

Spektrum

der Wissenschaft

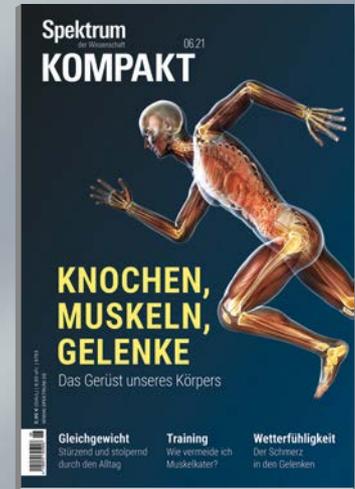
Wie groß ist unendlich?

Der ewige Streit
in der Mathematik

BRAUNE ZWERGE Zwischen Stern und Gasplanet
ARCHÄOLOGIE Die Erfindung des Zuhauses
PALUDIKULTUR Wie sich Moore nachhaltig nutzen lassen

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)



EDITORIAL

LÖCHER STOPFEN FÜR DEN KLIMASCHUTZ

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Nach dem Kohlendioxid gilt Methan als das zweitwichtigste Treibhausgas in unserer Atmosphäre. Es bleibt dort zwar nicht so lange wie Kohlendioxid erhalten, dafür erweist sich seine erwärmende Wirkung aber als deutlich größer. Die Quellen für Methan sind vielfältig: Es entweicht Sümpfen und Termitenbauten, aber auch verdauenden Rindern oder aus Öl- und Erdgasbohrungen. Und gerade Letztere haben in den vergangenen Jahren dafür gesorgt, dass die Methankonzentration in unserer Lufthülle verstärkt angestiegen ist.

Das Methan entweicht aus zehntausenden aktiven und stillgelegten Förderanlagen für fossile Energieträger. Unsere Kollegin Anna Kuchment von »Scientific American« beschreibt in ihrem Artikel »Die Methan-Jäger« ab S. 42, wie man mit modernster Technik nach den größten Emissionsquellen sucht, um sie hoffentlich dann endlich dicht zu versiegeln. Allein in einem der größten Gasfördergebiete der USA gibt es demnach zehntausende nicht mehr genutzte Bohrlöcher, die allenfalls notdürftig verschlossen sind.

Sie abzudichten wäre ein vergleichsweise einfach zu bewerkstellender Beitrag zum Klimaschutz. Und die Maßnahme würde mithelfen, die Methanemissionen in den nächsten Jahren um jene 30 Prozent zu reduzieren, die viele Staaten auf dem letzten Weltklimagipfel COP26 in Glasgow zugesagt haben. Es brächte uns einen Schritt näher an das Ziel, die Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius bis zum Ende des Jahrhunderts zu begrenzen.

Herzlichst ihr



NEU AM KIOSK!

Spektrum SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 4.21 berichtet über aktuelle Erkenntnisse zu den grundlegenden Bausteinen der Welt.

IN DIESER AUSGABE



KATELYN ALLERS

Die US-Astronomin untersucht Objekte im Weltall, die nicht genug Masse auf sich vereinen, um zu Sternen zu werden. Ab S. 52 stellt sie die seltsamen Himmelskörper vor.



IRIS PROFF UND SWANTJE FURTAK

Wie lassen sich wiedervernässte Moore durch Paludikultur nutzen? Das erklärt die Kognitionswissenschaftlerin und Wissenschaftsjournalistin Proff gemeinsam mit der Dokumentarfilmerin Furtak ab S. 32.

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM
- 22 FORSCHUNG AKTUELL
Die ersten Amerikaner
Menschen kamen noch viel früher nach Amerika.
Suprafestkörper erreichen die zweite Dimension
Quantenmaterie kann fest und flüssig zugleich sein.
Samen der Vergangenheit
Die Evolution der Samenanlage von Blütenpflanzen.
Ringöffnung gelungen
Chemiker knacken den widerspenstigen Benzolring.
- 31 SPRINGERS EINWÜRFE
Man wird älter
Warum leben manche Tiere länger?
- 60 SCHLICHTING!
Skurrile Eispodeste auf dem Baikalsee
Sublimation lässt Steine balancieren.
- 85 FREISTETTERS FORMELWELT
McNuggets-Zahlen
Münzen und frittierte Hühnchen hängen zusammen.
- 86 REZENSIONEN
- 94 ZEITREISE
- 95 LESERBRIEFE
- 96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE
- 97 IMPRESSUM
- 98 VORSCHAU

12 UNENDLICHKEITEN **WIE VIELE REELLE ZAHLEN GIBT ES?**

Seit mehr als 50 Jahren gehen Mathematikerinnen und Mathematiker davon aus, dass die Anzahl der Punkte auf dem Zahlenstrahl unbestimmbar ist. Doch ein neuer Beweis bringt die Fachwelt dazu, ihre Auffassung zu überdenken.

Von Natalie Wolchover

32 PALUDIKULTUR **NASSE LANDWIRTSCHAFT**

Trockengelegte Moore belasten durch Treibhausgasemissionen das Klima und sollten daher wiedervernässt werden. Wie lassen sich die Flächen dann landwirtschaftlich nutzen?

Von Iris Proff und Swantje Furtak

42 UMWELT **DIE METHAN-JÄGER**

Im größten Erdölfördergebiet der USA entweicht massenhaft Methan aus maroden Anlagen. Satelliten und Sensoren sollen die Lecks aufspüren.

Von Anna Kuchment

52 ASTRONOMIE **AUFTRITT DER BRAUNEN ZWERGE**

Die seltsamen Objekte haben zu wenig Masse für einen Stern, aber zu viel für einen Planeten – und sie sind überall zu finden.

Von Katelyn Allers

62 QUANTENFELDTHEORIE **DIE GRUNDKRÄFTE DER WELT**

Serie: Quantenfeldtheorien (Teil 3) Physikerinnen und Physiker haben ausgeklügelte Tricks entwickelt, um den schwer zu knackenden Gleichungen von Quantenfeldtheorien doch noch einige Geheimnisse zu entlocken.

Von Manon Bischoff

70 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **PHYSIKALISCHE BEWEISE**

Kann die Physik der Mathematik bei ihren ureigensten Aufgaben behilflich sein? Ja, wie eine Fülle von Beispielen zeigt.

Von Christoph Pöppe

76 ARCHÄOLOGIE **DER URSPRUNG DES WOHNENS**

Vor 9000 Jahren ließen sich Gemeinschaften erstmals häuslich nieder. Sie legten den Grundstein dafür, dass sich Menschen mit einem bestimmten Ort identifizieren.

Von Annalee Newitz



12

TITELTHEMA
WIE VIELE REELLE ZAHLEN GIBT ES?

VECTORINDIEY / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



NICK SIMONITE

42

UMWELT
DIE METHAN-JÄGER

MARK ROSS STUDIO / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2021



52

ASTRONOMIE
AUFTRITT
DER BRAUNEN
ZWERGE



KOTO, FEJA / GETTY IMAGES / ISTOCK

62

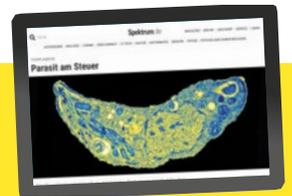
QUANTENFELDTHEORIE
DIE GRUNDKRÄFTE DER WELT



ALAMY / LAURA DI BIASE

76

ARCHÄOLOGIE
DER URSPRUNG
DES WOHNNENS



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

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



SO LEBTEN RÖMISCHE SKLAVEN

▶ Drei Menschen auf 16 Quadratmeter – unter diesen Bedingungen lebten Sklaven vor fast 2000 Jahren in Pompeji. Wissenschaftler des Archäologischen Parks der Vesuvstadt haben

eine Kammer innerhalb einer Villa freigelegt und darin die Überreste dreier schlichter Betten entdeckt. Wie die Ausgräber vermuten, handelte es sich um den Schlafraum von Unfreien, womöglich einer Familie, die neben Tongefäßen und wenigen Habseligkeiten dort nächtigte.

Beim Ausbruch des Vesuvs im Jahr 79 n. Chr. waren Menschen und Tiere in Pompeji verschüttet worden. Die Toten sind unter der dicken Bimsschicht meist längst zerfallen, ebenso wie zahlreiche Objekte aus

vergänglichem Material. Allerdings haben Opfer und Gegenstände viele Hohlräume in der Schicht hinterlassen. Schon die frühen Ausgräber Pompejis gossen diese mit Gips aus – ein Verfahren, mit dem die Archäologen auch hier rekonstruierten, wie die Betten in der Kammer früher aussahen.

Die Liegen bestanden demnach aus einfachen Holzgestellen, die mit Seilen bespannt waren. Darauf hatte man Decken gelegt. Zwei von ihnen sind ungefähr 1,7 Meter lang, die dritte 1,4 Meter – sie diente möglicherweise als Kinderbett. Der Raum enthielt zudem eine Holzkiste mit Zaumzeug, das

vielleicht mit einem nebenan gefundenen Prunkwagen in Verbindung steht. Eine Deichsel, die ebenfalls in der Kammer abgelegt war, identifizierten die Forscher als Teil dieses Wagens.

Pressemitteilung der offiziellen Pompeji-Website <http://pompeisites.org/>, 6. November 2021



ASTRONOMIE

FERNER PLANET ÜBERLEBTE DEN TODESKAMPF SEINES MUTTERSTERNS

► Vielleicht hat das Team um Joshua Blackman von der University of Tasmania weit draußen im All die Zukunft unseres Sonnensystems erspäht. Dort, rund 6500 Lichtjahre von uns entfernt, umkreist ein Exoplanet, der rund anderthalbmal so schwer ist wie der Jupiter, einen Weißen Zwerg. Die besten Zeiten hat dieses System hinter sich, denn Weiße Zwerge stellen das finale Entwicklungsstadium sonnenähnlicher Sterne dar. Die Arbeitsgruppe schließt aus ihrem Fund, dass zumindest größere Begleiter den Todeskampf ihres Zentralgestirns überleben können.

Hinweise auf die Existenz des jupiterähnlichen Planeten namens MOA-2010-BLG-477Lb hatten die tasmanischen Fachleute bereits im Jahr 2010 aufgespürt. Damals werteten sie ein Gravitationslinsenereignis aus – einen Vorgang, bei dem ein

Himmelskörper eine dahinter liegende, leuchtstarke Quelle passiert und ihr Licht mit seiner Schwerkraft bündelt. Die Helligkeit der Quelle verändert sich dabei auf eine bestimmte Weise, was die Existenz von MOA-2010-BLG-477Lb verriet.

Zunächst waren die Forscher davon ausgegangen, dass der ferne Exoplanet einen ganz normalen Stern umkreist, und suchten nach diesem mit Hilfe des Keck-II-Teleskops auf Hawaii. Doch sie fanden nichts. Auch Braune Zwerge, Schwarze Löcher oder Neutronensterne ließen sich als mögliche Zentralgestirne des jupiterähnlichen Objekts ausschließen. Somit blieb nur noch ein Weißer Zwerg als Kandidat. Diesen hat das Team zwar ebenfalls nicht entdeckt, doch den Berechnungen zufolge dürfte der Exoplanet einen Weißen Zwerg umkreisen, der es auf ungefähr die Hälfte der Masse unserer

Sonne bringt. Die Entfernung zwischen beiden beträgt wahrscheinlich rund das Dreifache der Erde-Sonne-Distanz.

Entwickelt sich ein Stern zum Weißen Zwerg, bringt er sein Planetensystem gehörig durcheinander. Erst bläht er sich zum Riesen auf und verschluckt dabei Begleiter, die ihm zu nah sind. Anschließend stößt er seine äußere Hülle ab, was bei jenen Planeten, die noch übrig sind, oft die Umlaufbahnen destabilisiert. Die Gruppe um Blackman wertet ihren Fund als Hinweis darauf, dass zumindest Sternbegleiter in jupiterähnlichen Umlaufbahnen auch diese Phase überstehen können. Vermutlich gebe es im All noch viel mehr Planeten, die ihre ausgebrannten Muttersterne mehr oder weniger intakt umkreisen.

Nature 10.1038/s41586-021-03869-6, 2021

W. M. KECK OBSERVATORY/ADAM MAGNER/NO

EINE KALTE, DUNKLE WELT Der Exoplanet MOA-2010-BLG-477Lb kreist in großem Abstand um einen Weißen Zwerg (Illustration).

MIKROBIOLOGIE PILZ LOCKT FLIEGEN- MÄNNCHEN IN TÖDLICHE FALLE

► Der Pilz *Entomophthora muscae* trägt seinen deutschen Namen »Fliegentöter« zu Recht: Stubenfliegen sterben schnell, wenn er sie infiziert. Man findet die Opfer oft auf dem Fensterbrett, umgeben von einem Hof aus weißen Pünktchen – den Pilzsporen, die aus dem toten Insekt herauskatapultiert worden sind. Gelangen solche Sporen auf den Körper einer weiteren Fliege, keimen sie binnen weniger Stunden, wachsen durch ihr Außenskelett und ernähren sich von ihrer Körperflüssigkeit, welche sie binnen weniger Tage verbrauchen. Auf dem sterbenden Tier bildet der Pilz massenweise Sporenträger, womit sich der Vermehrungszyklus schließt.

Diese Strategie ist freilich darauf angewiesen, dass verendete Fliegen von Artgenossen aufgesucht werden, die sich mit dem Erreger anstecken und ihn weitertragen. *E. muscae* stellt das auf erstaunliche Weise sicher, wie ein Team um Andreas Naundrup von der Universität Kopenhagen berichtet. Schon vor Jahrzehnten war Biologen

aufgefallen, dass gesunde Fliegen ihre am Pilz gestorbenen Artgenossen nicht meiden. Im Gegenteil: Männchen versuchen oft, die toten Weibchen zu begatten, und gehen danach unausweichlich selbst unter. Der Grund dafür war unbekannt. Fachleute spekulierten, die angeschwollenen Hinterleiber der Pilzopfer könnten auf die Männchen attraktiv wirken.

Das Team um Naundrup schlägt nun eine andere Erklärung vor. Die Forscherinnen und Forscher testeten zunächst die sexuelle Attraktivität toter Stubenfliegenweibchen – sowohl solcher, die am Pilz gestorben waren, als auch nicht angesteckter. Dabei kam heraus, dass sich die Männchen viel öfter den Pilzopfern nähern. Sie unterscheiden aber nicht zwischen zwei nahe beieinander liegenden Weibchen, von denen eines an *E. muscae* verendet und das andere erfroren ist. Weitere Untersuchungen ergaben: Nicht die sterblichen Überreste der Fliegendamen, sondern der Pilz selbst ködert die Männchen.

Wahrscheinlich sei dafür ein Lockstoff verantwortlich, eine Art Aphrodisiakum, so die Vermutung der Wissenschaftler. Mit Hilfe von Elektroden, die sie an den Duft wahrnehmenden Antennen der Männchen befestigten,

ermittelte das Team, welcher von den pilzinfizierten Weibchen abgegebene Geruchsstoff besonders anziehend wirkt. Es sind spezielle Kohlenwasserstoffe namens Alkane, wie sich zeigte. Das erscheint plausibel, denn Fachleute wussten schon vorher, dass einige Alkane die Paarungsbereitschaft von Stubenfliegenmännchen erhöhen. Vielleicht lassen sich die flüchtigen Substanzen künftig als Lockstoff in Fliegenfallen einsetzen.

bioRxiv 10.1101/2021.10.21.465334, 2021



PILZOPFER
Eine Dung-
fliege, infiziert
mit *E. muscae*.

ÖKOLOGIE MILLIONEN TONNEN MÜLL DURCH CORONA

► Die Covid-19-Pandemie hat weltweit zu deutlich erhöhten Mengen an Plastikmüll geführt. Bis August 2021 sind im Zuge der Krankheitsbekämpfung in 193 Ländern insgesamt rund 8,4 Millionen Tonnen Plastikabfall angefallen, wie Forscherinnen und Forscher in der Fachzeitschrift »PNAS« schreiben. Zum Vergleich: Laut dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen produziert die Menschheit insgesamt etwa 300 Millionen Tonnen Plastikmüll jährlich.

Dem Team um Yanxu Zhang von der Nanjing University (China) zufolge ist mit rund 87 Prozent der Großteil des Abfalls in Krankenhäusern entstanden, insbesondere in asiatischen

Ländern. Zirka 8 Prozent seien auf Masken und andere Schutzgüter für den privaten Gebrauch zurückzuführen. Verpackungen für den boomenden Onlinehandel hätten schätzungsweise 5 Prozent ausgemacht.

»Kunststoffabfälle schaden dem Leben im Meer und sind zu einem großen globalen Umweltproblem geworden«, betonen die Wissenschaftler. Die Corona-Pandemie habe zu einer erhöhten Nachfrage nach Einwegplastik geführt, und das verstärke den Druck auf »dieses außer Kontrolle geratene Problem«. Mehr als 25 000 Tonnen des Corona-Mülls seien bereits in die Weltmeere gelangt, was ein lang anhaltendes

Problem für die marine Umwelt darstelle. Innerhalb von drei bis vier Jahren werde ein großer Teil davon entweder an Strände gespült oder auf den Meeresgrund sinken. Das Team fordert einen besseren Umgang mit medizinischen Abfällen, vor allem in Entwicklungsländern.

Weltweit schwimmen schätzungsweise 270 000 Tonnen Plastik im Meer, die sich zusammensetzen aus rund 5,25 Billionen Einzelteilen verschiedener Größe. Mikro- und Makroplastik hat mittlerweile von der Tiefsee bis zum arktischen Eis alle Erdregionen erreicht.

PNAS 10.1073/pnas.2111530118, 2021

CHEMIE

»URSUPPE« ZÜNDET NUR IM GLASKOLBEN RICHTIG

► Mit ihrem berühmten Miller-Urey-Experiment demonstrieren die amerikanischen Chemiker Stanley Miller und Harold Urey im Jahr 1953, wie aus einfachsten Zutaten auf einer angenommenen »Urerde« die Bausteine des Lebens entstehen konnten. Sie ließen dazu in einem geschlossenen Kreislauf stark basisches Wasser (das »Urmeer«) in einer »Uratmosphäre« aus Ammoniak, Methan und Wasserstoff kontinuierlich verdampfen und kondensieren. Elektrische Entladungen im Kolben simulierten Blitze.

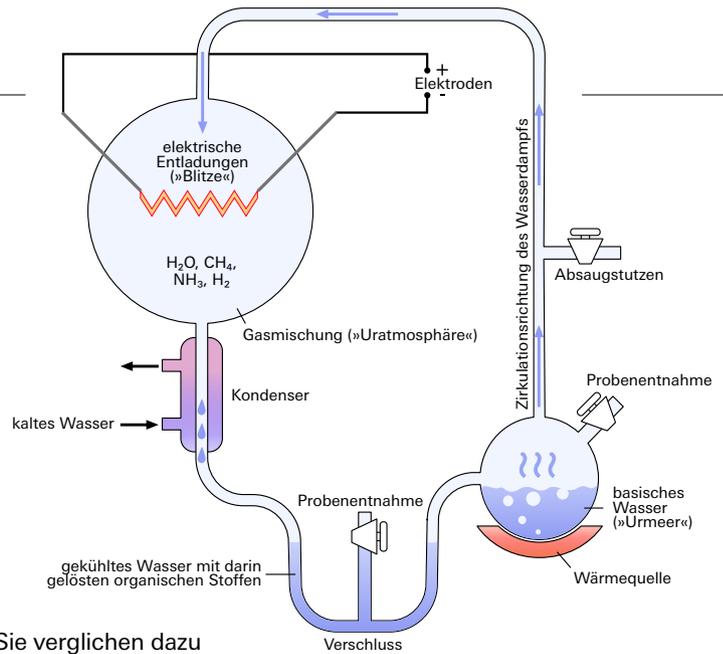
Mehr brauche es nicht, lautete das Ergebnis des Experiments, um organische Verbindungen wie Aminosäuren zu erzeugen. Der Versuch wurde unzählige Male in verschiedenen Abwandlungen durchgeführt – immer mit dem gleichen Ergebnis, auch wenn Wissenschaftler uneins darüber sind, ob er die Verhältnisse auf der frühen Erde präzise genug abbildet.

Ein Team um Ernesto di Mauro von der Universität Tuscia (Italien) weist nun auf einen bislang übersehenen Aspekt des Experiments hin. Die

KREISLAUF Ein Schema des Miller-Urey- Experiments.

Forscher prüfen, welche Rolle das Gefäßmaterial spielt, in dem der Versuch abläuft. Sie verglichen dazu die Ausbeute an organischen Molekülen einmal in den üblichen Behältern aus Borosilikatglas und einmal in Teflonbehältern. In den reaktionsträgen Teflongefäßen bildeten sich nur wenige und zudem einfache organische Verbindungen. Erst wenn die Forscher wieder Borosilikatglasscherben in die Lösung legten, stieg die Molekülausbeute. Das Behältermaterial scheint somit einen bedeutenden Einfluss zu haben.

Die Forscher sehen das jedoch eher als Stärke des Experiments. Das Glas ähnelt ihrer Ansicht nach dem Silikatgestein auf der frühen Erde. Der



hohe pH-Wert der Lösung (>11) habe die Glasoberfläche angegriffen, was Silikat- und Siliziumoxidpartikel freigesetzt habe, die als Katalysatoren wirkten. Auch könnten sich in den Partikeln Poren gebildet haben, in denen sich das Reaktionsgeschehen beschleunigte – ebenso wie es für die frühe chemische Evolution angenommen wird. Falls das stimmt, könnten Miller und Urey die Urerde zumindest in einem Punkt überraschend genau abgebildet haben, obgleich unbeabsichtigt.

Scientific Reports 10.1038/s41598-021-00235-4, 2021

BIOTECHNOLOGIE PROTEIN FILTERT SELTENE ERDEN AUS ELEKTRONIKSCHROTT

► Ein Protein, das Seltenerdmetalle an sich bindet, könnte das Recycling dieser wichtigen Industrierohstoffe vereinfachen. Das berichtet eine Arbeitsgruppe um Dan Park vom Lawrence Livermore National Laboratory (USA).

Das Protein Lanmodulin stammt aus Methan verdauenden Bakterien und heftet sich sehr effektiv an Lanthanide, zu denen Elemente wie Cer und Neodym gehören, welche in Elektronikbauteilen vorkommen. Diese Elemente können bisher nicht zurückgewonnen werden, weil sie fein verteilt und schwer abzutrennen sind.

Das Team um Park koppelte Lanmodulin an poröse Mikrokugeln. Diese fischten die gewünschten Elemente aus einer vorbeifließenden Lösung und trennten sie so von anderen Metallen. Der Ansatz könnte helfen, den Energie- und Materialaufwand beim Recyceln seltener Erden zu reduzieren. Lanmodulin ist chemisch recht stabil, verträgt Säureeinwirkung und lässt sich mehrfach wiederverwenden – ebenso wie einige der anderen eingesetzten Chemikalien.

Elemente der seltenen Erden gelten als wichtige Rohstoffe, die nur begrenzt verfügbar und derzeit nicht durch andere Substanzen zu ersetzen sind. Sie kommen gering konzentriert in angereicherten Erzen vor und lassen sich schwer voneinander trennen. Gäbe es einen Weg, sie mit wenig Aufwand stark anzureichern, könnte

man sie aus Altelektronik zurückzugewinnen. Oder aus Kohlenasche, die ebenfalls Spuren solcher Stoffe aufweist: Als Park und seine Kollegen ihre Lanmodulin-Kugeln an einer Kohlenasche-Lösung testeten, gelang es ihnen, die Seltenerdelemente darin um das 2000-Fache anzureichern.

Zudem lassen sich die Stoffe voneinander trennen, denn Lanmodulin koppelt an verschiedene Seltenerdelemente unterschiedlich stark, je nachdem, wie sauer die Lösung ist. Aus einer Mischung, die der Zusammensetzung von Elektronikschrott entsprach, gewannen die Fachleute je 80 Prozent des enthaltenen Neodyms und Dysprosiums zurück und schieden sie sauber voneinander ab.

ACS Central Science 10.1021/acscentsci.1c00724, 2021

PHYSIOLOGIE

ROTE BLUTKÖRPERCHEN HELFEN DER KÖRPERABWEHR

► Rote Blutkörperchen (Erythrozyten) galten lange Zeit als bloße Zellhüllen, die kaum mehr tun, als Sauerstoff durch den Körper zu transportieren. Neue Erkenntnisse zeigen, dass diese Sicht überholt ist. Demnach können Erythrozyten eindringende Krankheitserreger wahrnehmen und die Immunabwehr davor warnen.

Die verschiedenen Blutbestandteile des Organismus sind hoch spezialisiert: Leukozyten etwa wirken an der Abwehr von Krankheitserregern mit, Erythrozyten transportieren Atemgase wie Sauerstoff. Offenbar überlappen ihre Aufgaben aber auch, wie ein Team um Matthew Lam von der University of Pennsylvania gezeigt hat. Rote Blutkörperchen nehmen demzufolge die DNA eindringender Mikroben auf und präsentieren sie dem Immunsystem. Schon zuvor war bekannt gewese-

sen, dass sie mit Erregern verklumpen und diese festsetzen können, bis weitere Akteure der Körperabwehr anrücken.

Das Forscherteam hat in Zellkultur- und Mausexperimenten untersucht, wie Erythrozyten auf Malariaerreger oder das Bakterium *Legionella pneumophila* reagieren. Dabei erwies sich: Die roten Blutkörperchen binden DNA-Schnipsel der Mikroben an ein Eiweißmolekül auf ihrer Außenseite, das Rezeptorprotein TLR9 (toll-like receptor 9). Jener Rezeptor hat eine Vorliebe für DNA-Fetzen aus beschädigten Zellen, die viele CpG-Motive enthalten – also Abschnitte, in denen die Nukleinbasen Cytosin und Guanin zahlreich aufeinander folgen. Anhand solcher CpG-Motive kann das Immunsystem körperfremde von körpereigener DNA unterscheiden.

Die durch Fremd-DNA aktivierten TLR9-Rezeptoren auf den roten Blutkörperchen übermitteln Warnsignale an den Organismus, schreibt das Team. Sie kurbeln angeborene Immunreaktionen an, vermittelt von Killerzellen und Plasmaproteinen. Übertrugen die Wissenschaftler rote Blutkörperchen mit aktiven TLR9-Rezeptoren aus einer infizierten Maus in eine andere nicht infizierte, reagierte deren Immunsystem mit heftigen Entzündungsreaktionen.

Erythrozyten fungieren als Alarmanlage des Körpers, folgert das Team: Sie schlagen an, wenn das Blut bakterielle DNA in größeren Mengen enthält. Da sie im Organismus sehr zahlreich vorkommen, sollte ihre Bedeutung für das Immunsystem nicht unterschätzt werden, betonen die Autoren.

Science Translational Medicine 10.1126/scitranslmed.abj1008, 2021

ZOOLOGIE

WALE FRESSEN VIEL MEHR ALS GEDACHT

► Wale fressen rund dreimal so viel, wie Zoologen bislang annahmen. Zu diesem Ergebnis kommt ein Forscherteam um Matthew Savoca von der Stanford University. Ein ausgewachsener Blauwal verschlingt demnach rund 16 Tonnen Krill pro Tag, ein Nordatlantischer Glattwal täglich etwa 5 Tonnen Zooplankton und ein Grönlandwal etwa 6 Tonnen.

Der gewaltige Appetit der Meeressäuger bleibt für die Umwelt nicht folgenlos: Weil sie mit ihren Fäkalien das oberflächennahe Wasser düngen, schaffen sie überhaupt erst die Voraussetzungen, um ausreichend Nahrung finden. Insbesondere Eisenmangel begrenzt die Produktivität mariner Ökosysteme. Die Wale scheiden große Mengen des Elements, das sie zuvor aufgenommen haben, an der Wasseroberfläche aus und verhindern so, dass es in die Tiefsee absinkt. Auf diese Weise recyceln sie es.

Bislang hatten Wissenschaftler den Nahrungsbedarf der Bartenwale indirekt abgeschätzt, etwa durch Analysen des Mageninhalts. Savoca und sein Team dagegen versahen zwischen den Jahren 2010 und 2019 insgesamt 321 Wale mit Sendegeräten. Die Apparate lieferten Daten zur Umgebung und zum Schwimm- und Fressverhalten der Tiere. Immer wieder rückte das Team in Booten aus, um Stellen aufzusuchen, an denen die besenderten Tiere gerade gefressen hatten. Dort bestimmte es die Dichte des Krills und der Kleinstlebewesen im Wasser. Aus der Kombination aller Daten errechneten die Forscher schließlich, wie viel Nahrung die Wale tatsächlich aufnehmen.

Die Ergebnisse machen bisherige Annahmen obsolet. So kalkulierten Fachleute im Jahr 2008, dass Wale entlang der nordamerikanischen Pazifikküste rund zwei Millionen Tonnen tierische Biomasse jährlich konsumieren. Laut den neuen Daten benötigen von den Blau-, Finn- und Buckelwalpopulationen jede schon für sich zwei Millionen Tonnen pro Jahr.

Die Studie lässt auch Rückschlüsse auf die Zeit vor dem industriellen Walfang zu. Anhand historisch überlieferter Bestandsdaten für das Südpolarmeere lässt sich schätzen, dass Mink-, Buckel-, Blau- und Finnwale dort einst rund 430 Millionen Tonnen Krill pro Jahr fraßen. Das wäre das Doppelte der Gesamtkrillmenge, die jene Gewässer heute enthalten. Die Wissenschaftler erklären das damit, dass die seinerzeit viel größeren Walpopulationen etwa zehnmal so viel Eisen ins Wasser abgaben wie heute: rund 12.000 Tonnen. Nachdem sie großteils erlegt worden waren, fehlte ihrer Beute, dem Krill, die Lebensgrundlage.

Das marine Ökosystem ist eine wichtige Senke: Je produktiver es ist, desto mehr Kohlenstoff entzieht es der Atmosphäre. Würden sich die Walpopulationen auf ihre einstigen Bestandsgrößen erholen, könnten sie die marine Produktivität um elf Prozent steigern, was jährlich 215 Millionen Tonnen Kohlenstoff zusätzlich binden würde, rechnen die Wissenschaftler vor.

Nature 10.1038/s41586-021-03991-5, 2021

UNENDLICHKEITEN WIE VIELE REELLE ZAHLEN GIBT ES?

Seit mehr als 50 Jahren gehen Mathematikerinnen und Mathematiker davon aus, dass die Anzahl der Punkte auf dem Zahlenstrahl unbestimmbar ist. Doch ein neuer Beweis bringt die Fachwelt dazu, ihre Auffassung zu überdenken.



Natalie Wolchover ist Wissenschaftsjournalistin und Redakteurin bei »Quanta Magazine«.

» spektrum.de/artikel/1950058

AUF EINEN BLICK EIN TURM AUS UNENDLICHKEITEN

- 1** Es existieren unendlich viele Zahlen. Betrachtet man verschiedene Arten von unendlich vielen Zahlen, gibt es aber Unterschiede: Zum Beispiel übersteigt die Anzahl der reellen die der natürlichen Zahlen.
- 2** Bereits vor 150 Jahren fragten sich Fachleute, wie groß die Differenz ist. Wie sich allerdings herausstellte, lässt sich das mit den normalen Mitteln der Mathematik nicht beantworten.
- 3** Indem man zusätzliche Annahmen trifft, kann das Geheimnis gelüftet werden. Doch welche davon ist am sinnvollsten? Darüber ist inzwischen ein Streit ausgebrochen.

**HIERARCHIE DES
UNVORSTELLBAREN**
Unendlich ist nicht immer
gleich unendlich.

Während eines Urlaubs im Oktober 2018 blickte David Asperó gedankenversunken aus dem Autofenster auf die italienische Landschaft, als ihm plötzlich die zündende Idee zu dem fehlenden Puzzleteil eines Rätsels kam, das ihn schon lange beschäftigte: Er hatte gerade den letzten Schritt eines bahnbrechenden neuen Beweises gefunden, der Aufschluss über die Größen von Unendlichkeiten gibt.

Der Mathematiker an der University of East Anglia in Großbritannien kontaktierte daraufhin sofort seinen Kollegen Ralf Schindler von der Universität Münster, mit dem er das Thema seit einigen Jahren verfolgte, und beschrieb seine Erkenntnis. »Für mich klang alles völlig unverständlich«, erinnert sich Schindler. Aber schließlich gelang es beiden Forschern, Asperós Gedanken zu entwirren und in nachvollziehbare logische Schlüsse zu verwandeln.

Ihr Beweis, den sie im Mai 2021 im renommierten Fachjournal »Annals of Mathematics« veröffentlichten, vereint zwei rivalisierende Grundausagen, so genannte Axiome, die jeweils das Fundament der Mathematik erweitern sollten. Bisher hatten Fachleute angenommen, man müsse sich zwischen beiden Annahmen entscheiden, weil sie sich gegenseitig ausschließen würden. Doch wie Asperó und Schindler zeigen konnten, folgt aus einer der Aussagen die andere. Das deutet darauf hin, dass beide wahr sind – und damit auch alles, was sie für die Welt der Unendlichkeiten besagen.

Das Ergebnis schlägt hohe Wellen, denn es verstärkt die Argumente gegen die berühmte Kontinuums-hypothese, eine weit reichende Vermutung über die Größe bestimmter Mengen, die der deutsche Mathematiker Georg Cantor 1878 aufstellte. Kurz zuvor hatte er herausgefunden, dass es nicht nur eine Art von Unendlichkeit, sondern unendlich viele davon gibt. Diese unvorstellbaren Werte lassen sich wie die natürlichen Zahlen der Größe nach ordnen. Cantor äußerte daraufhin die Vermutung, dass es keine Unendlichkeit zwischen der Anzahl der natürlichen und der reellen Zahlen gibt. Aber die beiden Axiome, die der neue Beweis miteinander verbindet, widerlegen diese Kontinuums-hypothese: Demnach existieren Mengen, die größer sind als die natürlichen und gleichzeitig kleiner als die reellen Zahlen.

Cantors Verdacht spaltet Mathematikerinnen und Mathematiker seit

nun fast 150 Jahren in zwei Lager: auf der einen Seite jene, die daran glauben, und auf der anderen solche, die davon ausgehen, er lag falsch. Das Ergebnis von Asperó und Schindler legt nahe, dass Letztere mit ihrer Intuition richtiglagen. Die Anhänger der Vermutung geben sich aber nicht geschlagen. Sie kämpfen weiterhin um eine Vision von der Mathematik, in der die Kontinuums-hypothese gilt – und wie es aussieht, wird sich der Ausgang des Streits so schnell nicht klären lassen. »Es ist eine erstaunliche Zeit«, urteilt Juliette Kennedy, Logikerin und Philosophin an der Universität von Helsinki. »Das Ergebnis zählt zu den aufregendsten und dramatischsten Dingen, die in der Geschichte der Mathematik je passiert sind.«

Um zu verstehen, warum die Fronten so verhärtet sind, muss man in die Vergangenheit zurückblicken. Wie schon

Nicht alle Unendlichkeiten sind gleich

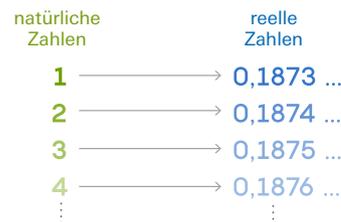
Die kleinste Unendlichkeit

Zwei unendliche Mengen gelten als gleich groß, wenn sich jedes Element der einen mit einem Element der anderen paaren lässt. Zum Beispiel kann man jeder geraden Zahl eine natürliche Zahl zuweisen. Aus dieser Eigenschaft folgt, dass beide Mengen die gleiche Größe haben.



Ungleiche Unendlichkeiten

Sind die reellen Zahlen, die alle Punkte eines Zahlenstrahls enthalten, genauso groß wie die natürlichen? Wenn sie es wären, könnte man sie eins zu eins aufeinander abbilden.



Allerdings wird eine solche Zuordnung stets unvollständig sein. Um zu verstehen, warum, kann man den Wert der ersten Nachkommastelle der ersten Zahl, den der zweiten Nachkommastelle der zweiten Zahl und so weiter ändern:



Nun fügt man alle veränderten Ziffern zusammen: 0,2987...

Die so entstandene reelle Zahl ist in der ursprünglichen Liste nicht enthalten. Deswegen ist es unmöglich, die reellen Zahlen aufzuzählen – es gibt also mehr reelle Zahlen als natürliche.

erwähnt, gibt es Unendlichkeiten in vielen Varianten. 1873 erschütterte Cantor die Grundfesten der Mathematik, als er herausfand, dass der Umfang der reellen Zahlen, die den Zahlenstrahl aufbauen, den der natürlichen (1, 2, 3, 4 und so weiter) übersteigt. Und das, obwohl es von beiden bekanntlich unendlich viele gibt.

Unendliche Zahlenmengen bringen unser Gespür für Größen durcheinander. Wenn man etwa die natürlichen Zahlen $\{1, 2, 3, \dots\}$ mit den ungeraden $\{1, 3, 5, \dots\}$ vergleicht, könnte man annehmen, die erste Menge sei größer. Schließlich taucht nur die Hälfte ihrer Elemente in der zweiten auf. Doch man kann mit Unendlichkeiten nicht so umgehen wie mit gewöhnlichen Zahlen.

Stellen Sie sich zum Beispiel vor, Sie möchten herausfinden, ob es in einer Stadt mehr Fahrräder als Einwohner gibt. Eine Möglichkeit besteht darin, zuerst alle Bürger und anschließend die Räder zu zählen und beide Zahlen ins Verhältnis zu setzen. Man könnte aber auch jeder Person einen Drahtesel zuordnen. Wenn am Ende keine Räder übrig sind, dann gibt es mindestens genauso viele Menschen wie Fahrräder.

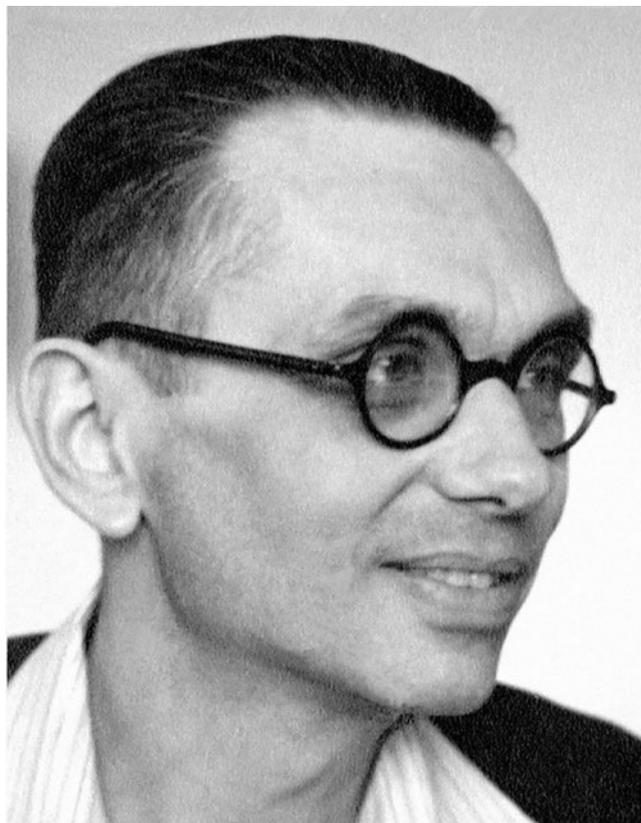
Von Fahrrädern zu unendlichen Mengen

Cantor übertrug diese Überlegung auf die Mathematik von Mengen. Man kann beispielsweise eine Abbildung finden, die jeder natürlichen Zahl genau eine ungerade zuordnet und umgekehrt: Man verbindet 1 mit 1, 2 mit 3, 3 mit 5 und so weiter. Die entsprechende Funktion hat folgende Gestalt: $f(n) = 2n - 1$. Von diesem Standpunkt aus betrachtet enthalten die zwei Mengen gleich viele Elemente.

Da sich das Konzept hinter der Größe unendlicher Mengen von jenem endlicher Sammlungen unterscheidet, führte Cantor einen neuen Begriff ein: Die Anzahl der Elemente von Mengen wird seither als Kardinalität bezeichnet. Diese kann unendliche Werte annehmen. In diesem Fall folgt das Rechnen damit anderen Regeln als mit gewöhnlichen endlichen Zahlen. Die Kardinalität der natürlichen und der ungeraden Zahlen codierte Cantor mit dem ersten Buchstaben, Aleph, des hebräischen Alphabets: \aleph_0 . Tatsächlich entspricht \aleph_0 auch der Größe der geraden, der Primzahlen, der Quadratzahlen und sogar der rationalen Zahlen. Häufig spricht man von einer abzählbaren Unendlichkeit, da sich die Elemente der entsprechenden Mengen wie die natürlichen Zahlen auflisten lassen. Wie Cantor jedoch herausfand, gibt es durchaus Sammlungen, die eine größere Kardinalität haben als \aleph_0 , so genannte überabzählbare Unendlichkeiten.

Das berühmteste Beispiel dafür sind die reellen Zahlen. Es ist unmöglich, sie eins zu eins mit den natürlichen Zahlen zu verknüpfen. Versucht man etwa, 1 mit 1,00000..., 2 mit 1,00001... und so weiter zu verbinden, überspringt man dabei stets unendlich viele Exemplare (wie 1,000000001...), die dazwischenliegen. Im Gegensatz zu den rationalen Zahlen lassen sich die reellen nicht auflisten, deshalb übersteigt ihre Anzahl \aleph_0 .

Die Kardinalität des Zahlenstrahls markiert aber keinesfalls das obere Ende der Unendlichkeiten. Noch größere Mengen zu konstruieren, gestaltet sich ziemlich einfach: Cantor entdeckte, dass eine mathematische Operation aus



LANDESBIBLIOTHEK/APA/DRP/PICTUREALLIANCE

KURT GÖDEL Der Mathematiker wurde durch seine Unvollständigkeitssätze berühmt, aus denen folgt, dass es mathematische Aussagen gibt, die sich weder beweisen noch widerlegen lassen.

der Mengenlehre die Anzahl der Elemente einer Menge erhöht. Dabei handelt es sich um die so genannte Potenzmenge, also die Sammlung aller Untermengen einer Menge. Das Ergebnis hat stets eine größere Kardinalität als die ursprüngliche Menge – um genau zu sein, wird aus der Kardinalität \aleph der Wert 2^\aleph . Da man die Potenzmenge immer wieder hintereinander ausführen kann, lassen sich die Kardinalzahlen zu einem unendlich hohen Turm von Unendlichkeiten aufstapeln.

Überraschenderweise sind es nicht die oberen Stockwerke des abstrakten Bauwerks, die Mathematikerinnen und Mathematikern Kopferbrechen bereiten, sondern seine Grundfesten. Als sich Cantor auf die unteren Etagen konzentrierte, konnte er beweisen, welche Kardinalzahl auf \aleph_0 folgt: die Größe der Menge, die sich aus verschiedenen Ordnungsarten der natürlichen Zahlen zusammensetzt (etwa von der kleinsten zur größten oder mit allen ungeraden Zahlen an erster Stelle). Diese bezeichnete er daraufhin als \aleph_1 , eine überabzählbare Unendlichkeit. Andererseits entspricht die Kardinalität der Potenzmenge der natürlichen Zahlen der Größe der reellen Zahlen, die 2^{\aleph_0} beträgt.

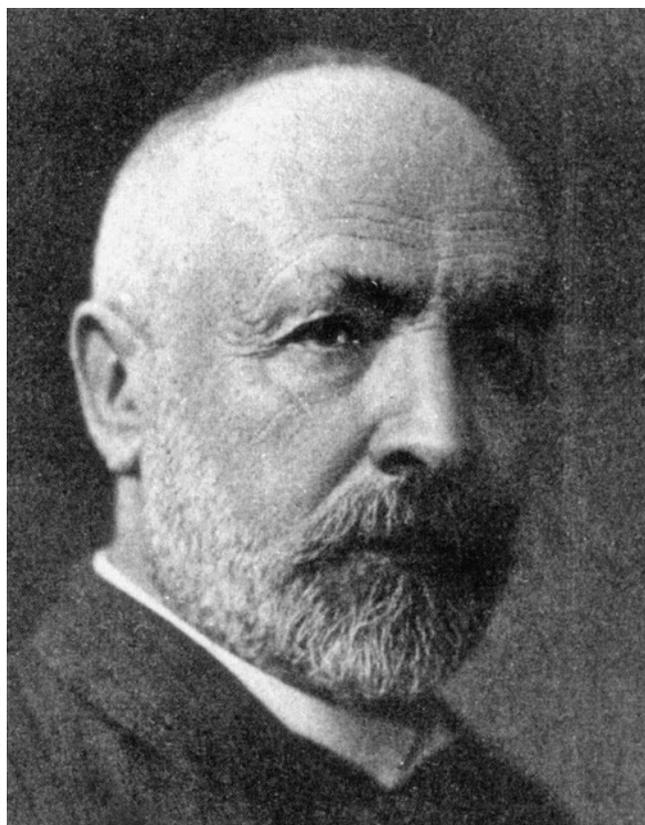
Doch nun stand Cantor vor einem Rätsel. Wo genau reiht sich 2^{\aleph_0} im Turm der Unendlichkeiten ein? Anders gefragt: Um wie viel übersteigen die reellen Zahlen die natürlichen? Da der Mathematiker keine Menge finden konnte, die

nachweislich größer als die natürlichen und kleiner als die reellen Zahlen war, formulierte er seine berühmte Vermutung: Demnach beträgt die Kardinalzahl des Kontinuums, also der reellen Zahlen, genau \aleph_1 . Obwohl auch viele seiner Kolleginnen und Kollegen die Behauptung für plausibel hielten, gelang es zu Cantors Bedauern niemandem, sie zu beweisen.

Welche Bedeutung man der Frage beimaß, verdeutlicht die Rede des berühmten Wissenschaftlers David Hilbert im Jahr 1900 auf dem internationalen Mathematikerkongress in Paris. Dort stellte er eine Liste mit 23 mathematischen Problemen vor, die im bevorstehenden Jahrhundert angegangen werden sollten – die Kontinuumshypothese setzte er dabei an erste Stelle. Hilbert war geradezu begeistert von dem entstehenden formalen Konzept der Unendlichkeiten, das er als »Cantors Paradies« bezeichnete. Für ihn stellte das Rätsel um die Größe der reellen Zahlen ein entscheidendes Puzzleteil auf dem Weg zu einer vollständigen Theorie dar.

Doch das 20. Jahrhundert sollte nicht das mit sich bringen, was die Fachwelt gehofft hatte. Stattdessen verwandelten schockierende Enthüllungen die Kontinuumshypothese in eine erkenntnistheoretische Fragestellung. Die Schwierigkeiten begannen 31 Jahre nach Hilberts prägender Rede, als der in Österreich geborene Logiker Kurt Gödel seine Unvollständigkeitssätze veröffentlichte. Demnach ist

GEORG CANTOR Er gilt als der Begründer der modernen Mengenlehre – jenes Bereichs, auf dem inzwischen die gesamte Mathematik fußt.



AGE-IMAGES / PICTURE-ALLIANCE

jede Sammlung von grundlegenden Aussagen, die man als Fundament der Mathematik nutzen kann, zwangsläufig unvollständig. Das heißt, es wird immer Fragen geben, die man mit einer Liste von Axiomen nicht beantworten kann – das sind wahre mathematische Fakten, die sich nicht beweisen lassen. Wie sich nach einigen Jahrzehnten herausstellte, ist die Kontinuumshypothese ein Beispiel dafür. Die Grundpfeiler der modernen Mathematik reichen nicht aus, um sie zu belegen.

Zehn Aussagen als Grundpfeiler

Zu diesem Fundament gehören zehn Axiome, die man als ZFC bezeichnet, nach Ernst Zermelo (Z), Abraham Fraenkel (F) und dem Auswahlaxiom (englisch: choice). Aus diesen unbewiesenen, aber plausiblen Grundaussagen lässt sich fast die gesamte moderne Mathematik konstruieren. Sie beschreiben elementare Eigenschaften, die niemand anzweifelt. Die Mengenlehre eignet sich gut als Startpunkt, um daraus die restlichen Bereiche des Fachs zu entwickeln, da sich aus Mengen so gut wie jede andere Struktur erzeugen lässt. Zum Beispiel die natürlichen Zahlen: indem man die leere Menge $\{\}$ etwa als 0 bezeichnet; $\{\{\}\}$ als 1; $\{\{\}, \{\{\}\}\}$ als 2 und so weiter. Damit reichen die Grundregeln für Mengen aus, um in der gesamten Mathematik Beweise zu konstruieren. Jeder Satz aus der Topologie, Analysis oder Geometrie ließe sich also in Aussagen über Mengen zurückübersetzen – selbst wenn das in dieser Form natürlich so gut wie nie gemacht wird, weil es viel zu aufwändig ist.

Der erste Rückschlag für Cantors Paradies ergab sich, als Gödel 1940 zeigte, dass man die ZFC-Axiome nicht verwenden kann, um die Kontinuumshypothese zu widerlegen. Dennoch hofften Fachleute, die Vermutung ließe sich mit den gängigen Werkzeugen beweisen. Doch 23 Jahre später mussten sie auch diese Hoffnung aufgeben. Denn der US-amerikanische Logiker Paul Cohen bewies damals die Umkehr von Gödels Erkenntnis: Mit dem gewöhnlichen mathematischen Grundgerüst lässt sich die Kontinuumshypothese ebenso wenig belegen. Aus den zwei Arbeiten folgt, dass Cantors Vermutung unabhängig von den ZFC-Axiomen ist.

Das heißt, man kann sie ohne Beweis als wahr oder falsch annehmen und damit das Fundament erweitern, ohne jemals Widersprüche zu erzeugen. Man hat also die Wahl zwischen zwei mathematischen Universen: eines, in dem Cantor Recht hat, und eines, in dem er falschliegt. Welches davon das richtige ist, lässt sich von diesem Punkt aus nicht beurteilen.

Die Kontinuumshypothese ist aber kein Ausnahmefall. Wie sich herausgestellt hat, sind auch viele andere Aussagen über unendliche Mengen unabhängig vom Axiomensystem ZFC. Doch was bedeutet das? Einige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler interpretieren es so, dass sich die entsprechenden Fragen nicht beantworten lassen. Aber die meisten Mathematiker sind anderer Meinung.

Ihrer Auffassung nach darf man sich nicht mit dieser frustrierenden Situation zufriedengeben. Schließlich müsse der Zahlenstrahl auch mengentheoretisch eine festgelegte Größe haben. Wenn das jetzige Fundament nicht ausreicht, um diese zu bestimmen, dann sollte man es modifizieren.

Forcing

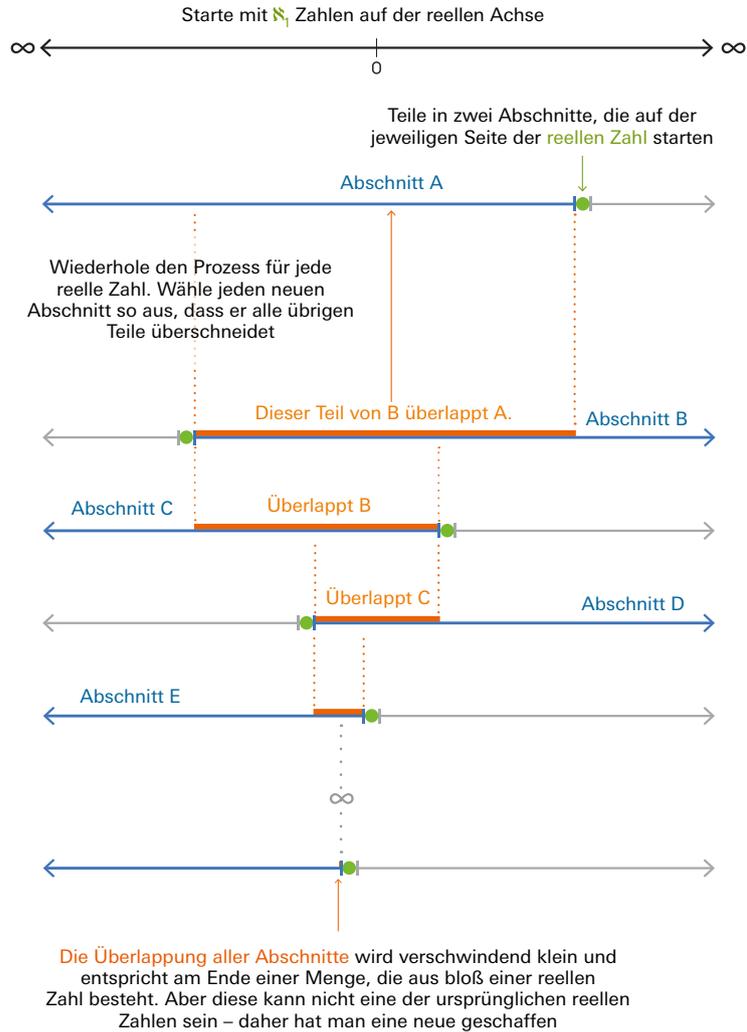
Mathematiker und Mathematikerinnen nutzen das Forcing-Verfahren, um die Menge der reellen Zahlen zu erweitern und damit zu zeigen, dass die Vermutung von Cantor falsch ist. Dabei startet man mit der Annahme, es gäbe \aleph_1 reelle Zahlen, die auf dem Zahlenstrahl verteilt sind (Kontinuumshypothese). Die Gerade lässt sich auf unendlich viele Arten aufteilen. Beispielsweise kann man eine reelle Zahl herauspicken und zwei Intervalle definieren, die jeweils vor der Zahl enden und hinter ihr beginnen – die Zahl ist daher von den beiden Abschnitten ausgenommen. Die Idee besteht darin, solche Unterteilungen unzählige Male vorzunehmen.

Cohen hat eine Methode entwickelt, um sich bestimmte Abschnitte in der Prozedur genauer anzusehen. Man startet also mit einer reellen Zahl und teilt den Zahlenstrahl in zwei Bereiche vor und hinter der Zahl auf. Man wählt einen Abschnitt aus, etwa den vorderen. Dann teilt man den Zahlenstrahl an einer anderen reellen Zahl in zwei und wählt auch hier einen Abschnitt aus, wobei sich dieser mit dem zuvor gewählten überschneiden muss. Im nächsten Schritt wählt man wieder eine Zahl und dementsprechend einen Abschnitt, der den ursprünglichen überlappt. Das wiederholt man, bis man den Zahlenstrahl an jeder reellen Zahl gespalten hat.

Der ausgewählte Überlappungsbereich wird im Lauf des Verfahrens immer kleiner, bis er am Ende nur noch einer Menge entspricht,

die eine einzige reelle Zahl enthält. Weil man den Zahlenstrahl allerdings an jeder existierenden reellen Zahl geteilt hat und dabei stets die Zahl selbst von dem betrachteten Abschnitt ausgenommen hat, kann die entstandene Überlappungsmenge keine der anfänglichen reellen Zahlen enthalten. Das heißt, man hat auf diese Weise eine neue reelle Zahl geschaffen.

Indem Mathematikerinnen und Mathematiker die Methode von Cohen verallgemeinert haben, können sie das Kontinuum beliebig erweitern, von \aleph_3 über \aleph_{100} – nach oben sind ohne Einschränkungen keinerlei Grenzen gesetzt. Wenn man allerdings Axiome wie Martins Maximum annimmt, kann die Kardinalität der reellen Zahlen maximal \aleph_2 betragen.



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

»Die bisherigen Axiome lösen die Probleme nicht«, erklärt der emeritierte Logiker Menachem Magidor von der hebräischen Universität Jerusalem, »also müssen wir sie zu einem reichhaltigeren System erweitern.«

Seit Cohens ernüchterndem Ergebnis haben Fachleute versucht, die Grundlagen der Mathematik zu festigen, indem sie dem ZFC-Axiomensystem neue Aussagen hinzufügten. Diese sollten die Struktur der unendlichen Mengen

beleuchten, einleuchtende Theoreme hervorbringen, fatale Widersprüche vermeiden und natürlich Cantors Vermutung klären.

Im Prinzip wäre es möglich, die Kontinuumshypothese selbst als Axiom festzulegen. Allerdings sollten die Grundannahmen, welche die Mathematik aufbauen, zweifelsfreie Tatsachen widerspiegeln. Wie groß die Menge der reellen Zahlen genau ist, fällt nicht unter diese Kategorie. Daher

Determiniertheit und das Auswahlaxiom

Die moderne Mathematik fußt für gewöhnlich auf neun Axiomen, die als ZF abgekürzt werden, und dem Auswahlaxiom. Letzteres besagt, dass man für jede Sammlung aus nichtleeren Mengen ein Element aus jeder dieser Mengen auswählen kann.

Formal ausgedrückt heißt das, es gibt eine Funktion, der man die Mengen übergibt und die jeweils ein darin enthaltenes Element ausspuckt. Darüber, wie man eine solche Funktion konstruiert, sagt das Axiom allerdings nichts aus.

Die Mehrheit der Forscherinnen und Forscher akzeptiert das Auswahlaxiom, doch es gibt eine Minderheit, die es anzweifelt. Grund dafür sind unintuitive Ergebnisse wie das Banach-Tarski-Paradoxon, wonach sich eine Kugel des

Volumens V in zwei Kugeln, die ebenfalls jeweils ein Volumen V haben, zerlegen lässt.

Daher verfolgen einige Skeptiker den Versuch, die bisherigen Erkenntnisse der modernen Mathematik in einem Axiomensystem ohne das Auswahlaxiom herzuleiten – doch damit stößt man schnell auf Probleme.

Um eine mathematische Welt zu beschreiben, kann man aber auch ganz andere Grundannahmen berücksichtigen. Eine Möglichkeit stellt das Axiom der so genannten Determiniertheit dar, das Verbindungen zur Spieltheorie aufbaut. Dazu definiert man ein Spiel mit einer Menge M an reellen Zahlen: Die Teilnehmer A und B müssen jeweils abwechselnd eine natürliche Zahl aufsagen. Sobald sie

unendlich viele Zahlen gewählt haben, endet das Spiel. A gewinnt, wenn die erzeugte Zahlenfolge als reelle Zahl gelesen in M enthalten ist, sonst ist B der Sieger. Das Axiom der Determiniertheit besagt, dass es stets für einen der beiden Spieler eine Gewinnstrategie gibt. Das heißt, bei jedem Zug existiert eine Funktion, welche die »richtige« Zahl für A oder B vorgibt.

Wenn man von der Gültigkeit des Auswahlaxioms ausgeht, dann ist das Spiel für allgemeine M nicht determiniert. Man kann in diesem Fall Beispiele konstruieren, in denen es keine Gewinnstrategie gibt. Deswegen widersprechen sich das Auswahl- und das Determiniertheitsaxiom, wenn man sie mit den üblichen ZF-Grundaussagen paart.

bestand die Aufgabe darin, passende Kandidaten zu finden, die sich gut in das bestehende System einfügen.

Gödel war der Meinung, die Kontinuumshypothese sei falsch – es gäbe mehr reelle Zahlen, als Cantor vermutete. Der in Österreich geborene Logiker ging davon aus, dass die Kardinalität des Kontinuums \aleph_2 beträgt; das heißt, es gäbe eine weitere Unendlichkeit zwischen den natürlichen und den reellen Zahlen. 1947 sah er bereits den Trend der zukünftigen Bemühungen voraus: »Die Rolle des Kontinuumproblems in der Mengenlehre wird darin bestehen, dass schließlich neue Axiome entdeckt werden, die es ermöglichen, Cantors Vermutung zu widerlegen.«

Neue Axiome gesucht

Damit sollte er Recht behalten: Fachleute haben zwei plausible Aussagen gefunden, die der Kontinuumshypothese widersprechen. Jahrzehntlang ging man davon aus, sie seien unvereinbar, und Verfechter beider Seiten stritten sich darum, welche Aussage am ehesten erfüllt sein sollte. Um zu verstehen, was die Axiome besagen, muss man sich Cohens bahnbrechender Arbeit aus dem Jahr 1963 zuwenden. Darin entwickelte er eine Technik namens »Forcing«, welche die Mengenlehre entscheidend geprägt hat und für die er 1966 mit der Fields-Medaille geehrt wurde, einer der höchsten Auszeichnungen in der Mathematik.

In seinem Artikel konstruierte Cohen ein Modell eines Universums, in dem die Kontinuumshypothese wahr ist, die reellen Zahlen also eine Kardinalität von \aleph_1 haben. Mit dem von ihm konzipierten Forcing erweiterte er jedoch den

Zahlenstrahl und schuf neue Werte, die im ursprünglichen Modell nicht enthalten waren (siehe »Forcing«). Damit hat das Kontinuum in diesem Universum mindestens eine Größe von \aleph_2 .

Bald fanden Cohen und seine Zeitgenossen heraus, dass man – abhängig von den Besonderheiten des Verfahrens – den reellen Zahlen auf diese Art und Weise beliebig viele Glieder hinzufügen kann. Man landet dann bei Kardinalzahlen von etwa \aleph_{12} oder \aleph_{35} , nach oben hin sind keine Grenzen gesetzt.

Das Forcing erwies sich in den folgenden Jahren als extrem nützliche Methode. Abgesehen von neuen reellen Zahlen haben Mathematiker und Mathematikerinnen den Ansatz verallgemeinert, um verschiedenste Universen zu erzeugen, in denen seltsame Objekte existieren, die teilweise unvereinbar sind. So entstand ein Multiversum von Wirklichkeiten. »Die Technik schafft eine Mehrdeutigkeit in unserem Mengenuniversum«, so der Logiker Hugh Woodin von der Harvard University. »Man schafft all diese virtuellen Möglichkeiten. Damit stellt sich die Frage, wie man beurteilen kann, in welcher mathematischen Realität man sich befindet.«

Mit solchen Überlegungen stand die Fachwelt vor einem großen Rätsel. Welches von zwei widersprüchlichen Objekten, die durch unterschiedliche Methoden des Forcing kreiert wurden, sollte man zulassen – und welches verwerfen? Es war nicht klar, wann (oder ob) eine Struktur, die durch Cohens Technik entsteht, wirklich existiert.

Um das Problem zu lösen, stellten die Mathematikerinnen und Mathematiker mehrere Forcing-Axiome auf. Das

sind Regeln, um festzulegen, unter welchen Voraussetzungen bestimmte Objekte existieren, die Cohens Verfahren ermöglicht. »Wenn man sich vorstellen kann, dass es etwas gibt, dann ist es auch so. Dieses intuitive Prinzip führt zu den Forcing-Axiomen«, erklärt Magidor. 1988 formalisierte er die Überlegung zusammen mit seinen Kollegen Matthew Foreman und Saharon Shelah zu einer Grundregel der Logik: »Martins Maximum«, benannt nach dem Mengentheoretiker Donald A. Martin, der viel Vorarbeit zu diesem Thema geleistet hat. Jedes Objekt, das sich durch Forcing erzeugen lässt, wird demnach zu einem realen Bestandteil der Mathematik, wenn das Verfahren eine bestimmte Bedingung erfüllt.

Durch diese Anforderung lassen sich die reellen Zahlen nicht mehr beliebig aufblasen wie bisher. Tatsächlich beträgt die Kardinalität des Kontinuums \aleph_2 , falls man Martins Maximum berücksichtigt – was gerade einmal eine Stufe über dem kleinstmöglichen Wert \aleph_1 liegt. Damit widerspricht es zwar ebenfalls Cantors Vermutung, legt aber die Größe des Zahlenstrahls eindeutig fest.

Welche Aussage macht mehr Sinn?

Martins Maximum beleuchtet nicht nur Fragen um die Kontinuumshypothese. Auch in anderen Bereichen der Logik hat sich das Prinzip als nützlich erwiesen, beispielsweise um die Eigenschaften unendlicher Mengen zu erforschen. Befürworter des Axioms sagen, es ermögliche weit reichende Aussagen und führe zu entscheidenden Theoremen. Im Gegensatz dazu erzeuge die Annahme von Cantor, das Kontinuum habe bloß eine Kardinalität von \aleph_1 , einige Ausnahmefälle und erschwere allgemein gültige Beweise.

Daher wurde Martins Maximum als Erweiterung der gewöhnlichen ZFC-Axiome unter Fachleuten sehr beliebt. Doch in den 1990er Jahren schlug Woodin eine andere überzeugende Grundaussage vor, die ebenfalls die Kontinuumshypothese widerlegt und die Kardinalität der reellen Zahlen auf \aleph_2 festlegt – allerdings auf völlig andere Weise. Woodin nannte das Axiom (*), ausgesprochen »Stern«, weil es »wie eine helle Lichtquelle war«, erklärt der Mathematiker.

Der größte Unterschied zwischen (*) und Martins Maximum besteht in den Grundlagen, auf denen sie aufbauen. Während sich Letzteres auf das ZFC-System bezieht, basiert Woodins Grundaussage auf einem Modelluniversum von Mengen, das die neun ZF-Axiome und das Axiom der Determiniertheit AD erfüllt statt des Auswahlaxioms C (siehe »Determiniertheit und Auswahl«). Weil sich AD und C widersprechen, nahmen Fachleute an, dass (*) und Martins Maximum ebenfalls unvereinbar seien. Allerdings gelang es Woodin, ein Forcing-Verfahren zu entwickeln, das sein mathematisches Modelluniversum auf ein größeres ausdehnt. Und wie sich herausstellte, ist dieses erweiterte Modell, in dem das Axiom (*) gilt, mit ZFC vereinbar.

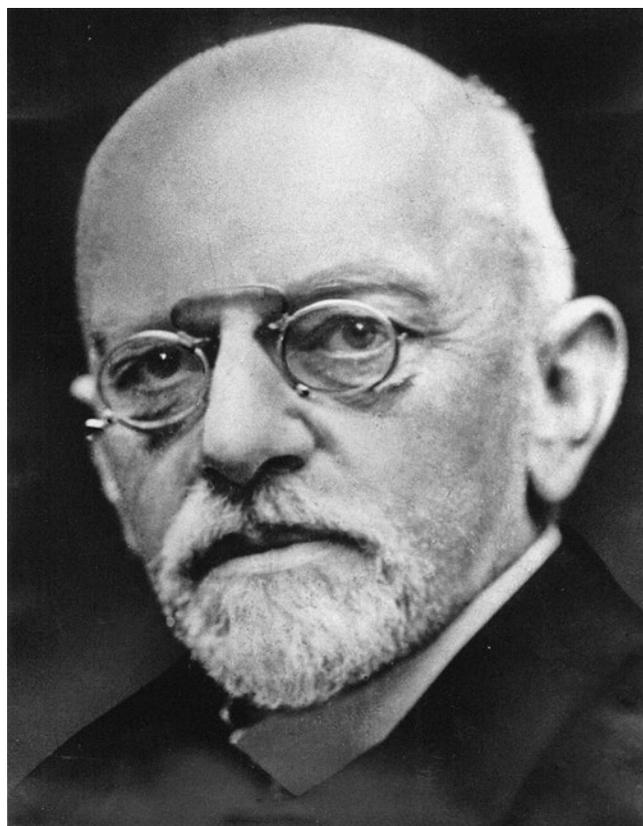
Doch wofür braucht man (*), wenn Martins Maximum bereits so erfolgreiche Ergebnisse produziert? Tatsächlich liegt der Vorteil von Woodins Axiom darin, dass es erlaubt, folgenschwere Aussagen der Form »für alle X gibt es Y, so dass Z« zu treffen, die sich auf Eigenschaften von Mengen innerhalb eines Bereichs beziehen. Solche Formulierungen

stellen mächtige logische Argumentationen dar, zum Beispiel lässt sich aus (*) ableiten: »Für alle Mengen von \aleph_1 reellen Zahlen gibt es weitere reelle Zahlen, die nicht in diesen Mengen enthalten sind.« Demnach ist das Kontinuum größer als \aleph_1 , was Cantors Vermutung widerspricht.

Die Tatsache, dass (*) Fachleute zu dieser Schlussfolgerung führt und viele andere Eigenschaften von Mengen reeller Zahlen beleuchtet, macht sie zu einer attraktiven Hypothese, so Schindler. Mit gleich zwei viel versprechenden Axiomen stehen die Befürworter des Forcings allerdings vor einer schwierigen Entscheidung. »Sowohl Martins Maximum als auch (*) fühlen sich richtig und natürlich an«, erklärt der Mathematiker. »Welches wählt man also?« Da viele Fachleute davon ausgingen, die Aussagen würden sich gegenseitig ausschließen, fiel die Wahl extrem schwer. Wenn man sich auf eines festlegte, würde man alles opfern, was aus dem anderen Axiom folge, befürchteten sie. »Man müsste sich gute Gründe einfallen lassen, warum eine der beiden Grundaussagen wahr ist und die andere falsch – oder vielleicht sogar beide danebenliegen«, sagt Schindler.

Doch statt solche Hinweise zu liefern, konnte er zusammen mit Asperó zeigen, dass aus einer leicht abgewandelten Variante von Martins Maximum (das als Martins Maximum++ bezeichnet wird) das Axiom (*) folgt. Wenn gleich zwei plausible Aussagen einander bedingen, stütze das die Annahme, dass sie beide wahr sein könnten – und man sie

DAVID HILBERT Mit seiner berühmten Rede im Jahr 1900, in der er 23 Probleme vorstellte, prägte er den Verlauf der Mathematik des 20. Jahrhunderts.



AGE IMAGES / PICTURE-ALLIANCE

somit dem jetzigen Fundament der Mathematik hinzufügen sollte, betont Schindler.

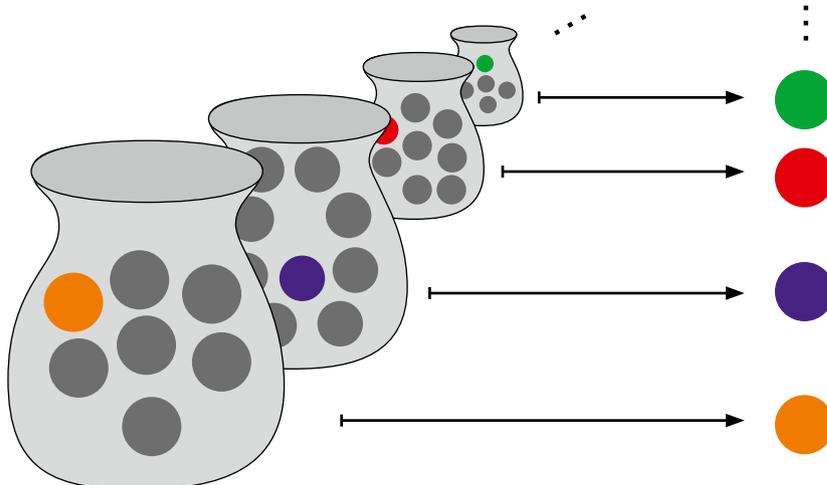
Die Vorarbeit zu dem bahnbrechenden Ergebnis begann bereits vor 20 Jahren in Wien. Damals forschten Asperó und Schindler gemeinsam zu diesem Thema an einem Institut in der österreichischen Hauptstadt. Lange Zeit blieb ihre Arbeit dazu erfolglos. Doch nach ein paar Jahren fiel Schindler ein (wie üblich handgeschrieben) Manuskript des Mengentheoretikers Ronald Jensen von der Humboldt-Universität zu Berlin in die Hand, der darin ein neues Verfahren namens L-Forcing entwickelt hatte. Schindler sah in dem Ansatz großes Potenzial und bat daraufhin einen seiner Studenten, die Methode weiterzuentwickeln.

Als Asperó seinen deutschen Kollegen 2011 in Münster besuchte, erklärte Schindler ihm, was er inzwischen über das L-Forcing herausgefunden hatte. Asperó schlug sofort vor, die Technik zu nutzen, um (*) aus Martins Maximum++ abzuleiten. Ein Jahr später veröffentlichten sie ihr Ergebnis. Als Woodin ihre Arbeit aufmerksam las, fand er jedoch einen Fehler. Da die beiden Mathematiker ihn so schnell nicht ausräumen konnten, sahen sie sich gezwungen, ihren Beitrag zurückzuziehen. In den folgenden Jahren gingen sie den Beweis immer wieder durch, aber sie stießen stets auf scheinbar unüberwindbare Schwierigkeiten. Ihnen fehlte die entscheidende Idee – ein fehlendes Glied in der logischen Kette, so Asperó, die von Martins Maximum++ zu (*) führt.

Die Schlüsselidee fehlt

Um das Axiom (*) abzuleiten, versuchten sie ein Verfahren zu entwickeln, das dem L-Forcing ähnelt. Sie wollten dadurch ein Objekt erzeugen, das in der Logik als »Zeuge« bezeichnet wird. Dieses sollte alle Grundaussagen der Form (*) verifizieren. Wenn den Forschern das gelänge, bräuchten sie nur noch zu zeigen, dass das Forcing Martins Maximum++ erfüllt. Denn daraus würde folgen, dass der Zeuge tatsächlich Teil der mathematischen Realität ist – und somit auch (*). Damit könnte man (*) aus Martins Maximum ableiten.

»Uns war klar, wie man solche Forcings konstruiert«, sagt Asperó. Aber die zwei Mathematiker konnten nicht zeigen, dass ihr Verfahren die Kernanforderung von Martins Maximum erfüllt. Asperós Eingebung während der Autofahrt im Jahr 2018 führte schließlich zu einem viel verspre-



AUSWAHLAXIOM Für jede Sammlung nichtleerer Mengen kann man ein Element aus jeder dieser Mengen auswählen.

chenden Weg: Sie teilten das Forcing in eine aufeinander aufbauende Abfolge mehrerer Forcing-Techniken auf, die jeweils für sich der notwendigen Bedingung genügen.

Glaubt man den beiden Axiomen, dann nehmen die reellen Zahlen den dritten Platz im unendlich hohen Turm an Unendlichkeiten an. »Die Frage ist, ob das wahr ist«, meint Peter Koellner, ein Mengentheoretiker an der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. Die Tatsache, dass aus dem stärksten Forcing-Axiom (also Martins Maximum) die Aussage (*) folgt, könne man gleichzeitig als Argument für oder gegen Martins Maximum werten, gibt er zu bedenken. »Das hängt wirklich davon ab, was man von (*) hält.«

Daher konzentrieren sich Mathematikerinnen und Mathematiker auf die Frage, für wie plausibel sie (*) ansehen. Dafür untersuchen sie daraus abgeleitete Aussagen der Form »für alle X gibt es Y, so dass Z«, die teilweise weit reichende Konsequenzen für die reellen Zahlen haben. Wie Koellner betont, sind einige der Ergebnisse angreifbar; zum Beispiel folgt aus (*), dass sich die Struktur einer großen Klasse von Mengen auf eine sehr viel kleinere Menge abbilden lässt. Das erscheint ihm und anderen Skeptikern seltsam.

Überraschenderweise hat sich inzwischen auch Woodin, der (*) ursprünglich entwickelt hat, gegen sein Axiom gestellt. »Ich werde als Verräter angesehen«, erzählt er. Als er die mathematische Grundaussage vor 25 Jahren postulierte, war er noch überzeugt, die Kontinuumshypothese sei falsch – und setzte ganz auf (*). In den 2010er Jahren änderte er aber plötzlich seine Meinung. Er glaubt nun, Cantor habe Recht gehabt, womit (*) sowie das Forcing »zum Scheitern verurteilt« wären.

Zwar sei der Beweis von Asperó und Schindler »ein fantastisches Ergebnis, das es verdient, in die Annalen aufgenommen zu werden«, äußert er beeindruckt und räumt gleichzeitig ein, dass diese Art von Resultat normalerweise als Hinweis für irgendeine Art von Wahrheit ange-

»Woher weiß man, in welcher Realität man sich befindet?«

Hugh Woodin

sehen wird. Dennoch glaube er nicht, dass Martins Maximum und (*) Teil der mathematischen Realität seien.

Neben der von Koellner erwähnten Unstimmigkeit identifizierte Woodin ein weiteres, größeres Problem. Diese »unerwartete Wendung«, wie der Logiker es nennt, entdeckte er im 2019 erschienenen Vorabdruck von Asperó und Schindlers Arbeit. Um die Schwierigkeit zu verstehen, muss man wissen, dass (*) nicht das einzige Axiom seiner Art ist. In der Vergangenheit hat Woodin stärkere Varianten der Grundaussage aufgestellt, die (*)+ und (*)++ genannt werden. Diese beziehen sich nicht nur auf die reellen Zahlen, sondern gelten für deren Potenzmenge (also die Menge aller Teilmengen). Wie sich schnell herausstellte, widerspricht (*)+ in verschiedenen Modellen des mathematischen Universums – wenn auch nicht allgemein – Martins Maximum. Im Mai 2021 teilte Woodin mit der Fachwelt eine Arbeit, in der er bewies, dass (*)+ und (*)++ äquivalent sind. Das heißt, (*)++ schließt ebenfalls in manchen Modellen Martins Maximum aus.

Das ist insofern problematisch, als die beiden Axiome (*)+ und (*)++ ihren Vorläufer (*) weit in den Schatten stellen. Sie erlauben es, Aussagen der Form »Es gibt eine Menge von reellen Zahlen ...« zu machen – und damit die Eigenschaften beliebiger (sowie aller) Sammlungen solcher Zahlen zu beschreiben und zu untersuchen. Eine derartige Stärke hat (*) nicht. Da Martins Maximum aber (*)+ und (*)++ zu widersprechen scheint, befürchten Mathematiker und Mathematikerinnen, das Forcing-Axiom lasse keine existenziellen Aussagen über die Mengen von reellen Zahlen zu. Für Woodin ist das ein Ausschlusskriterium: »Damit wäre Martins Maximum zum Scheitern verurteilt.«

Zurzeit untersucht die Fachwelt noch Woodins Beweis und versucht, dessen Folgen abzuschätzen. Doch wie einige betonen, handelt es sich bei den vorgebrachten Argumenten bisher bloß um Vermutungen. Nur weil (*)+ in manchen Modellen Martins Maximum widerspricht, muss das nicht in jeder mathematischen Realität so sein – insbesondere nicht im ZFC-Universum. Selbst Woodin räumt ein, dass eine überraschende Entdeckung seine Meinung ändern könnte; so, wie es in der Vergangenheit schon geschehen ist.

Hoffnung für das Ultimative L

In der Zwischenzeit verfolgt der Logiker andere Ansätze. Viele Forscherinnen und Forscher erwarten mit Spannung die Ergebnisse seines Versuchs, ein »ultimatives L« zu konstruieren (siehe »Spektrum« Februar 2021, S. 12). Denn Woodins Überzeugung nach enthält das derzeit genutzte Mengenuniversum zu viele Mengen. Man müsste die Anforderungen an die Sammlungen von Objekten stärker einschränken, um das Universum auf ein »ultimatives L« zu verkleinern. Gleichzeitig darf man Mengen nicht zu viel abverlangen, sonst lassen sich gewisse Strukturen und damit einhergehende mathematische Aussagen nicht mehr beweisen. Woodin hat bereits 400 Seiten zu dem Thema verfasst und ist überzeugt, bald eine Lösung zu haben.

Fügt man dem ZFC-System das Axiom hinzu, wonach das Mengenuniversum dem ultimativen L entspricht, dann erweist sich die Kontinuumshypothese plötzlich als wahr.

Da die Anzahl der möglichen Mengen in dieser Welt begrenzt ist, gibt es keine Unendlichkeit mehr zwischen der der natürlichen und jener der reellen Zahlen. Gelingt der Beweis, wird das ultimative L-Axiom, wenn auch nicht als offensichtliche Erweiterung für ZFC, so doch zumindest als ernst zu nehmender Konkurrent für Martins Maximum gelten – und somit die Plausibilität des Forcing-Verfahrens in Frage stellen. Das sehen manche Fachleute als entscheidenden Vorteil, denn die von Cohen entwickelte Technik führt über die Mengenlehre hinaus zu zahlreichen unentscheidbaren Aussagen. Mit einem »ultimativen L« ließen sich viele davon klären.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



WIGGLESTICK / GETTY IMAGES / ISTOCK

Eine Einigung zwischen dem Lager, das Cantors Vermutung unterstützt, und den Verfechtern von Martins Maximum ist nicht in Sicht. Seit dem letzten Jahrhundert, als Gödel und Cohen bewiesen haben, dass die Kontinuumshypothese im Axiomensystem ZFC unentscheidbar ist, erschaffen Mengentheoretiker Universen, in denen der Größe der reellen Zahlen keine Grenzen gesetzt sind – von \aleph_2 über \aleph_{20} bis hin zu \aleph_{1346} –, und erforschen die sich dadurch ergebenden Konsequenzen. Mit dem Ergebnis von Asperó und Schindler, das auf \aleph_2 hindeutet, und Woodins Arbeit, die für \aleph_1 spricht, sind die meisten Fachleute inzwischen davon überzeugt, die Kardinalität des Kontinuums betrage einen der beiden Werte. Wie einige ihrer Kollegen ist auch die Mathematikerin Kennedy der Auffassung, man komme damit Hilberts Traum einer fassbaren mathematischen Wirklichkeit näher und sei auf dem besten Weg zu »Cantors Paradies«. ◀

QUELLEN

Asperó, D., Schindler, R.: Martin's Maximum++ implies Woodin's axiom (*). *Annals of Mathematics* 193, 2021

Foreman, M. D. et al.: Martin's Maximum, saturated ideals, and nonregular ultrafilters. Part I. *Annals of Mathematics* 127, 1988

Woodin, H.: The axiom of determinacy, forcing axioms, and the nonstationary ideal. Walter de Gruyter, 2010

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »How Many Numbers Exist? Infinity Proof Moves Math Closer to an Answer« 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.



ARCHÄOLOGIE DIE ERSTEN AMERIKANER WAREN DOCH SCHON FRÜHER DA

Vor rund 22500 Jahren stapften Kinder durch ein Flussufer und hinterließen ihre Fußspuren – dort, wo heute der US-Bundesstaat New Mexico liegt. Die fossilisierten Abdrücke belegen, dass Menschen schon während der letzten Eiszeit in Amerika lebten. Und damit mehrere tausend Jahre früher als bislang angenommen.

Der White Sands National Park ist bekannt für seine kreideweißen Sanddünen, die sich über hundert Quadratkilometer im Süden des US-Bundesstaats New Mexico erstrecken. Während des Maximums der letzten Eiszeit war diese Gegend üppig mit Gras bewachsen, und das Klima war feuchter. An den Ufern der Seen, die im Lauf eines Jahres mal mehr und mal weniger Wasser führten, wanderten damals Mammuts, Riesenfaultiere und andere Vierbeiner umher. Und es gab dort Menschen.

Forscher um Matthew Bennett von der Bournemouth University im britischen Poole haben in einer Studie vom September 2021 menschliche Fußabdrücke beschrieben. Demnach waren einst zahlreiche Personen dort, wo heute der White Sands National Park liegt, durch ein Seeufer gestapft. Das Alter der Spuren: zwischen 21000 und 23000 Jahren. Wenn die Datierung korrekt ist – und Fachleute halten das für sehr wahrscheinlich –, dann belegen die Abdrücke den bislang frühesten unstrittigen Zeitpunkt, an dem Menschen in Amerika lebten.

»Der Nachweis ist sehr überzeugend und sehr spannend«, sagt der Experte für Radiokarbondatierung Tom Higham von der Universität Wien. »Ich bin überzeugt davon, dass diese Fußabdrücke wirklich so alt sind, wie die Kollegen behaupten.« Der Fund stellt viele der bisherigen Erkenntnisse über das Datum der Erstbesiedlung Amerikas in Frage. Sicher ist, dass *Homo sapiens* aus Sibirien über die Beringstraße auf den Doppelkontinent gelangte (siehe »Spektrum der Wissenschaft« September 2021, ab S. 74). In den vergangenen Jahren mehrten sich

jedoch die Hinweise, wonach die Erstankömmlinge mit Booten entlang der Pazifikküste fuhren; denn das Landesinnere war damals noch von einem mächtigen Eispanzer bedeckt. Allerdings haben Archäologen inzwischen einige wenige Fundplätze dokumentiert, die eine Ankunft des Menschen deutlich früher wahrscheinlich machen – vor zirka 20000 bis 30000 Jahren. Die von Bennett und seinen Kollegen beschriebenen Fährten bekräftigen nun diese neueren Thesen.

»Die Studie liefert überzeugende Argumente dafür, dass die Fußspuren von Menschen stammen und älter als 20000 Jahre sind«, sagt Spencer Lucas, Paläontologe am New Mexico Museum of Natural History & Science in Albuquerque. »Der Fund ist ein Gamechanger.«

Lange vor den Clovis

Jahrzehntlang galt es als archäologischer Konsens, dass die frühesten Amerikaner durch 11000 bis 13000 Jahre alten Steinspitzen nachgewiesen sind. Als Clovis-Kultur benannten Forscher diese Gruppen – die Bezeichnung hatten sie vom Erstfundort in New Mexico übernommen, Überreste der Clovis kamen aber in ganz Nordamerika zu Tage. Diese Kultur existierte während der Zeit, als die Eisdecke über Nordamerika so weit abgeschmolzen war, dass sich ein eisfreier Korridor durch Zentralkanada gebildet hatte. Auf diesem Weg seien die ersten Siedler eingewandert.

Doch dann kamen immer mehr Fundplätze von Alaska bis zur Spitze Südamerikas ans Licht, die ungefähr 16000 Jahre alt sind und damit deutlich vor den Clovis liegen. Die These

des »Clovis first« – also dass diese Kultur die erste in Amerika war – verlor an Halt. Die Experten suchten nach neuen Erklärungen für den Befund. Eine davon lautete: Die Menschen müssen entlang der amerikanischen Küste gefahren sein.

In den einschlägigen Fachmagazinen finden sich inzwischen sogar Studien, die für eine noch frühere Datierung plädieren. Laut einem Artikel von 2017 in »Nature« seien Frühmenschen angeblich bereits vor 130000 Jahren im heutigen Kalifornien umhergezogen. Die Beweiskraft der Belege ist allerdings schwach. Man hat möglicherweise Bruchsteine falsch als Hammersteine interpretiert, und vermeintliche Schlagspuren auf Tierknochen rühren wohl nicht von Menschenhand her, sondern wie im Fall des kalifornischen Fundplatzes Cerutti Mastodon von Baumaschinen. Die archäologische Stätte war bei einem Straßenbauprojekt entdeckt worden.

In White Sands sind zahlreiche fossilisierte Fußabdrücke von Menschen und Tieren erhalten. Im Jahr 2018 dokumentierte das Team um Bennett die Fährte eines Riesenfaultiers, auf das offenbar Menschen am Grund eines ausgetrockneten Sees Jagd gemacht hatten. Aber solche Abdrücke lassen sich kaum vernünftig datieren, erklärt Geowissenschaftler Bennett, der sich auf fossile Fußspuren spezialisiert hat. »Jeder Abdruck, den man freilegt, kann ein anderes Alter haben. Die Datierung ist ein Albtraum.«

Koautor David Bustos vom White Sands National Park entdeckte dann 2019 Spuren in felsigen Bodenschichten. Im Gestein erspähte der Archäologe zudem Samen der Schraubigen



FÄHRTE Die versteinerten Fußabdrücke im White Sands National Park in New Mexico sind zwischen 21000 und 23000 Jahren alt – und damit gut 5000 Jahre älter als die bisher früheste bekannte Fundstätte menschlicher Präsenz in Amerika.

NATIONAL PARK SERVICE, USGS UND BOURNEMOUTH UNIVERSITY

Salde (*Ruppia cirrhosa*), einer Wasserpflanze. Das Alter der organischen Überreste ließ er mit Hilfe der Radiokohlenstoffmethode bestimmen. »Dieser Fund ist der Heilige Gral für die Datierung von Fußabdrücken«, urteilt Bennett. Völlig unerwartet war das Ergebnis der ^{14}C -Analyse jedoch nicht für die Archäologen – das US Geological Survey in Denver stellte fest, dass die Samen zwischen 21000 und 23000 Jahren alt sind. Bennett und Bustos hatten nämlich vorab für die Sedimente an der Fundstelle ein ähnliches geologisches Datum ermittelt. Allerdings war dem Forscherteam bewusst, dass die Fachwelt die Belege für eine derart frühe menschliche Präsenz in Amerika äußerst kritisch begutachten würde.

Daher wollten die Wissenschaftler möglichst alle Fehlerquellen ausschließen, die ihre Datierungsergebnisse beeinträchtigt haben könnten. Das Radiokarbonalter eines organischen Stoffs verfälscht sich beispielsweise,

wenn ein Organismus Kohlenstoff aus Wasser aufnimmt, das durch das umgebende Gestein gespült wurde. Bei Kalziumkarbonat aus Kalkstein wäre dies der Fall. Denn Kohlenstoff aus wässrigen Milieus zeigt in der Regel ein höheres ^{14}C -Alter an als Kohlenstoffisotope, die von terrestrischen Organismen aufgenommen wurden.

Die Suche nach dem Fehler

Solche Reservoir-Effekte konnte die Arbeitsgruppe am Fundplatz in White Sands jedoch ausschließen. Sie datierte hunderte Samen aus verschiedenen Sedimentschichten. Das jeweilige Alter stimmte jedes Mal mit der Fundlage überein – soll heißen: Die älteren Stücke lagen unten, die jüngeren oben. Hätten die Samen irgendwann alten Kohlenstoff absorbiert, müsste es mehrere voneinander abweichende Datierungen geben, erklärt Koautor Daniel Odess vom National Park Service in Washington, D. C. An einer

anderen Stelle, einer ohne Fußabdrücke, sammelten die Wissenschaftler ebenfalls Samen der Schraubigen Salde sowie aus derselben Schicht Reste von Holzkohle. Die ^{14}C -Daten der Funde stimmten überein. Das bestätigte, dass die Radiokohlenstoffmessung der Samenkörner korrekt war – Holzkohle ist nämlich nicht von Reservoir-Effekten betroffen.

»Ich gehe davon aus, dass die Datierungen in Ordnung sind«, sagt Thomas Stafford, der in den USA als Geochronologe bei den Stafford Research Laboratories in Lafayette tätig ist. Selbst eine Fehlerbreite von 1000 Jahren würde die Bedeutung der Fußabdrücke nicht schmälern, betont er. »Ob Menschen nun vor 20000, 22000 oder 19000 Jahren in Amerika waren, ändert nichts an dem unglaublichen Endergebnis«, fügt Stafford hinzu. Tatsache sei, dass Menschen bereits während des eiszeitlichen Maximums im Süden Nordamerikas umherstreiften. Und damit tausende Jahre früher,



SCHNITT Bei Grabungen in New Mexico legten Archäologen ein Seeufer der letzten Eiszeit frei. In den Sedimenten haben sich Spuren von Menschen erhalten.

als es die meisten Forscherinnen und Forscher für möglich gehalten hätten.

Laut Benetts Arbeitsgruppe stammen die dutzenden Fußabdrücke von zahlreichen Individuen, die meisten von ihnen Kinder und Jugendliche. Karen Moreno von der Universidad Austral de Chile in Valdivia zweifelt nicht daran, dass die Vertiefungen von Menschen stammen. Ob es sich dabei aber vor allem um Kinder gehandelt hatte, davon ist die Expertin für Spurenfossilien noch nicht überzeugt. Denn die Forscher um Bennett haben die Sohlenlängen heutiger Menschen als Vergleich genommen, um das Alter der Urheber jener Fußabdrücke zu ermitteln. Abgesehen davon würde der Fund auch nach Ansicht von Moreno unbestritten die früheste Anwesenheit von Menschen in Amerika belegen.

Bennett geht einen Schritt weiter. Für ihn liegen nun eindeutige Beweise vor, dass *Homo sapiens* vor mehr als 20000 Jahren auf dem Doppelkontinent angekommen war. Seines Erachtens sei es nun für die Fachwelt an der Zeit, daraus weitere Schlüsse zu ziehen: Die Spuren in White Sands verleihen den wenigen übrigen früh datierten und deshalb umstrittenen Fundorten mehr Überzeugungskraft.

In diesem Punkt widerspricht David Meltzer. Der Archäologe von der Southern Methodist University in Dallas hält die Abdrücke von White Sands zwar für korrekt datiert. Deshalb würden sie aber andere Fundorte nicht plötzlich weniger umstritten machen. Sollten allerdings Steinwerkzeuge ans Licht kommen, die von den Menschen stammten, die einst durch das Seeufer von White Sands stapften,

hätte man eine bessere Grundlage, um die angeblich frühen Fundorte neu zu bewerten, meint Meltzer.

Wer waren nun die Ersten in Amerika? Für Tom Higham ist das die Forschungsfrage, die nun noch stärker angegangen werden muss. Der Neufund verleihe der These »große Wahrscheinlichkeit«, dass die Vorfahren der Menschen von White Sands entlang der Pazifikküste gepaddelt waren. Als Nächstes gelte es, die eiszeitlichen Erstankömmlinge zu identifizieren. »Es wäre nun wichtig, nicht nur weitere Fußabdrücke zu finden, sondern auch die Überreste von den dazugehörigen Menschen.« ◀

Ewen Callaway ist Wissenschaftsjournalist und schreibt in London für »Nature«.

QUELLEN

Bennett, M. R. et al.: Evidence of humans in North America during the Last Glacial Maximum. *Science* 373, 2021

Bustos, D. et al.: Footprints preserve terminal Pleistocene hunt? *Science Advances* 4, 2018

Holen, S. R. et al.: A 130,000-year-old archaeological site in southern California, USA. *Nature* 544, 2017

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 597, S. 601–602, 2021

ATOMPHYSIK SUPRAFESTKÖRPER ERREICHEN DIE ZWEITE DIMENSION

»Suprasolide« Materie kann gleichzeitig einen Kristall bilden und reibungsfrei fließen. Mit ultrakalten Gasen aus stark magnetischen Atomen wurde nun der erste zweidimensionale Suprafestkörper hergestellt.

► Zwar bedeutet die aus dem Lateinischen stammende Vorsilbe »supra« so viel wie »über«, dennoch sind Materialien in einem als suprasolide bezeichneten Zustand nicht etwa besonders starr. Vielmehr

vereinen sie die geordnete Struktur eines Festkörpers mit den Eigenschaften eines so genannten Suprafluids. Das ist eine Substanz, die völlig reibungsfrei fließt. Man kann sich einen Suprafestkörper wie einen Eiswürfel

vorstellen, der eingetaucht in flüssiges Wasser von diesem durchströmt wird, ohne dass es dabei einen Widerstand erfährt.

Erstmals wurden Suprafestkörper 2019 von drei Forschungsgruppen

unabhängig voneinander hergestellt. Je ein Team um Francesca Ferlaino vom Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Innsbruck, eines um Giovanni Modugno von der Universität Florenz und eines um Tilman Pfau von der Universität Stuttgart verwendete dazu ultrakalte, magnetisch wechselwirkende Atome. Allerdings war die Struktur in den Experimenten jeweils nur entlang einer Dimension geodnet. Jetzt haben Matthew Norcia und Claudia Politi vom Innsbrucker Institut einen zweidimensionalen Suprafestkörper aus ultrakalten Dysprosiumatomen geschaffen.

Wenn eine Flüssigkeit zu einem Festkörper wird, ordnen sich die darin enthaltenen Teilchen zu einem Kristall. Die dabei entstehende Regelmäßigkeit ist für diverse Stoffe charakteristisch, von Eis bis hin zu Metallen. Damit eine Substanz zu einem Suprafestkörper werden kann, müssen ähnliche Symmetrieveränderungen stattfinden. Hier kommt allerdings noch Suprafluidität hinzu. Bei dieser lässt sich das Material durch eine einzige Wellenfunktion beschreiben, die sich gewissermaßen

über seine gesamte Ausdehnung hinweg erstreckt.

Ursprünglich hatten diverse Wissenschaftler zunächst bei extrem stark gekühltem Helium nach Anzeichen für Suprasolidität gesucht. Je nachdem, welcher Druck herrscht, können Heliumatome theoretisch zwischen einer festen und einer supraflüssigen Phase wechseln. Womöglich koexistieren also beide Materieformen und bringen gemeinsam einen Suprafestkörper hervor. Im Prinzip ist Helium ein hervorragender Kandidat dafür, da seine leichten Atome gemäß der Quantenmechanik bereitwillig Welleneigenschaften zeigen. Trotzdem ließ sich das Element bislang nicht zu suprasolidem Verhalten bewegen.

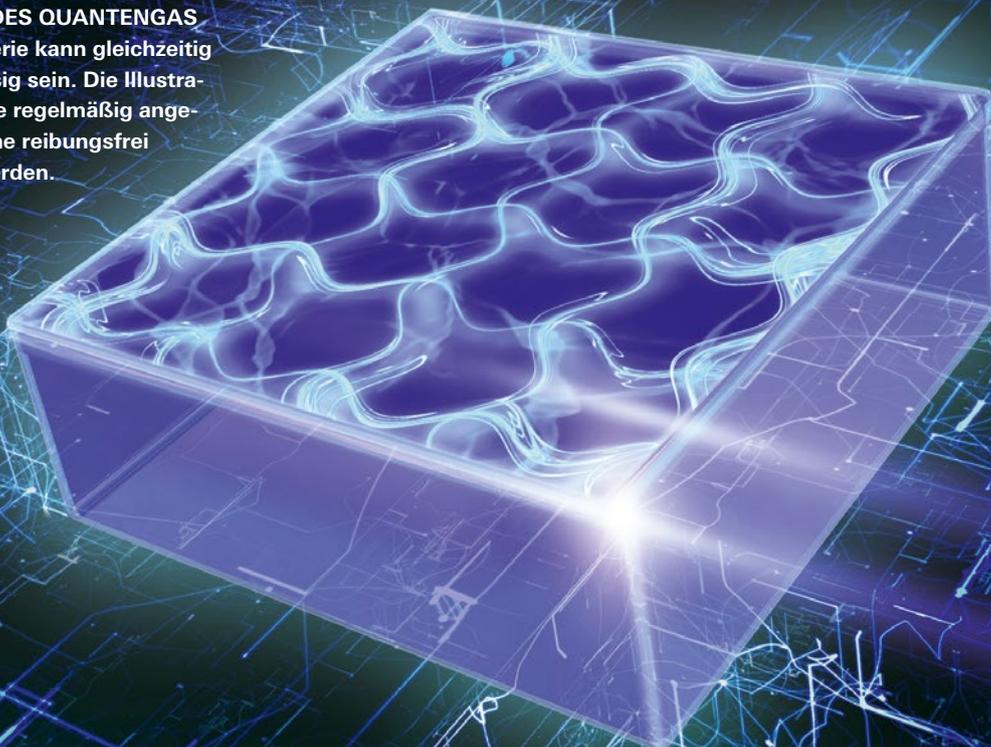
Wenn kalte Atome kondensieren

Zum Glück gibt es noch weitere viel versprechende Ansätze auf der Suche. Dazu gehören Versuche mit ultrakalten Atomgasen. Diese finden bei Temperaturen von nur etwa 100 Nanokelvin statt. Durch ein quantenmechanisches Phänomen namens Bose-Einstein-Kondensation können unter diesen Bedingungen alle Atome einen kollektiven makroskopischen Zustand ein-

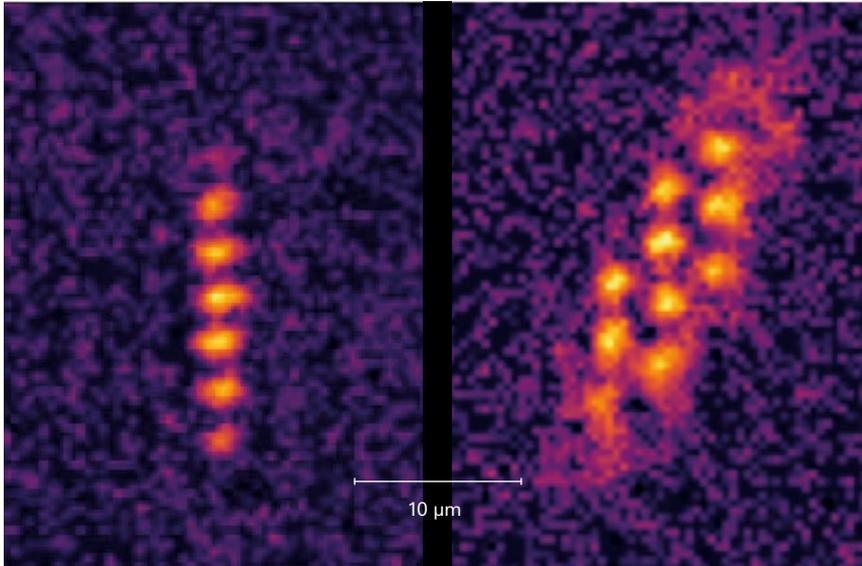
nehmen. So ordnen sich Bose-Einstein-Kondensate, die inmitten eines Musters aus Laserstrahlen platziert wurden, selbstorganisiert zu Kristallen an. Deren Periodizität wird jedoch durch die Wellenlänge des Lasers bestimmt. Dieser schränkt die Möglichkeiten des Gitters ein, in alle Raumrichtungen zu vibrieren. Damit fehlen dem Material einige der Freiheitsgrade, die es bräuchte, um als vollwertiger Suprafestkörper zu gelten.

Darum wurden die Fachleute 2019 hellhörig, als die drei genannten Teams berichteten, tatsächlich Suprafestkörper konstruiert zu haben, nämlich auf der Grundlage von magnetisch wechselwirkenden Bose-Einstein-Kondensaten. Solche Kondensate basieren auf dem Tauziehen zwischen anziehender und abstoßender Wechselwirkung von magnetischen Atomen wie Dysprosium oder Erbium. Die Experimentierbedingungen müssen nahe der Grenze liegen, bei der die Anziehung zwischen den Atomen so stark wird, dass das System kollabiert. Unter solch labilen Umständen bilden die Atome eine Reihe von Tröpfchen. Deren Form wird durch die Konkurrenz zwischen den atomaren Wechselwirkungen sowie

SUPRASOLIDES QUANTENGAS
Quantenmaterie kann gleichzeitig fest und flüssig sein. Die Illustration zeigt, wie regelmäßig angeordnete Atome reibungsfrei umströmt werden.



LABURTHE-TOLRA, B.: SUPERSOLIDS GO TWO-DIMENSIONAL. NATURE 596, 2021, FIG. 1; NANCY NORCIA, M.A. ET AL.: TWO-DIMENSIONAL SUPERSOLIDITY IN A DIPOLAR QUANTUM GAS. NATURE 596, 2021, FIG. 2; B. UND D.



ATOMGAS-SUPRAFESTKÖRPER Ultrakalte Dysprosiumatome erzeugen eine suprasolide Struktur – links eindimensional, rechts zweidimensional. Die Bilder entstanden mittels Absorption von Laserlicht. Die Farben codieren die Dichte von niedrig (schwarz) bis hoch (gelb).

durch Druckkräfte auf Grund von Quantenfluktuationen gesteuert. Darüber hinaus entscheidet die magnetische Abstoßung auf Grund ihrer großen Reichweite über die räumliche Anordnung insgesamt.

Im Hintergrund dieser selbstorganisierten Tropfenkette wabert relativ weitläufig ein Gas von annähernd gleichmäßiger Dichte. Es trägt zu der speziellen Schwingung der Atomwelle bei, die für die Suprafluidität erforderlich ist. Anschaulich gesprochen bilden die gitterförmig platzierten Tröpfchen den festen Teil, und sie koexistieren mit einem Suprafluid – ähnlich wie der eingangs erwähnte hypothetische, von Wasser durchströmte Eiskristall. Tatsächlich jedoch bestehen der Kristall und das Umgebungsgas aus denselben Atomen, und sie formen eine einzige Materiephase: den Suprafestkörper.

Das Ziel der 2021 publizierten Studie war es, von den eindimensionalen Anordnungen der ersten, bahnbrechenden Experimente zu zweidimensionalen Suprafestkörpern zu gelangen. Dazu modifizierte die Innsbrucker Gruppe die optische Falle, welche die Atome einschließt. Ein Tröpf-

chengitter in zwei Richtungen markiert einen entscheidenden Fortschritt. Nur wenn das System mehr als eine Dimension hat, lassen sich seine Eigenschaften unter Rotation untersuchen. Und solch ein Vorgehen erlaubt wiederum einen direkten Beweis eines zentralen Bestandteils der Suprasolidität: der Suprafluidität.

Wirbel ohne Viskosität

Ein Suprafluid kann nicht einfach gedreht werden, weil ihm die innere Zähigkeit einer klassischen Flüssigkeit fehlt. Darum muss man der Wellenfunktion, durch die der gemeinsame Zustand aller Atome beschrieben wird, Wirbel hinzufügen. Ähnlich wie bei einem Strudel im Wasser erfordert das eine gewisse Energiemenge, also eine ausreichend große Kraft. Wegen dieses besonderen Verhaltens weist das Suprafluid ein Trägheitsmoment auf; die Größe gibt an, wie sehr ein Objekt einer Rotationsbeschleunigung widersteht. Bei einem Suprafestkörper sollte die Kristallkomponente theoretisch wie ein starrer Körper rotieren, das Hintergrundgas hingegen nicht. So ließe sich das Trägheitsmoment mit dem von gewöhnlicher Materie ver-

gleichen und somit der Anteil bestimmen, der tatsächlich Suprafluidität aufweist.

Solche Untersuchungen stehen vorerst allerdings aus. Ebenso ist die Antwort auf eine weitere Frage offen: Inwieweit sind die Eigenschaften des Suprafestkörpers durch seine begrenzte Größe bedingt? Die Eigenschaften von Systemen mit weit reichenden Wechselwirkungen, wie im vorliegenden Fall den Magnetkräften, hängen häufig stark von den äußeren Rändern des Systems ab. In Norcias und Politis Experiment haben die Tröpfchen eine Anordnung, die extrem empfindlich auf die Struktur der optischen Falle reagiert. Das weist auf einen hohen Einfluss solcher Randeffekte hin. Es bleibt daher abzuwarten, ob sich bedeutend größere Systeme herstellen lassen als in diesen Versuchen.

Fürs Erste ist das aber auch gar nicht notwendig, um weitere Untersuchungen anzustellen. Für das Hintergrundgas des Suprafestkörpers lässt sich eine »Relaxationslänge« bestimmen. Von dem Wert hängt etwa der typische Durchmesser eines Wirbels ab. Im vorliegenden Experiment ist sie wohl viel kleiner als das ganze System. Dieses ist also vermutlich bereits ausgedehnt genug, um Anordnungen von Wirbeln und andere Erscheinungen zu beherbergen, die mit für Suprasolidität charakteristischen Symmetrien und Strukturen verbunden sind. Die dynamischen Eigenschaften dieser besonderen Materie zu studieren, wird in den kommenden Jahren jedenfalls ein spannendes Forschungsthema sein. ◀

Bruno Laburthe-Tolra leitet die Forschungsgruppe zu kalten Atomen am Laserlaboratorium der Universität Paris-Nord in Frankreich.

QUELLE

Norcia, M.A. et al.: Two-dimensional supersolidity in a dipolar quantum gas. Nature 596, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 596, S. 348–349, 2021

BOTANIK

SAMEN DER VERGANGENHEIT

Die Entstehung der Blütenpflanzen gilt als hartnäckiges Rätsel der Evolution. Jetzt enthüllten Forscher den Ursprung einer typischen Struktur bedecktsamer Pflanzen: der doppelten Schutzschicht der Samenanlage.

Als eines der wichtigsten Ereignisse in der Evolution zählt der Auftritt der Blütenpflanzen, die bei Botanikern unter den Begriffen Angiospermen oder Bedecktsamer firmieren. Eine Reihe evolutionärer Innovationen verhalf diesen Organismen zum schnellen Aufstieg, so dass sie heute weltweit die Ökosysteme an Land beherrschen. Hierzu gehören die Blütenorgane sowie das Endosperm, ein spezielles Nährgewebe für den Pflanzenembryo. Darüber hinaus produzieren Angiospermen (sowie ihre Schwestergruppe, die Nacktsamer oder Gymnospermen) Samen, die eine

Schutzschicht um den sich entwickelnden Embryo bilden. Dadurch konnten die Samenpflanzen andere Gewächse wie Moose und Farne übertrumpfen. Und nicht zuletzt leisten Samen einen entscheidenden Beitrag für unser täglich Brot.

Die Herkunft der bedecktsamigen Blütenpflanzen liegt im Dunkeln. Wir kennen Fossilien von vier Gruppen ausgestorbener Gymnospermen, doch aus welcher die Angiospermen entstanden sind, bleibt rätselhaft. Wir wissen lediglich, dass es sich nicht um eine der heute lebenden Gruppen von Nacktsamern handelt, zu denen Nadel-

bäume, Palmfarne oder auch der Ginkgo zählen.

Bereits Charles Darwin (1809–1882) bezeichnete in einem Brief an den Botaniker Joseph Dalton Hooker (1817–1911) den Ursprung der Blütenpflanzen als »abscheuliches Rätsel«. Mysteriös ist etwa, wie die Angiospermen – im Gegensatz zu den Gymnospermen – zu einer doppelten Samenschutzschicht gekommen sind. Diese Integumente durchlaufen verschiedene Entwicklungswege und werden genetisch unterschiedlich kontrolliert. Äußeres und inneres Integument sind also nicht gleich.



MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!

STERNE UND
WELTRAUM

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2022

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen zeigen den Saturn im Sommer, eine Sternentstehungsregion in der Großen Magellanschen Wolke, FAST (das »Auge des Himmels«), die Milchstraße im Radiowellenbereich, den Käfernebel, die erste Aufnahme eines Schwarzen Lochs und weitere Himmelsregionen und -objekte.

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

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/aktion/hue

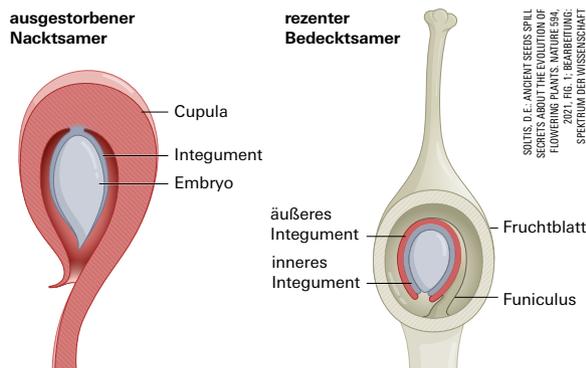
E-Mail: service@spektrum.de



Evolution der Samen

Die bedecktsamigen Blütenpflanzen (Angiospermen) entstanden vermutlich aus Nacktsamern (Gymnospermen). Letztere besitzen eine Samenanlage mit einer einzigen Schutzschicht, dem Integument. Bei manchen ausgestorbenen Gymnospermen wird die Samenanlage zusätzlich von einer becherförmigen Struktur namens Cupula umhüllt (links).

Die Samen heutiger Angiospermen zeichnen sich dagegen durch zwei Schutzschichten aus: dem inneren sowie dem äußeren Integument (rechts). Dabei ist die Samenanlage über das Samenstielchen oder Funiculus mit dem Fruchtblatt bogenförmig verbunden. Wie Paläobotaniker nun vermuten, entwickelte sich die Cupula der Gymnospermen zum äußeren Integument der Angiospermen, wobei sich der Cupula-Stiel zum Funiculus umwandelte.



Die Arbeitsgruppe von Gongle Shi von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften bringt nun etwas Licht in dieses Dunkel. Das Team hat sich außerordentlich gut erhaltene Fossilien von ausgestorbenen Samenpflanzen angeschaut, die vermutlich mit heutigen Bedecktsamern nahe verwandt sind. Die Fortpflanzungsorgane der Pflanzen erwiesen sich dabei als äußerst vielgestaltig. Bemerkenswerterweise handelt es sich nicht um jüngst ausgegrabene Fossilien; die Exemplare wurden vielmehr vor fast einem Jahrhundert gesammelt und lagern seitdem in Museumsdepots.

Der besondere Dreh

Bei diesen ausgestorbenen Pflanzen umgibt eine becherförmige Struktur, Cupula genannt (lateinisch: cupula = kleine Tonne), den sich entwickelnden Keim (siehe »Evolution der Samen«). Auch wenn die Rolle des Bechers noch unklar bleibt, lässt sich vermuten, dass er dem Samen zusätzlichen Schutz bot oder seine Ausbreitung förderte.

Könnte es sich bei der Becherschale um den Vorläufer des äußeren Integu-

ments handeln? Die Klärung dieser Frage bedarf eines zusätzlichen Drehs. Die Samenanlage der Angiospermen zeichnet sich nämlich durch eine ungewöhnliche Struktur aus: Ihre Spitze biegt sich mit dem Stiel, mit dem der Same am Fruchtblatt sitzt, nach unten. Stellen Sie sich vor, Sie stehen nicht aufrecht (das entspräche dem Bau eines Gymnospermens), sondern nach vorne gebeugt, so dass sich der Kopf bei den Zehen befindet. Genau solch eine gebogene Position findet sich bei den Cupulae der Fossilien, die damit den charakteristisch geformten Samenanlagen der Angiospermen erstaunlich ähneln. Heureka!

Mit einem Alter von lediglich 126 Millionen Jahren stammen die untersuchten Fossilien aus einer Zeit, in der die Bedecktsamer bereits auf der Bildfläche erschienen waren. Was also ist das Besondere? Wir kennen ähnliche Pflanzenfossilien mit becherförmigen Strukturen, die viel älter sind – darunter die Gattung *Caytonia*, ein ausgestorbener Nacktsamer, der als naher Verwandter oder vielleicht

sogar Vorfahre der Bedecktsamer gehandelt wird. Die etwa 250 Millionen Jahre alten Pflanzen tauchten lange vor den Angiospermen auf. Damit ergeben die neu beschriebenen Fossilien zusammen mit den bereits bekannten ein klares Bild: Das zweite Integument der Samenanlage der Angiospermen leitet sich von der Cupula eines ausgestorbenen Nacktsamers ab.

Um es klar zu sagen: Die von den Forschern um Shi beschriebenen Exemplare entsprechen nicht den unmittelbaren Vorfahren der Bedecktsamer; solche Fossilien harren noch ihrer Entdeckung. Außerdem bleiben weitere evolutionäre Rätsel zu knacken. Dazu gehört der Ursprung des Fruchtknotens, der bei den Blüten von Angiospermen die Samenanlage umgibt und sich zu Früchten entwickelt – eine weitere Struktur, die für die menschliche Ernährung eine zentrale Rolle spielt. Die Herkunft der Pollen erzeugenden Staubblätter sowie des Endosperms, das es nur bei Bedecktsamern gibt, gilt es ebenfalls noch zu klären.

Es gibt immer noch die romantische Vorstellung, solche Fragen könnten nur Paläontologen beantworten, die im Feld mit Steinhämmerchen bewaffnet neue Fossilien ausgraben. Doch wie die Arbeit von Shi und seinen Kollegen zeigt, verstecken sich wichtige Teile des evolutionären Puzzles nicht unbedingt unter der Erde. Vielmehr könnten sie in paläobotanischen Sammlungen auf der ganzen Welt schlummern und hier auf einen neugierigen Wissenschaftler warten, der einfach die richtige Schublade öffnet. ◀

Douglas E. Soltis ist außerordentlicher Professor am Florida Museum of Natural History sowie am Department of Biology der University of Florida in Gainesville (USA). Der Botaniker gilt als Experte für die Evolution der Bedecktsamer.

QUELLE

Shi, G. et al.: Mesozoic cupules and the origin of the angiosperm second integument. *Nature* 594, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 594, S. 185–186, 2021

CHEMIE

RINGÖFFNUNG GELUNGEN

Benzolringe gelten als extrem stabil – unter normalen Reaktionsbedingungen sind sie quasi nicht zu knacken. Mit einem Trick gelang es jetzt jedoch, die widerstandsfähigen Ringe zu öffnen. Das Ergebnis lässt sich als Baustein für offenkettige Moleküle verwenden.

Normalerweise beschäftigen sich synthetische Chemikerinnen und Chemiker damit, neue Bindungen zwischen Atomen zu knüpfen. Besonders Augenmerk legen sie meist darauf, zwei Kohlenstoffatome miteinander zu verbinden – denn die große Mehrzahl der organischen Substanzen besitzt ein Grundgerüst aus Kohlenstoffatomen. Ist solch eine Bindung erst einmal geschaffen, ist es ziemlich schwierig, sie wieder zu lösen: Das kohlenstoffhaltige Rückgrat gilt oft sogar als »unantastbarer« Teil des Moleküls, der sich nicht mehr oder nur sehr ungern an einer chemischen Reaktion beteiligt.

Doch nun hat eine Gruppe organischer Chemiker das Gegenteil bewiesen: Forscher um den Chemiker Xu Qiu von der Universität Peking hat ganz gezielt die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen in organischen Molekülen aufgebrochen, genauer: in als besonders stabil bekannten aromatischen Ringen.

Nützliche chemische Bausteine

Als aromatische Verbindungen bezeichnete man in der Chemie ursprünglich organische Stoffe mit einem charakteristischen Geruch, heute umfasst der Begriff eine ganze Substanzklasse mit bestimmten Eigenschaften. Eines der einfachsten aromatischen Moleküle ist Benzol. Sein Gerüst besteht aus sechs Kohlenstoffatomen, die in einem regelmäßigen Sechseck angeordnet sind. Chemisch sind Benzolringe außerordentlich beständig – zum Teil deshalb, weil sie sechs so genannte delokalisierte Elektronen beherbergen. Diese Elektronen gehören nicht zu einem festen Atom, sondern sind ständig in Bewegung. Die Kohlenstoffatome »teilen« sich die Elektronen.

Aromatische Verbindungen zählen zu den nützlichsten und am häufigsten verwendeten Bausteinen der Chemie. Sie kommen in den beiden wichtigsten Rohstoffen vor, aus denen Chemikalien hergestellt werden – in Rohöl und in Biomasse –, und sind in zahlreichen

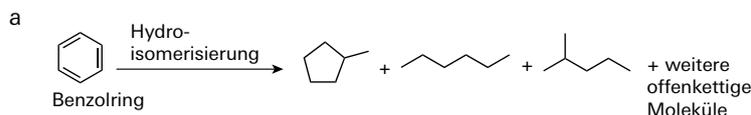
Materialien, Biomolekülen und industriell hergestellten Chemikalien zu finden.

Aromatische Kohlenstoffringe wie beim Benzol gelten als außerordentlich schwer aufzubrechen. Wenn solche Substanzen mit einem weite-

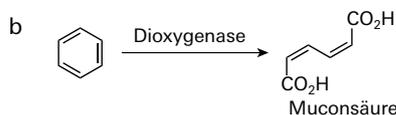
Benzolspaltung

Weil Benzolringe außerordentlich stabil sind, waren bislang nur wenige Reaktionen bekannt, die die Moleküle aufbrechen können.

a) Der Prozess der Hydroisomerisierung öffnet Benzolringe bei hohen Temperaturen. Er ist jedoch nicht selektiv und bringt eine Vielzahl verschiedener Kohlenwasserstoffe hervor.



b) Dioxygenase-Enzyme stellen aus Benzol unter biologischen Bedingungen gezielt Muconsäure her.



c) Die Autoren um Qiu haben eine durch Kupfer katalysierte Reaktion entwickelt. Dabei reagiert ein abgewandeltes Benzolmolekül mit Sauerstoff und einem Oxidationsmittel (Natriumazid, NaN_3) und bildet Alkenylnitrile. Die Bindung, die bei der Umwandlung bricht, ist in der Grafik rot hervorgehoben. Die Kohlenstoffatome im Benzolring sind nummeriert, so dass klar wird, wie aus dem Startmaterial das Produkt entsteht. Vermutlich läuft die Reaktion über eine instabile Zwischenstufe, ein Bis-Nitren, ab. R steht für eine Reihe reaktiver chemischer Gruppen, L ist ein Ligand, Cu steht für Kupfer.



ren Stoff reagieren, dann meist an anderen Stellen des Moleküls – der Ring und sein System mit den delokalisierten Elektronen bleibt dabei in der Regel intakt. Nur unter extremen Bedingungen lassen sich Benzolringe dennoch spalten, zum Beispiel bei der Hydroisomerisierung. Sie verwandelt Benzol bei Temperaturen von über 200 Grad Celsius in gesättigte, teils offenkettige Kohlenwasserstoffe (siehe »Benzolspaltung, a)«).

Die Reaktion öffnet zwar den Benzolring, doch es kommt dabei eine Vielzahl verschiedener Produkte heraus. Der Prozess ist in etwa so, als würde man mit einem Hammer eine Murmel zertrümmern – das ist zwar effektiv, verursacht aber ein ziemliches Durcheinander. Die Natur wiederum hat einen anderen Weg gefunden: Dioxygenase-Enzyme brechen den Benzolring unter natürlichen Bedingungen auf und stellen daraus Muconsäure her (siehe »Benzolspaltung, b)«). Im Gegensatz zur Hydroisomerisierung ist dieser mehrstufige enzymatische Prozess hochselektiv und ergibt durch einen präzisen und kontrollierten Reaktionsweg nur ein einziges Produkt.

Nach der Vorgehensweise der Autoren lassen sich auch viele komplizierte Moleküle umgestalten

Jetzt hat die Gruppe um Qiu aber etwas Bemerkenswertes geschafft. Mit ihrer Methode lässt sich eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung im Ring einer aromatischen Verbindung brechen – und zwar selbst dann, wenn am Ring noch andere chemische Gruppen hängen, die eigentlich viel reaktiver sind. Die Forscher verwen-

den dazu ein starkes Oxidationsmittel – Natriumazid, NaN_3 – und kombinieren es mit einem kupferbasierten Metallkomplex (siehe »Benzolspaltung, c)«). Dank dieser Hilfsmittel entfalten sich die ursprünglich im Sechsring angeordneten Kohlenstoffatome zu linearen Ketten, an deren beiden Enden jeweils ein Stickstoffatom hängt. Das Besondere: Dabei kommen Ketten aus sechs Kohlenstoffatomen heraus, und diese wiederum sind wichtige Bausteine für die Industrie, zum Beispiel bei der Herstellung von Polymeren.

Der Trick: Instabile Zwischenstufen

Natürlich ging das nicht ohne gewisse chemische Tricks. Damit die Methode von Qiu und seinen Kollegen funktioniert, muss das Startmolekül an seinem aromatischen Sechsring eine Gruppe von Atomen besitzen, die Elektronen in Richtung des Rings verschiebt. Dadurch beeinflusst diese Gruppe, wie das Molekül reagiert. Nach Annahme der Autoren ermöglicht sie es, dass sich bei der Reaktion instabile Zwischenstufen bilden, die als Bis-Nitren-Verbindungen bekannt sind. In ihnen befinden sich zwei Stickstoffatome an benachbarten Kohlenstoffatomen des Rings. Wie vorangegangene Studien nahelegen, könnten solche Zwischenstufen das Molekül destabilisieren und so zum Aufbrechen des Rings führen.

Die Forschungsgruppe um Qiu hat darüber hinaus untersucht, wie ihre Reaktion mechanistisch ablaufen könnte. Auf Grund von Computermodellierungen vermuten sie, dass besagte Bis-Nitren-Zwischenstufen am Kupferatom des Katalysators gebildet werden und der Ring sich genau an der Stelle öffnet, an der die Stickstoff tragenden Kohlenstoffatome miteinander verbunden sind. Das ist in ihren Versuchen stets die Stelle neben dem Kohlenstoffatom mit der Elektronen schiebenden Gruppe. Die Stickstoffatome schwächen vermutlich auf Grund ihrer elektronischen Eigenschaften die Bindung zwischen diesen beiden Kohlenstoffatomen.

In ihrer jetzigen Form ist die neuartige Reaktion noch nicht praktisch für

die Herstellung neuer Stoffe nutzbar: Denn zum einen ist Natriumazid explosiv und giftig, zum anderen benötigt man große Mengen des Kupferkatalysators, was einen Industrieprozess unwirtschaftlich machen und eine Menge problematischen Schwermetallabfalls produzieren würde. Doch die möglichen Anwendungen im Labor faszinieren: So zeigen die Autoren etwa, dass sich gemäß ihrem Vorgehen auch viele komplizierte Moleküle umgestalten lassen. Damit schaffen sie eine neue Herangehensweise, um Naturstoffe, Farbstoffe und Pharmazeutika chemisch zu verändern.

Allgemeiner gesprochen könnte das gezielte Aufbrechen von Benzolringen einen Beitrag zum relativ neuen Feld des »molecular editing« leisten. Das ist die Kunst, Atome in organischen Molekülen ganz selektiv einzubauen, herauszunehmen oder auszutauschen. Darüber hinaus könnte der Ansatz Werkzeuge für die chemische Synthese und die Entdeckung neuer Stoffe bereitstellen, die für praktische Anwendungen benötigt werden.

Basierend auf den Arbeiten von Qiu und seinen Kollegen könnten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler künftig Methoden entwickeln, die Benzolringe ganz ohne die Hilfe spezifischer angehängter Gruppen aufbrechen oder andere Atome als Stickstoff in die Kohlenstoffkette des Produkts einführen. Vielleicht fragen sich Chemikerinnen und Chemiker rückblickend einmal, warum sie nicht schon viel früher nach der Sollbruchstelle von Benzol gesucht haben. ◀

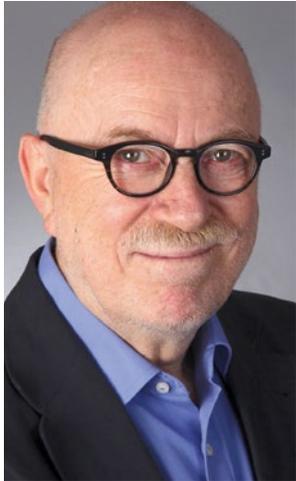
Mark R. Crimmin forscht am Molecular Sciences Research Hub am Institut für Chemie des Imperial College London.

QUELLE

Qiu, X. et al.: Cleaving arene rings for acyclic alkenylnitrile synthesis. *Nature* 597, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 597, S. 33–34, 2021



SPRINGERS EINWÜRFE MAN WIRD ÄLTER

**Wodurch erlahmt mit der Zeit unsere Vitalität?
Warum werden manche Tiere uralter? Und wozu ist
ein langes Leben überhaupt gut?**

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

► spektrum.de/artikel/1950079

Für die Altersforschung muss oft der Fadenwurm herhalten. Kaum ein Tier ist erfolgreicher. Unzählige Arten solcher Nematoden bevölkern die Erde, viele machen sich als Parasiten in Pflanzen und Tieren breit, und einige besiedeln den menschlichen Darm. Wie schwinden die Lebensgeister dieser Helden der Evolution?

An der Universität Köln hat sich ein Team von Medizinforschern um David Vilchez den Modellorganismus *Caenorhabditis elegans* vorgenommen, um herauszufinden, was gealterte Vertreter dieses Fadenwurms physiologisch von ihren jüngeren Artgenossen unterscheidet. Dabei spielt die Aktivität des Proteins Ubiquitin eine entscheidende Rolle; es ist, wie sein Name sagt, in den Zellen praktisch aller Organismen allgegenwärtig (»ubiquitär«). In *C. elegans* bewerkstelligt es den Abbau zweier Proteine namens IFB-2 und EPS-8, die bei Übermaß die Muskeln und den Darm eines ausgewachsenen Wurms beeinträchtigen können. Bei alten Nematoden scheint dieser Abbau, die Ubiquitinierung, zu erlahmen, so dass die schädlichen Proteine überhandnehmen (*Nature* 596, S. 285–290, 2021).

Aber warum ist das überhaupt so? Eine biologische Erklärung für das Phänomen des Alterns besagt: Die Evolution selektiert zwar Gene, die für die Ontogenese und sexuelle Fortpflanzung eines jungen Organismus vorteilhaft sind – und das ist bei den für die erwähnten Proteine codierenden Genen tatsächlich der Fall –, doch später dürfen dieselben Gene mit ihren Proteinen durchaus bleibenden Schaden anrichten. Und auch die Schadensregulation durch Ubiquitinierung kann im Alter ruhig erlahmen, denn der Organismus hat seine evolutionäre Fortpflanzungsaufgabe ja schon erfüllt. Also ist Altern, biologisch gesehen, der späte Preis für jugendliche Fitness.

Genug von faden Würmern, die höchstens ein paar Wochen lang leben. Wenden wir uns einem

wahren Methusalem der Meere zu. Der Felsenbarsch *Sebastes aleutianus* vermag in extremen Fällen mehr als 200 Jahre durchzuhalten. Wie und warum er das schafft, fragte sich ein Team von US-Biologen um Peter H. Sudmant von der University of California in Berkeley (*Science* 374, S. 842–847, 2021).

Es gibt durchaus Felsenbarsch-Arten, die es nur auf 20 Jahre bringen. Was unterscheidet sie von unserem Rekordhalter? Sie leben gefährlicher, treiben sich in seichten Salzwassertümpeln herum und sterben öfter eines gewaltsamen Todes als *S. aleutianus*. Der lebt sehr zurückgezogen und bevorzugt Felsnischen in größerer Tiefe, aus denen er sich kaum je hervorwagt. Außerdem verfügt er über ein ausgezeichnetes DNA-Reparatursystem. Das bewahrt ihn viel besser als die kurzlebigeren Barschspezies vor der Akkumulation schädlicher Genvarianten. Vor allem solch genetischer Müll ist für den biologischen Alterungsprozess bei Tieren ausschlaggebend, deren Lebensspanne sich nach Jahren bemisst und nicht nach Wochen.

Warum nur belohnt die Evolution einen alten Knacker mit derart effektiven lebensverlängernden Maßnahmen? Der Hauptgrund ist eine Laune der Natur: Der langlebige Barsch verfügt über eine mit dem Alter wachsende Fortpflanzungskraft. Ein 150-jähriger Felsenbarsch vermag mehr als eine Million Nachkommen pro Jahr zu produzieren. Also ist ein langes Leben für die Art von Vorteil.

Wie man an den gegensätzlichen Beispielen von Wurm und Fisch sieht, korreliert das tierische Lebensalter mit der sexuellen Fitness. Bei uns Menschen fällt die reproduktive Phase recht kurz aus. Wir können die biologische Programmierung freilich überlisten, indem wir bei gesunder Ernährung und sportlichem Lebenswandel ein möglichst langes, produktives und fürsorgliches Alter genießen. Wie ein Elefant, vielleicht.

PALUDIKULTUR NASSE LANDWIRTSCHAFT

Seit Jahrhunderten werden Moore trockengelegt, um sie urbar zu machen. Dadurch entweicht Kohlenstoffdioxid, und das heizt unseren Planeten weiter auf. Deshalb sollen die Flächen wiedervernässt werden. Doch wie lassen sie sich dann wirtschaftlich nutzen?

TORFMOOS Die für Moore typische Gattung *Sphagnum* speichert sehr viel Wasser und eignet sich frisch geerntet als hochwertiges Kultursubstrat für den Gartenbau. Bislang wird hierfür Torf eingesetzt, dessen Vorräte in Mitteleuropa jedoch nahezu erschöpft sind.





Iris Proff (links) ist Kognitionswissenschaftlerin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Amsterdam (Niederlande). **Swantje Furtak** ist Wissenschaftsjournalistin mit biochemischem Hintergrund und Dokumentarfilmerin in Berlin.

► spektrum.de/artikel/1950061



IRIS PROFF

NIEDERLÄNDISCHE VERSUCHSFLÄCHE

Bei Ankeveen testen niederländische Wissenschaftler das Potenzial von Paludikultur. Das Schild weist auf das »Experiment mit nasser Landwirtschaft gegen Bodenabsenkung« hin. Ein Großteil der Niederlande liegt unter dem Meeresspiegel – ein Absacken des Bodens stellt daher eine unmittelbare Bedrohung dar, die durch Wiedervernässung trockengelegter Moore gemindert werden soll.



IRIS PROFF

ORTSTERMIN Tim Pelsma von der niederländischen Wasserbehörde Waternet zeigt die wiedervernässte Testfläche des Moors bei Ankeveen.

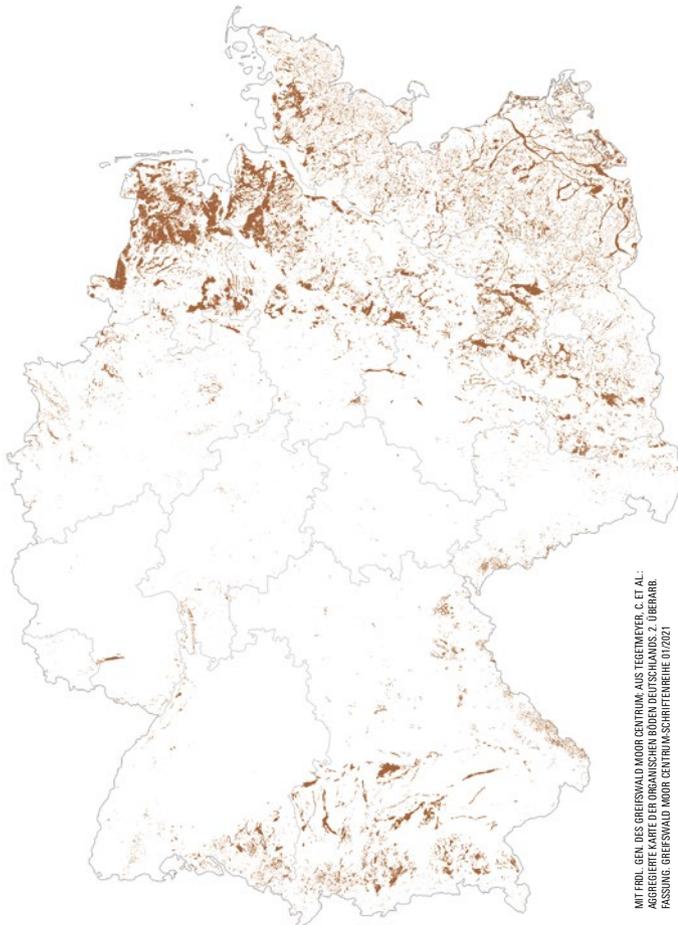
AUF EINEN BLICK PALUDIKULTUR AUF WIEDERVERNÄSSTEN MOOREN

- 1** Moorböden stellen einen enormen Kohlenstoffspeicher dar. Wird das Moor entwässert, verschärfen die dadurch freigesetzten Treibhausgase die Klimakrise.
- 2** Zum Klimaschutz, aber auch zur Vermeidung von Bodenabsenkungen und Moorbränden fordern Wissenschaftler die Wiedervernässung trockengelegter Moorböden.
- 3** Durch den Anbau geeigneter Pflanzen wie Rohrkolben, Schilf oder Torfmoos lassen sich solche Moore wirtschaftlich nutzen (Paludikultur). Doch ohne staatliche Förderung rechnet sich das bislang kaum.

Das Schild am Straßenrand im westniederländischen Dorf Ankeveen kündigt ein »Experiment mit nasser Landwirtschaft« an. Früher grasten hier Biokühe auf der Weide. Heute grenzen mit Planen abgedeckte Sandeiche fünf Becken voneinander ab, in denen Schilf und Rohrkolben im Wasser stehen. Wacklige Holzbretter führen über die sumpfige Wiese um die Becken herum, Solarzellen pumpen Wasser aus dem nahegelegenen Kanal.

Tim Pelsma von der niederländischen Wasserbehörde Waternet betraut seit 2019 das kleine Testgelände. »Diesen Winter haben wir unsere ersten Erträge für den Rohrkolben erzielt«, sagt der Ökologe stolz, während er mit Gummistiefeln durch das knöcheltiefe Wasser wadet.

Ähnliche Experimente führen Forscherinnen und Forscher an vielen Stellen der Welt durch, wo früher Moorgebiete für die Landwirtschaft trockengelegt wurden. Denn entwässerte Moore spielen eine zentrale Rolle für den Klimawandel. Moorböden machen gerade einmal drei Prozent der Erdoberfläche aus, speichern jedoch mit rund 500 Gigatonnen etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie die gesamte Biomasse aller Wälder der Erde.



MIT FERN-SEN DES GEFESWALD MOOR CENTRUM AUS TEGENBERG, C. ET AL.: ABSCHERTEKARTE DER ORGANISCHEN BÖDEN IN DEUTSCHLAND. ÜBERNABE: GASSING, GEFESWALD MOOR CENTRUM SCHRIFTSREIHE 01/2021

VERBREITUNG DER MOORBÖDEN IN DEUTSCHLAND

Die Gesamtfläche der organischen Böden (Moore und Anmoore) in Deutschland beträgt 1,8 Millionen Hektar; das entspricht 5,2 Prozent der Landesfläche. Der größte Teil liegt in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern sowie im Alpenvorland.

»Des Ersten Tod, des Zweiten Not und des Dritten Brot«, lautet eine Redensart über das Moor. Um das Land produktiv bewirtschaften zu können, gab es lange Zeit nur einen Weg: Entwässerung. Mitte des 18. Jahrhunderts begann man damit, viele Moorflächen Europas mit Hilfe von Entwässerungsgräben urbar zu machen.

Die Entwässerung von nassen Landschaften gleicht dem Abgießen der Flüssigkeit aus einem Einmachglas mit Essigurken. In natürlichem Zustand liegen im Moorboden abgestorbene Pflanzenreste wie die Gurken im Glas in einer leicht sauren Flüssigkeit und werden konserviert. Das Wasser lässt keinen Sauerstoff an die obere Bodenschicht und verlangsamt dadurch die Zersetzung der Pflanzenreste durch Mikroorganismen. Unter Wasser sammelt sich organisches Material als dunkler Torf.

Wird jedoch das Moor entwässert, gelangt Sauerstoff an die obere Bodenschicht. Aerobe Mikroorganismen beginnen, den Torf zu zersetzen. Dabei sackt zum einen der Boden ab, zum anderen entstehen die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄). Trockengelegte Moore verwandeln sich somit von Kohlenstoffsenken zu Kohlenstoffquellen.

Weltweit ist – im Gegensatz zu Deutschland – nur ein Bruchteil der Moorflächen entwässert. Doch diese geben jährlich etwa zwei Gigatonnen CO₂ an die Atmosphäre ab. Mit anderen Worten: Lediglich 0,3 Prozent der Landfläche verursachen schätzungsweise fünf Prozent der menschengemachten Treibhausgasemissionen – und übertreffen damit den globalen Flugverkehr.

»Moor muss nass!«

Die Europäische Union gilt nach Indonesien als zweitgrößter Emittent von Treibhausgasen aus trockengelegten Moorböden. Innerhalb der EU hält Deutschland den größten Anteil. Hier sind sogar über 90 Prozent der Moore entwässert, die wiederum jährlich rund 50 Millionen Tonnen CO₂ freisetzen. Grob geschätzt emittiert ein Hektar entwässerter Moorboden jährlich etwa so viel CO₂ wie ein neu zugelassener Pkw nach rund 200 000 gefahrenen Kilometern.

Füllt man wieder Wasser in das »Einmachglas«, wird durch den erneuten Luftabschluss die Verrottung gestoppt, die CO₂-Emissionen gehen zurück. Über die Zeit kann sich neuer Torf bilden, der den Kohlenstoff speichert. Dennoch erreichen wiedervernässte Moore nicht ganz ihren natürlichen Zustand, da sich die Zusammensetzung der Mikroorganismen verändert hat. Dafür entweicht nun mehr Methan. Das Gas hat einen 25-fach höheren Treibhauseffekt als CO₂, verbleibt aber nur etwa zwölf Jahre in der Atmosphäre, so dass es vergleichsweise schnell wieder verschwindet. Außerdem nehmen die Methanemissionen nach der Vernässung jährlich ab. Unterm Strich wirkt ein vernässstes Moor somit deutlich weniger klimaschädlich als ein entwässertes.

»Moor muss nass!«, fordern daher deutsche Forscherinnen und Forscher. Trockengelegte Moore sollen wieder vernässt werden – und zwar so schnell wie möglich. Das kann jedoch die Existenz von Landwirten gefährden, die dadurch ihr produktiv bewirtschaftetes Land verlieren.

Kurz erklärt: Moore

Je nach Wasserspeisung lassen sich Moore in Nieder- und Hochmoore einteilen. Erstere entstehen durch aufgestautes Grundwasser und zeichnen sich durch einen hohen Nährstoffgehalt aus. Hochmoore werden lediglich durch Regenwasser gespeist. Sie sind daher ausgesprochen nährstoffarm.

Einen Kompromiss zwischen Klimaschutz und den Interessen der Landwirtschaft könnte die so genannte Paludikultur darstellen. Die Idee: Landwirte bauen auf den nassen Böden angepasste Pflanzen wie Rohrkolben oder Torfmoose an oder halten andere Tiere wie Wasserbüffel. Damit können sie weiterhin ihre Existenz sichern, während gleichzeitig die Emissionen sinken – so die Theorie. Doch in der Praxis fehlen bisher politische und wirtschaftliche Voraussetzungen für das Gelingen.

Wie eine nasse Insel liegt die »Teichweide« in einer trockenen Landschaft von Weiden und Wiesen. Seit 2019 testet die Universität Greifswald, die in Deutschland als führender Standort der Moorforschung gilt, auf der wiedervernässten Fläche nahe der Kleinstadt Neukalen in Mecklenburg-Vorpommern den Anbau von Rohrkolben (*Typha*). Mit etwa zehn Hektar handelt es sich um die derzeit größte Anbaufläche für die Sumpfpflanze hier zu Lande.

Hans Voigt, Eigentümer des Grundstücks, arbeitet seit 20 Jahren mit der Universität daran, alternative Bewirtschaftungsformen für Moorflächen zu finden, und stellte einen Teil seiner Fläche für die Durchführung des Experiments zur Verfügung. Der Landwirt glaubt an einen Wandel

in der Moorbewirtschaftung und möchte ihn vorantreiben. Doch »ohne wissenschaftliche Begleitung kann man so etwas als Landwirt nicht auf den Weg bringen«, so Voigt.

Rohrkolben gedeiht am besten, wenn das Wasser auf der Fläche steht. Daher baute das Team Wälle um das Gelände und richtete ein Pumpsystem zur nebenliegenden Teterower Peene ein. »Was bereits gut klappt, ist das Wassermanagement«, erklärt Voigt. »Die Wasserstände werden überwacht, und es erfolgt eine Zufuhr oder ein Abpumpen von Wasser, um die notwendige Höhe zu erzielen.« Ist die Fläche ganzjährig von Wasser bedeckt, sinken die Treibhausgasemissionen auf eine Tonne CO₂-Äquivalent pro Hektar und Jahr. Dagegen emittiert ein Hektar der umliegenden entwässerten Weideflächen jährlich zwischen zehn und elf Tonnen.

Neben der energetischen Verwertung als Biomasse eignet sich Rohrkolben auf Grund der vielen luftgefüllten Kammern im Gewebe hervorragend als Isoliermaterial. Drei Jahre nach der Aussaat kann die Pflanze geerntet werden, um daraus Platten für Dach- und Dämmstoffe herzustellen. In der gleichen Liga spielt auch Schilf (*Phragmites australis*), das traditionell seit Jahrhunderten als Baustoff etwa bei Reetdächern eingesetzt wird. Eine 2020 von der Arbeitsgruppe des Greifswalder Landschaftsökonom Volker Beckmann durchgeführte Endverbraucherfrage offenbarte eine Angebotslücke für regionalen Schilf. Paludikultur könnte diese Lücke schließen und gleichzeitig Treibhausgasemissionen reduzieren. Doch ist das auch eine realistische Alternative für den Landwirt?

»Der Knackpunkt werden die Produktionskosten sein«, meint Voigt. In seinen Augen ist die aufwändige Eindeichung der Fläche für einen einzelnen Landwirt finanziell nicht zu stemmen. Außerdem sei noch unklar, mit welchen Maschinen er auf seiner nassen Insel ernten kann. »In der Praxis kann es nur funktionieren, wenn es sich rechnet – und das ist im Moment noch nicht absehbar.«

TREIBHAUSGAS-EMISSIONEN

Wiesen und Weiden auf entwässerten Moorböden setzen jährlich etwa 29 Tonnen Treibhausgase (Summe aus Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas; umgerechnet in CO₂-Äquivalente) pro Hektar frei. Bei Äckern sind es sogar 37 Tonnen. Dagegen emittieren Paludikulturen auf wiedervernässten Flächen lediglich fünf bis acht Tonnen; naturnahe Moore eher noch weniger.



Ackerland auf entwässertem Moor
40 t CO₂-Äq. pro Hektar



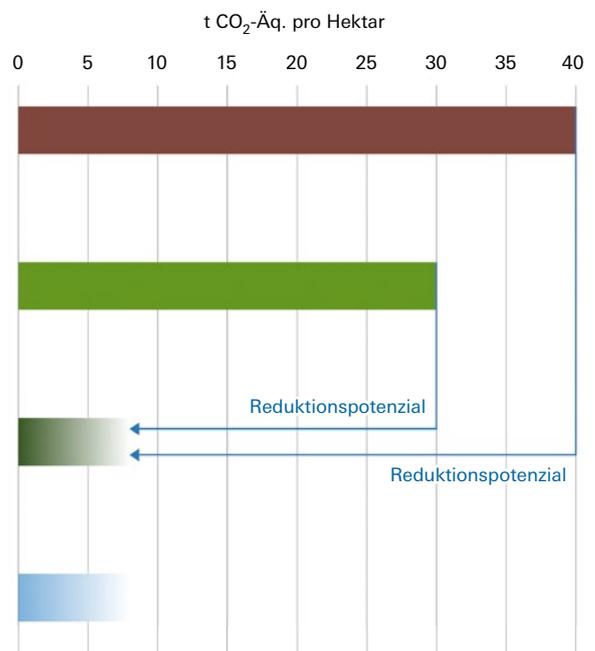
Grünland auf entwässertem Moor
30 t CO₂-Äq. pro Hektar



Paludikultur
0–8 t CO₂-Äq. pro Hektar



naturnahes Moor
0–8 t CO₂-Äq. pro Hektar



MIT FÖHL, GEN, DES GREIFSWALD MOOR ZENTRUM, AUS ABEL, S. ET AL.: KLIMASCHUTZ AUF MOORBÖDEN – LÖSUNGSAUSGANGSPUNKTE UND BEST PRACTICE BEISPIELE. GREIFSWALD MOOR ZENTRUM, SCHRIFTREIHE 02/2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Als näher am Markt erwies sich der Anbau von Torfmoosen (*Sphagnum*). Die Pflanzen sind empfindlich; da sie jedoch ein stabiles Netz bilden, Wasser halten und einen niedrigen Salz- und Nährstoffgehalt aufweisen, sind sie sehr gefragt als Substrat für den Gartenbau. In Paludikultur wachsende Moose könnten zukünftig Torf in herkömmlicher Blumenerde ersetzen und als klimafreundliches Kultursubstrat für die Zucht von Obst, Gemüse und Blumen eingesetzt werden.

Um zu erforschen, ob und wie das möglich ist, richteten die Universitäten Greifswald, Rostock und Oldenburg eine 15 Hektar große Versuchsfläche im niedersächsischen Hankhauser Moor ein. Den mittlerweile gewachsenen Torfmoosrasen können die Wissenschaftler nur noch mit einer Art Schneeschuh überqueren.

»Modellflächen müssen in die Breite«

Laut 2020 veröffentlichten Hochrechnungen des Teams um die Greifswalder Landschaftsökonomin Sabine Wichmann können Torfmoose für die Orchideenzucht bereits eine ökonomische Alternative zu Weißtorf darstellen. Im gewöhnlichen Gartenbau ist Torfmoos noch nicht ganz konkurrenzfähig: Käufer müssten im Schnitt zehn Prozent mehr für Pflanzen bezahlen, schätzt die Studie.

Für ihr Projekt »Moosweit« arbeitet die Universität Greifswald mit dem kommerziellen Torfwerk Moorkultur Ramsloh zusammen. Das Unternehmen lebt vom Torfabbau – warum sieht es sich nach Alternativen um? Offenbar wächst das Bewusstsein, dass Torf aus Mooren endlich ist: Während die Nachfrage von Kultursubstraten für den Anbau von Pflanzen steigt, versiegen die Torfvorkommen in vielen Ländern West- und Mitteleuropas. Silke Kumar vom Torfwerk Moorkultur Ramsloh sieht im Umstieg auf Torfmoose eine langfristige Perspektive im Gartenbausektor. »Modellflächen müssen aber in die Breite«, betont sie.

In Chile und Finnland wird wild wachsendes Torfmoos auf Moorflächen schon in großem Stil geerntet und verkauft. Nach Berechnungen der Universität Greifswald ließe sich der hier zu Lande gewonnene Weißtorf durch eine Fläche von etwa 350 Quadratkilometern Torfmoos ersetzen.

Kurz erklärt: Paludikultur

Unter »Paludikultur« (lateinisch palus = Sumpf, Morast; cultura = Bewirtschaftung) versteht man die land- und forstwirtschaftliche Nutzung nasser oder wiedervernässter Moorböden. Traditionell wird beispielsweise Schilf für Reetdächer angebaut. Inzwischen erprobt man auch experimentell, inwieweit sich Röhrichte als Baustoffe oder Torfmoose als Torfersatz für den Gartenbau nutzen lässt. Eine weitere Möglichkeit liegt in der energetischen Verwertung der Biomasse. Ein wesentliches Ziel der Paludikultur stellt der Erhalt beziehungsweise die Neubildung von Torf dar, um die Bodenabsenkung und die Freisetzung des Treibhausgases CO₂ aus trockengelegten Mooren zu verhindern.

Auch in den Niederlanden, die einst fast vollständig von Torfböden bedeckt waren, wurden zahlreiche Moore trockengelegt. An vielen Stellen baute man Torf ab und nutzte ihn als Brennstoff und Kultursubstrat – große Seen im Westen des Landes zeugen davon. Heute forschen etliche niederländische Institute und Universitäten an Paludikultur. Testflächen für den Anbau von Torfmoos, Rohrkolben und Schilf, Cranberrys, Weide und Pfeilkraut sind über das ganze Land verstreut.

Vorrangig geht es bei diesen Experimenten allerdings weniger um die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Weite Teile des Landes liegen unterhalb des Meeresspiegels. Während dieser von Jahr zu Jahr steigt, sinkt das Land durch die Zersetzung des Torfkörpers weiter ab. Mit der Etablierung von Paludikultur hoffen die Niederländer, die Bodenabsackung zu verlangsamen.

Indonesische Wissenschaftler treibt noch ein weiterer Grund an: Sobald trockene Torfböden brennen, ist es beinahe unmöglich, sie wieder zu löschen. In Indonesien, dem Land mit den höchsten Emissionen aus trockenen Mooren, führten großflächige Entwässerungen für den Anbau von Palmölplantagen zu massiven Moorbränden. Allein im Jahr 2015 verschlangen die Flammen eine Landmasse von 2,6 Millionen Hektar – viereinhalb Mal die Fläche von Bali.

Abgesehen von dem irreversiblen Verlust des Torfkörpers verschlechterte sich die Luftqualität erheblich, mit Folgen für Gesundheit, Infrastruktur und Landwirtschaft. Als auch Malaysia und Singapur eine erhöhte Feinstaubbelastung verzeichneten, reagierte die indonesische Regie-

DIE TEICHWEIDE Nahe der Stadt Neukalen (Mecklenburg-Vorpommern) hat die Universität Greifswald eine zehn Hektar große Fläche eingedeicht und geflutet, um den Anbau von Rohrkolben zu erproben.



SWANLIE FURRACK

rung mit einem ambitionierten Moorrestaurierungsprogramm: Rund 2,5 Millionen Hektar Moor sollen wiedervernässt und bepflanzt werden.

Um das auf lokaler Ebene umzusetzen, rief die Regierung das »Peat Care Village Program« ins Leben. Projektkoordinator Hasbi Berliani zeigt eines der wiedervernässten Dörfer: Wasserläufe durchziehen eine leuchtend grüne Landschaft, unter den Stelzen eines Holzhauses liegen Beete. »Die Gemeinden in den betroffenen Gebieten hängen von der Bewirtschaftung des Moors ab«, erklärt Berliani. »Wir versuchen ihnen die Bedeutung der Wiedervernäsung zu erklären und gleichzeitig einen Weg zu finden, wie sie trotzdem ihr Leben finanzieren können.«

In über 150 Dörfern testet das Programm bereits Paludikulturen für Kunsthandwerk, Bauindustrie oder Fischerei. »Es ist ein guter Anfang«, betont Berliani. »Aber das Programm muss eigentlich in viel größerem Maßstab umgesetzt werden. In Indonesien findet Paludikultur lediglich auf Pilotflächen statt.«

2020 analysierten die Biologin Saritha Kittie Uda von der Universität Palangka Raya und ihre Kollegen, welche Pflanzen sich für die indonesische Paludikultur am besten eignen. Sie bewerteten die Gewächse nach Kriterien der Nachhaltigkeit, der Ökonomie, des Marktzugangs sowie der Akzeptanz bei Landwirten. Besonders gut schnitten Früchte

ROHRKOLBEN Die in Mitteleuropa heimische Gattung *Typha* zeichnet sich durch steil aufwachsende Blätter aus, die vier Meter Höhe erreichen können. Im Blattinneren liegen ausgeprägte Luftkammern, so dass sich Rohrkolben als nachwachsender Rohstoff für Isoliermaterial eignet.

wie Bananen, Ananas und Drachenfrucht ab. Nach gängiger Definition sind diese keine wirklichen Paludikulturen, da der Boden bis 30 Zentimeter entwässert werden muss, so dass es noch immer zu Emissionen aus dem Torfkörper kommt. Doch Landwirte akzeptieren diese Früchte eher, weil sie den Anbau und den Markt hierfür bereits kennen.

Die Regierung müsse die Umstellung der traditionellen Landwirtschaft und den Aufbau eines Markts für neue Paludikulturgewächse finanziell unterstützen, meint Hasbi Berliani. Ähnliche Diskussionen um die Machbarkeit von Paludikultur laufen in einem Land mit niedrigeren Temperaturen, weiten Ackerflächen und tiefen Entwässerungsgräben: in Deutschland.

»Viele Klimaziele sind nicht rechtsverbindlich«

Auch hier zu Lande klaffen Wissenschaft und politische Realität noch weit auseinander. Fachleute vom Greifswald Moor Centrum fordern, dass pro Jahr 50000 Hektar land- und forstwirtschaftlich genutzte Moorflächen in Deutschland vernässt werden. Bis 2050 sollen damit die Emissionen aus dem Moor auf null gebracht werden, da Deutschland nur so das Pariser Klimaziel einhalten könne, argumentieren die Wissenschaftler. Die im Oktober 2021 unterzeichnete Bund-Länder-Zielvereinbarung sieht jedoch vor, die Emissionen aus Moorböden bis 2030 um lediglich fünf Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, also um etwa zehn Prozent zu senken – nicht annähernd genug nach Ansicht der Forscher.

»Das Problem in der EU und den Mitgliedsstaaten ist oft, dass es zwar Klimaziele gibt, doch viele davon nicht rechtsverbindlich und nicht feinkörnig genug sind«, meint der Agrarwissenschaftler Cheng Chen vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung in Müncheberg. Die





SWANLIE FURDAK

WASSERSTANDSMELDUNG Die Biologin Nora Köhn von der Universität Greifswald misst regelmäßig, inwieweit sich der Wasserstand auf der Versuchsfläche Teichweide verändert.

Niederlande und Indonesien sind hier schon weiter. In beiden Ländern stellen die trockenen Moore durch Bodenabsackung und Brände akute Bedrohungen dar – das motiviert zu schnellerem Handeln.

»Es gibt viele Gelder für den Klimaschutz in Deutschland, doch sie werden vor allem für Verkehr oder Energie verwendet und nicht für die Wiederherstellung von Moorgebieten«, betont Chen. Dabei rechnen Experten immer wieder vor, dass die Moorvernässung eine kosteneffiziente Form des Klimaschutzes ist. Noch mangelt es aber in Politik und Öffentlichkeit an Bewusstsein für die Rolle von Mooren im Klimawandel.

Eines der Hauptprobleme beim Übergang von entwässerungsbasierter Landwirtschaft zu Paludikultur ist der fehlende Markt für Materialien aus dem Moor – trotz der breiten Palette an möglichen Produkten, die von Tierfutter und Nahrung über Pflanzensubstrat und Baustoffe bis hin zu Verpackungen aus Schilf und Rohrkolben reicht. Einige Pioniere entwickeln erste Prototypen, doch eine industrielle Produktion in größerem Stil fehlt bislang.

Einer dieser Pioniere ist Richard Hurdig, dessen kleiner Betrieb Zelfo Technology in der brandenburgischen Uckermark unter anderem Bauplatten aus Moormaterialien

entwickelt. »Wir haben viele Ideen und wir zeigen, dass es funktioniert«, erklärt er, »aber wir brauchen Firmen mit Geld.« Die Platten werden aus Pflanzenfasern gepresst, ohne dass dabei Klebstoff oder Bindemittel benötigt wird. Daraus lassen sich Wände, Böden und Möbel herstellen. Hurdig sieht darin ein großes Potenzial für die Uckermark: »Die Gräser sind das Öl unserer Region.«

»Ein Euro Direktzahlungen verursacht 25 Euro Schadenskosten – das ist hanebüchen«

Einen ersten Einsatz fanden Hurdings Platten in einem Paludi-Tinyhouse. Das 2020 in Greifswald gebaute Minihaus besteht hauptsächlich aus Materialien von wiedervernässten Moorflächen und soll das Potenzial von Paludikultur demonstrieren. Unter einem Vordach aus Schilf hindurch führt eine kleine Treppe hinein. Dort fällt der Blick sogleich auf einen Schrank aus gleichmäßig grün-rot-braun gefasert Bauplatten aus Hurdings Herstellung. Einen Schritt weiter fallen die eingelassenen Fenster in der Holzverkleidung der Innenwände auf. Jedes davon präsentiert einen anderen Dämmstoff: weiche Matten aus Pflanzenfasern, gebundene Schilfrohre, feste Platten aus Rohrkolben. Ein komplettes Haus aus nachhaltigen Baustoffen – sieht so vielleicht die Zukunft aus?

Die Gebäudedämmung bietet ein enormes Marktpotenzial für nachwachsende Rohstoffe wie Schilf und Rohrkolben, meint der Ökonom Achim Schäfer von der Universität Greifswald. »Gebäudedämmung ist essenziell für die Einhaltung der Klimaziele. Aktuell werden dafür Stoffe genutzt,

die vorwiegend aus endlichen fossilen Rohstoffen hergestellt werden, wie Styropor oder Mineralwolle«, erklärt Schäfer. »Das könnte man auch mit Paludi-Biomasse machen.«

Hierdurch ergäbe sich ein dreifacher Klimanutzen: Auf Grund der Wiedervernässung sinken die Treibhausgasemissionen aus dem Moor, die bessere Wärmedämmung der Gebäude spart Heizenergie, und die verbaute Biomasse dient zusätzlich als Kohlenstoffspeicher. Auf lange Sicht könnte sich daher das Geschäft mit Paludikultur selbst tragen. Doch noch »klemmt es an der Nachfrage«, meint Schäfer. Um das zu ändern, müsse die Politik verschiedene finanzielle Anreize setzen und so Landwirte und Industrie ermutigen, sich auf das Experiment Paludikultur einzulassen.

Ein wichtiger Impuls muss von der Europäischen Union kommen. Durch die erste Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU erhalten Landwirte Direktzahlungen, die von der Größe der von ihnen bewirtschafteten Flächen abhängen. In Deutschland bekommt ein Landwirt im Schnitt 281 Euro pro Hektar – ohne diese Zahlungen könnten sich viele Betriebe nicht halten. Auch Landwirtschaft auf entwässerten Moorböden profitiert von den Direktzahlungen, ungeachtet der damit einhergehenden Klima- und Umweltschäden. Das Umweltbundesamt beziffert die Folgeschäden für eine Tonne CO₂ mit 195 Euro. Dadurch finanziert die EU mit Steuergeldern direkt den Klimawandel und dessen Folgekosten, sagt Schäfer. »Ein Euro Direktzahlungen verursacht 25 Euro an Schadenskosten. Das ist hanebüchen.«

Auf der anderen Seite erhalten Flächen, auf denen Paludikultur betrieben wird, derzeit keine EU-Direktzahlungen, was sie gegenüber herkömmlicher Landwirtschaft benachteiligt. In dem EU-Beschluss zur Gemeinsamen Agrarpolitik, die ab 2023 in Kraft treten soll, wird die



GRETA GAUDIG, UNIVERSITÄT GREIFSWALD

BAGGER MARSCH! Im Hankhauser Moor (Niedersachsen) wird auf einer Fläche von vier Hektar Torfmoos geerntet.

Paludikultur lediglich erwähnt. Ein Auslaufen der Direktzahlungen für entwässerungsbasierte Landwirtschaft, wie Fachleute es gefordert hatten, ist dagegen nicht vorgesehen.

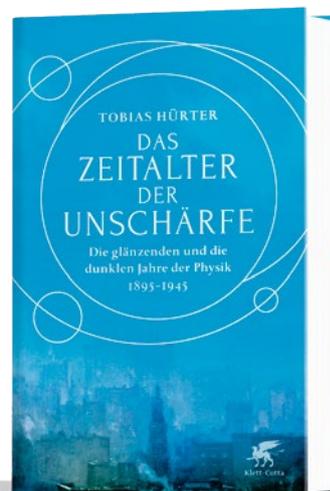
Ein weiterer Anreiz für Paludikultur sollte aus einer konsequenten Bepreisung von CO₂-Emissionen resultieren. Indem Verursacher für Umweltbelastungen zahlen müssen, werden die Folgeschäden für die Gesellschaft in den Produktionsprozess integriert. Aktuell existieren in Deutschland zwei solcher Mechanismen: der EU-weite Emissionshandel, der allerdings nur für ausgewählte Sektoren gilt, sowie seit 2021 eine nationale CO₂-Steuer. Wenn der Preis für Emissionen in den nächsten Jahren wie geplant schrittweise ansteigt, dann werden Produkte aus fossilen Rohstoffen immer teurer. Alternativen aus nachwachsenden Materialien – etwa Dämmplatten aus Rohrkolben, Verpackungen

ANZEIGE

www.klett-cotta.de

Von Marie Curie bis Max Planck, von Albert Einstein bis Werner Heisenberg – die Neuerfindung der Welt

Im goldenen Zeitalter der Physik wurden unser Denken und die Welt revolutioniert. Mitreißend schildert Tobias Hürter diese Epoche und die spektakulären Lebensläufe der großen Genies der Naturwissenschaft. Und er zeigt, wie untrennbar Wissenschaft und Weltgeschehen miteinander verbunden sind. Denn wir können die Welt nicht beobachten, ohne sie zu verändern.



Tobias Hürter
Das Zeitalter der Unschärfe
Die glänzenden und die dunklen Jahre der Physik 1895–1945
400 Seiten, gebunden mit Schutzumschlag
€ 25,- (D), € 25,70 (A)
ISBN 978-3-608-98372-2

aus Grasfasern oder Pflanzensubstrat aus Torfmoos – erhalten dann automatisch einen Wettbewerbsvorteil.

Für die Übergangszeit, in der sich Paludikultur nur bedingt lohnt, bräuchte es einen dritten Anreiz, um zu verhindern, dass die Landwirte auf existenzvernichtenden Umstellungskosten sitzen bleiben. Viele zahlen noch Investitionen in Ställe oder Maschinen der vergangenen Jahre ab. Außerdem können sie die Kosten für Vernässung, Wassermanagement und die Anschaffung von spezialisierter Technik nicht allein stemmen. Entscheidet sich die Gesellschaft für den Klimaschutz, muss sie diesen gemeinsam umsetzen. Landwirtschaftliche und weiterverarbeitende Betriebe benötigten zu Beginn staatliche Förderungen, die ihnen bei dem Schritt in die Paludikultur helfen, fordert Schäfer.



ISTOCK / CACTUSOUP

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Der vierte Pfeiler der Paludi-Ökonomie besteht schließlich in der Honorierung ökologischer Leistungen. Das bedeutet: Wenn Landwirte Emissionen vermeiden, Biodiversität fördern oder Bodenabsackungen minimieren, bekommen sie dafür Geld. So existiert in Brandenburg ein Förderprogramm, das Landwirte bezahlt, wenn sie den Wasserspiegel auf ihren Feldern oder Weiden anheben. Erhöhte Wasserstände reduzieren wiederum nicht nur Emissionen, sondern dienen ebenfalls als Anpassung an den Klimawandel: Wird im Winter das Wasser in der Landschaft gehalten, kann es Wassermangel in trockenen Sommern kompensieren. Und trockene, heiße Sommer werden wir mit der Klimakrise wohl häufiger erleben.

»Der Weg mag radikal erscheinen«

Ökologische Leistungen können aber auch mit privaten Mitteln honoriert werden. Eine nicht zu unterschätzende Möglichkeit liegt im freiwilligen Kohlenstoffmarkt: Firmen oder Privatpersonen erwerben Zertifikate, um ihre Emissionen zu kompensieren – etwa um ihr Geschäft als »klima-neutral« bezeichnen zu können.

Die Kompensation geschieht meist, indem Umweltorganisationen Wälder pflanzen, die CO₂ aus der Luft ziehen. Doch auch das Vernässen von Mooren kann Emissionen ausgleichen. Über den Verkauf von MoorFutures-Zertifikaten ermöglicht das Landwirtschafts- und Umweltministerium von Mecklenburg-Vorpommern jedem Interessenten, für 64 Euro pro Tonne CO₂ die Vernässung der Rehweide in Brandenburg oder des Königsmoors in Schleswig-Holstein mitzufinanzieren. Ähnliche Projekte laufen in den Niederlanden und in Finnland.

In Großbritannien ist der Handel mit Kohlenstoffzertifikaten für Moore am besten etabliert. Über den Peatland Code,

einen nationalen Standard für die Zertifizierung von Moorflächen, können Firmen ihre Emissionen kompensieren, und der Erlös ermöglicht es Landbesitzern, Moore zu regenerieren und zu pflegen. Dabei soll deren Instandhaltung über die nächsten Jahrzehnte hinweg garantiert sein. Jedoch deckt der Peatland Code lediglich Projekte ab, die zum Ziel haben, Naturmoor wiederherzustellen. »Ein enormer Vorteil der Moorrenaturierung ist die Biodiversität sowie die Wasserqualität«, erklärt die Koordinatorin Renée Kerkvliet-Hermans. Da sich über Paludikultur der natürliche Zustand der Landschaft nicht wieder erreichen lässt, bleibt diese bei der Förderung außen vor.

Somit vertritt Großbritannien einen ganz anderen Ansatz: Moore nicht auf ihre ökonomische Leistung zu reduzieren. Unbewirtschaftete, nasse Moorflächen gelten als einzigartige Lebensräume für angepasste Pflanzen- und Tierarten. Paludikultur, so argumentieren auch deutsche Moorforscher, taugt darum nicht als Einheitslösung für trockene Moore. Sie soll nur auf Flächen angewandt werden, deren landwirtschaftliche Nutzung eine Rückkehr zum natürlichen Zustand verbaut. Doch ein natürliches, intaktes Moor ist stets die bessere Wahl.

Ob mit natürlichem Moor oder durch Paludikultur: Das großflächige Vernässen von Moorböden möge radikal und komplex erscheinen, schrieben 2021 die Pflanzenökologin Franziska Tanneberger von der Universität Greifswald und ihre Kollegen in einer Veröffentlichung. Doch diesen Weg *nicht* einzuschlagen, ist »in der derzeitigen Situation nicht minder radikal«. ◀

QUELLEN

Becker, L. et al.: Common reed for thatching in Northern Germany: Estimating the market potential of reed of regional origin. Resources 9, 2020

Hirschelmann, S. et al.: Moore in Mecklenburg-Vorpommern im Kontext nationaler und internationaler Klimaschutzziele – Zustand und Entwicklungspotenzial, Faktensammlung. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 3, 2020

Tanneberger, F. et al.: Towards net zero CO₂ in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in Germany. Mires and Peat 27, 2021

Uda, S. K. et al.: Towards better use of Indonesian peatlands with paludiculture and low-drainage food crops. Wetlands Ecology and Management 28, 2020

Wichmann, S. et al.: Paludiculture on former bog grassland: Profitability of Sphagnum farming in North West Germany. Mires and Peat 26, 2020

WEBLINKS

www.greifswaldmoor.de

Das Greifswald Moor Centrum koordiniert die Forschungen der Universität Greifswald, der Succow Stiftung sowie dem Institut für Dauerhafte Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde.

www.youtube.com/watch?v=5k3owpfSwcA

Dokumentarfilm über die Paludikultur von Swantje Furtak

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile im Abonnement

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonentinnen und Abonnenten von **Spektrum** der Wissenschaft

- ▶ Monatlicher Gratis-Download eines Digitalprodukts: im Januar das **Spektrum** KOMPAKT »Humor«
- ▶ Weitere Digitalprodukte zum stark reduzierten Preis: im Januar **Spektrum** SPEZIAL PMT Jahrgang 2021, **Spektrum** SPEZIAL BMH Jahrgang 2021 und das Digitalpaket »Persönlichkeit«
- ▶ Veranstaltungen des Verlags zum Vorteilspreis
- ▶ Regelmäßige Einladungen zu Redaktionsbesuchen oder zu Vorträgen
- ▶ Monatliche Verlosung von Büchern und **Spektrum**-KOMPAKT-Ausgaben
- ▶ Vergünstigungen und Rabatte bei Partnerangeboten: Onlinekurs **Spektrum**-Schreibwerkstatt; **Spektrum**-Hörbücher von Fliegenglas; Englischkurs von Gymglish; BrainPics: künstlerische Hirnbilder in Perfektion; drei ausgewählte iversity Onlinekurse; **Spektrum**.TV: spannende Dokumentationen und Reportagen

Weitere Informationen und Anmeldung:
[Spektrum.de/plus](https://www.spektrum.de/plus)

UMWELT DIE METHAN-JÄGER

Im größten Erdölfördergebiet der Vereinigten Staaten entweicht massenhaft Methan aus maroden Anlagen. Mit Satelliten- und anderen Überwachungstechnologien will man die undichten Stellen aufspüren – und die Daten öffentlich machen, damit die Verursacher belangt werden können.



Anna Kuchment ist Redakteurin bei »Scientific American« und Wissenschaftsjournalistin bei den »Dallas Morning News«.

» [spektrum.de/artikel/1950064](https://www.spektrum.de/artikel/1950064)

AUF EINEN BLICK DIE ÜBELTÄTER AUFSPÜREN

- 1** Das Treibhausgas Methan befeuert die Erderwärmung. Mehr als die Hälfte der Emissionen ist menschengemacht, und davon geht schätzungsweise über ein Drittel auf die Brennstoffindustrie zurück.
- 2** Ein guter Teil dessen ließe sich recht einfach vermeiden: Das Gas strömt aus kaputten Pipelines und Anlagen – oder wird als lästige Begleiterscheinung der Ölförderung in die Luft abgegeben.
- 3** Die Kunst besteht darin, die Lecks aufzuspüren. Verschiedene Initiativen experimentieren daher mit Satelliten und Sensornetzwerken. Ihre Methoden werden immer zuverlässiger.



Wir überfliegen in einem zweisitzigen Flugzeug eine Gegend rund 50 Kilometer nördlich der Stadt Odessa im US-Bundesstaat Texas. Bis zum Horizont erstreckt sich unter uns ein schachbrettartiges Muster aus schnurgeraden unbefestigten Straßen, dazwischen liegen Quadrate flachen, kahlen Bodens. Wir befinden uns über dem so genannten »Permian Basin«, einem der größten Öl- und Gasfelder der Welt. Auf einer Fläche von rund 400 mal 480 Kilometern reihen sich hier Bohrlöcher und Fördertürme aneinander, ein Großteil von ihnen im westlichen Texas, ein kleinerer Teil im südöstlichen Zipfel von New Mexico, das hier in den größeren Bundesstaat hineinragt. Vor Hunderten von Millionen Jahren war die Region von einem weiten, flachen Meer bedeckt, in dem winzige Organismen riesige Riffe gebildet haben. Nach ihrem Tod zersetzten sich deren Überreste, sammelten sich und verwandelten sich im Lauf der Jahrtausende zu ölhaltigen Ablagerungen, die heute 3000 Meter oder tiefer unter der Erdoberfläche schlummern. Derzeit ist das Gebiet das größte und am schnellsten wachsende Ölfördergebiet in den USA – von hier stammen rund 38 Prozent des Erdöls und 17 Prozent des Erdgases des Landes. Seit das US-Exportverbot für Erdöl Ende 2015 aufgehoben wurde, ist die Förderung dieser Energierohstoffe rasant gewachsen: Aus mittlerweile 150 000 aktiven Bohrlöchern pumpen Unternehmen heute insgesamt viermal so viel Öl ans Tageslicht wie noch vor zehn Jahren.

Etwa 60 Meter unter uns sehe ich ein helles, orange-farbenes Leuchten: die »Fackel« einer Ölquelle. Aus einem hohen, senkrechten Rohr schlagen Flammen in die unruhige Nachmittagsluft. Hier verbrennen Gase, hauptsächlich Methan, die zusammen mit dem Rohöl aus dem Untergrund aufsteigen. Paolo Wilczak, der 23-jährige Pilot, arbeitet als Forscher beim US-amerikanischen Unternehmen Scientific Aviation, das für Kunden wie die Vereinten Nationen, Regierungsbehörden, Umweltschutzgruppen oder Privatunternehmen die Luftqualität überwacht. Er will wissen, ob die Fackel ordnungsgemäß funktioniert – also ob alles Methan wie gewünscht zu Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf verbrennt.

Problem im Fokus

Seit 2019 nehmen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Methanausdünstungen in der Region genau in den Blick. Denn das ertragreiche Gebiet stößt zugleich mehr Methan aus als jede andere Region in den USA. Das Gas entweicht aus Erdöltanks, Verarbeitungsanlagen und anderen Teilen der Infrastruktur ins Freie. Heute weiß man, dass es in der relativ kurzen Zeit, in der es in der Atmosphäre verweilt, das Klima weitaus stärker anheizt als Kohlenstoffdioxid.

Zwar gelangt viel weniger Methan in die Atmosphäre als CO_2 , doch es speichert Wärme über einen Zeitraum von zehn Jahren wesentlich stärker und trägt damit kurzfristig viel mehr zur Erderwärmung bei. Der Gehalt des Gases in der Luft ist seit 2007 unaufhaltsam gestiegen (siehe »Methan in der Atmosphäre«, S. 47). Im April 2021 meldete die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), dass seine Konzentration in der Atmosphäre allein im Jahr 2020 um 14,7 Teile pro Milliarde (ppb, parts per billion)

EINE FACKEL verbrennt Erdgas, das als Nebenprodukt der Ölförderung an die Oberfläche steigt.

gestiegen ist – ein Rekord, und das, obwohl sich die Wirtschaft während der Covid-19-Pandemie deutlich verlangsamt hatte.

Umgekehrt wären die positiven Auswirkungen einer Methanreduktion ebenfalls schnell zu spüren: »Wenn wir die Methanemissionen jetzt reduzieren, verlangsamen wir die globale Erwärmung fast augenblicklich«, erklärt Robert Howarth, Biogeochemiker und Ökosystemwissenschaftler an der Cornell University. Drosselten wir bis 2030 den menschengemachten Methanausstoß um 45 Prozent – das wären pro Jahr 180 Millionen Tonnen Reduktion –, dann könnten wir recht einfach und kostengünstig die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit begrenzen, denn es würde die Erwärmung bis 2040 um ungefähr 0,3 Grad Celsius abschwächen. Das schreiben die Vereinten Nationen im »Global Methane Assessment«, einem Bericht vom Mai 2021. Am 2. November 2021 versprachen gut 80 Staaten auf der COP26-Konferenz, ihren Methanausstoß bis 2030 um 30 Prozent zu verringern – immerhin.

Wilczak lässt die Maschine sinken. »Schauen wir mal, ob diese Fackel ihre Aufgabe erfüllt«, sagt der Pilot, kaum hörbar über dem lauten Motor des Flugzeugs. Während wir eine Schleife um die Luftsäule über der Fackel drehen, saugt ein Apparat über Röhren unter dem rechten Flügel Luft an und leitet sie in ein Spektrometer hinter unseren Sitzen. Das Gerät analysiert die Proben, und sogleich sind auf einem Bildschirm zwischen uns grüne und blaue Linien zu sehen. Die grüne Linie für Kohlenstoffdioxid steigt an, die blaue Linie für den Methangehalt bleibt hingegen konstant

LUKRATIVES GESCHÄFT Texas und New Mexico verfügen über enorme Öl- und Gasvorkommen, die an zehntausenden Stellen erschlossen werden.

niedrig. Die Fackel brennt demnach sauber, es ist alles in Ordnung.

Viele Betreiber von Ölförderstellen fackeln das aufsteigende Erdgas ab, weil sie allein am Öl interessiert sind. Funktionieren die Fackeln ordnungsgemäß, verbrennen sie Methan zu Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf und verringern gleichzeitig die Menge an flüchtigen organischen Verbindungen. Doch die Fackeln versagen manchmal. Außerdem entweicht Methan über undichte Pipelines und wird bei Bedarf aus Sicherheitsgründen abgelassen, um Druck abzubauen und so Explosionen zu verhindern. Und auch gasbetriebene Steuerungen für die Ventile an Bohrlochköpfen, Tanks und anderen Geräten stoßen große Mengen des Klimagases aus. Im September 2020 stieß Wilczak auf ein enormes Leck, das die Grenzen seines Spektrometers sprengte. Weil ein Motor einer Kompressorstation ausgefallen war, gab die Anlage mehr als 12000 Kilogramm Methan pro Stunde ab – und trug damit stündlich etwa so viel zur globalen Erwärmung bei wie 65 Autos in einem Jahr. Wilczak ließ den Betreiber benachrichtigen, und das Leck wurde bis zum nächsten Tag abgedichtet.

Mühsame Suche nach den Lecks

Solche undichten Stellen überhaupt zu finden, ist eine der größten Schwierigkeiten, wenn man das Problem der Methanemissionen in den Griff bekommen will. Seit mindestens 2010 versuchen Fachleute von Universitäten, Energieunternehmen und anderen Einrichtungen zu verstehen, wie sich neue Fördertechniken wie das Fracking (hydraulic fracturing, siehe »Fracking«) und horizontale Bohrungen auf den Ausstoß von Methan auswirken. Eine der prinzipiellen Schwierigkeiten bei diesem Projekt war es bislang, einzelne Emissionsquellen aufzuspüren. Denn Methan ist farb- und geruchlos und mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen.



In jüngster Zeit hat sich das Gebiet um Odessa zu einem Labor entwickelt, in dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit neuen Methoden daran experimentieren, Emissionen zu detektieren. Den Anstoß dazu gaben neue Vorschriften der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde und der Bundesstaaten, die 2015 in Kraft traten und Emissionen sowie Überwachung der Öl- und Gasunternehmen strenger regulieren. Jetzt steuern Forscher Flugzeuge, lassen Drohnen steigen, richten Satelliten aus und installieren komplexe Bodensensornetzwerke. Neue Satelliten, die in Kürze ihren Betrieb aufnehmen werden, sollen Methan auf globaler und lokaler Ebene verfolgen und die Daten für alle Welt frei zugänglich machen. Laut Robert Howarth ist das der beste Weg, um Druck auf die Verursacher der Leckagen auszuüben.

Schon wegen der riesigen Dimensionen der Methan-Austritte ist das Permian Basin der ideale Schauplatz für dieses Unterfangen. Eine von der Harvard University geleitete

Studie vom April 2020 ergab, dass sich mit dem in der Region jährlich ausgestoßenen Methan sieben Millionen Haushalte beheizen ließen. Die Methanleckage liegt dort etwa 60 Prozent über dem nationalen Durchschnitt für Öl- und Gasförderstätten, errechneten die Fachleute. Nach verschiedenen Schätzungen ist etwa jede zehnte Fackel im Permian Basin defekt. Und eine Studie des Environmental Defense Fund (EDF) ergab, dass die Fackeln dort im Durchschnitt nur mit einem Wirkungsgrad von etwa 93 Prozent arbeiten. Das klingt zwar nach einem kleinen Defizit, hat aber große Auswirkungen auf das Klima, sagt EDF-Wissenschaftler David Lyon. Auch eine Studie vom Juni 2021 bescheinigt den Ölfeldern in der Region weit überdurchschnittliche Emissionen. Das Permian Basin »unterscheidet sich qualitativ von den anderen großen Methan ausstoßenden Regionen, die wir in den USA untersucht haben«, urteilt Riley Duren, Mitautor der Studie und Forscher an der University of Arizona und am Jet Propulsion Laboratory der NASA.

Fracking

Beim Fracking (ausführlich: hydraulic fracturing, deutsch: hydraulische Frakturierung) geht es darum, Erdgas oder Erdöl aus Lagerstätten zu fördern, die sonst nicht oder nur schwer zugänglich wären (»unkonventionelle Lagerstätten«). Zu diesem Zweck pumpt man durch ein Bohrloch ein Gemisch aus Wasser, kleinen Partikeln wie Sand oder Keramikgranulaten sowie verschiedenen Chemikalien in die Tiefe, um es dann mit sehr hohem Druck durch eine horizontale Bohrung zum unterirdischen Rohstoffreservoir zu pumpen. Durch den Druck entstehen Risse im Gestein, durch die das Gas oder Öl dann zum Bohrloch strömt. So lassen sich die Energieträger auch dort gewinnen, wo sie in undurchlässigen Gesteinsschichten eingeschlossen sind, etwa in Ton oder Schiefer – das so geförderte Gas wird als Schiefergas bezeichnet. Fracking wird aber auch angewandt, um mehr Rohstoff aus bereits ausgebeuteten konventionellen Quellen herauszubekommen.

Das Verfahren ist seit Mitte des 20. Jahrhunderts bekannt. Aber erst seit Mitte der 2000er Jahre wird es in großem Stil eingesetzt, vor allem

in den USA. Laut der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sind dort heute 73 Prozent des geförderten Erdgases Schiefergas. Das Land ist dank dieser Technik der mit Abstand größte Erdgasproduzent weltweit: 2020 förderte es laut dem Portal Statista rund 915 Milliarden Kubikmeter, fast eineinhalbmal so viel wie das zweitplatzierte Russland.

Die Technik steht aus verschiedenen Gründen in der Kritik. So argumentieren Gegner, das Methan könne durch den Vorgang ins Grundwasser eindringen. Zum anderen sorgen die chemischen Zusätze in den Fracking-Gemischen für Diskussionen: Denn welche Chemikalien genau die Unternehmen dazu einsetzen, müssen sie nicht offenlegen. Nach einer Analyse der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde von 2015 kamen zwischen 2011 und 2013 rund 700 verschiedene Substanzen für diesen Zweck zum Einsatz – manche von ihnen sind unbedenklich, andere gesundheitsschädlich. Außerdem gibt es immer wieder Befürchtungen, die Druckwellen könnten kleine Erdbeben auslösen. Der Effekt ist allerdings umstritten.

Auf Grund dieser Bedenken und weil laut dem Umweltbundesamt nicht genügend Erfahrung besteht, um die Risiken exakt abzuschätzen, ist Fracking für die Förderung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Deutschland seit 2017 untersagt. Lediglich zu Forschungszwecken dürfen Organisationen oder Unternehmen das Verfahren hier zu Lande anwenden. Für die konventionelle Erdgasförderung in Sandgestein ist Fracking hingegen unter Auflagen weiterhin erlaubt und wird seit mehreren Jahrzehnten in Niedersachsen eingesetzt. Die Regelung für Fracking gilt bis Ende 2021; eine Expertenkommission hat im Juni 2021 einen Bericht über den aktuellen Kenntnisstand veröffentlicht. Auf dieser Grundlage soll der Deutsche Bundestag nun entscheiden, ob das Verbot bestehen bleibt.

MEHR ÜBER FRACKING

www.spektrum.de/wissen/1315235

5 Fakten über die Technik

www.spektrum.de/t/schiefergas-und-fracking

Unsere Themenseite im Internet

Das liegt zum einen an der veralteten Infrastruktur. Der erste Boom der Region fand in den frühen 1920er Jahren statt, als eine kleine Gruppe von Investoren entgegen aller Wahrscheinlichkeit auf eine Ölquelle namens Santa Rita No. 1 wettete. Aus dem darauf folgenden Ölräusch ging die heute umfangreiche texanische Industrie für fossile Brennstoffe hervor. Viele Bohrungen sind daher jahrzehntealt – weit älter als diejenigen in vergleichbaren Gebieten, in denen die Infrastruktur zuverlässiger ist, erzählt Artem Abramov, Leiter der Schieferforschung beim Beratungsunternehmen Rystad Energy. Hunderttausende von Bohrlöchern und Pipelineabschnitten wurden zudem einfach aufgegeben, so dass aus ihren maroden Dichtungen und Armaturen Methan entweicht (siehe »Versteckte Übeltäter«).

Der andere Grund ist das schnelle Wachstum: Auf dem Höhepunkt der Produktion im Jahr 2019 bohrten Unternehmen hier 600 neue Löcher pro Monat. An jedem Bohrloch hängen verschiedenste Komponenten, von denen potenziell jede Methan freisetzen kann: angefangen bei einem Separator, der Öl, Gas und Wasser voneinander trennt, über Tanks und Pipelines für die flüssigen Stoffe bis hin zu Kompressoren und Aufbereitungsanlagen, die das aufgefangene Gas als Erdgas für Haushalte aufbereiten sowie zu Ethan, Propan und Butan umsetzen. Entlang dieser Wertschöpfungskette gibt es laut Duren viele Wundepunkte.

Neben Tanks und Bohrlöchern sowie an Verarbeitungsanlagen stehen meist Fackeln, erläutert der Chemieingenieur David T. Allen, Direktor des Zentrums für Energie- und Umweltressourcen der University of Texas in Austin. Nahezu jedes Gerät in der komplizierten Infrastruktur besitzt außerdem gasbetriebene Steuergeräte und Ventile. »Jeder Regler stößt eine relativ geringe Menge Methan aus«, sagt Allen. »Aber es gibt Hunderttausende davon.«

Viele Quellen, ein Produkt

Die unvorstellbar große Menge potenzieller Methanlecks ist der Grund, warum Wissenschaft und Umweltgruppen – sowie einige große Unternehmen, die fossile Brennstoffe fördern – auf eine immer schärfere Überwachung des Permian Basin drängen. Bislang können Vermessungsflugzeuge wie die von Scientific Aviation die Emissionen nur auf ein grobes Gebiet und nicht auf ein bestimmtes Gerät zurückführen, wenn es sich nicht gerade um eine so offensichtliche und isolierte Quelle wie eine große Fackel handelt. In einem Radius von rund einem Kilometer fänden sich in der dicht gedrängten Infrastruktur etwa 20 mögliche Standorte für ein gesuchtes Leck, erzählt Mackenzie Smith, eine leitende Wissenschaftlerin bei Scientific Aviation.

Methan stammt aus einer Vielzahl natürlicher und menschlicher Quellen: zum Beispiel aus Feuchtgebieten, flachen Gewässern und Kläranlagen. Daniel J. Jacob, Professor für Atmosphärenchemie an der Harvard University, schätzt, dass sich die anthropogenen Methanemissionen gleichmäßig auf die Öl- und Gasinfrastruktur, den Kohlebergbau, Mülldeponien, die Viehzucht und die Landwirtschaft verteilen. Die Vereinten Nationen schlüsseln die Anteile im »Global Methane Assessment« vom Mai 2021 noch etwas genauer auf: 40 Prozent des vom Menschen verursachten Methanausstoßes schreiben sie der Land-



PERMIAN BASIN Das heutige Öl- und Gasfördergebiet war vor hunderten Millionen Jahren ein flaches Meer mit ausgedehnten Riffen.

wirtschaft zu, 35 der Industrie für fossile Brennstoffe und 20 Prozent Mülldeponien weltweit.

Warum also die Konzentration auf die Öl- und Gasindustrie? Den Vereinten Nationen zufolge sind die Ausstöße hier »durch technische Maßnahmen leicht zu vermeiden«. Tatsächlich ist es ungleich schwieriger, Emissionen aus der Viehzucht zu kontrollieren als aus einer undichten Ölquelle. Zum anderen wächst die Industrie für fossile Brennstoffe immer noch rasant. Laut Howarth sind Öl und Gas wahrscheinlich die am schnellsten wachsenden Verursacher von Methanemissionen. Ab dem Jahr 2006 nahm das Fracking zu; seither ist auch der Methanausstoß gestiegen.

Sind die Quellen erst einmal gefunden, sind unbeabsichtigte Methanausdünstungen von Ölfeldern relativ einfach zu beseitigen. Laut Jacob und anderen Experten sind die Maßnahmen nicht nur günstig, sie könnten sogar Geld einbringen – etwa, wenn die Unternehmen das Gas verkaufen, statt es abzufackeln oder entweichen zu lassen.

Weil es sich bei den potenziellen Methanquellen um so viele kleine Vorrichtungen handelt, braucht es für die Suche allerdings sehr scharfe Bilder. Per Videokonferenz konnte ich kürzlich Aufnahmen des Permian Basin sehen, die per Flugzeug aus einer Höhe von etwa 5200 Metern gemacht wurden. Dank bildgebender Spektrometer der NASA werden Methan und andere Gase in diesen Aufnahmen sichtbar. So blickte ich auf die mir bekannte Landschaft, die jedoch dort, wo Methan austrat, von leuchtend roten Fahnen überlagert war. »Es sieht aus, als wüteten überall Waldbrände«, fand Duren, der die Aufnahmen erstellt hatte.

Die Detailschärfe solcher Karten beträgt etwa drei bis acht Meter und ist damit weitaus besser als die der Bilder, die aktuell die meisten Satelliten und niedrig fliegenden Flugzeuge liefern. Aber selbst diese Präzision reicht nicht ganz aus, um einzelne Methanquellen auszumachen. »Ohne zusätzliche, höher aufgelöste Daten ist es oft schwierig, die

Ursache zu ermitteln«, erläutert Duren das Problem. Außerdem wird die Infrastruktur im Permian Basin ständig erweitert, so dass die Aufnahmen bereits nach einigen Monaten veraltet sind. Daher sind einige der Flugzeuge inzwischen mit leistungsstarken Kameras ausgestattet und nehmen ein Bild der Infrastruktur am Boden auf, sobald die Spektrometer das Gas detektieren.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass viele Quellen unregelmäßig und unvorhersehbar Methan ausstoßen – die Hälfte von ihnen ist laut Duren nur während eines Viertels der Zeit aktiv. Die EDF, die die Forschungen von Jacob, Allen und anderen finanziert, hat darüber hinaus eine Besorgnis erregende Anzahl so genannter »Superemitter« gefunden, die riesige Mengen Gas ausstoßen. Eine effektive Methanüberwachung muss daher kontinuierlich – mindestens täglich – und über große Gebiete hinweg erfolgen.

Hier kommen die Satelliten ins Spiel. Noch können sie die Emissionen nur über weite Regionen erfassen. In den Jahren 2018 und 2019 nutzte Jacob beispielsweise den TROPOMI-Satelliten der Europäischen Weltraumorganisation ESA und fertigte damit einige der besten Messungen in großem Maßstab von Leckagen aus dem Permian Basin an. Die Auflösung von TROPOMI beträgt jedoch lediglich etwa fünfeinhalb mal sieben Kilometer – eine Fläche, auf der sich Dutzende von Öl- und Gaslagerstätten befinden könnten.

Glücklicherweise werden Wissenschaftler bald eine neue Generation von Sensoren in Betrieb nehmen, die einzelne Anlagen verorten können. Die NASA, der Satellitenhersteller Planet, die University of Arizona sowie die Arizona State University, der Bundesstaat Kalifornien und weitere Beteiligte haben dazu das Projekt »Carbon Mapper« ins Leben gerufen. 2023 soll es mit zwei Satelliten starten und nach einigen Jahren mit insgesamt 18 Satelliten die Treibhausgasemissionen aus dem All überwachen. Das Ziel des Unterfangens ist es, täglich 80 Prozent der größten bekannten Methan und Kohlenstoffdioxid ausstoßenden Gebiete rund um den Globus zu erfassen. Das sind derzeit sieben bis zehn Prozent der besiedelten Landfläche.

Verbesserte Bildung

Jedes Bildpixel soll ein Quadrat von 30 mal 30 Metern repräsentieren. Das Konsortium will die Daten öffentlich zugänglich machen, so dass Regulierungsbehörden, Unternehmen, Umweltgruppen und die breite Öffentlichkeit die Quellen des Ausstoßes einfach und direkt per Suche auf einer Website aufspüren können.

Darüber hinaus will die EDF im Jahr 2023 einen eigenen Satelliten namens MethaneSAT starten, unterstützt mit 100 Millionen Dollar aus dem Earth Fund von Amazon-Gründer Jeff Bezos. Die Ausrüstung wird derzeit produziert und soll in verschiedenen Regionen der Welt genau quantifizieren, wie viele Treibhausgase ausgestoßen werden. Auch die Daten dieser Überwachung sollen öffentlich zugänglich sein.

Sobald beide Gruppen von Satelliten in Betrieb sind, werden sie sich gegenseitig ergänzen. Laut Duren funktioniert das so: »Stellen Sie sich vor, Sie blicken vom Welt- raum aus auf die Erde hinunter und fotografieren das Permian Basin mit zwei Kameras: einer mit einem Mittel- bis Weitwinkelobjektiv und einer mit einem Teleobjektiv.«

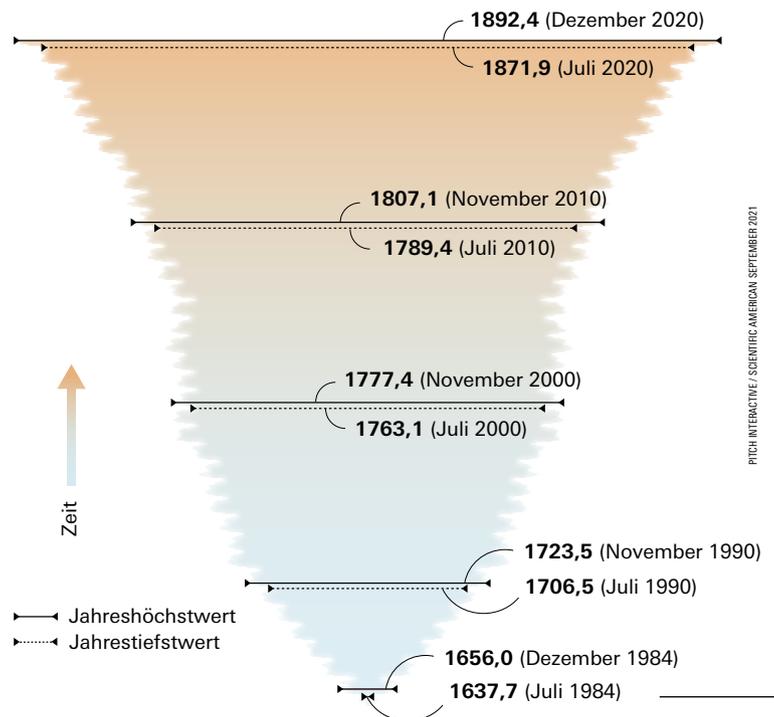
Die Initiatoren hoffen, durch die frei verfügbaren Daten Druck auf die Industrie ausüben zu können. Denn längst nicht alle Unternehmen wollen ihre Emissionen herunterfahren.

Sharon Wilson kennt die Schwierigkeiten aus eigener Erfahrung. Alle paar Monate belädt sie einen gemieteten Geländewagen mit ihrer Kameraausrüstung und macht sich von ihrem Haus in Dallas aus auf die sechsstündige Fahrt in die Ölfelder. Sie ist eine der leitenden Organisatorinnen der Umweltgruppe Earthworks und arbeitet seit Jahren daran, zu zeigen, dass die Emissionen im Permian Basin höher sind als den offiziellen Messungen zufolge.

Methan in der Atmosphäre

Die Atmosphäre enthält heute mehr als zweieinhalbmal so viel Methan wie vor der industriellen Revolution. Der Gehalt des Treibhausgases stieg von 1984 bis etwa 2000 stark, nahm von 2000 bis 2007 nur leicht zu und kletterte dann von 2007 bis 2020 weiter rasch in die Höhe. Der Wert schwankt innerhalb eines Jahres zyklisch – in der nördlichen Hemisphäre ist der Gehalt im Sommer am niedrigsten und im Spätherbst am höchsten (gezackte Ränder der Grafik).

weltweiter Durchschnitt des Methangehalts in der Atmosphäre in Teilen pro Milliarde (ppb)





AUF UND AB Rund 20-mal pro Minute »nicken« die Pferdeköpfe an den Ölförderstellen auf und ab und saugen bei jedem Hub bis zu 40 Liter Flüssigkeit hoch.

Im März 2021 habe ich sie und zwei ihrer Kollegen bei einer mehrtägigen Feldforschung in der Nähe der texanischen Stadt Pecos begleitet, rund 120 Kilometer südwestlich von Odessa und nach eigenen Angaben der weltweit erste Ort mit Rodeo.

»Riechst du das?«, fragte die Umweltaktivistin an unserem ersten Abend, als sie den weißen Wagen von einer staubigen Schotterstraße heruntersteuerte. Wir fuhren in der Dämmerung langsam an Öl- und Gasfeldern entlang, nicht weit von unserem Hotel entfernt. Der Wind trug einen starken Schwefelgeruch heran, von dem uns die Augen tränten. Methan ist zwar geruchlos, wird aber oft von übel riechenden Verbindungen wie Schwefelwasserstoff begleitet.

Die 60-jährige Sharon Wilson schnappte sich ihre Videokamera, stieg aus dem Auto und richtete sie auf eine etwa 200 Meter entfernte Fackel. Aus dieser Entfernung sah das Rohr aus wie ein überdimensionales, aufrechtes Streichholz, aus dessen Spitze orangefarbene Flammen schlugen. Die Fackel dröhnte und piffte so laut wie ein niedrig fliegendes Passagierflugzeug. Die erfahrene Methan-Jägerin schaute durch ihre Infrarotkamera und stellte fest, dass die Flamme sauber brannte und die Tanks in der Nähe kein Leck hatten. Wir stiegen wieder in den Geländewagen und fuhren die verlassene Straße entlang, während sie mit laufender Kamera nach der Quelle des Gestanks suchte. Bald entdeckte sie ein Rohr, das für uns aussah, als sei es außer Betrieb. Doch die Kamera zeigte eine geisterhafte Wolke, die von seinem oberen Ende aus in die Luft stieg: Abgase, die dort nichts zu suchen hatten.

Am nächsten Tag kehrten wir zurück. Auch jetzt schien in dem Rohr nichts zu geschehen, aber die Kamera erfasste Wolken aus Gas. Wilson markierte den Ort auf einer digitalen Karte.

Sharon Wilson sucht und beobachtet Standorte, an denen regelmäßig große Mengen Methan freigesetzt werden. Sie meldet sie den Unternehmen und fügt oft ein Video zur Dokumentation bei. Zudem schickt sie ihre Er-

gebnisse an die texanische Kommission für Umweltqualität sowie an die Texanische Eisenbahnkommission, die 1891 gegründet wurde, um den Eisenbahnverkehr zu regulieren, heute aber die Öl-, Gas- und Bergbauindustrie überwacht. Die Anzahl der Bohrlöcher nehme so schnell zu, erzählt sie, dass die Aufsichtsbehörden nicht Schritt halten können. Manchmal, wenn sie anrufe, sei der gemeldete Standort nicht in den offiziellen Unterlagen zu finden. »Das ist ein Problem. Sie wissen nicht, was vor sich geht. Sie können dieses Chaos hier draußen nicht einmal ansatzweise regeln«, urteilt die Aktivistin. Oft muss sie mehrere Beschwerden einreichen und die Lokalpresse informieren, bevor die Unternehmen aktiv werden.

Wie begeistert die Betreiber über Wilsons Besuche sind, kann man sich denken. Zwar haben sich ExxonMobil, BP und einige andere große Öl- und Gasproduzenten dazu verpflichtet, ihre Emissionen im Permian Basin in den nächsten zwei Jahrzehnten zu reduzieren. Doch nicht alle Unternehmen machen solche Versprechen, und darüber hinaus sind diese nicht verbindlich. Eine im Dezember 2020 von der Dallas Federal Reserve Bank durchgeführte Umfrage ergab, dass nur etwa ein Drittel der in der Region tätigen Unternehmen planen, ihre Emissionen zu verringern oder weniger Erdgas zu verbrennen. Kleine Betreiber, die bloß

Versteckte Übeltäter: Alte und verlassene Bohrlöcher

Ist das meiste Öl und Gas aus einem Bohrloch gefördert, geben die Betreiber die Förderstelle auf. Oft wird die Stelle nicht abgedichtet wie vorgeschrieben. Weil im Permian Basin seit über einem Jahrhundert Öl und Gas gefördert werden, finden sich dort zudem zahlreiche »verwaiste« Bohrlöcher, deren Besitzer längst verstorben sind. Verschiedenen Studien zufolge entweichen aus ihnen große Mengen Methan. Aus einem Bericht der Interstate Oil and Gas Compact Commission geht hervor, dass allein in den USA mehr als 1,6 Millionen unverschlossene und mehr als 56000 verwaiste Bohrlöcher existieren (Zahlen 2018/2019 siehe Grafik) – und vielleicht hunderttausende weitere, die nicht dokumentiert sind. Im Vergleich dazu wurden im Jahr 2018 landesweit nur 2377 Bohrlöcher verschlossen.

Unabhängige Studien deuten darauf hin, dass möglicherweise eine relativ kleine Zahl unverschlossener und verwaister Bohrlöcher für einen Großteil der Methanleckagen verantwortlich ist. Diese Übeltäter aufzuspüren und zu versiegeln könnte den Methanausstoß der Region bereits deutlich reduzieren.

wenige Bohrlöcher unterhalten, haben außerdem vielleicht nicht die nötigen Ressourcen.

Auf einer unserer nachmittäglichen Patrouillen hielten wir an, um ein paar Tanks zu filmen. Ein Mann in einem purpurroten Pick-up hielt hinter uns, sprang aus seinem Führerhaus, fuchtelte wild mit den Armen und forderte uns auf, wegzufahren. »Raus hier, Earthworks«, sagte er, trat an Wilsons Fenster und verdeckte mit seiner Hand ihr Kameraobjektiv.

Unternehmen starten ihre eigenen Projekte

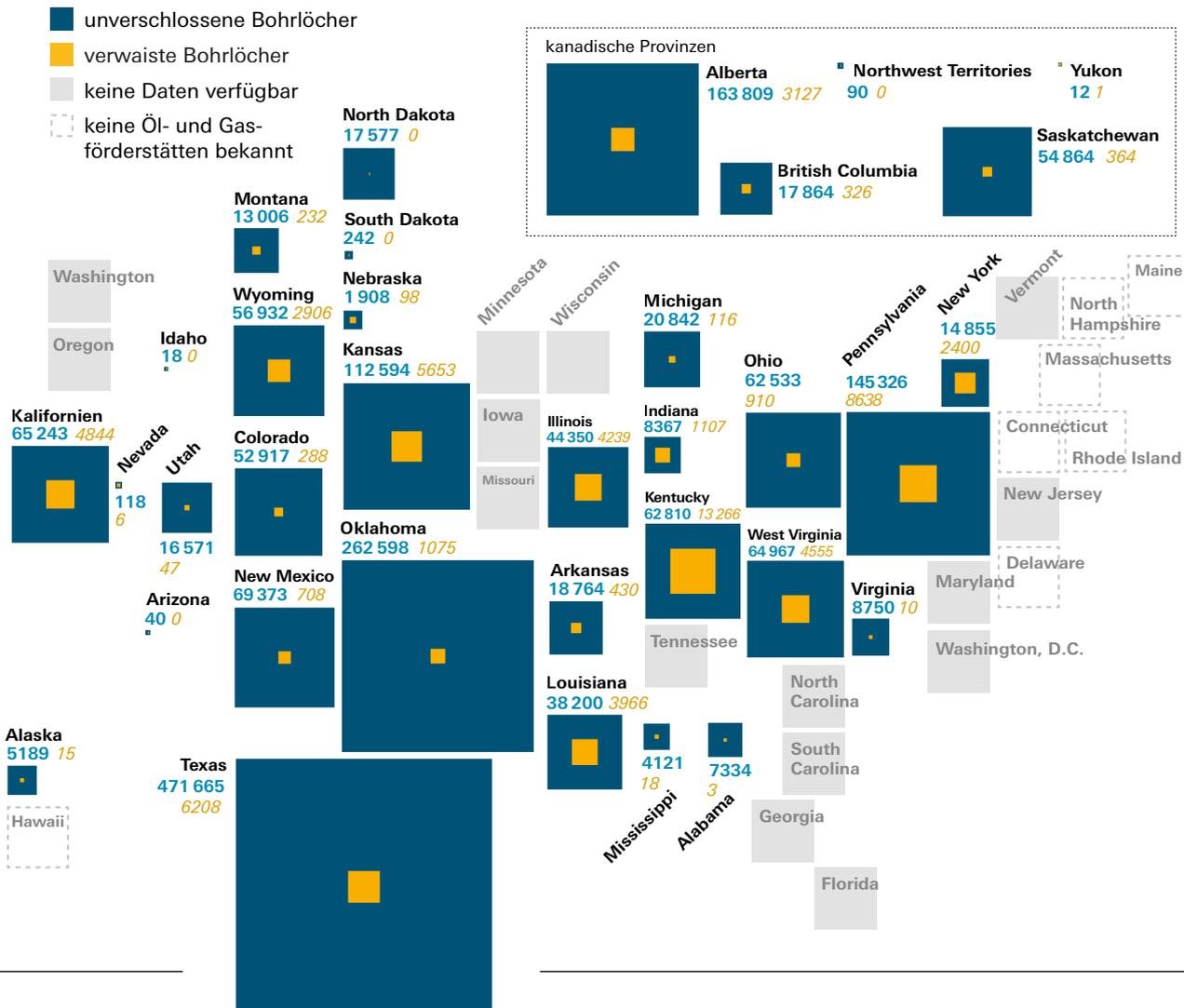
»Was wollen Sie verbergen?«, fragte sie und begann, ihn mit ihrem Smartphone zu filmen. Der junge, bärtige Mann wich zurück, wies sie aber darauf hin, dass sie sich auf einem Privatgrundstück befand. »Texaner glauben an Öl und Gas«, schimpfte er, stieg in seinen Wagen und fuhr davon.

Einige Öl- und Gasunternehmen versuchen wiederum selbst, das Methanproblem in den Griff zu bekommen, und testen neue Techniken auf eigene Faust. So experimentiert die in Houston ansässige Firma TRP Energy mit Flugzeugen, Drohnen und bodengestützten Sensoren zur Überwachung ihrer Emissionen. Laut Mitbegründer Randy Dolan ist

es eine Priorität, Lecks zu verhindern oder zu reparieren – weil Erdgas, bei dessen Produktion weniger Methan ausgestoßen wird, attraktiv sei, um die Zeit bis zur Energiewende zu überbrücken.

Dolan prognostiziert, dass die Unternehmen am Ende ihre eigenen Kombinationen von Methoden einsetzen werden, um die Leckagen unter Kontrolle zu bekommen. Pioneer Natural Resources in Dallas lässt seine größten Anlagen im Permian Basin jährlich überfliegen. Zeigen die Spektrometer hohe Werte an, versucht ein Bodenteam mit Spezialkameras, die Problemstellen ausfindig zu machen.

ExxonMobil, Pioneer, Chevron und weitere Firmen aus der Energiebranche testen zusammen mit David Allen ein bodengestütztes kontinuierliches Überwachungssystem namens Projekt Astra. Das Ziel sei es, »Superemitter schnell zu finden, damit man sie rasch reparieren kann«, so Allen. Im Herbst 2021 hat die Gruppe etwa 50 bis 100 Sensoren auf bis zu 50 Quadratkilometern installiert. Dort befinden sich rund 100 Öl- und Gaslagerstätten. Der Schwerpunkt liegt dabei auf unbemannten Anlagen wie beispielsweise Bohrlöchern, die unbeabsichtigt Emissionen ausstoßen. Denn während in den verarbeitenden Betrieben die Mitar-



PITCH INTERACTIVE. MACH. IPCC REPORT ON OIL AND ORPHAN OIL AND GAS WELLS. STATE AND PROVINCIAL REGULATORY STRATEGIES 2019. (2019 DATA) AND 2020 (2020 DATA). BEVICK, LAURA B.H. AREAS OF HISTORICAL OIL AND GAS EXPLORATION AND PRODUCTION IN THE UNITED STATES. USGS. DIGITAL DATA SERIES (DSS-69-0). 2008 (HISTORISCHE REFERENZEN) / SCIENTIFIC AMERICAN. SEPTEMBER 2021. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

beiter solche Störungen beheben können, halten sich an einem Bohrloch nur selten Menschen auf.

Die eingesetzten Methansensoren sind typischerweise klein, solarbetrieben und lassen sich etwa an einem Mast befestigen, der die Daten aus den Echtzeitmessungen dann über Mobilfunknetze sendet. Jeden Tag könnten die Betreiber so sehen, ob eine Anlage ordnungsgemäß arbeitet oder ungewöhnlich viel Methan ausstößt. Die Forscher wollen verschiedene Arten von Sensoren testen, darunter einen kostengünstigen Metalloxidsensor. Entwickelt hat ihn



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Scientific Aviation; das Unternehmen testet unter dem Namen »Project Falcon« auch sein eigenes System zur kontinuierlichen Überwachung. »Wir sind sehr gespannt, ob sich die Technik durchsetzt«, sagt Mark S. Berg, Executive Vice President of Corporate Operations bei Pioneer Natural Resources. Er schätzt, dass die Methode »sehr viel effektiver und günstiger sein wird als die Kombination aus Luftaufnahmen und privaten Satellitendaten, die einige Unternehmen derzeit nutzen«. Es ist noch offen, ob sich die Firmen an seinem Projekt beteiligen.

Wilson hat die Hoffnung auf eine sauber arbeitende Industrie aufgegeben. In ihren Augen sind die geplanten Überwachungstechnologien Ressourcenverschwendung und verzögern den Übergang zu grünen Energien nur. Wenn die neuen Satelliten in Betrieb genommen werden, vermutet sie, werden die Methanemissionen sogar noch höher sein. Sie hat eine klare Vision für die Zukunft der Erdölförderung im Permian Basin: Das Fracking sollte eingestellt, es sollten keine Bohrgenehmigungen mehr ausgegeben und keine weiteren fossilen Brennstoffe mehr erschlossen werden. Präsident Joe Biden sollte den Klimawandel zum nationalen Notstand erklären, um die erweiterten Befugnisse zu erhalten, das 1975 nach der ersten Ölkrise in den USA verhängte Exportverbot für Rohöl wieder in Kraft zu setzen. »Dass dieses Verbot 2015 gekippt wurde, hat den Fracking-Boom im Permian Basin ausgelöst«, stellt sie fest.

Am Ende hilft nur Transparenz

Inzwischen gibt es einige strengere Regelungen: So verlangt die Texanische Eisenbahnkommission seit November 2020 von den Betreibern genauere Informationen, bevor sie das Abfackeln oder Ausstoßen von Methan genehmigt. Außerdem startete sie während der Pandemie ein eigenes Drohnenprogramm, mit dem sie verfolgt, wie viel Methan bei unkontrollierten Gasaustritten freigesetzt wird. New Mexico verpflichtet die Öl- und Gasunternehmen seit Mai 2021 dazu, 98 Prozent der Erdgasemissionen aufzufan-

gen, das Abfackeln oder Ablassen ist nur in Notfällen erlaubt. Es ist jedoch unklar, ob der Bundesstaat über genügend Inspektoren verfügt, um die Übeltäter im Auge zu behalten.

Künftige Überwachungsmethoden und die daraus gewonnenen Daten könnten Unternehmen und Regulierungsbehörden allerdings zum Handeln zwingen. So haben beispielsweise ExxonMobil und Chevron versprochen, ihre Emissionen bis 2025 beziehungsweise 2028 zu halbieren und das routinemäßige Abfackeln bis 2030 zu beenden. Doch nach einer Analyse von zwei gemeinnützigen Organisationen für nachhaltige Energie, Ceres und Clean Air Task Force, verkaufen viele große Öl- und Gasunternehmen diejenigen ihrer Anlagen, die die Umwelt am stärksten verschmutzen, einfach an kleinere, weniger bekannte Firmen, die dann den Betrieb fortführen. Ceres und die Task Force fanden heraus, dass 195 der kleinsten Produzenten zwar für 22 Prozent der US-Emissionen, aber nur für 9 Prozent der Produktion verantwortlich zeichnen.

Also läuft es doch auf öffentlich zugängliche Daten über die Verschmutzer heraus. Dieser Meinung ist auch Robert Howarth von der Cornell University. »Bald kann aber jeder, der über die Satelliten-Informationen verfügt, die Selbstauskünfte der Industrie überprüfen. Ich denke, das ist ein wichtiger Wendepunkt«, erklärt der Ökosystemwissenschaftler. Er hofft, dass die Unternehmen handeln, wenn sich ihre Aussagen direkt überprüfen und widerlegen lassen.

Von den neuen Satelliten samt den offen zugänglichen Daten könnte nicht nur das Permian Basin profitieren. Denn Methanemissionen sind ein globales Problem. Im Jahr 2020 entdeckten Satelliten der Europäischen Weltraumorganisation zum Beispiel große Methanfahnen, die von der russischen Jamal-Pipeline ausgingen, welche Europa mit Gas aus Sibirien versorgt. Dank der Projekte Carbon Mapper und Methane-SAT werden schließlich regelmäßige Messungen der Treibhausgasemissionen in großen Gebieten weltweit möglich sein. ◀

QUELLEN

Ocko, I.B. et al.: Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environmental Research Letters* 16, 2021

Ravishankara, A.R. et al.: United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition: Global Methane Assessment – benefits and costs of mitigating methane emissions. Nairobi, United Nations Environment Programme, 2021

Robertson, A.M. et al.: New Mexico Permian Basin measured well pad methane emissions are a factor of 5–9 times higher than U.S. EPA estimates. *Environmental Science and Technology* 54, 2020

Zhang, Y. et al.: Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space. *Science Advances* 6, 2020

WEBLINK

<https://permianmap.org>

Hier lassen sich die Methanemissionen im Permian Basin auf einer Karte verfolgen (Projekt des Environmental Defense Fund)

Das beste Wissen für Körper, Geist und Seele

Jetzt im
Handel



Das Magazin für Gesundheit



Den Menschen verstehen

Heft oder Abo bestellen unter: [geo-wissen.de/lesen](https://www.geo-wissen.de/lesen)

ASTRONOMIE AUFTRITT DER BRAUNEN ZWERGE

Sie haben zu wenig Masse für einen Stern, aber zu viel für einen Planeten. Allmählich lernt man mehr über die Entstehung und Eigenschaften der seltsamen Objekte, etwa ihre höchst stürmischen Atmosphären.



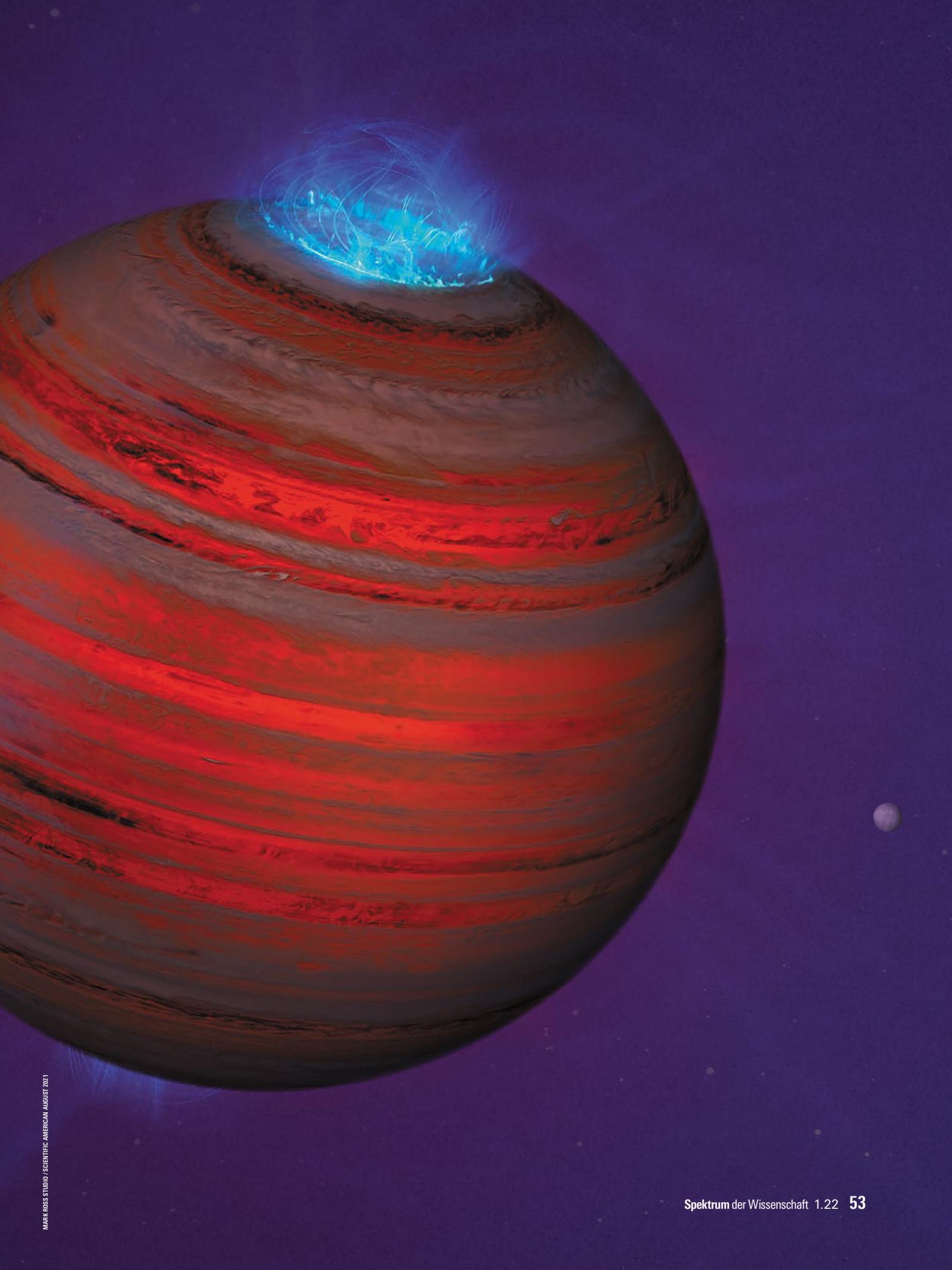
Katelyn Allers erforscht massearme Sterne und Braune Zwerge. Sie ist Professorin an der Bucknell University in Lewisburg (Pennsylvania).

» spektrum.de/artikel/1950067

▶ Der Bau eines astronomischen Observatoriums in der entlegenen Atacama-Wüste in Chile bedeutet viel Aufwand. Doch es gibt gute Gründe, es gerade dort zu errichten, und wer sich in die Gegend begibt, bekommt davon einen deutlichen körperlichen Eindruck. Als ich einmal auf der Suche nach einem geeigneten Ort für ein neues Teleskop auf dem Gipfel des 5600 Meter hohen Cerro Toco stand, musste ich mich ständig darauf konzentrieren, genug von der dünnen Luft in meine Lungen zu bekommen. Die besonderen atmosphärischen Bedingungen sind der große Vorteil dieser Stelle. Auf dem Chajnantor-Plateau, das man vom Gipfel aus überblicken kann, steht eines der leistungsfähigsten Radioteleskope der Welt, das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA).

Die Erdatmosphäre stellt für Himmelsbeobachtungen generell ein Problem dar. Gelegentlich verdecken Wolken die Sicht, außerdem verzerren Luftturbulenzen ständig das Licht, das uns von Objekten im All erreicht. Deswegen scheinen bereits für das bloße Auge Sterne zu funkeln. Moleküle wie Wasserdampf und Kohlendioxid absorbieren manche Wellenlängen, insbesondere das Infrarotlicht. Auf dem Cerro Toco hat man aber schon mehr als die Hälfte der Luft der Erde unter sich, so dass sie Teleskopaufnahmen dort entsprechend weniger beeinträchtigt.

UNGEWÖHNLICHES PLANETEN-SYSTEM Ein Brauner Zwerg würde für unser Auge vermutlich orangerot glimmen – und an den Polen intensiv leuchtende Polarlichter erzeugen. Wie in dieser Illustration besäße er möglicherweise sogar Planeten.



Die Infrarotastronomie beschäftigt sich mit relativ energieärmer Strahlung aus dem Kosmos, die für das menschliche Auge zu langwellig und damit unsichtbar ist. Sie stammt in der Regel von sehr weit entfernten oder schwach leuchtenden Objekten. Zu Letzteren gehören die so genannten Braunen Zwerge, die sich im Infrarotlicht am besten beobachten lassen. Als ich zur Jahrtausendwende mein weiterführendes Studium begann, waren solche Himmelskörper gerade erst entdeckt worden. Die seltsamen Objekte, die in Bezug auf Temperatur und Masse irgendwo zwischen Sternen und Planeten liegen, zogen mich in ihren Bann. Ich wollte herausfinden, wie sie entstanden und beschaffen sind.

Erstaunlich zahlreiche Beinahe-Sterne

Bei meinen Forschungen stellte ich fest: Braune Zwerge sind nicht nur für sich genommen interessant, sondern bilden außerdem eine wichtige Brücke zu unserem Verständnis von Planeten und Sternen. Wir befinden uns jetzt in einer günstigen wissenschaftlichen Phase. Zum einen gibt es noch etliche Exemplare, die ihrer Entdeckung harren, zum anderen bieten die bereits bekannten Objekte eine solide Grundlage, um Theorien zu jenen physikalischen Prozessen zu entwickeln und zu verfeinern, die sich in ihrem Inneren abspielen. Außerdem verfügen wir endlich über geeignete Instrumente, um Braune Zwerge im Detail zu untersuchen, beispielsweise ihre Atmosphärenzusammensetzung oder die Wind- und Rotationsgeschwindigkeiten. Vielleicht finden wir sogar heraus, ob manche Exemplare eigene Planeten beherbergen.

Die meisten Sterne werden durch die Fusion von Wasserstoff zu Helium aufgeheizt. Der Prozess kann sie über Milliarden von Jahren bei gleichmäßiger Temperatur und Helligkeit brennen lassen. Dazu muss jedoch ein Himmelskörper, der sich anschickt, ein Stern zu werden, erst einmal ausreichend Temperatur und Druck im Inneren aufbauen. Schafft er das nicht, kann die Wasserstofffusion nicht starten. Dann wird er zu einem Braunen Zwerg. Das ist der Fall, wenn die Masse maximal acht Prozent der unserer Sonne beträgt, das entspricht etwa der 80-fachen Masse des Jupiters.

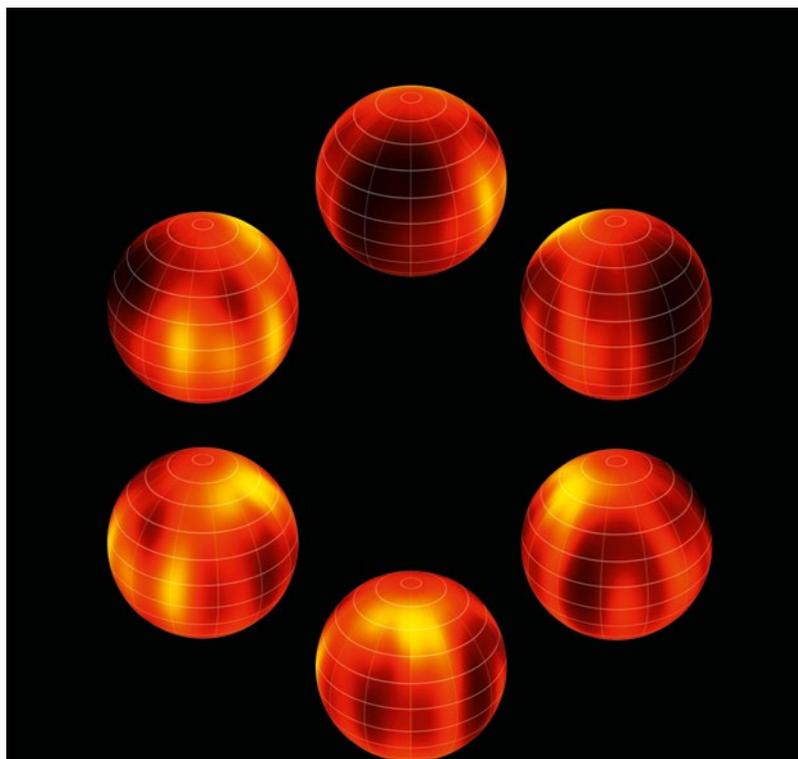
Laut jüngsten Erkenntnissen sind Braune Zwerge fast so häufig wie Sterne und überall zu finden. Sie kommen in stellaren Kinderstuben neben jungen Sternvorläufern vor. Sie begleiten in Doppelsternsystemen Weiße Zwerge, nachdem sie deren Entste-

hung bei der Explosion eines Roten Riesen überlebt haben. Sie machen einige der Sternsysteme aus, die unserer Sonne am nächsten sind – genau genommen die dritt- und viertnächsten extrasolaren Systeme in 6,5 beziehungsweise 7,3 Lichtjahren Entfernung (die beiden nächstgelegenen sind das Alpha-Centauri-System und Barnards Stern). Und obwohl Braune Zwerge so allgegenwärtig sind, haben die meisten Menschen noch nie von ihnen gehört.

Zwar fehlt Braunen Zwergen die Energie aus der Fusion von Wasserstoff, dennoch strahlt die in ihrem Inneren komprimierte Materie Wärme ab. Von anfänglich mehreren tausend Grad Celsius wird ihre Oberfläche im Lauf von Jahrmilliarden kälter. Sie sterben nie, sondern leuchten einfach immer schwächer. Der kälteste bekannte Vertreter hat in seinen Außenbereichen möglicherweise sogar eine Temperatur unter dem irdischen Gefrierpunkt von Wasser. Da Braune Zwerge so kühl sind, liegt der Großteil des von ihnen ausgesandten Lichts im infraroten Wellenlängenbereich. Wenn wir sie aus der Nähe betrachten könnten, hätten sie für unsere Augen wahrscheinlich einen orangefarbenen oder purpurnen Farbton.

Während der mehr als zwei Jahrzehnte seit den ersten Untersuchungen an Braunen Zwergen ist ein relativ klares Bild ihrer grundlegenden Eigenschaften entstanden. Wie unsere Sonne bestehen Braune Zwerge weitaus überwiegend aus Wasserstoff. Die Temperaturen in den oberen Atmosphärenschichten sind jedoch kühl genug für die Bildung einer Vielzahl von Molekülen. Bei fast allen Exemplaren lassen sich Signale von Wasserdampf ausmachen. Mit abnehmender Temperatur ändern sich die chemischen Vorgänge, und andere Moleküle spielen eine stärkere Rolle. Die Entwicklung hängt von der Masse und dem Alter des Braunen Zwergs ab. Beispielsweise wird ein Exemplar mit der 40-fachen Masse des Jupiters im Lauf der ersten 100 Millionen Jahre eine ähnliche atmosphärische Zusam-

WOLKENDECKE Infrarotaufnahmen des relativ nahe gelegenen Braunen Zwergs Luhman 16 B während einer etwa fünf Stunden dauernden Umdrehung enthüllen atmosphärische Phänomene. Wolken erscheinen als dunkle Flecken, zwischen denen durch Lücken das Licht des heißen Himmelskörpers dringt.



mensetzung haben wie ein roter Zwergstern und etwa Titanoxid und Kohlenmonoxid enthalten. Im Zeitraum zwischen 100 und 500 Millionen Jahren kühlt die Atmosphäre ab, und es bilden sich Staubwolken aus Mineralen wie Enstatit und Quarz. Sie lösen sich zirka eine Milliarde Jahre später auf und sinken ab. Dann wird Methan zum dominierenden Molekül in der oberen Atmosphäre. Beim kältesten bekannten Braunen Zwerg gibt es Anzeichen für Wassereiswolken sowie Wasserdampf und Methan. Ähnlich wie bei Jupiter dürfte seine Atmosphäre außerdem erhebliche Mengen von Ammoniak enthalten.

Abgesehen davon sind viele Eigenschaften Brauner Zwerges noch völlig unbekannt. Die seltsame Natur der Himmelskörper hat zu einigen weit hergeholtten Ideen geführt. Sie galten eine Zeit lang als mögliche Kandidaten für Dunkle Materie. Die Hypothese wurde allerdings bald verworfen, als klar wurde, dass Braune Zwerges Licht ausstrahlen und ihr Anteil an der Gesamtmasse unserer Galaxie gering ist. Später gab es Spekulationen über potenziell lebensfreundliche Bedingungen in den kühlen oberen Regionen ihrer Atmosphäre. Doch die dort herrschenden Strömungen würden jede Lebensform irgendwann in die unwirtlichen tieferen, heißen Schichten befördern. Zeitweise machten sogar pseudowissenschaftliche Weissagungen einer bevorstehenden katastrophalen Annäherung eines Braunen Zwerges an die Erde die Runde. Für so ein Weltuntergangsszenario gibt es keinerlei Anlass. Ein Brauner Zwerg wäre schon Hunderte oder Tausende von Jahren vor einer Begegnung mit unserem Planeten erkennbar.

Bereits in den 1960er Jahren sagten Wissenschaftler die Existenz Brauner Zwerges auf der Grundlage der damaligen Kenntnisse über die Entstehung von Sternen und Planeten voraus. Solch eine Zwischenkategorie erschien nur folgerichtig. Aber es fand sich partout kein entsprechendes Objekt am Himmel. Letztlich stellte sich heraus, dass Braune Zwerges schlicht enorm schwach leuchten und der Gutteil ihrer Strahlung auf den Infrarotbereich entfällt. Die Technik zum Beobachten solcher Wellenlängen steckte damals noch in den Kinderschuhen und war der Aufgabe nicht gewachsen.

Ungewöhnliche spektrale Eigenschaften deuteten auf unbekannte Objekte hin

Dann kam das Jahr 1995, das in mehrerer Hinsicht ein großes für die Astronomie werden sollte. Einerseits entdeckten die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz den ersten Exoplaneten um einen Stern, 51 Pegasi b. Dafür erhielten sie 2019 den Nobelpreis für Physik. Andererseits tauchten Braune Zwerges erstmals in den Bildern von Teleskopen auf.

Zunächst wurde Teide 1 aufgespürt. Rafael Rebolo López, María Rosa Zapatero-Osorio und Eduardo L. Martín fanden ihn auf Aufnahmen des 0,8-Meter-Teleskops des kanarischen Teide-Observatoriums. Es arbeitet zwar im optischen Wellenlängenbereich, aber das junge Objekt glühte noch stark genug, um es auf den Bildern zu erkennen. Das Team fand in seiner Atmosphäre die typische spektrale Signatur von Lithium. Da Sterne normalerweise das in ihnen enthaltene Lithium sofort nach ihrer Entste-

AUF EINEN BLICK GESCHEITERTE STERNANWÄRTER

- 1** Seit gut zwei Jahrzehnten gibt es immer mehr Beobachtungen seltsamer Himmelskörper, die in Bezug auf Temperatur und Masse zwischen Sternen und Riesenplaneten liegen.
- 2** Die Braunen Zwerges glimmen nur schwach im infraroten Wellenlängenbereich, denn in ihrem Inneren findet keine Wasserstofffusion statt. Dennoch entstehen die Objekte auf ähnliche Weise wie Sterne.
- 3** Mit besseren Geräten gelingt es zunehmend, mehr über die Braunen Zwerges zu erfahren und herauszufinden, in welchen Aspekten sie sich von Sternen und Planeten unterscheiden.

hung verbrennen, konnte dieser Himmelskörper kein Stern sein. Das Team veröffentlichte seine Entdeckung im September 1995.

Zwei Monate später gab eine Gruppe von Astronomen des California Institute of Technology und der Johns Hopkins University den Fund eines zweiten Braunen Zwerges bekannt. Gliese 229 B ist der Begleiter eines anderen Sterns, fiel auf einem Infrarotbild des Palomar-Observatoriums auf und wirkte von Anfang an seltsam: Er hatte ungewöhnliche spektrale Eigenschaften und schien Methan in seiner Atmosphäre zu besitzen. Für dessen Vorhandensein muss es sehr kalt sein, da aus dem Molekül bei höheren Temperaturen Kohlenmonoxid wird. Späteren Beobachtungen zufolge ist der Braune Zwerg mit einem Durchmesser von fast 129000 Kilometern etwa so groß wie Jupiter, aber mit dessen 70-facher Masse wesentlich dichter.

Als ich im Jahr 2000 auf meine Doktorarbeit zusteuerte, waren bereits weitere Braune Zwerges bekannt, wenngleich noch nicht sehr viele. Ich beschäftigte mich mit der Konstruktion von Infrarotinstrumenten und war auf der Suche nach einem Forschungsthema. Mein Doktorvater untersuchte die Sternentstehung, und so beschloss ich, in Sternentstehungsgebieten nach Braunen Zwerges zu suchen. Schließlich fand ich eine ganze Reihe davon, darunter solche, die hinsichtlich ihrer Masse Planeten nahekommen. Damals war noch unklar, wie sich die Objekte gebildet hatten, und wir wussten auch nicht, ob es eine untere Massenschwelle gibt. Jedenfalls fanden wir mit der Zeit immer kleinere Exemplare.

Insgesamt entdeckte und beschrieb ich im Lauf meiner Dissertation fast 20 Braune Zwerges – für damalige Verhältnisse war das eine Menge. Seitdem hat sich viel getan, und dank verbesserter Instrumente fand man etliche weitere. Die größten Beiträge dazu leisteten der Two Micron All Sky Survey (2MASS), eine um die Jahrtausendwende durchgeführte Himmelsdurchmusterung im Infrarotbereich, sowie das 2009 gestartete Weltraumteleskop Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE). Derzeit sind etwa 3000 Braune

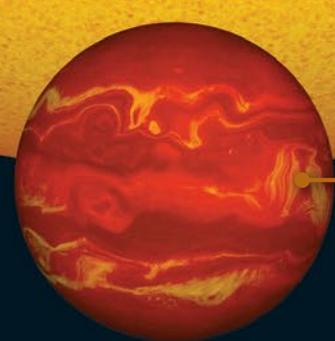
Die Vielfalt der Braunen Zwerge

Die kleinen, wenig leuchtkräftigen Himmelskörper sind überall im Weltraum anzutreffen. Sie sind maximal 80-mal so massereich wie Jupiter und beanspruchen eine eigene Kategorie zwischen Sternen und Planeten. Mit beiden teilen sie gewisse Eigenschaften.

Sonne
Gelber Zwerg
Radius: 696 000 Kilometer
1050-fache Jupitermasse



Proxima Centauri
Roter Zwerg
Radius: 107 000 Kilometer
130-fache Jupitermasse



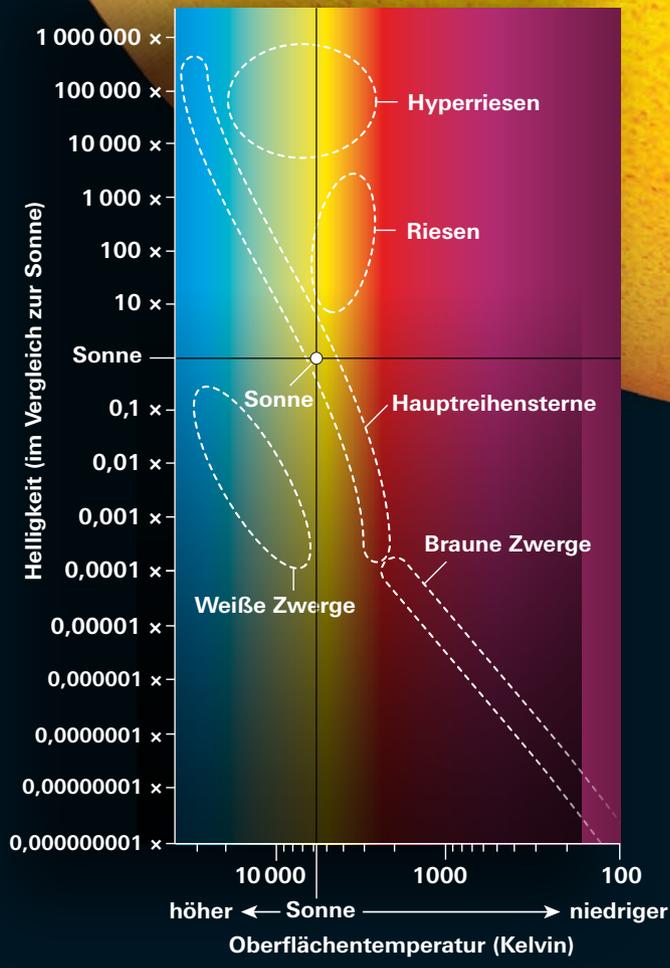
PSO J318.5-22
Brauner Zwerg
(Spektralklasse L)
Radius: 105 000 Kilometer
8,3-fache Jupitermasse



WISE 0855
Brauner Zwerg
(Spektralklasse Y)
Radius: 72 000 Kilometer
3- bis 10-fache Jupitermasse



Jupiter
Gasriese
Radius: 71 500 Kilometer



Hertzsprung-Russell-Diagramm

Trägt man die Helligkeit aller bekannten Sterne gegen deren Temperatur auf, gibt es in einigen Bereichen des Diagramms charakteristische Häufungen. Sie dienen in der Astronomie zum Gruppieren in typische Entwicklungsphasen. Unterhalb der Hauptreihe lassen sich Braune Zwerge einordnen, die kühler und leuchtschwächer sind als Sterne.

ILLUSTRATIONEN: RON MILLER, HERTZSPRUNG-RUSSELL-DIAGRAMM: JEN CHRISTENSEN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2021

Innerer Antrieb

Sterne produzieren ihre Energie durch die Fusion von Wasserstoff zu Helium. Braune Zwerge sind dafür allerdings zu massenarm. Sie glimmen mit Resten von der Wärme durch die Kompression zu ihrer Entstehungszeit sowie bei Exemplaren mit mehr als etwa 13 Jupitermassen anfangs durch Fusionsreaktionen von Deuterium. Diese liefern jedoch deutlich weniger und nur eine kurze Zeit lang Energie.

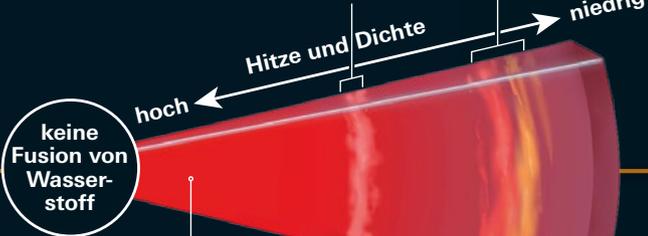
Atmosphären

Sterne, Braune Zwerge und Planeten weisen in ihren Gashüllen jeweils besondere Charakteristika auf. Ein Brauner Zwerg durchläuft dabei mehrere Stadien: Zunächst ähnelt seine Atmosphäre einem roten Zwergstern, aber mit der Zeit kühlt sie ab, und Minerale bilden sich. Wenn diese absinken, wirken die oberen Atmosphärenschichten wie die eines Gasplaneten.

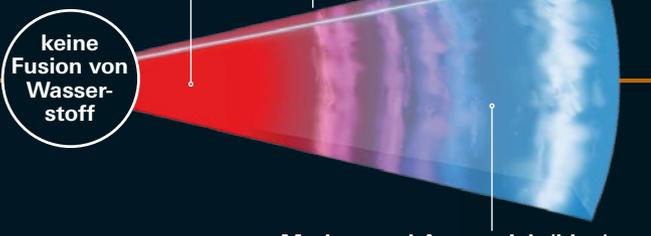
Fusion von Wasserstoff

keine Wolken in der Atmosphäre

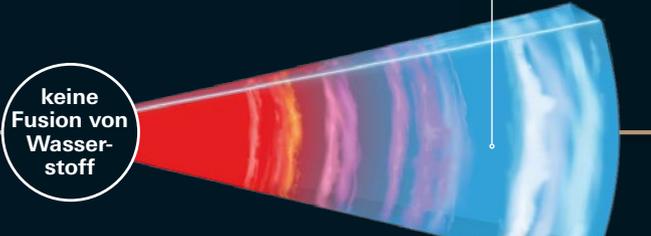
Wolken aus Kalziumtitanat und Kalziumaluminiumoxid
Magnesiumsilikat- und Eisenwolken



Kohlenstoffmonoxid (rot)
Wolken aus Wassereis
Sulfidwolken
Salzwolken



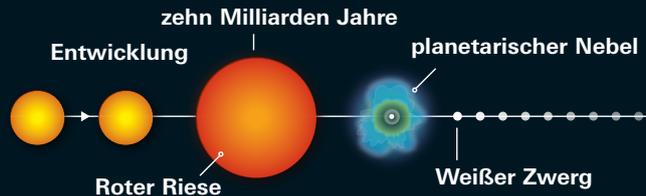
Methan und Ammoniak (blau)



Querschnitte nicht maßstabsgetreu

Gelber Zwerg (Stern)

Unsere Sonne ist ein Vertreter dieser Art von Sternen, in denen Wasserstoff zu Helium fusioniert und die auf diese Art etwa zehn Milliarden Jahre lang brennen, bis der Wasserstoffvorrat weitgehend aufgebraucht ist. Anschließend blähen sie sich zu Roten Riesen auf, in denen Helium zu Kohlenstoff und weiteren schweren Elementen wird. Geht auch dieser Treibstoff zur Neige, werden die äußeren Schichten als Planetarischer Nebel abgestoßen. Die Kerne schrumpfen zu heißen und kompakten Weißen Zwergen.



Roter Zwerg (Stern)

Der Großteil aller Sterne in der Milchstraße gehört zu diesem Typ, der leuchtschwächer und kühler ist als die Sonne. Auch in ihrem Inneren fusioniert Wasserstoff, aber die Vorgänge laufen weitaus langsamer ab als bei Gelben Zwergen. Es kann eine Billion Jahre dauern, bis nicht mehr genug Brennmaterial übrig ist. Dann werden auch sie zu Weißen Zwergen.



Brauner Zwerg

Diese Himmelskörper sind keine Sterne, denn ihre Masse reicht nicht aus, um genügend Druck für eine Fusion von Wasserstoff im Kern auszuüben. Deswegen leuchten sie nur mit der Wärme, die sie zu Beginn ihrer Entstehung entwickelt haben. Sie ändern ihren Typ nie, sondern werden lediglich allmählich kühler und dunkler.



Gasriese (Planet)

Sie gehen nicht aus einer kondensierenden Gaswolke hervor wie Sterne und Braune Zwerge, sondern entstehen im Umfeld junger Sterne aus der übrig gebliebenen Scheibe aus Gas und Staub. Im Sonnensystem sind die Gasriesen Jupiter und Saturn die größten Planeten. Sie enthalten viel Wasserstoff, aber er kann ähnlich wie im Kern Brauner Zwerge nicht fusionieren.

Zwerge bekannt. Es gibt aber noch viel mehr: Schätzungen zufolge enthält die Milchstraße zwischen 25 und 100 Milliarden von ihnen.

Da sie gewissermaßen das kleinstmögliche Ergebnis eines typischen Sternentstehungsprozesses sind, bieten Braune Zwerge eine ganz besondere Gelegenheit, unsere Theorien zu den grundlegenden Schritten bei der Bildung von Sternen und Planeten zu überprüfen. Sterne gehen aus Wolken aus Gas (vor allem molekularem Wasserstoff) und Staub (etwa Silikate und Kohlenstoff) hervor. Wenn eine solche »Molekülwolke« genügend Masse enthält, kollabiert sie durch ihre eigene Schwerkraft und wird im Endeffekt zu einem Stern. Während die Materie nach innen stürzt, verstärkt sich jede noch so kleine Drehbewegung in der Wolke, ähnlich wie eine Schlittschuhläuferin mit angelegten Armen schneller rotiert. Das führt letztlich zur Bildung einer



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

zirkumstellaren Scheibe, die den jungen Stern umkreist und zu einem Schmelztiegel für Planeten wird.

Als Braune Zwerge entdeckt wurden, nahm die Fachwelt an, sie würden sich auf analoge Weise wie Sterne bilden. Aber angesichts der geringen Gesamtmasse war unklar, wie die Gravitationswirkung den inneren Druck des Gases überwinden und einen Kollaps herbeiführen soll. Beim Verfassen dieses Artikels habe ich mir einige Anträge zu Fördermitteln und Teleskopdesigns aus der Anfangszeit meiner Karriere angesehen. Die meisten von ihnen zielten darauf ab, den Mechanismus besser zu durchschauen. Zu jener Zeit gab es mehrere konkurrierende Hypothesen. Manche gingen von einer Unterbrechung während der Entstehung eines Sterns aus, bevor dieser seine endgültige Masse erreicht hat. So könnte er durch unbekannte Wechselwirkungen von weiterem Material in seiner Umgebung getrennt werden. Andere Fachleute vermuteten eine Miniaturversion der Stern- oder eine vergrößerte Variante der Planetenentstehung.

Braune Zwerge entstehen wohl wie Sterne – bloß aus einem weniger ergiebigen Gasreservoir

Die Vielzahl von Erklärungsansätzen ist ein schönes Beispiel für die Menge an verschiedenen, überprüfbaren Vorhersagen, die im wissenschaftlichen Wettstreit der Ideen entstehen. Schließlich wurde klar, dass zahlreiche Braune Zwerge zirkumstellare Scheiben besitzen. Zudem waren allmählich die Massenverteilungen von Sternen und Braunen Zwergen in diversen Umgebungen bestimmt und die Umlaufbahnen von Braunen Zwergen in Doppelsystemen kartiert. Damit kristallisierte sich eine Antwort heraus: Die meisten Brau-

nen Zwerge dürften wie Sterne entstehen, bloß aus einem weniger ergiebigen Gasreservoir. Das Vorhandensein zirkumstellarer Scheiben lässt sogar Planeten möglich erscheinen, obgleich noch keine entdeckt wurden. Rätselhaft ist auch die Existenz vereinzelter Brauner Zwerge mit Massen im Bereich von Riesenplaneten mit weniger als der 13-fachen Masse des Jupiters. Könnten sie in den zirkumstellaren Scheiben massereicherer Sterne entstanden sein – mit anderen Worten, haben sie sich genau wie Planeten gebildet?

Um den Prozessen auf die Spur zu kommen, die zu solchen planetenähnlichen Massen führen, haben meine Kollegen und ich eine Untersuchung mit dem Hubble-Weltraumteleskop durchgeführt. Da es sich in einer Erdumlaufbahn befindet, wird das Licht nicht durch die Atmosphäre absorbiert. Dabei entdeckten wir 2020 ein einzigartiges System von Braunen Zwergen, das ein Beleg für die Hypothese sein könnte, der zufolge Vertreter mit planetenähnlichen Massen auf die gleiche Weise entstehen wie Sterne. Das Oph 98 AB genannte Doppelsystem ist mit drei Millionen Jahren für kosmische Verhältnisse sehr jung, und seine beiden Bestandteile haben die 15- und die 8-fache Masse des Jupiters. Die Himmelskörper sind 200-mal so weit voneinander entfernt wie Erde und Sonne. Daher und wegen der geringen Masse hat das System die geringste Gravitationsbindungsenergie aller bekannten Doppelsysteme. Das bedeutet: Die Körper müssen sich in ihrer jetzigen Konstellation gebildet haben, denn es ist unplausibel, dass zwei separat voneinander entstandene Objekte später zu einem derart schwach gebundenen System zusammenfinden. Das weist auf einen sternähnlichen Entstehungsmechanismus hin. Und das junge Alter spricht dafür, dass Objekte mit Planetenformat für den Vorgang offenbar nicht länger brauchen als Sterne.

Die Wissenschaft rund um Braune Zwerge hat heute ein Stadium erreicht, in dem wir viel präzisere Messungen vornehmen und Detailfragen stellen können. Zu den interessantesten jüngsten Entdeckungen gehören die kältesten Braunen Zwerge, die so genannten Y-Zwerge. Sie haben Temperaturen bis hinunter zu -20 Grad Celsius. Das ist zwar nicht ganz so kalt wie der Jupiter (-145 Grad Celsius), aber es erlaubt dennoch einen Vergleich zwischen Braunen Zwergen und den Atmosphären der Riesenplaneten in unserem Sonnensystem (siehe »Die Vielfalt der Braunen Zwerge«). Y-Zwerge sind schwer zu beobachten, da sie kühl und sehr leuchtschwach sind. Das von ihnen ausgesandte Licht liegt vor allem im Infrarotbereich bei Wellenlängen von drei bis fünf Mikrometern, bei denen die Erdatmosphäre die Beobachtung behindert.

Nichtsdestotrotz konnten meine Kollegen und ich Spektren mehrerer Y-Zwerge aufnehmen. Mit Hilfe theoretischer Modelle schlossen wir auf das Vorhandensein von Wasseriswolken sowie auf eine vertikale Durchmischung der Atmosphäre. In demselben Wellenlängenbereich strahlt Jupiter selbst Licht aus (im Gegensatz zum lediglich reflektierten Licht unserer Sonne), und auch er zeigt hier eine Durchmischung der Atmosphärenschichten. Wir hoffen, durch die Untersuchung von Y-Zwergen Eigenschaften von Jupiter zu identifizieren, die allein auf dessen Charakter als

Flecken und Streifen ähneln Sturmbändern auf den Riesenplaneten des Sonnensystems

Planet zurückzuführen sind – also auf die Tatsache, dass er sich aus der Staubscheibe um die junge Sonne gebildet hat und ständig dem Sonnenlicht ausgesetzt ist. Solche Merkmale ließen sich dann von jenen trennen, die kühlen Himmelskörpern aus Gas allgemein zu eigen sind. Bislang sind unseren Untersuchungen zufolge äußerst dynamische Atmosphären auch bei Braunen Zwergen eher die Norm und keine Besonderheit von Planeten.

Derlei Erkenntnisse haben zu einem neuen Teilgebiet der Astronomie geführt: der Exometeorologie. Obwohl Braune Zwergsterne zu weit entfernt sind, als dass wir ihre atmosphärischen Eigenschaften direkt untersuchen könnten, lassen sich anhand von Helligkeitsveränderungen gewisse Rückschlüsse ziehen. Wenn eine Wolke oder eine andere lokale Struktur ins Blickfeld gerät und wieder verschwindet, verändert sich das vom Braunen Zwerg kommende Licht. Analysen der Helligkeitsschwankungen von Braunen Zwergen über viele Rotationen hinweg haben die Kartierung ihrer Flecken und Streifen ermöglicht. Diese ähneln den bekannten Sturmbändern auf den Riesenplaneten im Sonnensystem. Bei einigen Braunen Zwergen ändert sich die Helligkeit innerhalb einer Umdrehung um bis zu 25 Prozent. Bei jungen Braunen Zwergen sowie bei Temperaturen, bei denen Wolken aufbrechen, sind die Unterschiede besonders groß.

Mittels Helligkeitsvariationen und Radiostrahlung lässt sich die Windgeschwindigkeit herausfinden

Es gibt weitere Gemeinsamkeiten zwischen Braunen Zwergen und Riesenplaneten. Beide neigen beispielsweise zu intensiven Magnetfeldern und Polarlichtern. Beobachtungen der Radiostrahlung enthüllen die Signaturen geladener Teilchen, die in den Magnetfeldern spiralförmig umherlaufen. Die gemessenen Magnetfeldstärken bei Braunen Zwergen sind 10 000-mal größer als bei der Erde und übertreffen diejenigen bei Jupiter um den Faktor 1000.

In einem Einführungskurs in die Astronomie habe ich die Planeten des Sonnensystems behandelt und bei der Gelegenheit erzählt, dass die Länge eines Tages auf Jupiter davon abhängt, wie man ihn misst. Achtet man auf die Bewegung der äußeren Merkmale in der Äquatorregion des Jupiters, ergibt sich eine Rotationsperiode, die etwa fünf Minuten kürzer ist als beim Radiosignal, das die Drehung der inneren Strukturen des Jupiters widerspiegelt. Jemand in der Vorlesung fragte mich nach der Ursache dieses Unterschieds. Ich begründete das Phänomen mit starken Stürmen, die Bereiche am Äquator zusätzlich antreiben.

Nach dem Ende der Stunde habe ich weiter darüber nachgedacht. Die Winde auf der Erde entstehen durch die Umverteilung der von der Sonne eingestrahlten Energie, aber wir sind nicht sicher, welchen Anteil die Sonne an den Stürmen auf Jupiter hat.

Astronomen haben die Radioemission von Braunen Zwergen gemessen, die über den gleichen Mechanismus wie bei Jupiter erfolgt, das heißt durch Magnetfelder. Darum lässt sich eine innere Drehgeschwindigkeit errechnen. Und die Überwachung von Helligkeitsänderungen liefert die Rotationsperiode der Atmosphäre. So kam ich auf die Idee, aus der Differenz erstmals die Windgeschwindigkeit auf einem Braunen Zwerg zu bestimmen.

Der beste Kandidat, um das auszuprobieren, war ein Brauner Zwerg mit bereits nachgewiesener Radioemission. Um die Windgeschwindigkeit zu ermitteln, mussten wir die beiden Perioden mit einer Genauigkeit von besser als 30 Sekunden messen. Wir wollten mit dem Spitzer-Weltraumteleskop die Helligkeitsschwankungen herausfinden und beantragten die Nutzung des Karl G. Jansky Very Large Array in New Mexico zur Beobachtung der Radioperiode. In den gemeinsam mit zwei Kolleginnen und einem Kollegen 2020 veröffentlichten Ergebnissen stellten wir einen Periodenunterschied von nur etwas mehr als einer Minute fest, was einer Windgeschwindigkeit von 2300 Kilometern pro Stunde entspricht. Dieses hohe Tempo auf einem isolierten Braunen Zwerg bedeutet, dass atmosphärische Winde nicht zwangsläufig durch die Umverteilung der von einem Stern eingestrahlten Energie angetrieben werden. Hier sind es anscheinend innere Prozesse; das lässt die Frage offen, inwieweit es sich im Fall von Jupiter analog verhält.

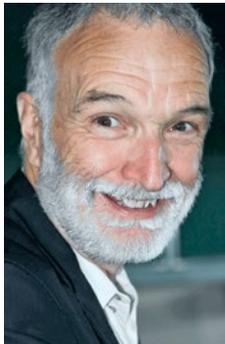
Die Suche nach weiteren Braunen Zwergen setzt nicht nur auf systematische Himmelsdurchmusterungen wie mit 2MASS, WISE und dem Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS); auch Laien können im Rahmen spezieller Projekte wie dem von der NASA initiierten Programm »Backyard Worlds« beitragen, indem sie auf Teleskopbildern verheißungsvolle Objekte identifizieren. Darüber hinaus dürften die bevorstehenden großen Messkampagnen mit demnächst fertig gestellten Observatorien wie dem Vera C. Rubin Observatory und dem Nancy Grace Roman Space Telescope die Kataloge mit vielen neuen Braunen Zwergen füllen. Sobald das James-Webb-Weltraumteleskop in Betrieb ist, kommt ein noch nie da gewesener, von der Erdatmosphäre ungestörter Blick im Infrarotlicht hinzu. Unter den ersten geplanten Beobachtungen sind beispielsweise Untersuchungen der Atmosphärenchemie von Y-Zwergen und sogar eine Fahndung nach Planetensystemen. Denjenigen unter uns, die sich mit den bislang so oft übersehenen Himmelskörpern beschäftigen, stehen aufregende Zeiten bevor. ◀

QUELLEN

Allers, K. N. et al.: A measurement of the wind speed on a brown dwarf. *Science* 368, 2020

Fontanive, C. et al.: A wide planetary-mass companion to a young low-mass brown dwarf in Ophiuchus. *The Astrophysical Journal Letters* 905, 2020

SCHLICHTING! SKURRILE EISPODESTE AUF DEM BAIKALSEE



Selbst bei lang anhaltenden tiefen Temperaturen kann die Eisdecke eines Sees allmählich schrumpfen. Das liegt an der Wärmestrahlung des Tageslichts. Aufliegende Steine schirmen diese unter sich ab, während das restliche Eis abgetragen wird. Sie finden sich daher schließlich auf einer Säule balancierend wieder.

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

► spektrum.de/artikel/1950082

Das Schöne ist eine Manifestation geheimer Naturgesetze

Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)

► In unseren Regionen trifft man auf einem zugefrorenen Gewässer zuweilen Steine, Blätter und Äste an, die sich in einer Mulde befinden, so als wären sie dort unter dem eigenen Gewicht eingesunken (siehe »Schmelzabdruck«). Der Eindruck trügt. Vielmehr absorbieren sie die direkte Sonnenstrahlung und erwärmen sich deswegen über den Gefrierpunkt hinaus. Bei nicht allzu tiefen Temperaturen entsteht zunächst Schmelzwasser und dann mit dessen Verdunstung eine passgenaue Mulde, die bei länger andauernder Sonneneinwirkung immer tiefer wird. Das Eis an sich ist weitgehend transparent und nimmt nur wenig Sonnenenergie auf. Es wird an unberührten Flächen in der Umgebung also kaum angegriffen.

Manchmal lässt sich aber eher das Umgekehrte beobachten, etwa bei lang anhaltenden tiefen Temperaturen auf schneefreien, zugefrorenen Seen wie dem Baikalsee in Sibirien. Dort sind Steine zwar ebenfalls von einer Mulde umgeben, nur statt darin zu liegen, scheinen sie vielmehr darüber zu schweben. Tatsächlich werden sie von einem schmalen Eispodest getragen, das aus der Vertiefung herausragt. Wegen der visuellen Ähnlichkeit zu meditativ genutzten Steintürmchen werden solche Fundstücke gelegentlich als Zen-Steine bezeichnet (siehe »Zen-Stein«).

SCHMELZABDRUCK Auf dem Eis liegende Blätter und andere Objekte absorbieren sichtbare Sonnenstrahlung. Daraufhin geben sie Wärme an das Eis ab.



Die Kontur der Zen-Steine erinnert an pilzartige Felsformationen, wie sie beispielsweise im türkischen Kappadokien zu bewundern sind. Solche »Feenkamine« entstehen, indem härteres Gestein, das auf weicherem liegt, an manchen Stellen die Erosion durch Wasser und Wind abschirmt und damit verzögert.

Es war bereits bekannt, dass die Erosion auch beim Entstehen der Zen-Steine eine wesentliche Rolle spielt.

H. JOACHIM SCHLICHTING



ZEN-STEIN Wie eine Skulptur auf einem Podest erhebt sich über dem Baikalsee ein Stein aus einer Mulde im Eis.

VLADIMIR / GETTY IMAGES / ISTOCK

Bisher ließ sich allerdings nicht erklären, welcher Mechanismus bei derart tiefen Temperaturen das Eis so stark abträgt. Denn einerseits ist die direkte Sonneneinstrahlung jahreszeitlich bedingt sehr schwach und zum anderen erfolgt die Strukturbildung der Zen-Steine unabhängig davon, ob und aus welcher Richtung die Sonne scheint.

Im Oktober 2021 haben die Physiker Nicolas Taberlet und Nicolas Plihon von der Universität Lyon das Problem gelöst. Sie konnten sowohl experimentell als auch anhand eines physikalischen Modells zeigen, dass die Erosion durch die Sublimation von Eis bewirkt wird. Beim Sublimieren einer Substanz geht diese direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über. Das flüssige Stadium wird sozusagen übersprungen. Das ist kein ungewöhnlicher Vorgang – im Winter verschwindet Schnee selbst in unseren Breiten unter bestimmten Bedingungen, ohne zuvor flüssig geworden zu sein (siehe »Spektrum« Februar 2020, S. 78). Ein solcher unmittelbarer Übergang geschieht außerdem beispielsweise beim festen Kohlenstoffdioxid, das umgangssprachlich bezeichnenderweise Trockeneis heißt und bei Umgebungstemperatur in einer stürmischen Reaktion gasförmig wird (siehe »Spektrum« November 2009, S. 52).

Bei der Sublimation von Eis finden Schmelzen und Verdampfen gewissermaßen gleichzeitig statt. Daher muss die dazu nötige Wärme für beides auf einmal aufgebracht werden; obendrein ist beim Wasser jeweils relativ viel Energie dafür erforderlich. Woher stammt sie? Eis absorbiert Licht sichtbarer Wellenlängen kaum. Deswegen kommen fast ausschließlich die langwelligeren Anteile des diffusen Tageslichts in Frage, das aus allen Richtungen einstrahlt.

Aus dessen Intensität lässt sich die Rate der Eiserosion durch Sublimation abschätzen. Hier zeigt sich: Der Schwund geht sehr langsam vonstatten. Dabei schirmt ein auf dem Eis liegender Stein die unter ihm befindliche Fläche ab und schützt sie vor Verlusten. So senkt sich allmählich das Eisniveau außerhalb des Schattens und

der Stein bleibt auf einem Podest liegen. Dieses scheint aus der sinkenden Eisfläche herauszuwachsen und wird der diffusen Strahlung des Tageslichts stärker ausgesetzt. Dadurch trifft die von überall kommende Wärme auf die zunehmend hohen Seiten der Eissäule, die zu einem immer schmaleren Stiel erodiert – der schließlich unter dem Gewicht des Steins bricht.

Taberlet und Plihon haben ihre Theorie durch Laborexperimente abgesichert. Sie führten sie in einer Vakuumkammer durch, wie sie zur Gefrierdrying etwa von Lebensmitteln verwendet wird. Bei den dort herrschenden niedrigen Drücken und Temperaturen konnten die beiden Physiker die Sublimationsrate wesentlich erhöhen und damit die Erosionsdauer entsprechend verkürzen. Sie stellten die Geschehnisse auf dem Baikalsee gewissermaßen im Zeitraffer nach.

Statt Steine verwendeten sie kleine Metallplatten. Diese wurden mit dem Schrumpfen der umliegenden Eisschicht in der Kammer schnell auf ein immer höheres und schmaleres Podest gehoben. Bei Versuchen mit Plättchen unterschiedlicher Art war der Effekt unabhängig vom Material. Insbesondere spielte die Wärmeleitfähigkeit des Stoffs keine Rolle.

Bei einem näheren Blick fällt auf: Ähnlich wie bei den eingangs genannten Blättern auf hiesigen zugefrorenen Flächen bildet sich unter den Zen-Steinen ebenfalls eine Mulde. Denn sie absorbieren – anders als Eis – auch Energie im sichtbaren Bereich des Tageslichts und geben diese als Wärmestrahlung an die Umgebung ab. Das erodiert die in unmittelbarer Nähe befindliche Eisfläche zusätzlich. Hier zu Lande bringt das die Unterlage üblicherweise zum Schmelzen, in Sibirien aber erhöht es wegen der sehr tiefen Temperaturen lediglich die Sublimationsrate.

QUELLE

Taberlet, N., Plihon, N.: Sublimation-driven morphogenesis of Zen stones on ice surfaces. PNAS 118, e2109107118, 2021

QUANTENFELDTHEORIE DIE GRUNDKRÄFTE DER WELT

Seit mehr als 90 Jahren fußt die Teilchenphysik auf Quantenfeldtheorien, allerdings bereitet der Ansatz Fachleuten viele Probleme. Deshalb haben sie ausgeklügelte Tricks entwickelt, um den hartnäckigen Gleichungen doch noch einige Geheimnisse zu entlocken.



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

» [spektrum.de/artikel/1950070](https://www.spektrum.de/artikel/1950070)

► Anfang des 20. Jahrhunderts geriet die Physik ins Schwanken. Prinzipien, die unantastbar schienen, wurden verworfen und das herkömmliche Weltbild nahm völlig neue Züge an: Einerseits schockierte Albert Einstein mit seinen Relativitätstheorien, wonach Raum und Zeit keineswegs statisch sind, sondern sich dehnen und krümmen lassen. Etwa zur selben Zeit wandelte sich mit der Entstehung der Quantenmechanik auch die Vorstellung des Mikrokosmos. Die Grenzen zwischen Teilchen und Wellen verschwammen, zudem wirkte die Natur nicht mehr länger deterministisch, sondern vom Zufall bestimmt. Handfeste Beobachtungsgrößen wie die Geschwindigkeit oder der Aufenthaltsort eines Objekts mussten einer Wahrscheinlichkeitsverteilung weichen.

Obwohl die neuen Konzepte unserer alltäglichen Erfahrung widerstreben, beschreiben sie das Universum erstaunlich gut. Doch schnell fiel Fachleuten auf, dass sich einige Phänomene nicht auf diese Weise erklären lassen. Ein Beispiel dafür ist die spontane Emission, die Albert Einstein bereits 1917 vorhersagte und die Grundlage für Laser bildet: Ein angeregtes Atom strahlt irgendwann ein Energiepaketchen aus, ein so genanntes Photon, um in den Grundzustand überzugehen. Dieser Vorgang lässt sich mit der reinen Quantenmechanik nicht erklären, denn diese setzt eine feste Teilchenzahl voraus. Bei der spontanen Emission



AUF EINEN BLICK WABERnde FELDER

- 1** Bis auf die Gravitation lassen sich alle Grundkräfte durch Quantenfeldtheorien beschreiben. Doch sobald Teilchen stark miteinander wechselwirken, kann man die Gleichungen meist nicht lösen.
- 2** Für solche Fälle haben Fachleute ausgefeilte Methoden entwickelt, die offenbaren sollen, was beispielsweise im Innern von Atomkernen oder in starken elektrischen Feldern geschieht.
- 3** Die verschiedenen Näherungsverfahren bringen jedoch Nachteile mit sich, häufig lässt sich nicht abschätzen, wie verlässlich sie sind.

SERIE

Quantenfeldtheorien

Teil 1: November 2021
Das Fundament der Physik
Kevin Hartnett

Teil 2: Dezember 2021
Stachelige Oberflächen für die Schwerkraft
Charlie Wood

Teil 3: **Januar 2022**
Die Grundkräfte der Welt
Manon Bischoff

ist das jedoch nicht der Fall. Während es anfangs bloß ein angeregtes Teilchen gibt, besteht der Endzustand aus einem Atom und einem Photon.

Da die bisherige Quantenphysik nicht genügte, um alle Teilchenphänomene zu beschreiben, entwickelte Paul Dirac in den 1920er Jahren einen umfangreicheren Formalismus. Dabei orientierte er sich an der Vorgehensweise, die seine Kollegen nutzten, um aus der klassischen Mechanik die Quantenmechanik abzuleiten, und weitete die Prinzipien für elektromagnetische Felder aus. Dieser Vorgang wird daher oft als zweite Quantisierung bezeichnet.

Möchte man eine klassische Theorie wie die Mechanik »quantisieren«, ersetzt man Beobachtungsgrößen wie Ort, Impuls oder Energie durch so genannte Operatoren. Diese entsprechen Matrizen, die unter Umständen unendlich viele Zeilen und Spalten besitzen können. Damit spiegeln sie die Tatsache wider, dass Teilchen mehrere Zustände gleichzeitig annehmen können: Ein Elektron hat beispielsweise überall im Raum eine gewisse Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Aus der Schrödingergleichung lässt sich bestimmen, wie sich ein System zeitlich entwickelt. Die berühmte Formel enthält Wellenfunktionen, die den Zustand eines Systems wiedergeben. Hieraus lassen sich etwa die Orbitale des Wasserstoffatoms berechnen.

Das physikalische Weltbild im Wandel

Dirac erweiterte dieses Bild, indem er die elektromagnetischen Felder und die Wellenfunktionen durch mathematische Operatoren ersetzte. Das war der Anfang der Quantenfeldtheorie des Elektromagnetismus, der Quantenelektrodynamik (kurz: QED), die das Weltbild abermals wandelte: Nun standen nicht mehr Teilchen und Kräfte im Fokus, sondern Quantenfelder, die unsere gesamte Raumzeit durchziehen.

Solche Felder können miteinander und sogar mit sich selbst wechselwirken, wodurch Partikel wie Elektronen oder Quarks entstehen – und wieder verschwinden. Weil der neue Formalismus viele bis dahin unverstandenen Phänomene erklärte, fand er schnell zahlreiche Befürworter. Doch wenige Zeit später offenbarten sich die ersten Schwierigkeiten und die Begeisterung ebte ab. Solche Höhen und Tiefen haben sich in den folgenden Jahrzehnten häufig wiederholt. Selbst heute birgt der Ansatz hartnäckige Probleme – vor allem wenn starke Wechselwirkungen beteiligt sind.

Durch die zweite Quantisierung gelang es Dirac, die spontane Emission zu erklären. Bis dahin verlangten die physikalischen Gesetze ein äußeres elektromagnetisches Feld, damit ein angeregtes Atom ein Photon ausstrahlt. Spontane Emission findet hingegen im Vakuum statt. Indem man elektromagnetische Felder quantenphysikalisch betrachtet, ergeben sich dafür Prinzipien wie die heisenbergsche Unschärferelation. Demnach ist es nicht möglich, Energie und Zeit beliebig genau zu messen – das heißt, die Stärke eines Felds kann kurzzeitig um winzige Werte schwanken. Diese reichen aber schon aus, damit ein angeregtes Atom ein Photon ausstrahlt, um in den Grundzustand zurückzukehren.

Die anschauliche Erklärung konnte Dirac mit mathematischen Berechnungen unterfüttern. Doch die Gleichungen, die sich durch die zweite Quantisierung ergeben, erwiesen sich als zu komplex, um sie exakt lösen zu können. Daher traf er eine Vereinfachung: Er nahm an, dass das Atom nur sehr schwach mit dem elektromagnetischen Feld wechselwirkt. Das ermöglichte es ihm, auf ein nützliches Rechenverfahren zurückzugreifen, das eine komplizierte Funktion in der Nähe eines Punkts vereinfacht.

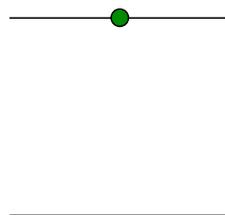
Das lässt sich zum Beispiel auf die Sinusfunktion anwenden. Diese kann unter Umständen schwer zu bestimmen – gerade, wenn man keinen Taschenrechner hat, um ihre Werte zu berechnen. Ist man aber nur an Ergebnissen interessiert, die der Sinus für kleine x annimmt, kann man die Funktion in dieser Umgebung durch eine Gerade nähern: $f(x) = x$. Die Werte von $\sin(x)$ und x unterscheiden sich in diesem Bereich kaum voneinander ($\sin(0) = 0$, $\sin(0,05) = 0,04997\dots$). Um genauere Resultate zu erzielen, kann man weitere Terme hinzuziehen: $f(x) = x - x^3/6$ (für $x = 0,05$ ergibt das $0,04997\dots$). Einer einfachen Vorschrift folgend kann man immer mehr Terme finden, wodurch das Ergebnis in der Umgebung des betrachteten Punkts zunehmend genauer wird.

In der Physik lässt sich mit komplizierten Ausdrücken auf ähnliche Weise verfahren. Wenn sich ein Teil einer Gleichung beispielsweise nicht exakt lösen lässt, kann man ihn – sofern er nur kleine Beiträge liefert – durch einfachere Terme annähern. Dieser Ansatz ist als Störungstheorie bekannt und hat sich in vielen Bereichen als äußerst nützlich erwiesen.

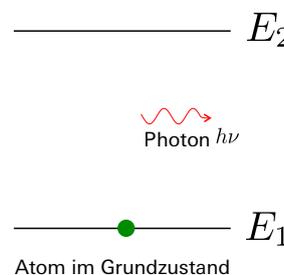
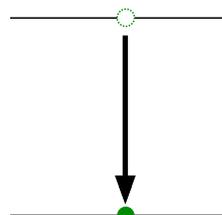
Dirac behandelte in seinen Berechnungen die Wechselwirkung zwischen dem elektromagnetischen Quantenfeld

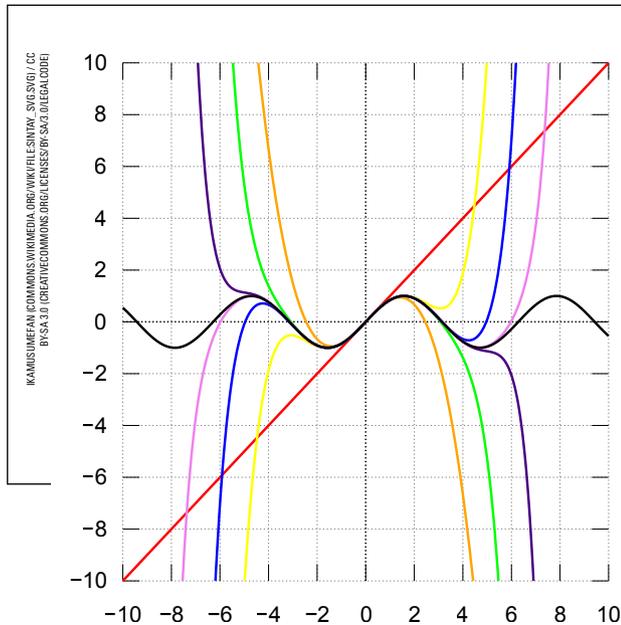
SPONTANE EMISSION
Ein angeregtes Atom kann auch ohne äußeres elektromagnetisches Feld irgendwann in den Grundzustand übergehen, indem es ein Photon ausstrahlt. Um diesen Vorgang theoretisch zu beschreiben, braucht man eine Quantenfeldtheorie.

Atom in angeregtem Zustand



Elektron sinkt auf ein niedrigeres Niveau





Störungstheorie

Die einfachste Methode, ein schwach wechselwirkendes System zu beschreiben, liefert die so genannte Störungstheorie. Dabei startet man mit einem freien Fall und lässt nach und nach schwache Wechselwirkungen zu. Grundlage ist dabei ein geläufiges Approximationsverfahren, mit dem sich Funktionen wie der Sinus (schwarz) nähern lassen. Je mehr Terme man berücksichtigt (rot: einer, orange: zwei, gelb: drei und so weiter), desto besser bildet der Ansatz die gesamte Lösung ab.

und dem Atom als kleine Störung und ersetzte den komplizierten Ausdruck daher zunächst durch den ersten Teil einer Näherung. Damit konnte er die spontane Emission beschreiben. Als seine Kollegen allerdings weitere Terme hinzuziehen wollten, um mehr Genauigkeit zu erlangen und vielleicht noch unbekannte Prozesse vorherzusagen, stießen sie auf Probleme. Denn einige der dabei entstehenden Ausdrücke nahmen unendliche Werte an. Das stürzte die Quantenfeldtheorie in ihre erste Krise, viele Physiker wandten sich in der Folge von ihr ab und verfolgten andere Ansätze, um unsere Welt zu beschreiben.

Das Vakuum ist nicht leer

Ein Term, der beispielsweise zu Schwierigkeiten führt, beschreibt die so genannte Vakuumpolarisation: Ein freies Photon kann spontan in ein Elektron-Positron-Paar zerfallen, das sich gleich darauf wieder zu einem Lichtteilchen zusammenfügt. Während ihres kurzen Daseins können das Teilchen und das Antiteilchen allerdings jede beliebige Energie annehmen – sie sind nicht durch die Eigenschaften des ursprünglichen Photons begrenzt. Grund dafür ist wieder die heisenbergsche Unschärferelation, wonach sich Energie und Zeit niemals genau auflösen lassen. Die Natur kann sich also kurzzeitig Energie »borgen«; je kürzer der Zeitraum, desto höher fällt der verfügbare Betrag aus. Das macht eine quantenphysikalische Berechnung aber fast unmöglich: Denn darin berücksichtigt man alle möglichen Energiebeiträge, indem man sie gewichtet addiert. In diesem Fall konvergiert die Summe nicht gegen einen festen Wert, sondern wird unendlich. Neben der Vakuumpolarisation gibt es viele weitere störungstheoretische Terme, die solche Unendlichkeiten verursachen.

Doch in den 1950er Jahren fanden die Physiker Julian Schwinger, Richard Feynman, Freeman Dyson und Shinichiro Tomonaga einen Ausweg, um mit den problematischen Termen umzugehen: Sie entwickelten ein Verfahren, das inzwischen als Renormierung bekannt ist. Der Grund-

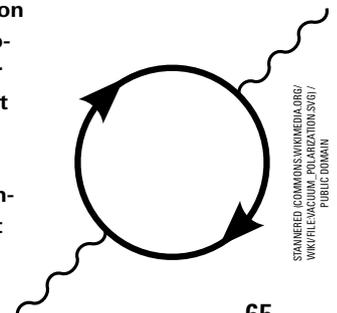
gedanke ist dabei, dass die Konstanten einer Theorie wie Teilchenmasse oder elektrische Ladung, die in den Gleichungen auftauchen, in Wirklichkeit nicht den experimentellen Messwerten entsprechen. Denn die Masse und die Ladung, die man in einem Versuch beobachtet, werden ebenfalls durch Prozesse auf quantenphysikalischer Ebene beeinflusst.

Ein Punktteilchen wie ein Elektron erzeugt durch seine Ladung ein elektrisches Feld, das in kleinen Abständen riesige Werte annimmt. Dadurch wird das Vakuum in diesem Bereich angeregt, es entstehen ständig Teilchen-Antiteilchen-Paare, die sich schnell wieder vernichten. Während ihrer Existenz richten sie sich aber ihrer Ladung entsprechend aus. Das Positron schirmt dann einen Teil des Felds ab. Dieser Effekt führt dazu, dass die gemessene Elektronenladung von außen betrachtet niedriger erscheint, als sie im »nackten« Zustand (ohne Quanteneffekte) wäre.

Da die Gleichungen der Quantenfeldtheorie aber genau solche Prozesse enthalten, müsste man die nackten Größen wie Ladung und Masse in die ursprünglichen Formeln einsetzen – also die Werte, die sie ohne Wechselwirkungen haben. Diese wird man jedoch niemals durch ein Experiment bestimmen können: Dafür muss man unendlich nah an ein Teilchen herankommen, was unbegrenzte Energiereserven erfordert.

Was auf den ersten Blick wie ein weiteres Problem erscheint, ist aber tatsächlich Teil der Lösung. Dafür hilft man sich mit einem einfachen Trick. Da die Werte einer Theorie bei bestimmten Abständen oder Energieskalen bekannt sind, formuliert man die Gleichungen gemäß

VAKUUMPOLARISATION Ein Photon zerfällt kurzzeitig in ein Elektron-Positron-Paar, das sich schnell wieder gegenseitig vernichtet – übrig bleibt wieder ein Photon. Dieser Prozess findet in der Natur offenbar statt, doch wenn man die Wahrscheinlichkeit dafür berechnen möchte, stößt man auf Unendlichkeiten.



STANERED: COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/
WIKI:FILE:VAKUUM_POLARISATION.SVG/
PUBLIC DOMAIN

dieser Größen um – und zieht entsprechende Terme ab, so genannte Gegenterme, damit das Ergebnis so ausfällt, als würde man die nackten Größen kennen. Im Prinzip fügt man eine »intelligente Null« ein, zum Beispiel indem man $a^2 + b^2$ durch $(a + b)^2 - 2ab$ ersetzt.

Die Gleichung der Quantenfeldtheorie besteht somit aus einem ersten Teil, der nur von den bekannten Messgrößen abhängt und einem Gegenterm, den man davon abzieht. Nähert man Ersteren durch die Störungstheorie, entstehen die bereits angesprochenen Unendlichkeiten. Indem man aber auch die Gegenterme auf diese Weise behandelt, heben sich die problematischen Gleichungen des ersten Teils auf. Die unendlichen Beiträge verschwinden also, sobald man berücksichtigt, dass die Größen, die wir im Labor messen, nicht den nackten Parametern der Theorie entsprechen.

Insofern funktioniert Renormierung wie eine Art Mikroskop. Abhängig von der Auflösung (der Energie- beziehungsweise Längenskala) sehen die »Konstanten« einer Theorie (die in Wirklichkeit veränderlich sind) unterschiedlich aus. Die Störungstheorie gepaart mit der Renormierung führte zu Ergebnissen mit erstaunlicher Genauigkeit: Unter anderem ist es dadurch möglich, die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung bis zur zehnten Nachkommastelle zu berechnen. Tatsächlich stimmen die Resultate bis in dieses Detail mit den experimentellen Messwerten überein. Das – und viele andere beeindruckende Ergebnisse – macht die Quantenelektrodynamik zur am besten überprüften Theorie der Naturwissenschaften.

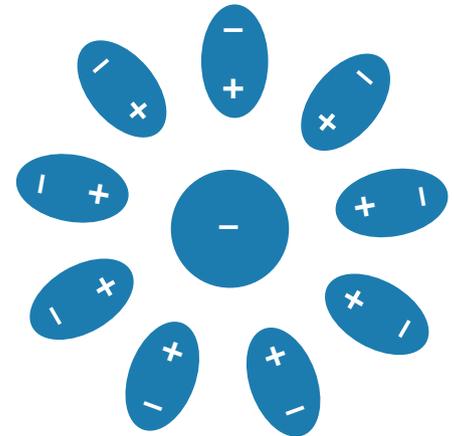
Die meisten Physikerinnen und Physiker zeigten sich begeistert. Dank der Renormierung konnten sie nicht nur die lästigen Unendlichkeiten loswerden, sondern sie hatten auch eine Erklärung dafür, warum sie überhaupt auftreten. Dennoch behagte einigen ein entscheidender Punkt nicht: Wie der renommierte Physiker Richard Feynman betonte, kann man auf diese Weise nicht die Details eines Systems, etwa die Masse oder Ladung eines Teilchens berechnen. »Es gibt keine Theorie, die diese Werte adäquat erklärt. Wir verwenden die Zahlen in all unseren Modellen, aber wir verstehen sie nicht: was sie sind oder woher sie kommen«, schrieb Feynman 1985.

Welche Größen habe die »nackten« Eigenschaften von Teilchen?

Doch nicht nur das: Nimmt man die QED ernst, müssten sowohl die nackte Ladung als auch die Masse des Elektrons unendlich groß sein. Selbiges ergibt sich für die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung auf sehr kleinen Skalen. Davon ließen sich die meisten Fachleute aber nicht beunruhigen. Denn es war von Anfang an klar, dass die Quantenelektrodynamik unsere Welt nicht vollständig beschreibt. Schließlich enthält die Theorie bloß elektromagnetische Prozesse und lässt alle anderen Grundkräfte außer Acht.

Einige Forscherinnen und Forscher befürchteten jedoch, die QED sei in dieser Hinsicht keine Ausnahme und die Werte nackter Größen würden in allen Quantenfeldtheorien unendlich. In einem solchen Fall hätte man zwar eine passende theoretische Beschreibung gefunden, wäre aber

RENORMIERUNG Messgrößen wie die Ladung eines Teilchens entsprechen nicht ihren tatsächlichen (»nackten«) Werten. Weil das Vakuum nicht leer ist und aus vielen kurzzeitig erscheinenden Teilchen-Antiteilchen-Paaren besteht, schirmen diese die Ladung eines Elektrons ab. Je mehr man sich dem Teilchen nähert, desto größer erscheint sie. Solche Effekte muss man berücksichtigen, wenn man die Gleichungen der Quantenfeldtheorien auswertet.



immer auf Experimente angewiesen, um etwas konkret zu berechnen.

Glücklicherweise waren die Befürchtungen unbegründet. 1974 bewiesen Frank Wilczek, David Politzer and David Gross, dass die starke und die schwache Kernkraft bei winzigen Abständen immer schwächer wird. Je höher die Energie, desto mehr ähnelt das System einer freien Theorie ohne Wechselwirkungen. Dieses Ergebnis, für das die drei Physiker 2004 den Nobelpreis erhielten, erscheint auf den ersten Blick äußerst überraschend. Die starke Kernkraft zeichnet sich dadurch aus, dass sie ihren größten Einfluss auf kleinen Abständen entfaltet. Sie hält die Protonen und Neutronen (genauer genommen die Quarks, aus denen sie bestehen) im Inneren von Atomkernen zusammen und ist dafür verantwortlich, dass Atome überhaupt existieren. Damit wirkt sie der elektromagnetischen Kraft entgegen, welche die Nukleonen auseinandertreibt. Auf größeren Distanzen hat die starke Kernkraft hingegen keinerlei Einfluss mehr – nicht einmal innerhalb von Molekülen ist sie spürbar.

Demnach nimmt die Kraft eine ungewöhnliche Form an: Zwei Quarks, deren Abstand erheblich kleiner ist als der Radius eines Protons, sind kaum von ihr betroffen; entfernen sie sich voneinander, kleben sie ab einer bestimmten Distanz regelrecht zusammen, so dass es unmöglich wird, sie zu trennen. Tatsächlich gibt es für dieses Verhalten eine anschauliche Erklärung, die auf den Bausteinen der starken Kernkraft fußt.

Der große Unterschied zwischen dieser Grundkraft und dem Elektromagnetismus besteht in den Teilchen, welche die entsprechenden Wechselwirkungen übermitteln. In der Quantenelektrodynamik sind Photonen dafür verantwortlich, dass sich gleiche Ladungen abstoßen, während in der Quantenfeldtheorie der starken Kernkraft, der so genannten Quantenchromodynamik (kurz: QCD), Gluonen die Atomkerne zusammenhalten.

Protonen und Neutronen bestehen aus jeweils drei Quarks, die neben einer elektrischen Ladung auch eine von drei Farbladungen besitzen: rot (r), grün (g) oder blau (b); Antiquarks haben »Antifarben«, antirot, antigrün, antiblau.

Sie bilden das Analogon zur elektrischen Ladung in der Elektrodynamik. Alle beobachtbaren Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind, haben eine neutrale Farbladung, das heißt, sie bestehen entweder aus einem roten, einem blauen und einem grünen Quark oder aus einem Quark und Antiquark entgegengesetzter Farbladung.

Während Photonen elektrisch neutral sind, besitzen Gluonen hingegen Farbladungen – sogar zwei gleichzeitig: eine Farbe und eine Antifarbe, etwa rot und antiblau. Um die nackten Eigenschaften eines Quarks zu bestimmen, muss man also nicht nur die Teilchen-Antiteilchen-Paare berücksichtigen, die in seiner Nähe entstehen und es abschirmen, sondern auch die dort befindlichen Gluonen. In der QED spielten die Photonen bei einem nackten Elektron keine Rolle, da sie weder Ladung noch Masse haben und somit die Merkmale des Teilchens nicht unmittelbar beeinflussen. Genau wie Elektron-Positron-Paare, schirmen Quark-Antiquark-Paare ebenfalls die Farbladung eines nackten Quarks ab.

Gluonen hingegen verstärken und verändern sie. Ein blaues Quark erscheint dann zum Beispiel rot. Wie Wilczek, Politzer und Gross herausfanden, ist der Effekt so stark, dass die Farbladung eines Teilchens kleiner wird, je weiter man sich diesem nähert. Das heißt im Umkehrschluss: Je mehr Energie man aufbringt, um beispielsweise zwei Atomkerne aufeinanderzuschießen und die darin befindlichen Quarks dazu bringt, sich sehr nahezu kommen, desto schwächer ist der Einfluss der starken Kernkraft.

Das unterscheidet die QED und die QCD grundlegend voneinander. Während sich elektromagnetische Prozesse auf größeren Distanzen und bei niedrigen Energien besser berechnen lassen, ist es bei der starken Kernkraft genau umge-

kehrt. Man kann die Störungstheorie nur bei enorm hohen Energien anwenden, zum Beispiel im Innern von leistungsstarken Teilchenbeschleunigern, die Partikel mit großer Wucht aufeinandertreffen lassen. Damit erzeugt man extreme Zustände, wie sie kurz nach dem Urknall in unserem Universum herrschten: Ähnlich wie stark erhitzte Materie, die unter Druck ein Plasma bildet, bei dem sich die Atomhülle von dem Kern löst, können am LHC in Genf Atomkerne ihre Struktur verlieren, wodurch die darin befindlichen Gluonen und Quarks fast frei herumfliegen.

Jenseits der Störungstheorie

Ist man hingegen an Phänomenen bei niedrigerer Energie interessiert, etwa dem so genannten Confinement, wonach Quarks immer nur als farblose Trios oder Duos auftauchen, versagt der störungstheoretische Ansatz. Die Wechselwirkungen sind in diesem Bereich so stark, dass man sie nicht mit einem solchen Näherungsverfahren behandeln kann. Es ist, als würde man die Sinusfunktion für kleine x nähern ($\sin(x) = x$), aber dann für $x = \pi$ auswerten: $\sin(\pi) = 0$ – man erhält dadurch unsinnige Resultate.

Zwar ist die Störungstheorie ein überaus nützliches Werkzeug, das bereits erstaunlich präzise Ergebnisse geliefert hat. Doch zahlreiche Phänomene unserer Welt lassen sich damit nicht erklären. Daher haben Physikerinnen und Physiker weitere Methoden entwickelt, um sich den für sie bisher verschlossenen Bereichen starker Wechselwirkungen auf andere Weise zu nähern.

Möchte man beispielsweise im Rahmen der Quantenelektrodynamik untersuchen, was bei extrem hohen elektrischen Feldstärken passiert, verwendet man häufig eine so

Standardmodell der Teilchenphysik

Die bekannteste Quantenfeldtheorie, das Standardmodell, beschreibt drei der vier bekannten Grundkräfte: den Elektromagnetismus (Photon, Elektron) sowie die starke (Quarks, Gluonen) und die schwache Kernkraft (Neutrinos, Muon, Tauon, Elektron, W- und Z-Bosonen). Zudem enthält es das Higgs-Boson, das über einen bestimmten Mechanismus einigen der Elementarteilchen ihre Masse verleiht.

	drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
	I	II	III		
Masse	=2.2 MeV/c ²	=1.28 GeV/c ²	=173.1 GeV/c ²	0	=124.97 GeV/c ²
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u Up	c Charm	t Top	g Gluon	H Higgs
	d Down	s Strange	b Bottom	γ Photon	
	e Elektron	μ Muon	τ Tau	Z Z-Boson	
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Muon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	W W-Boson	

Quarks (links), **Leptonen** (unten links), **Skalarbosonen** (rechts), **Eichbosonen Vektorbosonen** (unten rechts)

MISSKA & GUSHI (COMMONS:WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:STANDARD_MODEL_OF_ELEMENTARY_PARTICLES-DE.svg) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/SBY/4.0) LEGALCODE: BEARBEITUNG_SPEKTRUM_DER_WISSENSCHAFT

genannte semiklassische Näherung: Anstatt das gesamte System durch eine Quantenfeldtheorie zu beschreiben, nutzt man in diesem Fall eine klassische Formulierung des elektrischen Felds. Indem der deutsch-österreichische Physiker Fritz Sauter 1931 diese Betrachtungsweise wählte, stieß er auf einen erstaunlichen Effekt, der inzwischen nach Julian Schwinger benannt ist, der ihn 1951 vollständig berechnete. Bei derartigen Feldstärken, die künftige Laser in den kommenden Jahren erzeugen könnten, entstehen Teilchen gewissermaßen aus dem Nichts.

Denn das Feld erzeugt zahlreiche Elektron-Positron-Paare, wie in der Nähe eines nackten Partikels. Überschreitet die Feldstärke einen gewissen Wert, treibt sie die Paare auf Grund ihrer unterschiedlichen Ladung beschleunigt auseinander, wodurch sich die Teilchen nicht mehr gegenseitig vernichten können.

In der Folge verliert das elektrische Feld an Energie – denn diese bleibt im Gesamtsystem erhalten – bis es zu schwach ist, um weitere Paare zu generieren. Physiker hoffen, schon bald durch den Schwinger-Effekt verursachte Schwankungen in der Feldstärke von leistungsstarken Lasern, wie sie gerade am europäischen X-Ray Free-Electron Laser (XFEL) in Hamburg entwickelt werden, messen zu können (siehe »Spektrum« Dezember 2019, S. 12).

Der semiklassische Ansatz berücksichtigt zwar, wie ein äußeres Feld seine Umgebung beeinflusst, aber nicht, wie die Umgebung auf das Feld selbst einwirkt und es womöglich verändert. Daher verlieren solche Modelle schnell an Gültigkeit, insbesondere wenn man die starke Kernkraft damit beschreiben möchte. Denn dort sind die gegenseitigen Einflüsse von Feldern und Teilchen meist so hoch, dass eine solche Vereinfachung nicht gültig ist.

Möchte man die Quantenchromodynamik genauer im nicht störungstheoretischen Bereich untersuchen, wenden sich Fachleute daher anderen Methoden zu. Ein viel versprechendes Werkzeug ist auch in diesem Fall die Renormierung, die sich bereits bei der Störungstheorie als überaus nützlich erwiesen hat. Denn daraus lässt sich ein Ansatz entwickeln, der für starke Wechselwirkungen funktioniert: die funktionale Renormierungsgruppe, die eine Theorie wie eine Art Mikroskop bei verschiedenen Längen- und Energieskalen untersucht.

1993 entwickelte der Physiker Christof Wetterich, heute an der Universität Heidelberg, eine bemerkenswerte Formel, die angibt, wie sich die Gleichungen einer Theorie gemäß ihrer Skala ändern. Je nachdem, wie tief man in ein System hinein- oder herauszoomt, erhält man so die entsprechenden »effektiven« Beschreibungen. Möchte man zum Beispiel einen Atomkern untersuchen, ist es einfacher, Protonen und Neutronen als Grundbausteine zu behandeln (anstatt die vielen Gluonen und Quarks aufzulösen) und eine Kraft zwischen ihnen zu modellieren, die weniger kompliziert ist als die tatsächliche Kernkraft.

Bemerkenswerterweise ist die Wetterich-Formel exakt, das heißt, im Prinzip ließe sich damit für alle Skalen ein genaues Ergebnis berechnen. Jeder noch so kleine Effekt, der sich auf der Mikroebene abspielt, findet durch veränderte Parameter in der betrachteten effektiven Theorie seinen Platz. Der Zerfall eines Gluons in ein Quark-Anti-

quark-Paar kann beispielsweise den Wert der modellierten Kraft zwischen Neutronen und Protonen auf höherer Ebene leicht modifizieren.

In der Praxis ist die Wetterich-Gleichung jedoch zu kompliziert, um sie genau auszuwerten. Daher muss man auch in diesem Fall Vereinfachungen treffen. Anders als bei der Störungstheorie haben diese aber nichts mit der Stärke der Wechselwirkung zu tun. Stattdessen grenzt man zum Beispiel die möglichen Werte ein, welche die Parameter einer Theorie annehmen können. Ein Nachteil ist aber, dass es schwierig ist, den Fehler abzuschätzen, den die Vereinfachungen mit sich bringen. Daher gleichen Physikerinnen und Physiker die Ergebnisse der Methode mit experimentellen Messungen ab. Im Bereich der Quantenchromodynamik konnte die funktionale Renormierungsgruppe beispielsweise erklären, warum Nukleonen etwa zehnmal so schwer sind wie die Gesamtmasse der drei Quarks, aus denen sie bestehen. Ähnlich wie beim Higgs-Mechanismus, der einigen Elementarteilchen des Standardmodells ihre Masse verleiht, ist die Brechung einer bestimmten Symmetrie zwischen den Quarks dafür verantwortlich.

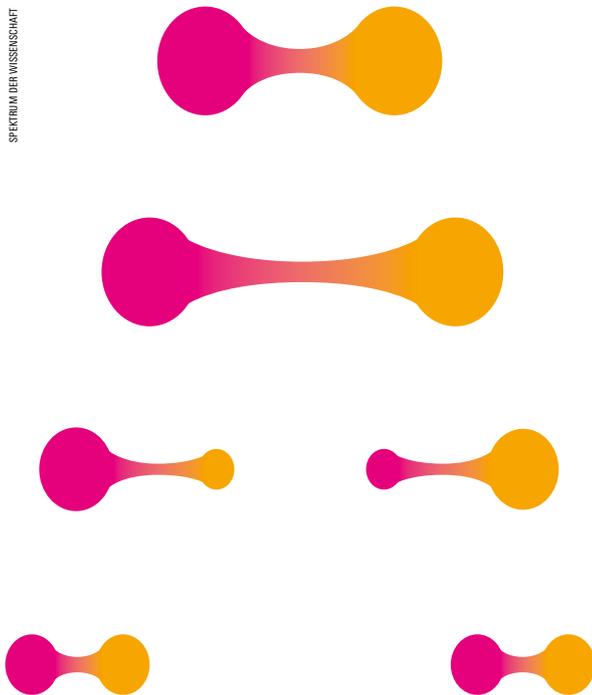
Ein diskretes Modell von Raum und Zeit

Ein weiterer beliebter Ansatz, um stark wechselwirkende Quantenfeldtheorien zu untersuchen, ist die so genannte Gittereichtheorie. Dabei nähert man die kontinuierliche Raumzeit durch ein vierdimensionales Gitter an. Das Modell beschreibt dann Materie-Teilchen wie Quarks oder Elektronen, die sich auf den Gitterpunkten befinden, und kräftevermittelnde Partikel wie Photonen oder Gluonen, die sich entlang der Seiten bewegen. Dadurch ist sichergestellt, dass sich Teilchen nicht unendlich nahekommen können. Somit fallen die Unendlichkeiten weg, die sonst bei der Berechnung wechselwirkender Felder entstehen würden.

Auch diese Methode hat ihre Nachteile. Um solche Systeme zu untersuchen, müssen Physikerinnen und Physiker auf leistungsfähige Rechner zurückgreifen. Oftmals kann man dabei nur wenige Gitterpunkte in Betracht ziehen – und dennoch laufen die Simulationen häufig mehrere Tage bis Wochen lang. Zudem sind die zu Grunde liegenden Gleichungen zwar mathematisch wohldefiniert, doch man konnte bisher noch nicht beweisen, dass der Grenzfall eines sich immer stärker verdichtenden Gitters wirklich die kontinuierliche Theorie wiedergibt.

Möchte man mit dieser Methode Prozesse der Quantenchromodynamik untersuchen, fallen weitere Probleme an: Wenn ein System beispielsweise aus zahlreichen, dicht beieinander befindlichen Teilchen besteht, ergeben sich bei der Berechnung viele positive und negative Beiträge. Dadurch schwankt das Ergebnis stark mit jedem zusätzlichen Term.

Weil ein Computer nur eine begrenzte Rechenkapazität hat, macht das eine zuverlässige Auswertung unmöglich. Eine Lösung des Problems besteht darin, nur zwei statt drei Farbladungen zuzulassen – in diesem Fall gibt es keine derartigen Schwankungen. Allerdings lässt sich durch eine solche Vereinfachung nicht abschätzen, wie weit die Resultate von der Realität entfernt sind. Wie unterscheidet sich



CONFINEMENT Quarks tauchen meist nur im Doppelpack als Quark-Antiquark-Paar oder als Dreierkombination auf. Wenn man versucht, ein solches Teilchen-Antiteilchen-Duo voneinander zu trennen, muss man so viel Energie entgegen der starken Kernkraft, die sie zusammenhält, aufbringen, dass ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht.

unsere Welt von einer, in der die starke Kernkraft eine Farbladung weniger besitzt?

Trotz dieser Einschränkungen hat sich die Gittertheorie bisher als die erfolgreichste Methode erwiesen, um die Quantenchromodynamik zu untersuchen. Man kann sowohl die Massen von Protonen vorhersagen als auch das geheimnisvolle Confinement, wonach sich nur Teilchen ohne Farbladung beobachten lassen: Versucht man beispielsweise ein Quark-Antiquark-Paar (q, \bar{q}) mit sehr viel Kraft auseinanderzuziehen, führt die starke Anziehung dazu, dass zwischen den ursprünglichen Partikeln ein weiteres Quark-Antiquark-Paar (q', \bar{q}') entsteht und ihre Farbladung abschirmt. Damit hat man zwei neue farblose Paare (q, \bar{q}') und (q', \bar{q}). Dieser Prozess lässt sich in Computersimulationen der Gittertheorie beobachten.

Dennoch fehlt eine Erklärung, welche Aspekte einer Quantenfeldtheorie das Confinement verursachen. Zudem möchte man weitere offene Fragen beantworten: Warum haben Quarks verschiedene Massen? Weshalb unterscheiden sich die Stärken der Grundkräfte voneinander? Und allem voran: Wie passt die Schwerkraft in das Bild?

Obwohl Quantenfeldtheorien schon seit Jahrzehnten die Grundlage der Physik bilden, ist man weit davon entfernt, sie vollständig zu verstehen. Noch immer feilen Forscherinnen und Forscher an Methoden, um die komplizierten

Gleichungen, die man bereits kennt, zu lösen – oder zumindest verlässlich zu nähern. Gerade wenn man stark wechselwirkende Systeme wie Quarks und Gluonen betrachtet, ist es extrem aufwändig, genaue Vorhersagen zu treffen.

Das verdeutlicht ein im September 2021 erschienenes Forschungsergebnis des CERN in Genf: Demnach sind bei einer Kollision von extrem schnellen Protonen im größten Teilchenbeschleuniger der Welt Tetraquarks entstanden, die aus zwei Charm-Quarks und zwei leichteren Antiquarks bestehen. Dass sich Quarks auch kurzzeitig in Viererkonstellationen zeigen, ist seit den frühen 2000er Jahren bekannt. Doch bisher kannte man nur die Kombinationen aus extrem schweren und extrem leichten Teilchen. Charm-Quarks besetzen hingegen eine mittlere Gewichtsklasse. Das setzt Physikerinnen und Physiker vor Probleme, denn die Berechnungen der Gitter-Quantenchromodynamik verbieten ein solches Pentaquark. Das heißt, durch die Annäherung der Raumzeit durch Gitterpunkte gehen wesentliche Details der Theorie verloren. Womöglich müsste man ein feineres Gitter für die Simulationen wählen. Dennoch zeigen sich Fachleute optimistisch, denn das Ergebnis kann ihnen den Weg weisen, welche Annäherungen berechtigt sind – und vor allem, welche nicht.

Den wohl härtesten Knackpunkt bildet jedoch die Schwerkraft. Erste Versuche, die Gravitation durch eine Quantenfeldtheorie auszudrücken und störungstheoretisch anzugehen, sind gescheitert. Denn die Unendlichkeiten, die sich durch diesen Ansatz ergeben, lassen sich anders als bei den übrigen Grundkräften nicht durch Renormierung lösen. Wie sich herausstellt, bräuchte man unendlich viele Gegenterme, damit sich die unphysikalischen Werte aufheben. Deshalb sind einige Fachleute davon überzeugt, Quantenfeldtheorien böten nicht den richtigen Rahmen, um die Schwerkraft zu beschreiben.

Andere zeigen sich optimistischer: Sie hoffen, ein nicht störungstheoretischer Ansatz könne das Problem aus der Welt räumen. Und tatsächlich gibt es Hinweise darauf, dass sich eine Quantengravitationstheorie mit Hilfe der funktionalen Renormierungsgruppe aufstellen ließe (siehe »Spektrum« Februar 2019, S. 12).

Ein besseres mathematisches Verständnis von Quantenfeldtheorien könnte auf jeden Fall dabei helfen, einige der offenen Fragen zu beantworten. Auch aus praktischer Sicht wäre eine formale Herangehensweise sinnvoll: Damit ließe sich wahrscheinlich besser abschätzen, wie zuverlässig nicht störungstheoretischen Näherungen sind – gerade wenn man keine Experimente zur Hand hat, um die Vorhersagen zu überprüfen. ◀

QUELLEN

Haymaker, R. W.: Confinement studies in lattice QCD. Physics Report 315, 1999

LHCb collaboration: Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark. ArXiv 2109.01038, 2021

Niedermaier, M., Reuter, M.: The asymptotic safety scenario in quantum gravity. Living Review Relativity 9, 2006

Wetterich, C.: Exact evolution equation for the effective potential. Physical Letters B 301, 1993

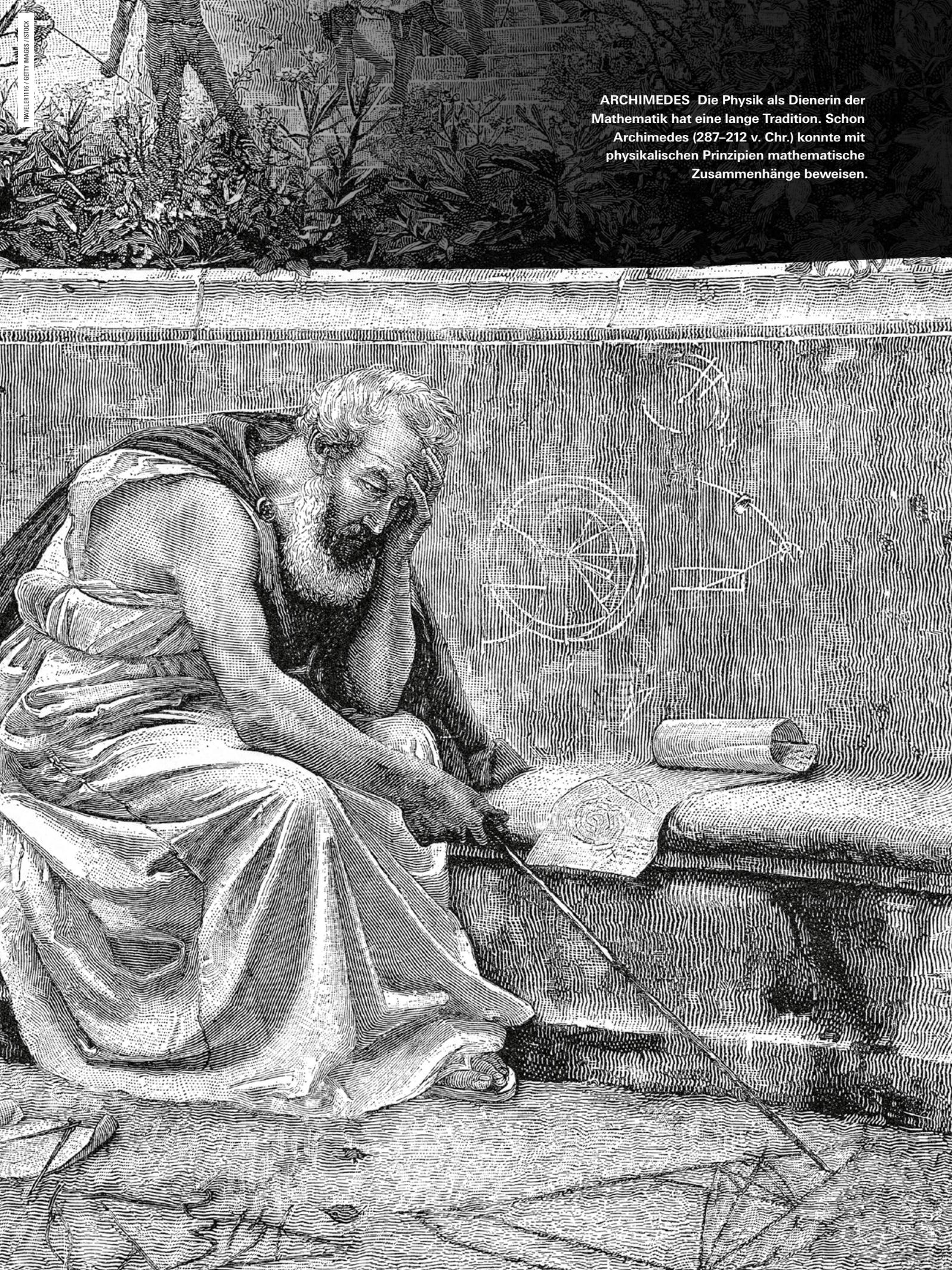
MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN PHYSIKALISCHE BEWEISE

Kann die Physik der Mathematik bei ihren ureigensten Aufgaben behilflich sein? Ja. Der Mathematiker Mark Levi hat eine Fülle von Beispielen dafür zusammengetragen.



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

» spektrum.de/artikel/1950073



ARCHIMEDES Die Physik als Dienerin der Mathematik hat eine lange Tradition. Schon Archimedes (287–212 v. Chr.) konnte mit physikalischen Prinzipien mathematische Zusammenhänge beweisen.

► Eigentlich gelten ja Mathematik und Physik als eng verbundene Schwestern in der großen Familie der Wissenschaften. Das schließt gelegentliche geschwisterliche Neckereien nicht aus.

Der Mathematikstudent Mark und sein Physikkollege Anatol waren nach Abschluss des ersten Studienjahrs in den Ferien zum Kiesschaufeln eingeteilt worden, wie das in der Sowjetunion der frühen 1970er Jahre so üblich war – offenbar eine gute Gelegenheit für die beiden, sich philosophisch auszutauschen und vor allem dem jeweils anderen die Überlegenheit des eigenen Fachs zu demonstrieren.

Während Mark betonte, dass die Physik nicht ohne die Mathematik leben könne, diese aber sehr wohl ohne ihre Schwester, beharrte Anatol darauf, der einzige Zweck der Mathematik bestehe darin, der Physik zu dienen, indem sie ihr die – zugegebenermaßen unentbehrlichen – theoretischen Werkzeuge bereitstelle. Mit dieser untergeordneten Rolle mochte Mark sich nicht abfinden und sann auf Vergeltung: Dann solle halt die Physik der abstrakten Mathematik dienen, und zwar für deren Kerngeschäft, das Beweisen von Theoremen.

Kann das denn funktionieren? Na ja, irgendwie schon. Man muss sich die Sache ja nicht mit den Augen des fundamentalistischen Wissenschaftsphilosophen anschauen. Mark, der inzwischen auf eine lange Karriere als Mathematikprofessor an der Pennsylvania State University zurückblicken kann, hat im Lauf der Zeit eine eindrucksvolle Sammlung an physikalischen Beweisen erarbeitet.

Wer hätte zum Beispiel gedacht, dass man mit Hilfe der elementaren Elektrizitätslehre zu einer klassischen Ungleichung kommt? Dazu genügt das einfachste elektrische Bauteil, der gewöhnliche (ohmsche) Widerstand. Wer nicht gern über unsichtbare elektrische Ladungen und ihre Bewegungen in einem Stromkreis nachdenkt, darf sich stattdessen Wasserströmungen vorstellen. Ein Widerstand

entspricht dann einer Engstelle in der Rohrleitung oder einem halb zugekehrten Ventil.

Zwei hintereinander (»in Serie«) geschaltete Widerstände addieren sich. Schaltet man sie dagegen parallel, so addieren sich die Kehrwerte der Widerstände, die so genannten Leitfähigkeiten. Zur Mathematik kommt man nun mit einer Schaltung mit vier Widerständen: einmal a und b in Serie, dann b und a in Serie und schließlich beide Paare parallelgeschaltet (siehe »Rechnen mit elektrischen Widerständen«). Jede der beiden Serienschaltungen hat den Widerstand $a + b$ und deren Parallelschaltung die Hälfte davon, also $(a + b)/2$.

Der Beweis ergibt sich wortwörtlich auf Knopfdruck: Man schließt den eingezeichneten Schalter. Damit wird aus der ganzen Anordnung eine Serienschaltung aus zwei Parallelschaltungen von a und b . Deren Gesamtwiderstand berechnet sich zu $2ab/(a + b)$.

Nun leuchtet unmittelbar ein, dass jeder zusätzliche Weg, den man dem Strom bereitstellt, den Gesamtwiderstand nur verringern kann. Schließlich verbessert auch das Öffnen eines Ventils irgendwo in einem System aus Wasserrohren den Durchfluss. Also ist der Gesamtwiderstand nach Schließen des Schalters kleiner als zuvor:

$$\frac{2ab}{a + b} \leq \frac{a + b}{2}$$

Die Formel lässt sich auch so ausdrücken: Das harmonische Mittel zweier positiver Zahlen a und b ist kleiner oder höchstens gleich ihrem arithmetischen Mittel. Mit einem kleinen Trick holt man aus dieser Ungleichung noch etwas mehr heraus: Wenn von zwei positiven Zahlen die eine kleiner oder gleich der anderen ist: $A \leq B$, dann gilt das auch für deren Wurzeln: $\sqrt{A} \leq \sqrt{B}$. Multipliziert man diese

Mittelwerte

Will man so etwas wie den Durchschnittswert von n Zahlen a_1, a_2, \dots, a_n berechnen, so ist in der Regel das Mittel der Wahl das arithmetische Mittel: Man addiert alle Werte und teilt das Ergebnis durch deren Anzahl.

$$A = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

Unter gewissen Umständen kommt es nicht auf die Zahlen selbst, sondern eher auf deren Logarithmen an. Ein klassisches

Beispiel sind die Höhen musikalischer Töne, die in unserem Hörempfinden nicht den Frequenzen der zugehörigen Schwingungen, sondern deren Logarithmen proportional sind. Dann ist statt des arithmetischen das geometrische Mittel zu verwenden: Man multipliziert alle n (positiven) Werte miteinander und zieht daraus die n -te Wurzel.

$$G = \sqrt[n]{a_1 a_2 \dots a_n}$$

Oder es kommt an Stelle der Zahlen selbst auf deren Kehrwerte an. So ist etwa die Länge einer Saite proportional dem Kehrwert der Frequenz, mit der sie schwingt. Dann ist es möglicherweise sinnvoll, das harmonische Mittel zu verwenden. Das ist indirekt definiert: Der Kehrwert des harmonischen Mittels ist das arithmetische Mittel der Kehrwerte der Zahlen.

$$H = \frac{n}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_n}}$$

Ungleichung einmal mit \sqrt{A} und einmal mit \sqrt{B} , so erhält man $A \leq \sqrt{AB} \leq B$. Setzt man schließlich für A und B die linke beziehungsweise rechte Seite der »elektrischen« Ungleichung ein, dann ergibt sich:

$$\frac{2ab}{a+b} \leq \sqrt{ab} \leq \frac{a+b}{2}$$

In Worten: Das geometrische Mittel zweier positiver Zahlen ist kleiner oder gleich dem arithmetischen Mittel, eine Abschätzung, die in vielen Beweisen der elementaren Analysis Anwendung findet.

Noch häufiger muss man von einer anderen Ungleichung Gebrauch machen – so oft, dass wir auf unseren Aufgabenzetteln in der Anfängervorlesung nur »CSU« über das Ungleichheitszeichen zu schreiben brauchten, wenn wir uns auf sie beriefen. Dann wusste jeder, dass die Cauchy-Schwarz-Ungleichung gemeint war, benannt nach den Mathematikern Augustin-Louis Cauchy (1789–1857) und Hermann Amandus Schwarz (1843–1921). Sie handelt vom Skalarprodukt zweier Vektoren; und das wiederum ist das Mittel, um sich in n -dimensionalen Räumen fast so zurechtzufinden wie zu Hause. Mit seiner Hilfe definiert man nämlich Längen und Winkel, und solange es nur um zwei Vektoren geht, kann man in der Ebene, die durch deren Endpunkte und den Nullpunkt bestimmt wird, die Geometrie betreiben, die man aus der Schule kennt.

Die Cauchy-Schwarz-Ungleichung läuft auf die Aussage hinaus, dass auch im n -dimensionalen Raum alles mit rechten Dingen zugeht, selbst wenn jeder Punkt aus n reellen Zahlen besteht. Das Skalarprodukt zweier Vektoren $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ und $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ ist definiert als $\langle a, b \rangle = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n$, und die Ungleichung lautet:

$$\langle a, b \rangle^2 \leq \langle a, a \rangle \langle b, b \rangle$$

oder ausgeschrieben:

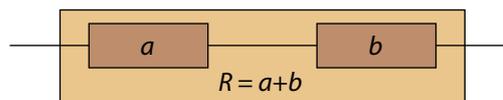
$$(a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n)^2 \leq (a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2)(b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2)$$

Den Beweis hätte Mark Levi im Prinzip auch auf elektrischem Weg führen können; denn die Cauchy-Schwarz-Ungleichung folgt aus derjenigen für das geometrische und das arithmetische Mittel. Aber hier arbeitet er mit Schraubenfedern, und zwar jenen klassischen, für die das Hookesche Gesetz gilt: Kraft ist gleich Federkonstante mal Auslenkung. Levis Federn haben im kraftlosen Zustand die Länge null, was in der Realität nicht vorkommt.

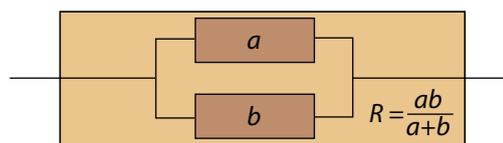
Aber das macht nichts: Mit echten Federn, deren Ruhelänge größer als null ist, funktioniert die Beweisführung genauso, erfordert allerdings etwas mehr gedankliche Anstrengung. Levi spannt nun etliche Federn mit verschiedenen Härten (Federkonstanten), auf verschiedene

Rechnen mit elektrischen Widerständen

Zwei hintereinandergeschaltete Widerstände sind gleich einem Ersatzwiderstand, dessen Wert gleich der Summe der einzelnen Widerstände ist (oben).



Bei parallelgeschalteten Widerständen (Mitte)



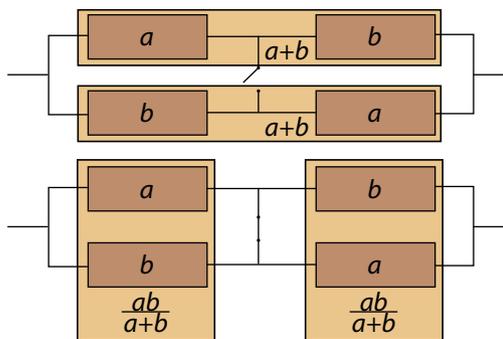
addieren sich die Ströme, die durch jeden Einzelwiderstand fließen; diese sind nach dem Ohmschen Gesetz umgekehrt proportional den Widerständen. Für den Ersatzwiderstand R gilt daher

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{a+b}{ab}$$

und damit

$$R = \frac{ab}{a+b}$$

Diese Schaltung aus vier Widerständen (unten)

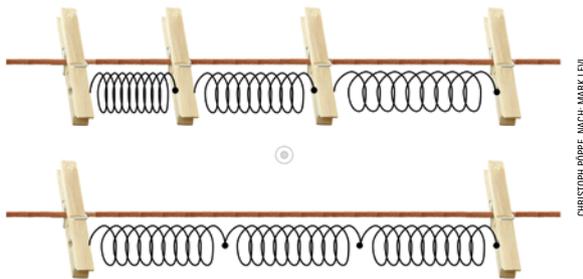


ist die Parallelschaltung zweier Paare in Serie geschalteter Widerstände, solange der Schalter geöffnet ist (oben). Durch Schließen des Schalters verwandelt sie sich in eine Serienschaltung zweier Paare parallelgeschalteter Widerstände.

Eine Ungleichung mit Schraubenfedern

Für das Folgende arbeitet man zweckmäßigerweise nicht mit der Härte k einer Feder, sondern mit deren Kehrwert, der Dehnbarkeit d . Das hookesche Gesetz »Kraft gleich Federkonstante mal Auslenkung«, $F = kx$, nimmt dann die Form $x = dF$ an, und für die potenzielle Energie einer solchen Feder ergibt sich $x^2/(2d) = dF^2/2$.

Mehrere hintereinandergehängte Federn verhalten sich wie eine einzige Feder, die weicher ist als jede der Komponenten; und zwar addieren sich deren Dehnbarkeiten. Die Begründung verläuft ähnlich wie bei der Parallelschaltung von elektrischen Widerständen. Die Dehnbarkeit unserer Verbundfeder ist also $\bar{d} = d_1 + d_2 + \dots + d_n$ wobei d_1, d_2 und so weiter die Dehnbarkeiten der Einzelfedern sind, und sie übt die Kraft $\bar{F} = \bar{x}/\bar{d}$ aus, denn die Gesamtlänge \bar{x} des Systems ist ja unverändert geblieben.



CHRISTOPH POPPE, WACH, MARK LEVI

Andererseits ist $\bar{x} = d_1 F_1 + d_2 F_2 + \dots + d_n F_n$, wobei die F_i die Kräfte der Einzelfedern sind und die potenzielle Energie des Gesamtsystems vor der Lösung der Klammern ist $d_1 F_1^2/2 + d_2 F_2^2/2 + \dots + d_n F_n^2/2$. Die Erkenntnis, dass die potenzielle Energie nachher geringer ist als vorher, nimmt damit die folgende Form an:

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \frac{\bar{x}}{\bar{d}} = \frac{d_1 F_1 + \dots + d_n F_n}{d_1 + \dots + d_n}, \\ E_{\text{nachher}} &= \frac{\bar{d} \bar{F}^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{\bar{x}^2}{\bar{d}} = \frac{1}{2} \frac{(d_1 F_1 + \dots + d_n F_n)^2}{d_1 + \dots + d_n} \\ &\leq E_{\text{vorher}} = \frac{d_1 F_1^2}{2} + \dots + \frac{d_n F_n^2}{2}, \\ (d_1 F_1 + \dots + d_n F_n)^2 &\leq (d_1 + \dots + d_n)(d_1 F_1^2 + \dots + d_n F_n^2) \end{aligned}$$

Die letzte Ungleichung geht aus der vorletzten durch Multiplikation mit $2(d_1 + \dots + d_n)$ hervor.

Der letzte Schritt sieht auf den ersten Blick aus wie ein fauler Trick; aber wir haben über die x_j und die d_j keine Voraussetzungen gemacht, außer dass sie nicht negativ sind. Also haben wir auch die Freiheit, sie so zu wählen, dass $d_j = a_j^2$ und $d_j F_j^2 = b_j^2$ ist. Setzt man das ein, so ergibt sich die cauchy-schwarzsche Ungleichung, was zu beweisen war.

Längen ausgezogen, in einer Reihe hintereinander, klemmt aber jede Feder an ihren beiden Endpunkten an einer dazu parallel verlaufenden Wäscheleine fest (siehe »Eine Ungleichung mit Schraubenfedern«). Für das Auslenken der Federn musste er Arbeit leisten; die steckt jetzt als potenzielle Energie in dem Federsystem.

Nun entfernt Levi alle Klammern bis auf die erste und die letzte. Daraufhin zappelt die Kette aus Federn ein bisschen und kommt in einer neuen Gleichgewichtsposition zur Ruhe. Dabei hat sich ein Teil der potenziellen Energie in Bewegung und schließlich in Wärme verwandelt.

Ein Modell aus Federn oder Wasserbehältern

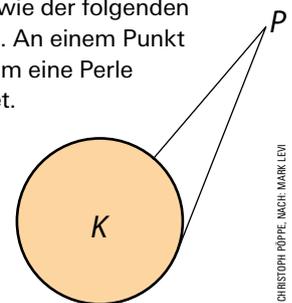
In beiden Fällen kann man die potenzielle Energie als Funktion der Federhärten und ihrer Auslenkungen ausdrücken. Aus der Tatsache, dass dieser Wert nachher kleiner ist als vorher, folgt eine Ungleichung, die man durch einen geschickten Trick in diejenige von Cauchy und Schwarz verwandeln kann.

Wem diese Herleitung zu trocken ist, dem bietet Levi eine Variante mit verschiedenen breiten, verschieden hoch gefüllten Wasserbehältern an, von denen jeder über ein Ventil an eine gemeinsame Rohrleitung angeschlossen ist. Sowie die Ventile geöffnet werden, schwappt das Wasser zwischen den Töpfen hin und her, bis sich ein einheitlicher

Wasserspiegel eingestellt hat. Diesmal ist es die potenzielle Energie der diversen Wassersäulen im Schwerfeld, die abnimmt. Eine ganz ähnliche Herleitung wie oben endet abermals bei der cauchy-schwarzschen Ungleichung.

Da freut sich die Physik, der Mathematik gedient zu haben; die aber dankt nur mit süßsaurem Lächeln und weist darauf hin, dass sie für diese Sätze schon Beweise hat. Die sind nicht schwieriger und vor allem ohne jeden Bezug zur Realität, was aus Sicht der Mathematik ein Vorzug ist. Ob die Physik ihr denn auch Dinge erzählen könne, die sie noch nicht weiß?

Das kann sie in der Tat – vor allem bei Problemen, die ohnehin aus der Physik kommen, wie der folgenden klassischen Minimierungsaufgabe. An einem Punkt P ist ein Faden angeknüpft, auf dem eine Perle reibungsfrei im Schwerfeld gleitet. Wie muss man den – stramm gezogenen – Faden legen, damit die Perle, im Punkt P losgelassen, in minimaler Zeit den Umfang des Kreises K berührt? Der Kreis liegt außerhalb von P , und zumindest ein Teil von ihm liegt tiefer als P , sonst wäre die Aufgabe nicht lösbar.



CHRISTOPH POPPE, WACH, MARK LEVI

Die ersten Ideen, die man zur Lösung hat, gehen in die Irre. Der kürzeste Weg ist nicht der richtige, und der mit der größten Geschwindigkeit, der den Kreis gerade noch streift, ist es auch nicht (beide Wege sind eingezeichnet).

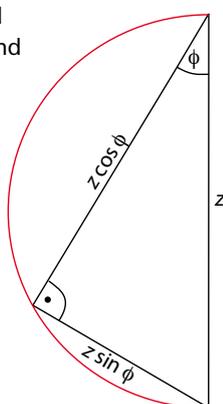
Nach dem Standardverfahren würde man jetzt geeignete Koordinaten einführen, eine Formel für die Laufzeit der Perle in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Fadens herleiten, nach diesem Parameter differenzieren und so weiter. Das ist noch wesentlich umständlicher als bei der Frage, wo der Hund ins Wasser springt, um möglichst schnell zum Ball zu kommen (siehe »Spektrum« Juli 2021, S. 86), denn diesmal ist die Geschwindigkeit einer Perle nicht konstant. Vor allem leidet das Verfahren unter demselben Mangel: Am Ende hat man zwar eine Lösung, aber keine Einsicht in das Wesentliche des Problems.

Wellen statt Teilchen

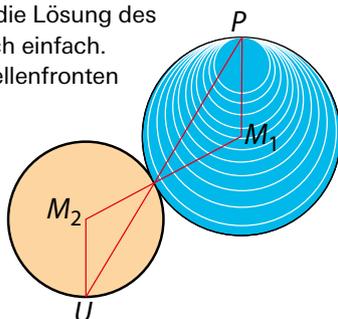
Mark Levi wählt einen Lösungsweg, den er bei den Quantenmechanikern abgeschaut haben könnte: Er geht vom Teilchen- zum Wellenbild über. Lassen wir in Gedanken eine große Anzahl von Perlen an ebenso vielen Fäden fächerförmig vom Punkt P loslaufen. Welche Form haben die Wellenfronten, das heißt die Linien, die Punkte gleicher Laufzeit verbinden?

Die überraschende Antwort: Es sind Kreise, die durch den Punkt P gehen und deren Mittelpunkt auf der Linie des freien Falls von P abwärts liegt. Warum? Für eine mit dem Winkel ϕ schräg laufende Perle teilt sich die Schwerkraft auf in eine Komponente entlang des Fadens, welche die Perle vorantreibt, und eine senkrecht dazu, die sie nur auf den Faden drückt. Wo eine lotrecht fallende Perle den Weg z zurücklegt, kommt die unter dem Winkel ϕ schräg gleitende nur $z \cos \phi$ mal dem Kosinus von ϕ weit. Nach dem Satz des Thales liegen die Scheitelpunkte aller rechtwinkligen Dreiecke über ein und derselben Strecke auf einem Kreis.

Mit dieser Erkenntnis ist die Lösung des Problems geradezu lächerlich einfach. Unter den kreisförmigen Wellenfronten wählt man die aus, die den Zielkreis K gerade berührt. Der Berührungspunkt beider Kreise liefert die Richtung, in die man den Faden halten muss. Und selbst dieser Punkt ist nicht schwer zu konstruieren. Man zeichnet einen Streckenzug von P abwärts zum Mittelpunkt des Wellenfrontkreises, dann zum Mittelpunkt des Zielkreises und abwärts bis zu dessen tiefstem Punkt U . Diesen muss auch die verlängerte Fadenlinie treffen, denn die beiden rot eingezeichneten Dreiecke sind einander ähnlich. Am Ende besteht also die Lösung darin, dass man den Faden von P nach U spannt.



CHRISTOPH PÖPPE, NACH: MARK LEVI



CHRISTOPH PÖPPE, NACH: MARK LEVI

Physikalische Argumente helfen bei der Lösung mathematischer Probleme – das beschränkt sich nicht auf elementare Sätze und nette Übungsaufgaben. Mark Levi hat zu dem Thema eine umfangreiche Sammlung zusammengetragen. Und für eine große Klasse von Problemen ist der physikinspirierte Lösungsansatz sogar quasi offiziell.

Man sucht für eine große, komplizierte Struktur, die verschiedenen Kräften ausgesetzt ist, den Gleichgewichtszustand: das, was sich einstellt, nachdem externe Kräfte wie die Schwerkraft und interne wie die elastische Rückstellkraft einzelner Teile ihr Werk getan haben und das ganze Objekt zur Ruhe gekommen ist.

Ein gutes Beispiel ist eine frei tragende Dachkonstruktion, die nur von ein paar Stahlträgern und Stahlseilen gehalten wird. Die mathematische Darstellung ist ein System partieller Differenzialgleichungen. Deren Unbekannte sind Funktionen, die von allen drei Raumkoordinaten abhängen, aber nicht von der Zeit; das Objekt soll ja in Ruhe sein.

Ein probates Verfahren für die – näherungsweise – Lösung im Computer besteht darin, das Problem so umzuformulieren, dass nicht die Lösung einer Gleichung gesucht wird, sondern das Minimum einer Funktion, nämlich der potenziellen Energie.

In der Realität wackelt die Struktur nämlich so lange, bis sie alle überschüssige Energie in Form von Wärme abgegeben hat, kommt also in einem – hoffentlich eindeutigen – Energieminimum zur Ruhe. Bei der numerischen Bearbeitung im Computer ist es nun in aller Regel einfacher, an der simulierten Struktur zu wackeln mit dem Ziel, ihre Gesamtenergie zu verringern, als auf anderem Weg nach einer Lösung zu suchen. Dabei muss man nicht etwa die Bewegung der realen Struktur imitieren; vielmehr führen unphysikalische Wackelverfahren häufig schneller zum Ziel als realistische.

Und obendrein kann man irgendwelche Gleichungen dieser Problemklasse in Minimierungsprobleme umwandeln, ohne dass die zu minimierende Funktion irgendetwas mit einer Energie zu tun haben müsste. Da gibt zwar die Physik den entscheidenden Anstoß, aber die Mathematik geht daraufhin ihre eigenen Wege. ◀

QUELLEN

Graham, C., Tokieda, T.: An entropy proof of the arithmetic mean–geometric mean inequality. The American Mathematical Monthly 127, 2020

Levi, M.: The mathematical mechanic. Using physical reasoning to solve problems. Princeton University Press 2009

Levi, M.: A water-based proof of the Cauchy–Schwarz inequality. The American Mathematical Monthly 127, 2020

Levi, M., Tokieda, T.: A communicating-vessels proof of Hölder's inequality. The American Mathematical Monthly 128, 2021

WEBLINK

<https://www.marklevimath.com/>

Sammlung der Kolumnen von Mark Levi aus der Zeitschrift »SIAM News«



STADTGRABUNG Archäologen
forschen bereits seit Jahrzehn-
ten in der jungsteinzeitlichen
Metropole von Çatalhöyük.



ARCHÄOLOGIE DER URSPRUNG DES WOHNENS

Vor 9000 Jahren ließen sich Menschen erstmals häuslich nieder. In Çatalhöyük gestalteten sie ein Zuhause aus vier Wänden, in dem Jenseits und Diesseits, Arbeit, Essen und Ahnenverehrung untrennbar beieinander lagen. Es war der Grundstein dessen, warum Menschen sich mit einem bestimmten Ort identifizieren.



Annalee Newitz ist Wissenschaftsjournalistin im kalifornischen Irvine.

» spektrum.de/artikel/1950076

Es ist eine beeindruckende Naturkulisse, die sich inmitten der Türkei auftut: Mächtige Gebirgsketten umgeben dort die weitläufige Ebene von Konya. Auf dem Hochplateau liegen zahlreiche kleine Bauernhöfe, es reiht sich Feld an Feld. Wer sich nachts den Ausläufern der Berge nähert, erblickt in der Ferne die gleißenden Lichter der Stadt Konya. Dieser Anblick dürfte sich in den letzten 9000 Jahren nicht wesentlich verändert haben – die beleuchtete Skyline der Großstadt würde einem Besucher aus der Zeit um 7100 v. Chr. womöglich bekannter als gedacht vorkommen. Denn in der Ebene von Konya liegt die Wiege des urbanen Lebens.

Jahrtausende vor dem Aufstieg der Städte Mesopotamiens blühte in Anatolien die Protostadt Çatalhöyük (sprich »Tschatalhöyük«). Mit einer Fläche von 34 Hektar und bis zu 8000 Einwohnern nahm sie damals die Ausmaße einer Metropole an. Zirka 2000 Jahre lang wohnten Menschen an diesem Ort, bis sie ihn im 6. Jahrtausend v. Chr. allmählich verließen. Anders als in späteren Großsiedlungen hatten die Bewohner von Çatalhöyük weder zentrale Plätze angelegt noch große Monumente oder Paläste errichtet. Die Stadt wirkt eher so, als seien mehrere bäuerliche Dörfer zu einer »Megasite« zusammengewachsen – so bezeichnen Archäologen derartige Siedlungen. Hunderte Häuser aus Lehmziegeln standen in Çatalhöyük dicht beieinander, wobei keine Straßen von Bau zu Bau führten, sondern die Gebäude Flachdächer besaßen, die als Fußwege dienten. Über Dachluken konnten die Häuser betreten werden. Rund um die Stadt legten die Menschen kleine Felder an. Sonst scheinen sie, das lassen zumindest die Grabungsergebnisse vermuten, viel Zeit in ihren Räumen verbracht zu haben. Sie fertigten dort Kleidung, Werkzeuge, bemalten die Wände, besserten ihre Bauten aus oder bereiteten Essen zu. All das geschah direkt neben dem Schlafbereich – oder in den wärmeren Monaten auf den Hausdächern.

Als Archäologen Anfang der 1960er Jahre mit den Ausgrabungen in Çatalhöyük begannen, hatten sie sicher nicht mit diesem Ergebnis gerechnet. Alles, was von anderen



WIEGE DES WOHNENS Die neolithische Stadt Çatalhöyük befindet sich in der Ebene von Konya. Auf dem Hochplateau hatten sich Menschen vor mehr als 9000 Jahren niedergelassen und eine Großsiedlung errichtet.

derartigen Stätten bis dahin bekannt war, ließ darauf schließen, dass es in Çatalhöyük Sakralbauten, Herrenhäuser, zentrale Plätze und kostbare Ausstattungsgegenstände geben sollte. Stattdessen dokumentierten die Forscher häusliche Dekorelemente, Kochgeschirr und kultische Objekte, die im Hausbereich bedeutsam waren. Jahrzehntlang versuchten Experten, sich einen Reim auf diesen Befund zu machen. Und nun scheinen sie eine plausible These gefunden zu haben, wie das Leben in Çatalhöyük ausgesehen haben könnte – zu einem Zeitpunkt, als Menschen von einer mobilen Überlebensstrategie als Jäger und Sammler allmählich in ein sesshaftes Dasein als Ackerbauern und Viehzüchter übergingen. Im Zuge dessen entwickelten sie offenbar einen ausgeprägten Sinn für ein festes Zuhause.

Im Jahr 2000 kam die Archäologin Ruth Tringham von der University of California in Berkeley nach Çatalhöyük, um mit Kollegen eines der Wohngebäude freizulegen. Im Inneren entdeckten sie die Überreste einer Frau, die unter einer Plattform – die wohl einst als Schlafstätte diente – begraben worden war. Tringham und ihr Team gruben das Haus in den folgenden Jahren weiter aus. Sie entdeckten Tierfigurinen, Knochen und mehrere Putzschichten an den Wänden.

Das Fazit der Forscher lautete: In diesem Haushalt war so ziemlich alles selbst- und hausgemacht. Die Menschen steckten ihre gesamte Zeit in ihren Lebensunterhalt. Sie bauten pflanzliche Nahrung an und züchteten oder jagten Tiere. Um Essen kochen zu können, errichteten sie einen Ofen, Messer wurden aus Obsidian geschlagen, Töpfe aus Ton gefertigt. Die Bewohner von Çatalhöyük stellten zudem Lehmziegel her, bauten daraus ihre Häuser, webten Schilfmatten als Bodenbelag, fertigten Textilien und nähten ihre Kleidung.

Befremdlich wirkt aus heutiger Sicht wohl die Sitte, die Toten unter den Hausböden zu bestatten. Möglicherweise ging es darum, die verstorbenen Angehörigen nahebei zu wissen. Die Skelette wurden allerdings auch wieder hervorgeholt und erneut beigesetzt – bisweilen nur Teile davon. Der Schädel eines Verstorbenen etwa war mit Kalksteingips überzogen und bemalt worden. Archäologen kennen solche Gepflogenheiten von anderen neolithischen Stätten in der Region des Fruchtbaren Halbmonds. Dieses Gebiet erstreckt

AUF EINEN BLICK VOM LAND IN DIE STADT

- 1** Ausgrabungen in Zentralanatolien geben Einblicke in einen bedeutsamen Moment der Kulturgeschichte: Zum ersten Mal entschieden sich Menschen, dauerhaft sesshaft zu leben.
- 2** Die Bewohner begannen in Çatalhöyük, ein festes Zuhause zu gestalten und neue Wohntechniken zu entwickeln. Sie bauten zudem eine emotionale und religiöse Bindung zu ihrer Wohnstatt auf.
- 3** Hieraus bildeten die Menschen vermutlich auch neue, städtische Identitäten aus. Ein Teil davon könnte die Sitte gewesen sein, die Toten unter den Häusern zu bestatten.

sich von der Levante über Syrien bis ins Zweistromland. Die knöchernen Funde stammen aus der Zeit von 12 000 bis 6500 v. Chr. Damals war es offenbar weit verbreitet, die Gesichter der Toten auf deren Schädeln aus Gipsmasse nachzubilden. In Çatalhöyük scheint man die Totenköpfe untereinander ausgetauscht und erneut bestattet zu haben. Bei den Grabungen fanden die Archäologen jedenfalls oft mehrere Schädel neben einem Skelett liegen. Sollten so die Vorfahren an ihr einstiges Zuhause gebunden werden? Eine eindeutige Erklärung ließ sich dafür bislang nicht finden (siehe »Wer waren die Toten unter den Häusern«, S. 82).

Geier als Seelenbegleiter

Die Bewohner hatten die Innenwände ihrer Häuser kunstvoll bemalt – und diese Malereien regelmäßig erneuert. Offenbar über Generationen hinweg wurden die immer selben Bilder erhalten. Als Motive hatten die Menschen abstrakte Muster gewählt, Spiralen und Zickzacklinien. Andere Wände zeigen Szenen mit Wildtieren und Jägern. In einem Haus legten die Forscher eine Wandmalerei frei, auf der kopflose Menschen von großen Vögeln, womöglich Geiern, umgeben sind. Was dort genau zu sehen ist, lässt sich nicht zweifelsfrei erschließen. Aber vielleicht hängen die Schädelbestattungen mit Vorstellungen zusammen, wie sie an den Wänden im Bild prangen: Große Vögel tragen die Seelen der Toten fort.

In den Häusern vergruben die Bewohner nicht nur menschliche Gebeine, sondern brachten auch Tierknochen an. Fast jeder Haushalt hatte Bukranien an der Wand hängen: mit Gips überzogene und rot bemalte Stierschädel, deren spitze Hörner in den Raum ragten. Zwar weniger auffällig, aber genauso erstaunlich ist, dass die Menschen Krallen und Zähne von Wildtieren in die Lehmziegel steckten. Es könnte sich dabei um eine Art Opfergabe oder Talismane gehandelt haben, ähnlich den Münzen oder Urkunden, die bisweilen heutzutage bei der Grundsteinlegung ins Fundament vergraben werden.

In den 1960er Jahren waren die Archäologen verblüfft, dass sie solche symbolischen oder kultischen Gegenstände im häuslichen Kontext fanden. Einer der damaligen Forscher, James Mellaart (1925–2012), war überzeugt davon, dass die gesamte Stadt ein gewaltiges Heiligtum voller Rätsel gewesen sein musste. »Aber es ist nur dann ein Rätsel, wenn man davon ausgeht, dass es etwas anderes ist, etwas Größeres und Komplexeres« als das, was es tatsächlich war, betont Ruth Tringham. Mellaart und seine Kollegen erwarteten, Kultgegenstände in großen Tempelanlagen zu entdecken, jedoch nicht in Hausküchen. Tringham plädiert deshalb dafür, die Funde selbst sprechen zu lassen, und nicht vorgefasste Thesen in sie hineinzuzinterpretieren.

Ian Hodder von der Stanford University, Archäologe und Grabungsleiter in Çatalhöyük bis 2018, stimmt Tringham zu. Frühere Ausgräber pflegten Artefakte freizulegen, sie nur zu oft verbotenerweise einzupacken und in den Museen ihres Heimatlands auszustellen. Hodder war es, der das Konzept der »kontextuellen Archäologie« entwickelte. Dieses besagt, dass Stücke nicht für sich zu verstehen sind, sondern stets im Zusammenhang ihrer Fundumgebung: Welche Funktion haben die Objekte einst in ihrem Umfeld über-

NEOLITHISCHE INNENARCHITEKTUR In den meisten Häusern von Çatalhöyük wurden bemalte Stierschädel angebracht **1** und die Wände farblich verziert **2**. Wie die Häuser einst aussahen, zeigt eine Rekonstruktion **3**.

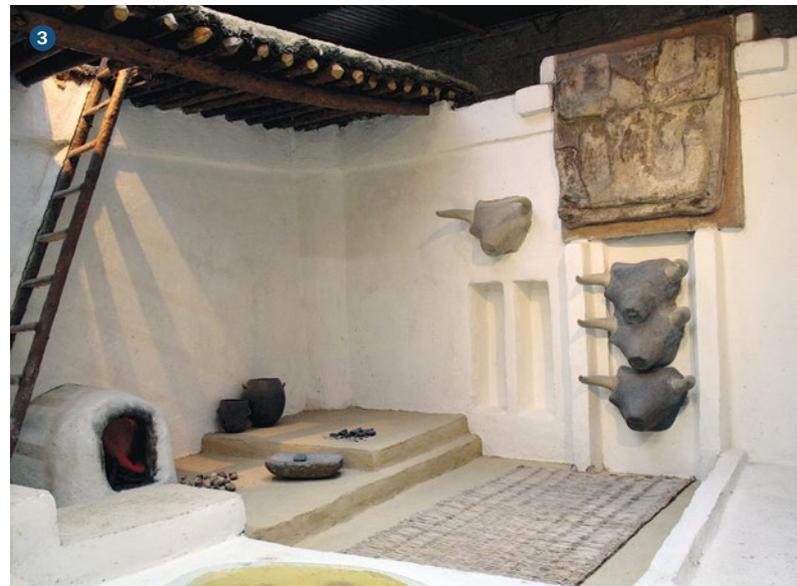
JASON QUINLAN



JASON QUINLAN



ALAMY / LAURA DI BIASE



nommen, welchen Sinn ergaben die Gegenstände an Ort und Stelle, und was taten die Menschen damit? Ruth Tringham bediente sich für das Haus in Çatalhöyük jener kontextuellen Archäologie, um für die Existenz kultischer Objekte im Wohnraum eine Erklärung zu finden. Warum hatten sich die Menschen religiöse Räume in ihren eigenen Häusern geschaffen?

Das Wohnen begann im Mehrzweckhaus

Anders als in den späteren Städten des Zweistromlands, wo die Verehrung der Götter, die Arbeit und das häusliche Leben in voneinander getrennten Räumen stattfanden, hatten die Bewohner von Çatalhöyük alle diese Tätigkeiten unter einem Dach vereint. Jedes Haus war Wohnstatt, Werkstatt und Tempel zugleich. Hodder ist überzeugt davon, dass solche Mehrzweckhäuser eine bedeutende Phase der menschlichen »Domestizierung« darstellten. Es war der Moment in der Menschheitsgeschichte, als ein wesentlicher Teil der Bevölkerung das mobile Leben aufgegeben hatte und sich niederließ, um Ackerbau zu betreiben. Möglicherweise dienten die Häuser anfangs nur als Orte zum Schlafen und Arbeiten. Doch mit der Zeit hätten sich die Menschen mit ihrem Land »psychisch verwoben«, wie Hodder es ausdrückt. Oder anders formuliert: Aus einer Gruppe Bauern, die in der Ebene von Konya lebten, wurden »Çatalhöyüker«. Die Stadt wurde Teil ihrer Identität, und die Bewohner schrieben ihren Häusern eine ideelle Bedeutung zu. Die Bauten waren damit mehr als nur physisch greifbare Böden und Wände. Sie wurden ein Zuhause. Die ideelle Bindung an ein Heim blieb auch in den späteren Städten erhalten, obgleich dort Tempel, Werkstätten und Wohnhäuser stärker räumlich getrennt wurden und die Gemeinschaft durch das aufkeimende Staatswesen komplexer strukturiert war. Die Vorstellung, dass die Stadt ein Zuhause und nicht nur eine Schlafstatt war, überdauerte die Zeiten.

In Çatalhöyük untersuchen Forscherinnen und Forscher, wie der Alltag der Menschen verlief – in einer Zeit, als ein festes Zuhause ein völlig neues Lebenskonzept darstellte. Sicher ist: Die meiste Zeit haben die Bewohner für den Erwerb ihrer Nahrung verbracht. Alle Menschen waren Bauern und Viehhüter. Damit sicherten sie ihre Versorgung und ihre sesshafte Lebensweise. Was zur Zubereitung von Essen nötig war, stellten sie ebenfalls selbst her – vom Schlachtermesser bis zur Suppenschüssel. Und dank Analysemethoden wie der Gaschromatografie oder der Massenspektrometrie können Wissenschaftler inzwischen auch feststellen, was die Neolithiker von Çatalhöyük in ihren Töpfen kochten.

Diese Forschungsarbeit barg einige Überraschungen. Das deutet jedenfalls Eva Rosenstock vom Einstein Center Chronoi in Berlin an: »Es war wie ein Krimi«, sagt die Archäologin. Sie und ihre Kollegin Jessica Hendy von der University of York extrahierten die Moleküle einstiger Nahrungsmittel von der Innenwand der Kochgefäße. Eva Rosenstock beschäftigt sich schon seit Langem mit der Ernährung und Gesundheit der Neolithiker. Sie und Hendy lernten sich vor einigen Jahren auf einer Konferenz kennen. Dort hatte Hendy erklärt, wie sie aus altem Zahnstein ermittelte, was die Menschen im Mittelalter gegessen



1
JASON QUINLAN
MICHAEL ASHLEY



haben. Im Zahnbelag identifizierte Hendy Fette und Proteine, die zum Teil aus der einst verspeisten Nahrung stammten.

Hendys Vortrag brachte Rosenstock auf eine Idee. Sie hatte Gefäßfragmente aus Çatalhöyük untersucht, die an der Innenseite von einer dünnen Schicht Kalzit überzogen sind. »So ähnlich wie die Kalkablagerungen in einer Teekanne«, erklärt die Archäologin. Sie überzeugte Hendy, die Tonscherben nach Resten neolithischer Speisen zu untersuchen.

Hendys erste Ergebnisse waren höchst erstaunlich: Sie fand Spuren von exotischen Süßwasserfischen und von Lotusblumen. Es stellte sich aber bald heraus, dass die Proben mit modernen Stoffen verunreinigt waren. Die nächsten Analysen zeigten dann plausiblere Resultate. Die Arbeitsgruppe entdeckte molekulare Spuren von Erbsen, Weizen, Gerste, Ziegen-, Schafs- und Rindfleisch, sogar Reste von Wild detektierte das Wissenschaftlerteam. Wirklich überrascht waren die Forscherinnen jedoch, dass alle Tongefäße einst Milchprodukte enthalten hatten – zu einer Zeit, als die meisten Menschen noch nicht die entsprechende genetische Mutation besaßen, um als Erwachsene Milchzucker zu ver-



JASON QUINNAN
JASON QUINNAN



ZUHAUSE Die Wohnbauten von Çatalhöyük waren Mehrzweckgebäude. Sie dienten als Ess- und Arbeitsplatz, Schlaf- und Verehrungsstätte. Unter den Böden waren Tote bestattet **1**. Mit Hilfe von Tonkugeln hielten die Menschen ihr Essen oder sich selbst warm **2**. Tongefäße **3** und Messer aus Obsidian **4** nutzte man zur Nahrungszubereitung.

dauen. Aus historischer Sicht gehörten die Bewohner von Çatalhöyük damit zu einer der frühesten Gruppen, die Milch trotz Laktoseintoleranz konsumierten. Das bedeutete sicher nicht, dass die Neolithiker ständig unter Übelkeit, Durchfall oder Blähungen litten. Bei der Verdauung von Milch hilft nicht nur das entsprechende Enzym Laktase, sondern auch Darmmikroben sind daran beteiligt. Sicher ist, dass die Forscherinnen einen Zeitpunkt in der Menschheitsgeschichte identifiziert hatten, an dem Menschen begannen, Milch zu kochen und vermutlich noch im Erwachsenenalter zu sich zu nehmen.

Laut Rosenstock weisen die Milchmoleküle an den Gefäßen vielleicht auf eine neue Ernährungsstrategie hin. In der Jungsteinzeit dürfte Milch nicht das ganze Jahr über zur Verfügung gestanden haben. Die Nutztiere brachten ihren Nachwuchs im Frühjahr zur Welt, spätestens im Winter gab das Vieh keine Milch mehr. Um sich durchgängig von der nährstoffreichen Flüssigkeit ernähren zu können und dazu den Stoff haltbarer zu machen, haben Menschen weltweit Käse und ähnliche fermentierte Erzeugnisse erfunden. In Anatolien, dem Nahen und Mittleren Osten gibt es beispielsweise eine Zutat namens Qurut oder Kaschk. Dabei handelt es sich um getrocknete Sauermilch, die in Form von Kugeln oder manchmal als Pulver aufbewahrt wird. Um den Geschmack zu verändern, wird die Milch auch mit gemahlenem Getreide fermentiert. Vielleicht haben die Menschen von Çatalhöyük ein ähnliches Gericht zubereitet. »Man hätte damit ein Produkt gehabt, das extrem gut aufbewahrt werden konnte und über Jahre hinweg nicht

ranzig wurde«, sagt Rosenstock. »Es lässt sich in heißem Wasser auflösen – es ist wie eine Fertigsuppe!«

Die Erfindung der Keramik

Die sesshafte Lebensweise machte die »Çatalhöyüker« erfinderisch. Sie entwickelten Techniken, die ihnen das häusliche Leben erleichtern sollten. Vor ungefähr 8500 Jahren, einige Jahrhunderte nach der Gründung der Stadt, haben die Bewohner begonnen, Keramik zu brennen. Diese Erfindung war für die Neolithiker ähnlich revolutionär wie die Mikrowelle für berufstätige Menschen in den 1970er Jahren. Denn das Kochen ohne Tongefäße war ein aufwändiges Unterfangen. Die Anthropologin Sonya Atalay von der University of Massachusetts in Amherst fand in den 2000er Jahren Hinweise darauf, dass man vermutlich in Körben Eintöpfe zubereitet hatte. Dazu füllte man Wasser und Zutaten in einen wasserdicht geflochtenen Korb und erhitze das Gemisch mit großen Steinen oder Tonkugeln, die zuvor im Feuer lagen. Hatten die Kugeln ihre Wärme an die Flüssigkeit abgegeben, wurden sie entnommen und durch neue, heiße ersetzt. So sah laut Atalay die präkeramische Küche aus.

Ihre Rekonstruktion beruht auf zwei Quellen: Es gibt noch heute ethnische Gruppen, die auf Grund ihrer Kultur und ihrer Traditionen mit erhitzten Steinen kochen. Und in Çatalhöyük fanden sich haufenweise Tonkugeln, eine jede ungefähr so groß wie eine Grapefruit, übersät mit Brandspuren. In einigen Häusern lagen sie zu Hunderten in und um die Feuerstellen. Für Atalay war es offensichtlich, dass sie einst als Hitzequelle dienten.

Nachdem die Menschen begonnen hatten, Keramik zu brennen und Töpfe zu nutzen, seien die Tonkugeln weitgehend außer Gebrauch gekommen. Denn Tongefäße sind hitzebeständig und lassen sich mit Ständern direkt aufs Feuer setzen. Das Essen konnte so vor sich hinköcheln. Nicht mehr mit Tonkugeln hantieren zu müssen, dürfte die Essenszubereitung erheblich erleichtert haben.

Atalays Rekonstruktion hat allerdings eine Schwachstelle. Als Wissenschaftler die Tonkugeln auf Lipide und Proteine

Wer waren die Toten unter den Häusern?

Es war eine große Überraschung, als die Anthropologin Marin Pilloud 2009 ihre Studie zu den Verwandtschaftsverhältnissen in Çatalhöyük vorstellte. Da die menschlichen Knochen bei früheren Ausgrabungen kontaminiert wurden und sich daher nicht für eine DNA-Analyse eigneten, hatte sie die Zähne von 266 Bestatteten untersucht. Denn bei genetisch verwandten Personen ähneln sich die Gebisse.

Das Ergebnis hatte keiner der an der Ausgrabung beteiligten Archäologen erwartet: Weder gehörten die unter demselben Haus beerdigten Personen zu einer biologischen Familie – von Ausnahmen abgesehen – noch waren sie mit den Toten in den Nachbarhäusern verwandt. Die Skelette mit der größten genetischen Ähnlichkeit waren über den gesamten Ort verteilt.

Forschern um Arkadiusz Marciniak von der Universität Posen gelang es dann 2019, von Skeletten aus Çatalhöyük die mitochondriale DNA zu sequenzieren. Die Ergebnisse bestätigten Pillouds Befund: In den Genproben wurden keine Anzeichen gefunden, dass die gemeinsam beigesetzten Frauen und Kinder miteinander verwandt waren.

Jetzt bestand akuter Klärungsbedarf. Waren die Verhältnisse in Çatalhöyük eine Ausnahme? Oder ließen sie sich auf ganz Anatolien übertragen? Ein internationales Team von Genetikern, Anthropologen und Archäologen analysierte daher die Kern-DNA von 59 Skeletten aus anatolischen Hausbestattungen. Die Proben stammten jeweils aus zwei Siedlungen der späten und frühen Jungsteinzeit. In Letzteren lebten die Menschen noch vorwiegend vom Jagen und Sammeln, während die späteren Gruppen bereits zur bäuerlichen Lebensweise übergegangen waren. 2021 publizierten die Forscher ihr Resultat: In Çatalhöyük und einem



SKELETT Archäologen legten dieses Grab eines Kinds in Çatalhöyük frei.

weiteren spätneolithischen Ort hatten die Toten keine gemeinsamen genetischen Wurzeln. In den älteren Siedlungen dagegen waren die meisten Bestatteten biologisch verwandt.

Die Forscher erklären ihre Daten mit dem Wechsel vom Wildbeutertum zur bäuerlichen Lebensweise. Die Umwälzungen im sozioökonomischen Gefüge hätten zu einer veränderten Bestattungspraxis geführt. Was Menschen unter Familie verstünden, sei eben variabel, meint Dominik Bonatz, Professor für Vorderasiatische Archäologie an der Freien Universität Berlin. Offensichtlich habe es in der Jungsteinzeit eine lange Phase des Ausprobierens gegeben, auch von unterschiedlichen Formen des sozialen Zusammenlebens.

Eine Frage bleibt: Hatten die Toten in den Häusern einst zusammengelebt oder wurden sie lediglich dort beerdigt? Für Bestattungsgemeinschaften gibt es ethnologische Vergleiche. Bei australischen

Aborigenes etwa wurden tote Kinder mit dem männlichen Erwachsenen begraben, der nach ihnen starb. Solche Traditionen führen dazu, dass die Verstorbenen wie in Çatalhöyük keine genetischen Gemeinsamkeiten haben.

Archäologe Ian Hodder will zwar eine Bestattungsgemeinschaft nicht ausschließen, geht aber davon aus, dass die Kinder dort »zwei Sets von Eltern« hatten: die biologischen und die, mit denen sie zusammenlebten. Letztere hätten die soziale Elternschaft übernommen. Das könnte mit dem egalitären Selbstverständnis der Bewohner zusammenhängen. So verzichtete man nicht nur auf Herrschaftsgebäude, sondern auch auf Unterschiede im Wert und Umfang der Grabbeigaben. Die Trennung von biologischen Eltern und Kindern hätte damit der Vermeidung sozialer Ungleichheit durch Vererbung gedient.

Dagmar Schediwy ist promovierte Psychologin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

untersuchten, wie sie Rosenstock und Hendy an den Gefäßfragmenten dokumentiert hatten, fanden sie nichts dergleichen. Offenbar waren die Kugeln im Feuer erhitzt worden – sie trugen ja Brandspuren – und sie waren im Umfeld der Herdstelle verwendet worden – dort hatten Archäologen sie entdeckt –, aber sie waren nie mit Lebensmitteln in Berührung gekommen. Wenn sie nicht zum Kochen gedacht waren, was war dann ihre Funktion?

Lucy Bennison-Chapman von der Universität Leiden hat Jahre damit verbracht, die Kugeln zu untersuchen. Dabei gelang ihr eine erstaunliche Entdeckung. Die Archäologin will zwar nicht ausschließen, dass die Tonbälle in Kochtöpfen landeten, hält diesen Verwendungszweck aber für äußerst unwahrscheinlich – dafür seien die Kugeln eigentlich zu groß; zudem hätten dabei leicht Ton und Schmutz absplintern und ins Essen gelangen können. Sie geht auch nicht davon aus, dass es sich um Projektile gehandelt hat. »Sie unterscheiden sich von Geschossen, die für eine Schleuder genutzt wurden«, erklärt die Forscherin. »Diese sind kleiner und anders geformt« – meist ellipsoid.

Recycling im Neolithikum

Die Archäologin ist davon überzeugt, dass die großen Kugeln kleine Heizungen waren. In einigen Fällen fanden sie sich um die Öfen, um so offenbar Wärme zu speichern. Die massiven Tonobjekte könnten auch neolithische Warmhalteplatten gewesen sein: Man schlug die heißen Kugeln in Schilfmatten ein und legte das Essen darauf. Bennison-Chapman hält noch eine weitere Verwendung für wahrscheinlich: eine als Wärmflasche oder Taschenwärmer. »Im Winter wird es in der Ebene von Konya sehr kalt. Man könnte die heißen Kugeln zum Wärmen am Körper getragen haben. Oder man wickelte sie in einen Leinenstoff und legte sie ins Bett«, erklärt Bennison-Chapman. »Die Menschen arbeiteten auf den Hausdächern und auf den Feldern – man hat die Tonkugeln vielleicht in die Tasche gesteckt, während man draußen war.« Das würde erklären, warum die Stücke so oft wiederverwendet wurden.

Die Bewohner von Çatalhöyük hatten zudem viel Zeit auf die Herstellung der Tonbälle verwendet. »Sie haben sie vermutlich sehr lange glatt gestrichen«, weiß Bennison-Chapman. »Sie sind voller Fingerabdrücke.« Das wäre eine Erklärung, warum die Heizkugeln so lange genutzt wurden, bis sie im Feuer rissig wurden und die Hitze sie auseinanderprenge. Von den meisten Kugeln haben nämlich nur Fragmente die Jahrtausende überdauert. Bisweilen wurden sie aber auch als Baumaterial recycelt: Man arbeitete sie in Lehmziegel ein oder füllte sie zwischen Mauerschalen.

Die Lehmkugeln dürften für die Çatalhöyüker noch aus einem anderen Grund wichtig gewesen sein. Die Menschen fertigten auch kleine Kugeln und verzierten sie hin und wieder mit Punkten oder Schnurmustern. Einige Archäologen deuten die kleinen Versionen als Zählsteine, wie sie aus den 5500 Jahre alten mesopotamischen Stadtkulturen bekannt sind. Dort dienten sie dazu, Lagerbestände oder Vieh zu dokumentieren und zu verwalten. Bennison-Chapman bezweifelt allerdings, dass die Stücke nur zum Zählen gedacht waren. Sie könnten ebenso Spielsteine, Gewichte, kultische Objekte und Dekorelemente gewesen sein.

Im Neolithikum vollzog sich ein grundlegender Wandel – vergleichsweise schnell änderte sich die Lebensweise hin zur Sesshaftigkeit und damit die Vorstellung, wie ein Zuhause beschaffen ist. Vor mehr als 12 000 Jahren lebten nur sehr wenige Menschen das ganze Jahr über in bäuerlichen Siedlungen. Die meisten waren Jäger und Sammler, sie lebten in kleinen Gruppen und zogen je nach Jahreszeit und Verfügbarkeit der Nahrung umher. Als die Menschen schließlich dazu übergingen, Häuser zu errichten und größere Siedlungen zu gründen, mussten sie eine neue Form von dauerhafter Nachbarschaft kreieren.

Häufig legten die frischgebackenen Siedler den Grundstein für ihre Gemeinschaft, indem sie als Gruppe ihre Häuser bauten. Dadurch wurde die mühselige Arbeit zum Gemeinschaftswerk, bei dem die Menschen sicher auch gemeinsame Momente der Freude erlebten. John S. Allen, Anthropologe an der Indiana University Bloomington, hat sich damit beschäftigt, wie das Wohnen zur Menschwerdung beigetragen hat. »Ein Zuhause ist ein Raum, zu dem man durch die gewohnheitsmäßige Nutzung eine emotionale Bindung aufgebaut hat«, sagt Allen. Menschen würden sich überdies ein Zuhause schaffen, indem sie an einem bestimmten Ort eine Bindung zu ihrer Gemeinschaft herstellten. Das könnte ein Grund dafür sein, dass in Çatalhöyük die Gräber unter den Häusern liegen. »Ein Grab markiert einen für Familie und Freunde bedeutsamen Ort«, erklärt Allen. Ein Haus sei damit sowohl eine rein praktische Einrichtung als auch ein Platz, an den man psychisch und emotional gebunden ist.

Als Eva Rosenstock und ihr Team die verschiedenen Nahrungsmittel erkundeten, die in Çatalhöyük aufgetischt wurden, warteten sie darauf, früher oder später Beweise für ein weiteres zu finden: Bier. Zum einen, weil sich das Getränk bereits an weiteren neolithischen Fundstätten nachweisen ließ, und zum anderen, weil die Forscher in Çatalhöyük auf die Überreste festlicher Ereignisse gestoßen waren. »Die Menschen hatten Unmengen an Keramik hergestellt – und weggeworfen. Man kann sich des Eindrucks nicht erwehren, dass sie gegessen und anschließend die Gefäße zerschlagen haben«, sagt die Archäologin. Zudem seien Knochen, an denen noch Fleisch haftete, in die Abfallgruben gewandert. Das Stadtleben war sicher nicht nur von Arbeit geprägt, sondern zu bestimmten Anlässen gab es Feste. Das Feiern dürfte allerdings – unabhängig vom urbanen Anbeginn – wohl so alt wie die Menschheit selbst sein. Ob dabei in Çatalhöyük auch Bier kredenzt wurde, nach diesem einen zweifelsfreien Beleg suchen die Archäologen noch. ◀

QUELLEN

Allen, J.S.: Home. How habitat made us human. Basic Books, 2015

Bennison-Chapman, L.E.: Large clay balls at Çatalhöyük east. In: Ian Hodder (Hg.): The matter of Çatalhöyük. Reports from the 2009–2017 seasons. British Institute of Archaeology at Ankara, 2021

Hendy, J. et al.: Ancient proteins from ceramic vessels at Çatalhöyük west reveal the hidden cuisine of early farmers. Nature Communications 9, 2018

Die Spektrum eLearningFlat



Mit der **eLearningFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von sechs bis zu 40-minütigen E-Learning-Kursen aus dem Programm von iversity/SpringerNature.

Jeden Monat wird ein Kurs ausgetauscht, so dass Sie jährlich auf bis zu zwölf Kurse zugreifen können.

€ 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.

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



UNSPLASH / ALES NESTRIH (unsplash.com/photos/m72j4ctkg)

Die Spektrum eBookFlat



Mit der **Spektrum eBookFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von zwölf E-Books (PDF-Format) des Sachbuchprogramms von **Springer Spektrum** aus den Bereichen Mathematik und Naturwissenschaften.

Jeden Monat wird ein Buch ausgetauscht, so dass Sie im Jahr auf bis zu 24 Bücher zugreifen können. € 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.

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



ROUDESIGN / BETTY IMAGES / ISTOCK



FRANZI SCHÄREL / FLORIAN FREISTETTER (FÜR PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS ORG) LICENSING BY SAAL (LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT DIE MCNUGGETS-ZAHLEN

Münzen und frittierte Hähnchen hängen miteinander zusammen. Man kann sie nicht nur gegeneinander eintauschen, sondern sie sind auch mathematisch verbunden.

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

► spektrum.de/artikel/1950085

Eine gute Freundin hatte kürzlich Geburtstag. Sie war etwas traurig, dass sie nun nicht mehr 42 Jahre alt ist, denn immerhin ist das die berühmte Zahl aus dem Roman »Per Anhalter durch die Galaxis« von Douglas Adams und demnach die Antwort auf die Frage »nach dem Leben, dem Universum und dem ganzen Rest«. Eine kurze Recherche hat aber auch Interessantes über ihr neues Lebensalter zu Tage befördert. Hintergrund ist die Formel:

$$m = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

Dabei sind a_1 bis a_n teilerfremde Zahlen und x_1 bis x_n natürliche Zahlen. Manche Werte lassen sich mit der Formel darstellen, andere aber nicht. Dieser Schwierigkeit begegnet man im so genannten »Münzproblem«, also der Frage, welche Summen man aus einem gegebenen Satz an Münzen bilden kann.

Wenn ich zum Beispiel nur 2- und 5-Cent-Stücke habe, dann werde ich ohne Wechselgeld nichts bezahlen können, was 3 Cent kostet. Preise von 2 oder 4 Cent klappen, ebenso alle höheren.

In der Realität bekommt man vermutlich schnell Ärger, wenn man an der Kasse mit einem Sack voller Kupfermünzen auftaucht. Doch hinter der Fragestellung steckt interessante Wissenschaft. Der deutsche Mathematiker Ferdinand Georg Frobenius wollte im 19. Jahrhundert wissen, welche die größte Zahl ist, die sich nicht auf die durch die Formel vorgegebene Weise schreiben lässt.

Dass es überhaupt so eine größte Zahl gibt, liegt daran, dass a_1 bis a_n teilerfremd sind. Hätte man beispielsweise zahlreiche 2-Cent-Münzen und einen weiteren Haufen 10-Cent-Stücke, dann sind beide Münzwerte stets durch zwei teilbar. Es wäre unmöglich, daraus ungerade Zahlen zu bilden, und es gäbe keinen größten unerreichbaren Wert.

Sind die a_i hingegen teilerfremd, kann man jede ausreichend hohe Zahl als lineare Kombination darstellen – das folgt aus dem »Satz von Schur«. Nur: Wie groß muss der Wert sein? Die Frage stammt von Frobenius, weswegen das entsprechende Ergebnis »Frobenius-Zahl« heißt.

Im Fall von nur zwei Münzen gibt es eine allgemein gültige Lösung. Der britische Mathematiker James Joseph Sylvester entwickelte 1884 eine Gleichung, um eine Frobenius-Zahl für $n = 2$ zu bestimmen: Man bildet zuerst das Produkt von a_1 und a_2 und zieht davon die beiden Werte ab ($a_1 \cdot a_2 - a_1 - a_2$). Für $n > 2$ hat noch niemand eine geschlossene Formel gefunden.

In Spezialfällen lassen sich dennoch konkrete Aussagen treffen. Einer betrifft die »McNugget-Zahlen«. Hier geht es nicht um Münzen, sondern um die frittierten Hähnchenstücke, die ein bekanntes Fast-Food-Restaurant anbietet. Dort muss man sich klassischerweise zwischen Packungsgrößen mit 6, 9 und 20 Stück entscheiden. Möchte man sich unbeliebt machen, kann man versuchen, eine Anzahl an McNuggets zu bestellen, die sich nicht aus diesen Einheiten kombinieren lässt. 14 Stück kann man beispielsweise mit den üblichen 6er und 9er Größen nicht zusammenstellen.

Die größte nicht erhältliche Zahl an McNuggets ist 43. Dass es wirklich das Maximum ist, kann man sich leicht klarmachen, wenn man die nachfolgenden Zahlen betrachtet. 44 (= 6 + 2·9 + 20) bis 49 (= 9 + 2·20) Stück lassen sich problemlos aus den vorgegebenen Packungsgrößen konstruieren. Und alle weiteren ganzen Zahlen ergeben sich durch fortlaufende Additionen von 6 zu diesen Werten.

43 ist also die größte natürliche Zahl, die keine McNugget-Zahl ist. Die Freundin war davon aber nur mäßig begeistert. Als Vegetarierin kann sie mit fritiertem Huhn wenig anfangen und trauert der verlorenen 42 immer noch ein bisschen nach.

REZENSIONEN



MEERESBIOLOGIE FORSCHUNGSREISEN UNTER WASSER

Zu den größten Mysterien auf der Erde gehören die Ozeane. Uli Kunz bringt uns ihre Geheimnisse näher – und macht auf ihre Bedrohung aufmerksam.

► Das Ziel des Forschungstauchers und Meeresbiologen Uli Kunz ist es, eine Welt sichtbar zu machen, in der wir nicht zu Hause sind. In seinem Buch nimmt er die Leserinnen und Leser mit auf eine Reise in die Unterwasserwelt – von der Nordsee bis zur Weihnachtsinsel. Dabei will er nicht nur faszinierende Bilder zeigen, sondern auch seine Arbeit als Taucher näherbringen. Die Problematik der Überfischung und die Notwendigkeit des Schutzes arbeitet der Autor immer wieder in seine Erzählungen mit ein.

Jedes Kapitel behandelt eine andere Forschungsreise, daher kann man sie unabhängig voneinander lesen. Der Umweltschutz zieht sich dabei jedoch als verbindendes Element durch alle Geschichten hindurch.

Kunz arbeitet mit einer Forschungsgruppe zusammen und bekommt Aufträge von Greenpeace, Archäologen oder Ökologen, die ihn durch die ganze Welt führen. Seine Reiseberichte starten in heimischen Gewässern, der Nord- und Ostsee, die faszinierendes Unterwasserleben zu bieten haben. Er erzählt von Seehunden vor Helgoland, bizarren Meeresbewohnern und Kaltwasserkorallen in norwegischen Fjorden.

Auf diesen Reisen ist es ihm erstmals gelungen, eine Kegelrobbe dabei aufzunehmen, wie sie einen Seehund

MARINER SCHNEE Im Gezeitenstrom der Nordsee treiben dicke Flocken aus unterschiedlichen organischen Materialien und sorgen für Sichtweiten von weniger als einem Meter.

jagt und frisst, oder einzufangen, wie Schleimaale Kadaver in den Fjorden von Norwegen beseitigen. Kunz berichtet auch von verloren gegangenen Fischernetzen im Meer, die zur Falle für andere Meeresbewohner werden, und von Vogelnestern auf Helgoland, die Plastik enthalten.

Der Autor bereist aber auch weit entfernte Orte wie Französisch-Polynesien, wo er über idealistische, junge Umweltschützer schreibt, die eine Korallenaufzuchtstation betreiben, oder zur Weihnachtsinsel, wo er die faszinierende Wanderung der Palmendiebe, einer Krabbenart, fotografiert. Man begleitet Tauchexpeditionen in französische Höhlensysteme oder unter das arktische Eis. Man begegnet Haien und Walen, den wohl bekanntesten Ozeanbewohnern, ebenso wie Plankton oder im Eis lebenden Flohkrebse.

Uli Kunz
**LEIDENSCHAFT
OZEAN**
Expeditionen in die
Tiefe
Knesebeck,
München 2021
240 S., € 35,-



Kunz beleuchtet den Ozean und seine Bewohner umfassend und zeigt ihre Vielfalt und Schönheit, weist jedoch ebenfalls auf ihre Bedrohung hin und stellt Projekte vor, die dagegen ankämpfen. So lernt man neben den engagierten Korallenzüchtern aus Französisch-Polynesien etwa Möglichkeiten für einen nachhaltigen Tunfischfang oder haifreundlichen Tourismus kennen.

Auf jeder Seite des Buchs finden sich das Thema des jeweiligen Kapitels und der Ort der Forschungsreise, wodurch man sich leicht orientieren kann. Übersichtlicher wäre es aber gewesen, wenn man diese Ortshinweise auch im Inhaltsverzeichnis fände.

Veronika Vikuk hat an der Universität Würzburg promoviert und arbeitet als Projektmitarbeiterin in einer Forschungsanstalt im öffentlichen Dienst.

GESCHICHTE APOKALYPSEN FÜR ANFÄNGER

Von den Pestwellen in Europa zu Hungersnöten in der Sowjetunion: Die Menschheit wurde bereits von einigen Katastrophen heimgesucht. Wie sich herausstellt, reagieren wir oft gleich.

► In unserer Geschichte sind Apokalypsen, Katastrophen und Weltuntergänge eine nicht enden wollende Konstante. Selbst in den ältesten Mythologien finden sich Berichte über derartige Ereignisse. Und obwohl die Vergangenheit lehrt, dass Seuchen, Unwetter, Erdbeben und Kriege immer wieder die Menschheit heimsuchen, sind wir doch überrascht, wenn es wirklich so weit ist.



Das neue Buch des aus Schottland stammenden Historikers Niall Ferguson nimmt sich Katastrophen in geschichtlicher und aktueller Hinsicht an. Der Titel lautet einfach »Doom«. In grellen weißen Großbuchstaben springen die vier Lettern der Leserschaft ins Auge, und mancher wird sich an das berühmt-berüchtigte Ego-Shooter-Spiel gleichen Namens aus den 1990er Jahren erinnern. Das Titelbild dazu ist gut gewählt: »The Great Day of His Wrath« von John Martin (1789–1854). Menschenmassen stürzen in eine tiefe schwarze Spalte und in einem feurigen Rot fließen Lavaströme auf sie zu. Ist die Aufmerksamkeit – und ein leichter Grusel – geweckt, geht es an das Lesen des fast 600 Seiten starken Bands.

Der erste Eindruck ist positiv. Die Geschichten der ausgewählten Katastrophen (etwa die Pestwellen in Europa, Hungersnöte in der Sowjetunion und in China) sind gut erzählt.

Ferguson bringt viel Hintergrundwissen und Einzelheiten zu den einzelnen Ereignissen mit. Manchmal lassen die Menge an wirtschaftsgeschichtlichen Daten – der Autor ist vornehmlich Wirtschaftshistoriker – allerdings den Lesefluss ins Stocken geraten. Dennoch, die Erzählung ist eingängig und man kann sich einen guten Überblick von der Antike bis heute verschaffen.

Interessant zu lesen sind unter anderem die antiken Berichte des Thukydides, der über eine Epidemie zur Zeit des Peloponnesischen Kriegs berichtet. Erstaunlich ist, dass sich in den letzten 2500 Jahren im Blick auf den Umgang mit Krankheiten und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft nicht viel geändert hat. Einen breiten Raum nimmt die Frage ein, wie man mit solchen Ereignissen umgeht. Gerade im historischen Längsschnitt nennt der Autor interessante Beobachtungen, wie die extremen ideologischen und religiösen Deutungen des Unglücks.

Allerdings verwundert Fergusons Eintreten für die Theorie, der »Mittelbau« sei schuld an dem schlechten Umgang der Katastrophen in der Neuzeit. Natürlich versage auch die Führung, aber der Knackpunkt liege in der Mitte. Er bezieht sich dabei auf eine These des Physikers Richard Feynman (1918–1988), der anhand des Challenger-Unglücks von 1986 festgestellt habe, dass Personen im mittleren Management durch ihre Ignoranz den Unfall hervorgerufen hätten. Auch bei der schlechten Seuchenbekämpfung in den USA sei es das dilettantische Vorgehen von Behörden gewesen, das die Covid-19-Pandemie erst unherrschbar machte, so der Autor.

Derartige monokausale Erklärungen sind äußerst fragwürdig. Ist es nicht eher so, dass gerade das obere Management gern den unteren Ebenen die Schuld für Fehlentscheidungen in die Schuhe schiebt? Oder dass die Chefetage mit realitätsfernen Vorstel-

lungen und Forderungen der mittleren Ebene ein ständiges Damoklesschwert über den Arbeitsplatz hängt? Wenn man, wie Ferguson, im Jahr 2004 zu den 100 einflussreichsten Menschen der Gegenwart gezählt wird, scheint die Lösung, die gesamte Verantwortung für miserables Management an den Mittelbau abzugeben, eine gewisse logische Konsequenz zu haben.

Was weiterhin verwundert, ist die Fixierung des Autors auf einen neuen kalten (Handels-)Krieg zwischen den USA und China. Momentan scheint zwar alles auf eine solche Konfrontation hinzudeuten, aber die Schlussfolgerung, ein »zweiter kalter Krieg« sei wünschenswert, weil er die USA aus ihrer Selbstzufriedenheit reiße, ist doch sehr bedenklich.

Im Untertitel verspricht Fergusons Buch einige Lehren für die Zukunft, die sich aus den großen Katastrophen gewinnen lassen. Leider bleiben die ethischen Aspekte dabei im Verborgenen. Gerade das wäre aber die spannende Frage: Welche Ethik müsste die Menschheit entwickeln, um künftig gegen solche Ereignisse gewappnet zu sein? Wenn wir bereit sind, etwas aus Unglücken zu lernen, dann wäre das der richtige Ansatzpunkt.

Christian Hellmann ist evangelischer Pfarrer und Journalist in Gelsenkirchen.

TECHNIK LERNEN MIT LESCH UND CO

Angesichts der Energiewende rücken erneuerbare Energien immer weiter in den Vordergrund. Doch welche gibt es und wie funktionieren sie?

► Der ein oder andere schaut vielleicht vor der Lektüre nach, ob das Buch tatsächlich vom bekannten Physiker und Philosophen Harald Lesch und seinem Sohn Florian, Ingenieur für Energietechnik, geschrieben wurde. Das Ergebnis: Ist es. Und von Christian Holler und Joachim Gaukel, beide Professoren im Ingeni-



Christian Holler, Joachim Gaukel, Harald Lesch, Florian Lesch
ERNEUERBARE ENERGIEN
 Zum Verstehen und Mitreden
 C. Bertelsmann, München 2021
 175 S., € 18,-

erbereich. Alle vier erläutern auf leichte Weise, wie erneuerbare Energien funktionieren und welches Potenzial sie in Deutschland haben. Die Mission der Autoren ist es, ein Gefühl für Energie zu vermitteln. Das gelingt ihnen durch drei Punkte: Erstens springen sie nicht unvermittelt von Leistung zu Stromverbrauch oder von Primär- zu Endenergieverbrauch, sondern erklären Schritt für Schritt das Grundlegende. Zweitens rechnen sie

mit greifbaren Größen wie Radfahrereinheiten – so ergeben zehn Stunden Strampeln rund eine Kilowattstunde an Energie, was sich viele besser vorstellen können. Drittens haben die Verfasser das Buch in ein modernes Design in blassen, unaufdringlichen Farben verpackt. Auch Zahlen und Diagramme sind anschaulich gestaltet, was das Verständnis erhöht.

Damit lässt sich erkennen, wie viel Fläche Windräder, Biopflanzen oder Solarzellen brauchen. So benötigt man für eine Kilowattstunde zwei Quadratmeter Fotovoltaik auf dem Dach, 16 für Windräder an Land oder 200, um Pflanzen für Biodiesel anzupflanzen. Energiegewinnung durch die Gezeiten oder Wellen stellen die Autoren zwar ebenfalls vor, bewerten sie aber für Deutschland als nicht relevant. Denn Küsten würden dadurch zu stark verändert und der Ertrag fiele zu gering aus.

Warum die Ingenieure und Physiker am Ende des Buchs allerdings die

Kernkraft vorstellen, erschließt sich nicht. Hier zu Lande ist sie als Option ausgeschlossen, und erneuerbar ist sie auch nicht. Greenpeace schätzt, dass die Vorräte an weltweit wirtschaftlich verfügbarem Uran in etwa 65 Jahren erschöpft sind. Zudem werden Kernkraftwerke im Buch als CO₂-neutral erklärt, was aber falsch ist, wie unter anderem das Umweltbundesamt hervorhebt. Man darf nämlich nicht die Treibhausgase unterschlagen, die vor und nach der Stromproduktion anfallen, etwa beim Uranabbau, Kraftwerksbau oder -rückbau bis hin zur Endlagerung. Laut einem IPCC-Bericht emittieren die Kraftwerke zwischen 3,7 und 110 Gramm CO₂-Äquivalente pro Kilowattstunde.

Natürlich sind daher – wenn auch in geringerem Ausmaß – erneuerbare Energiequellen ebenso wenig völlig CO₂-neutral. Das gilt insbesondere für Fotovoltaik und Biomasseerzeugung. Doch wie Forschende im Fachmagazin »Nature Energy« zusammenfassen,



Ein Geschenk, das ankommt!

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

Spektrum.de/aktion/gutscheine



REZENSIONEN

tragen Kernkraftwerke verglichen mit regenerativen Energien nicht dazu bei, Kohlendioxidemissionen zu senken. Letztlich schließen die Autoren die sinnvolle Nutzung der Kernenergie dennoch aus, weil die Investitionskosten extrem hoch sind und wegen des »möglichen Missbrauchs für Atomwaffen«. Sie wecken aber Hoffnungen auf künftige verbesserte Reaktoren.

Im Kapitel »Speicher« erwähnen sie allerdings nicht potenziell wichtige Speichertechnologien wie flüssige Redox-Flow-Akkus, die laut Forschenden des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie der größte Energiegroßspeicher der Zukunft werden könnten. Damit ließe sich der Mangel an verfügbaren erneuerbaren Energien wettmachen.

Trotz der genannten Kritikpunkte bietet das Buch eine empfehlenswerte Einführung in das Thema. Beim Lesen muss man sich keineswegs abstrampeln wie die Beispiel gebenden Radfahrer – es ist eher wie eine gemütliche Tour auf ebenem Gelände mit einem Hollandrad.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ NEURONALE HARDWARE

Durch neue Computersysteme könnten wir tatsächlich künstliches Bewusstsein erschaffen, meint der Informatiker Ralf Otte.

► Noch ein Buch über künstliche Intelligenz (KI). Doch der Titel stellt klar, dass es sich diesmal um eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema handelt. Das lässt aufhorchen, denn der Autor Ralf Otte ist Professor für Industrieautomatisierung und Künstliche Intelligenz an der Technischen Hochschule Ulm. Er forscht auf dem Gebiet des maschinellen Sehens und hat 2019 »Künstliche Intelligenz für Dummies« veröffentlicht. In einem hörenswerten Interview, geführt vom Karlsruher Institut für Technologie, betont Otte gerne, dass er nur Ingenieur sei, der auf technische Anwendun-



gen der KI abziele. Aber das ist reine Untertreibung, denn der Autor hat bemerkenswerte Ideen zum Bewusstsein, die seinem neuen Buch zu Grunde liegen.

Otte spart nicht mit Kritik an dem Wirbel, der um den aktuellen Stand der KI gemacht wird. Zugegeben: Die Leistungen sind zum Teil höchst beeindruckend. Gerade darum besteht die Gefahr, dass zunehmend – möglicherweise lebenswichtige – Entscheidungen von Automaten getroffen werden. Zudem befindet sich die Technologie hauptsächlich in der Hand von Big Tech, also Konzernen wie Facebook oder Google, und diese lassen nicht gerne zu, dass man Gewinn bringende Einsatzmöglichkeiten einschränkt. Ottos Mahnungen zeugen von einer erfreulich humanistischen Haltung, besonders wenn er den Transhumanismus als verrückte und gefährliche Pseudoreligion geißelt.

Man kann diesen kenntnisreichen und sprachlich klar ausgeführten Rundumschlag mit Gewinn lesen. Doch der Autor geht noch weiter. Er macht deutlich, dass aktuelle KI keine Form von Geist besitzt, weil sie auf Software basiert. Es sind Algorithmen, die in digitalen Computern ablaufen und einfache mathematische Operationen ausführen. Bewusstsein könne so nicht erzeugt werden.

Ottes zentraler Gedanke ist aber, dass es durchaus möglich ist, Maschinen mit echtem Bewusstsein herzustellen. Diese basierten auf einer anderen Technologie, den neuromorphen Systemen. Derartige Computer sind Netzwerke aus Bauelementen, die Neurone elektronisch nachbilden. Es

handelt sich also nicht um Software, die Gehirnzellen simuliert, sondern Hardware, in der echte physikalische Größen verarbeitet werden. Otte prognostiziert, neuromorphe Chips würden die softwarebasierte KI übertrumpfen, und im Jahr 2040 werde das Maschinenbewusstsein die Welt erobern. Warum das so ist, führt er in diesem Buch nicht weiter aus.

Verständlich wird die Argumentation, wenn man andere Werke des Autors kennt. Otte hat eine Theorie des Geistes entworfen, deren Grundlagen er 2011 in einem Buch mit dem sperrigen, aber viel sagenden Titel »Versuch einer Systemtheorie des Geistes. Mathematische und physikalische Untersuchungen mentaler Prozesse. Teil I: Ansatz zur mathematischen Analyse des Geist-Körper-Problems« vorstellte. Er vertritt darin die Position des Panpsychismus, der zwischen Dualismus und Materialismus angesiedelt ist. Demnach gibt es keine dualistische Scheidung von Geist und Materie, und Ersterer entspringt auch nicht aus Zweiterer. Geist sei stattdessen ebenso wie Materie in der Natur vorhanden, allerdings »vor-physisch«: Er könne nicht direkt mit dem Stofflichen wechselwirken.

Als Ausweg sieht Otte die Quantenphysik. Denn diese macht Wahrscheinlichkeitsvorhersagen, die ebenfalls real, aber »vor-physisch« sind. Experimente liefern nämlich ein bestimmtes Ergebnis und erst durch wiederholtes Ausführen des gleichen Versuchs lassen sich Wahrscheinlichkeiten ermitteln. Zudem postuliert Otte, dass man das Gehirn durch komplexe Zahlen mathematisch

2040 übertrumpfen neuromorphe Chips softwarebasierte KI, und das Maschinenbewusstsein erobert die Welt

beschreiben könnte. Der Realteil entspreche der Materie, das Bewusstsein verberge sich im Imaginärteil. Dadurch würden beide auf berechenbare Weise miteinander wechselwirken. Wäre die Geist-Materie-Funktion bekannt, ließe sie sich in neuromorphen Computern nutzen. Diese würden dann ein Maschinenbewusstsein zeigen.

Diese Überlegungen nennt Otte im vorliegenden Buch allerdings nicht, vielleicht weil sie zu anspruchsvoll und ungewöhnlich sind. Doch im Kern scheinen sie sein eigentliches Anliegen zu sein.

Michael Hedenus hat Physik und Philosophie studiert und 2007 in Wissenschaftsgeschichte promoviert. Er ist angestellter Software-Architekt.

NEUROWISSENSCHAFT DIE WELT DES GERUCHS

Verglichen mit unseren anderen Sinnen wird das Riechen häufig vernachlässigt – dabei spielt es eine wichtige Rolle, wie der Neuroethologe Bill Hansson erklärt.

► Es gibt wohl kaum ein Buch über das Riechen, das nicht betont, wie die Forschung die beiden chemischen Sinne Geruch und Geschmack außer Acht lässt. Auch aus historischen Gründen hat sich bereits früh die Unterscheidung zwischen »höheren« und »niederen« Wahrnehmungen etabliert, sind doch Sehen und Hören für die menschliche Kommunikation und das Sozialleben grundlegend. Aber in den letzten Jahrzehnten haben Geruchsforscher aufgeholt, und es gibt zahlreiche interessante Befunde über die Bedeutung chemischer Stoffe aus unserer Umgebung für viele Lebensvorgänge.

Der Direktor der Abteilung »Evolutionäre Neuroethologie« des Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie Bill Hansson fasst den gegenwärtigen Forschungsstand zum Thema Riechen zusammen. Dabei erfährt man viele Details über die überraschend große Sensitivität für Geruchsstoffe. Das illustriert der Autor vor allem an

tierischen Organismen, denn sein zentrales Forschungsgebiet ist das geruchsgesteuerte Verhalten von Insekten.

Das lässt sich auch am Aufbau des Buchs erkennen: Die beiden einleitenden Kapitel stellen die Riechfunktionen des Menschen dar, an die sich die Erkenntnisse über den Geruchssinn von Hunden, Vögeln, Fischen, Mäusen, Nachtfaltern, Fliegen, Mücken, Borkenkäfern und Krebsen anschließen. Man lernt von der lebenswichtigen Bedeutung der chemischen Wahrnehmung und der Kommunikation durch Geruchsstoffe für das Leben und Überleben der Organismen. Für Tiere liegen zahlreiche belastbare Befunde vor, während man die Daten, die an Menschen erhoben wurden, oft aus methodischen Gründen mit Fragezeichen versehen muss.

Ein informatives Kapitel, das der Frage »Können Pflanzen riechen?« nachgeht, fasst ebenfalls interessante Aspekte zusammen. Ob sich der Einfluss von flüchtigen Substanzen auf die Gewächse jedoch tatsächlich als Nachweis bewerten lassen, bleibt offen. Auch Tiere und Menschen verarbeiten einige chemische Signale wie Sauerstoffgehalt, der sich auf ihre Körperfunktionen auswirkt, ohne dass man den Prozess als eigenständige Sinnesmodalität ansieht.

In seinem Buch stellt Hansson zudem dar, wie sich unsere Umwelt im Lauf der Jahrtausende verändert hat; so spricht er auch die negativen Auswirkungen von globalem Temperaturanstieg, Ozonloch, der Verschmutzung der Weltmeere durch Mikroplastik und CO₂-Anstieg an. All diese Effekte

stören den Geruchssinn von Tieren und Menschen mit beachtlichen Folgen. Beispielsweise können Insekten Gerüche nur innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs wahrnehmen – entsprechend lässt sich ein Zusammenhang mit dem weltweiten Artensterben vermuten.

Abschließend beschreibt der Autor, wie Menschen Geruch (etwa in Form von Parfüm) für ihre eigenen Zwecke nutzen, und er bietet einen Ausblick in die Zukunft der Geruchsforschung. Eher pessimistisch stimmt ihn, dass synthetische Duftstoffe in unserem Alltag oft natürliche Gerüche verdrängen: Geschäfte und Produkte wie Lebensmittel werden mit künstlichen Düften behandelt.

Insgesamt ist das Buch lebendig geschrieben und daher für Laien gut lesbar. Die vielen Beispiele illustrieren, dass die vernachlässigten chemischen Sinne auch unser Alltagsleben prägen.

Wolfgang Skrandies ist Professor für Physiologie an der Justus-Liebig-Universität Gießen sowie an der Dokkyo Medical University in Japan.

EVOLUTION EIN EWIGES RÄTSEL

Seit Jahrtausenden rätseln wir, was Bewusstsein ist und wie es entsteht. Joseph LeDoux geht in seinem Buch diesen spannenden Fragen nach.

► Das neue Werk des renommierten Neurowissenschaftlers Joseph LeDoux trägt den kurzen Titel »Bewusstsein«. Darin beschäftigt er sich mit der Frage, welche Rolle bestimmte Teile unseres Gehirns bei gewissen Wahrnehmungen spielen. Dabei schlägt er einen großen Bogen vom Menschen zurück bis zum ersten Einzeller – und darüber hinaus zum Urknall und der Entstehung der Erde.

Denn alles ist miteinander verbunden und baut aufeinander auf: Die Funktionsweise unseres Bewusstseins lasse sich erst dann verstehen, wenn man sie in Beziehung zu ihrer Entwicklungsgeschichte im Millionen

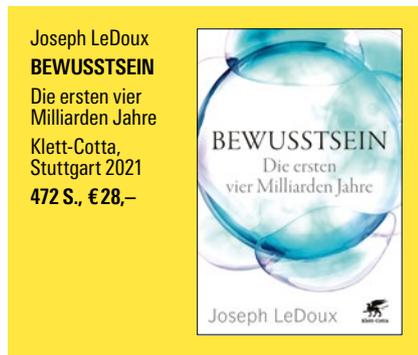


Bill Hansson
DIE NASE VORN
Eine Reise in die Welt des Geruchssinns
S. Fischer, Frankfurt 2021
400 S., € 24,-

Jahre langen Prozess der Evolution setze. Wer wissen möchte, wie Computer funktionieren, schreibt LeDoux in der Einleitung, sollte nicht erst bei den frühen Apple- und Microsoft-Prozessoren einsteigen, sondern sich auch mit dem Rechenschieber auseinandersetzen.

Deshalb beginnt LeDoux mit dem Anfang, als sich ein paar chemische Elemente zu immer komplexeren Verbindungen zusammengeschlossen haben, bis schließlich vor vier Milliarden Jahren das erste Lebewesen entstand. Es folgt die Evolutionsgeschichte vom Einzeller zum Vielzeller, hin zu Wesen, die Augen ausbilden und später eine Wirbelsäule. Das alles beschreibt der Autor ebenso dicht wie anschaulich. Die kurzen Kapitel über die Entwicklungsschritte des Lebens bauen zwar aufeinander auf, stehen aber trotzdem für sich und sind eine gute Möglichkeit, Wissen über die Uratmosphäre der Erde, Eukaryoten oder die kambrische Explosion aufzufrischen.

Etwas komplizierter wird es, wenn LeDoux nach seinem Parforceritt durch die Evolution beim Menschen



und damit bei der Frage angekommen ist, was denn nun genau menschliches Bewusstsein ist und wie es sich von der Wahrnehmung anderer Tiere unterscheidet. Das Thema ist seit mehr als 40 Jahren der Kernbereich seiner Forschung. Hier kennt er jede ideengeschichtliche Pirouette und Nuancenverschiebung bei den prägenden Begrifflichkeiten aus dem Effeff. Laien schwirrt hier schnell mal der Kopf: Wo von waren noch mal die Behavioristen überzeugt, und wie unterscheiden sie

sich von den Kognitivisten? Arbeitsgedächtnis, deliberative Kognition, präfrontaler Kortex – um im Dickicht der Bezeichnungen und der Personen, die sie geprägt, weiterentwickelt und umgedeutet haben, nicht die Orientierung zu verlieren, wäre ein Glossar hilfreich.

Auch wenn man ein paar Vokabeln nachschlagen muss und nicht jede Wendung gleich versteht, ist »Bewusstsein« eine inspirierende Lektüre. Wie denken wir? Ist der Geist vielleicht nur die Spitze des Eisbergs, weil der Großteil unserer Handlungen wie bei Tieren unbewusst erfolgt? So detailliert und vielgestaltig sind einige der großen Fragen der Menschheit schon lange nicht mehr verhandelt worden.

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

POLARFORSCHUNG DIE WAHRHEIT ÜBER PINGUINE

Viele Klischees über die faszinierenden Vögel sind schlichtweg falsch. Der Biologe Lloyd Spencer Davis räumt mit Irrtümern auf und widmet sich dabei auch den Naturforschern des 20. Jahrhunderts.

► Das Buch wimmelt von Helden und Dramen. Nicht nur einmal vergisst man beim Lesen fast das Atmen, und es läuft einem ein kalter Schauer über den Rücken, wenn der Autor die dramatischen Expeditionen zum Südpol in den 1910er Jahren wiedergibt. Selbst wer sie schon kennt, erfährt dabei Neues – und das nicht nur, weil es ebenso um das lange geheim gehaltene Liebesleben der Pinguine geht.

Der Autor Lloyd Spencer Davis ist neuseeländischer Biologe, der über Erdhörnchen promoviert und sich dann der Pinguinforschung verschrieben hat. Seit mehr als 30 Jahren fährt er in die Antarktis und veröffentlicht Artikel und Bücher zu den Vögeln, über die schon so viel gelogen wurde: Am publikumswirksamsten in dem Kinofilm »Die Reise der Pinguine«, ein

»Kaiserpinguine sind nicht der Inbegriff der Liebe, sondern die Schutzheiligen der Scheidung«

Lloyd Spencer Davis

Kassenschlager mit traumhaften Bildern, der zwar das strapaziöse Leben und Brutgeschäft der Kaiserpinguine wissenschaftlich korrekt zeigt, jedoch eine Liebesgeschichte erfindet, die jeder Realität entbehrt. Nein, die Vögel sind nicht monogam. Und nein, sie bilden meist keine heterosexuelle Kleinfamilie. Davis schreibt über die Klischees im Film: »Kaiserpinguine sind nicht der Inbegriff der Liebe, sondern die Schutzheiligen der Scheidung.«

Das Besondere an diesem Buch ist, dass der Autor Themen zusammenführt, die man zuvor getrennt wahrgenommen hat. Da sind zunächst seine Berichte über die Polarforscher Roald Amundsen, Robert Scott, Ernest Shackleton und Fridtjof Nansen. Bei den Expeditionen froren vielen Teilnehmern die Gliedmaßen ab und einige starben grausam, Schlittenhunde wurden erschossen und Pinguine geschlachtet – etwa, wenn der ganze Proviant samt den Schlitten in eine tiefe Gletscherspalte gestürzt war.

In diese Berichte flicht Davis die Geschichte des weltweit ersten Pinguinforschers ein, des eher stillen George Murray Levick, der als Schiffsarzt die Südpolexpedition des Briten Scott begleitete. Während dieser den Wettlauf gegen Amundsen verlor und Ende März 1912 starb, überlebte Levick. Mit fünf anderen Männern gehörte er zur Nordgruppe, die sich sieben Monate in einer Schneehöhle eingruben. In dieser ausweglosen Lage begann er, wann immer der antarktische Winter es zuließ, das Sozialverhalten der Pinguine zu beobachten.

Der dritte Erzählstrang, den der Autor einwebt, gilt seinen eigenen Expeditionen. Er beschreibt faszinierend, wie er Codes mit weißer Lackfarbe auf den Rücken der Vögel pinselt, um sie auseinanderzuhalten, wie er mit einer langen Bambusstange deren Hinterteile anhebt, um nach den Eiern im Nest zu schauen. Er erzählt so lebendig von ihrem Balz- und Brutverhalten, als sähe man einen Film: Das Männchen plustert die Federn am Hinterkopf auf, senkt den Kopf, steckt ihn unter einen Flügel und gibt einen Knurr laut von sich. War die Balz erfolgreich, festigt das Paar seine Bindung durch unverwechselbare Rufe, Brust an Brust, die Schnäbel gen Himmel, und tröten.

Bei seinen Recherchen zu Levick stößt Davis auf dessen Originalaufzeichnungen von 1912, die dieser offensichtlich selbst zensiert hat. Einige Stellen sind überklebt, andere mit einer Geheimschrift aus griechischen Buchstaben geschrieben. Als seine Beobachtungen



1914 als Buch (das erste über Pinguine überhaupt) veröffentlicht wurden, fehlten all diese Stellen – auch weil man von Seiten des British Museum of Natural History ein Veto eingelegt hatte.

Durch die Zensur ist das Liebesleben der Tiere in Levicks Buch ebenso geschönt wie im genannten Kinofilm. Weggelassen wurden der promiskuitive Sex, das Besteigen von Toten, Vergewaltigungen und Prostitution: Sex gegen Steine für den Nestbau.

Dreieinhalb Jahrzehnte lang war Davis der falschen Überzeugung, mit seinen Beobachtungen Pionierarbeit geleistet zu haben. Doch schließlich musste er erkennen, dass er nicht der Erste ist: Er trat lediglich in den Fußstapfen eines Mannes, der 1876 im pruden viktorianischen Zeitalter geboren, seine Erkenntnisse verheimlichen musste.

Manchmal springt der Autor zu schnell zwischen den verschiedenen Erzählungen hin und her, wodurch man einige Male fast die Orientierung verliert. Eine längere Verweildauer bei einer Person oder einer Expedition wäre besser gewesen. Dennoch ist das Buch etwas Besonderes. Auch weil Davis Charakterstudien der Polarforscher einfließen lässt und ein Bildteil ebendiese Männer, die Pinguine und die eiskalte Schönheit der Antarktis sichtbar macht.

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



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

WAS UNSER HERZ AN LEISTUNG BRINGT

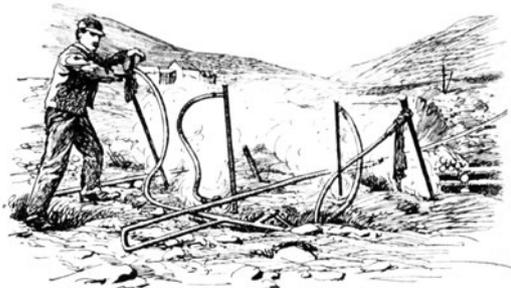
1922

»Recht interessante, wenn auch praktisch bedeutungslose Berechnungen finden sich im ›Scientific American‹. Mit jedem Herzschlag treiben die beiden Herzkammern 10 Kubikzoll Blut (1 Zoll = 2,54 cm) in den Körper, also in einer Minute 750, in einer Stunde 45000 usw. In Wasser umgesetzt wären dies 7000 Tons in einem Jahr. Oder in einem runden Wasserturm von 50 Fuß (1 Fuß = 30,4 cm) Durchmesser und 115 Fuß Höhe wäre diese Gesamtblutmenge eines Jahres unterzubringen.« *Die Umschau 1, S. 12*

MIT VOLLDAMPF NACH GOLD GRABEN

»Im Innern Alaskas ist die Temperatur so niedrig, daß der Erdboden bis zu großer Tiefe fest gefroren ist. Die Goldgräber mußten deshalb bisher Holzfeuer anzünden, um den Boden aufzuweichen. Da das ein sehr umständliches Verfahren ist und Wälder oft weit entfernt sind, hat man ein neues Verfahren mit Dampfspritzen eingeführt. Diese bestehen aus Stahlrohren. [Sie] werden mit Hammerschlägen in den Boden eingetrieben und sind an eine Dampfleitung angeschlossen. Der aus Löchern ausströmende Dampf weicht den Boden auf. Dadurch geht die Arbeit schneller voran und die Bergleute sind vor dem schädlichen Kohlenrauch bewahrt.« *Technische Monatshefte 1, S. 24*

Ein Goldgräber weicht mit Dampf den Boden auf.



USA: AUTOS LÖSEN PFERDE AB

»Die zunehmende Benutzung von Kraftwagen verdrängt das Pferd immer mehr aus den amerikanischen Städten. Zählungen in verschiedenen Städten beweisen das.

	1910	1920
New York	128224	56539
Chicago	68122	30388
Philadelphia	50461	19472
Baltimore	15346	7378
Boston	23007	10093
Pittsburgh	12845	6032

Die Umschau 4, S. 60

FORTSCHRITT BEI DER BRENNSTOFFZELLE

1972

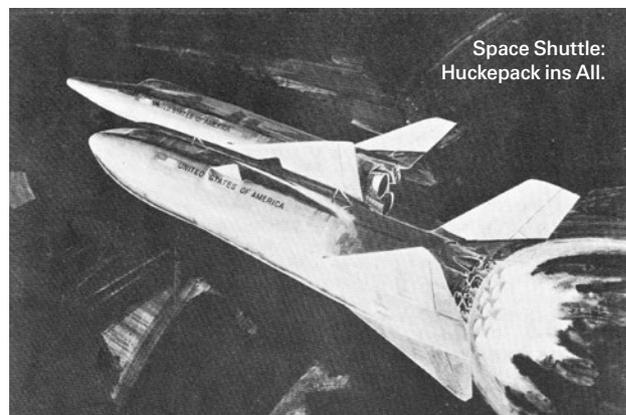
»Da es industriell uninteressant ist, Brennstoffzellen zu bauen, die nur mit reinem Wasserstoffgas gespeist werden und die auf kostspielige Platinkatalysatoren angewiesen sind, betreibt Prof. Franz Pohl die Entwicklung von Zellen, die ungereinigtes Stadtgas verarbeiten und die mit der katalytischen Wirkung von Wolframkarbid-Elektroden auskommen. Diese konnten entscheidend verbessert werden, indem man von der Herstellung des Wolframkarbids bei hohen Temperaturen (etwa 1500 °C) abging und statt dessen die Karburierung (d. h. Umwandlung des Metalls zum Metallkarbid) von Wolframpulver mit Kohlenmonoxid bei 800 bis 900 °C vornahm.« *Elektronik 1, S. 27*

BITTERE MEDIZIN GEGEN FINGERLUTSCHEN

»Ein Mittel gegen Fingerlutschen wurde in der Schweiz entwickelt. Es handelt sich dabei um eine stark riechende und bitter schmeckende Substanz, die den Kindern auf die Finger gepinselt wird. Untersuchungen an 135 Fingerlutschern zeigten, daß drei Viertel mit Hilfe des Mittels ganz von ihrer Angewohnheit befreit wurden. Die Behandlung soll aber erst nach dem 2. Lebensjahr der Kinder einsetzen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 1, S. 33*

WIEDERVERWENDBARE RAKETEN

»Inzwischen ist in den USA das Interesse an einem System laut geworden, das, ähnlich dem Luftverkehr, Lasten und Personen in eine Erdumlaufbahn und zurück befördern kann. Seine Betriebskosten sollten so niedrig sein, daß ein höherer Anteil der Raumfahrtbudgets für die Nutzlasten verwendet werden kann. Die Projekte verwenden eine zweistufige Huckepackanordnung, die vertikal gestartet wird und deren Stufen horizontal zurückkehren und landen. Das Rendezvous kann mit einer Raumstation stattfinden oder nur dem Absetzen von Baugruppen oder Treibstoffen einer Sonde dienen. Als entscheidendes Ergebnis der Studien ist anzuführen, daß die Ersparnis in 15 Jahren Betriebszeit das Doppelte der Entwicklungskosten beträgt.« *Die Umschau 1, S. 26*



LESERBRIEFE

BESCHIEDENE ERGEBNISSE

Kardiologe und Charité-Professor Wilhelm Haverkamp hinterfragte den Nutzen tragbarer Computersysteme, die Körperfunktionen überwachen. (»Gesundheitscheck am Handgelenk«, »Spektrum« November 2021, S. 48)

Thomas Graßl, per E-Mail: Als langjähriger »Spektrum«-Leser finde ich es sehr gut, dass einmal ein Artikel erscheint, der sich nicht nur mit den übertrieben positiven Erwartungen und Berichterstattungen über Wearables, sondern gleichzeitig auch mit den sehr bescheidenen Ergebnissen auseinandersetzt.

Ich habe schon einige Wearables im Internet bestellt und analysiert, die angeblich EKG, Blutsauerstoffsättigung und sogar den Blutdruck messen können. Da EKG bei Wearables ja meist mit Puls gleichgesetzt wird, ist der erste Test sehr einfach: Sie fühlen Ihren Puls, zählen eine Minute lang mit und vergleichen das Ergebnis mit dem angezeigten Wert. In absoluter Ruhe funktioniert das meist noch gut. Bei der Blutsauerstoffmessung ist eine Überprüfung eigentlich kompliziert, meine smarteste Watch hat da aber einen einfach zu durchschauenden Zufallsgenerator. Während auf der Rückseite eine grüne LED hektisch blinkt, werden im Display gleichverteilt vier Zahlen zwischen 90 und 99 angezeigt, die letzte bleibt dann stehen. Das ist übrigens die einzige Smartwatch, die ich noch nutze, denn sie liegt ausgeschaltet auf dem Wohnzimmertisch und erinnert mich daran, dass ich mich mehr bewegen sollte. Manchmal reicht das schon als Motivation.

THOMAS DODT



Thomas Dodt, per E-Mail: Wie in dem Artikel richtig angesprochen, steht und fällt die Nutzbarkeit dieser Smartwatches mit der Qualität der Messungen. Hier scheint es große Unterschiede zwischen den Geräten zu geben. Getreu dem Motto: »Wer misst, misst Mist, wer viel misst, misst viel Mist« habe ich meine eigene Smartwatch daher einem Null-Test unterzogen und anschließend zurückgegeben.

BLUTDRUCKMESSUNG Dem mehr als 60 Jahre alten Teddy geht es laut Smartwatch hervorragend. Auch Pulsfrequenz und Sauerstoffsättigung waren im Normbereich.

KEINE PAARUNG MIT FÜCHSEN

Laut Erbgutanalysen stehen Dingos zwischen Wölfen und wolfsähnlichen Hunderassen. Stellen sie eine eigene Spezies dar? Die Anthropologin Pat Shipman begab sich auf Spurensuche. (»Der mysteriöse Dingo«, »Spektrum« November 2021, S. 32)

Leserbriefe sind willkommen!

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

Karsten Dörfer, Heinade: In dem sehr spannenden Artikel heißt es, »dass Haushunde sich äußerst eifrig mit Dingos paaren (und auch mit Wölfen, Kojoten, Schakalen oder Füchsen)«. Für eine erfolgreiche Paarung mit Füchsen gibt es meines Wissens keinen entsprechenden Nachweis, und auf Grund der nicht zueinander passenden Chromosomenzahl sind solche Mischlinge auch praktisch ausgeschlossen.

Antwort des Redakteurs Andreas Jahn:

Sie haben Recht: Obwohl Hunde und Füchse zur selben Familie der Canidae gehören, lassen sie sich schon wegen der unterschiedlichen Chromosomenzahl (Rotfuchs: 34; Wolf, Haushund und Dingo: jeweils 78 Chromosomen) nicht kreuzen. Wir bitten, den Fehler zu entschuldigen.

DICHTEÄNDERUNGEN UNERHEBLICH

Die Waffenforscher David Wright und Cameron Tracy erläuterten, warum neuartige Lenkflugkörper die in sie gesteckten Erwartungen kaum erfüllen werden. (»Der Hype um den Hyperschall«, »Spektrum« November 2021, S. 68)

Martin Treiber, per E-Mail: Sie schreiben, dass »sich die Schallgeschwindigkeit mit der Dichte und somit der Höhe ändert«. Die Schallgeschwindigkeit ist proportional zur Wurzel aus Druck durch Dichte. Bei einem idealen Gas, was für Luft näherungsweise zutrifft, steigt jedoch der Druck mit der Dichte und der Temperatur, so dass sich Änderungen des Drucks und der Dichte wegheben und letztendlich eine Proportionalität zur Wurzel aus der Temperatur übrig bleibt. Die Höhenabhängigkeit ergibt sich nur indirekt über die Höhenabhängigkeit der Temperatur.

ERRATUM

»Chemie für das 21. Jahrhundert«, »Spektrum« Dezember 2021, S. 24

Die beiden Chemie-Nobelpreisträger wurden nicht wie angegeben 1986 geboren, sondern 1968.

Eine Spekulation auf die Zukunft

Investieren Sie in etwas, das es noch nicht gibt!

Eine Kurzgeschichte von S. R. Algernon

»Das heißt also, wir kaufen sozusagen einen Planeten?« fragt der grünäugige junge Mann, der dir an deinem Schreibtisch gegenüber sitzt. Die neugierigen Pupillen in seinem schmalen Gesicht wandern über deine Schulter zu den Sternkarten und Börsentickern hinter dir und fixieren einen Moment lang das Modell der Zeitmaschine von H. G. Wells auf deinem Tisch.

»Nicht gleich einen ganzen Planeten, Jae«, korrigiert seine Partnerin. Sie hat hellorange gefärbte Haare und trägt ein Sweatshirt mit dem Namen eines lokalen Colleges, das einen ziemlich guten Ruf genießt. Sie definiert sich als weiblich im traditionellen Sinn, obwohl ihr Hals links und rechts Kiemenspalten aufweist. Ihr reflektierender Augenhintergrund blitzt auf, wenn das Licht unter dem richtigen Winkel einfällt. »Nur ein kleines Stück eines Planeten.«

Die jungen Leute von heute führen ihr Leben auf ihre eigene Weise, denkst du insgeheim – nicht so wie früher einmal, als du selbst noch jung warst. Diesen Gedanken findest du wichtig; er hilft dir, mit der Situation klarzukommen.

»Das trifft nicht ganz zu«, erklärst du und beugst dich verschwörerisch vor, als würdest du ihnen gleich ein großes Geheimnis verraten. »Sie erwerben einen Anteil an der spekulativen Urbarmachung einer bestimmten Welt. Das einschlägige Gesetz besagt, dass ein Anteil der von der Kolonie geleisteten Produktion mittels Kryptowährung zurück zur Erde übertragen wird, und als Anteilseigner erhalten Sie einen Teilbetrag dieser Gesamtsumme.«

»Ich verstehe«, sagt Tabby. O du meine Güte, die da mit den Katzenaugen heißt Tabby, wie meine Tochter. Warum müssen sich die Kunden immer so einprägen? Warum sind sie so schwer zu vergessen?

»Moment mal, nicht so schnell«, wendet Jae ein und erhebt einen Zeigefinger, während die beiden die Broschüre studieren. »So eine Spekulation mit Exoplaneten erstreckt sich über Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte. Wie sollen wir damit hier und jetzt Gewinn machen?«

Du beugst dich wieder eindringlich vor, um den Trick an der Sache zu erläutern, aber Tabby kommt dir zuvor.

»Ich habe etwas darüber gelesen«, erklärt sie. »Vor 500 Jahren haben die Leute in Holland riesige Geldsummen für Tulpenblüten hingeblickt. Ihnen war es ganz egal, ob sie die Tulpen jemals mit eigenen Augen wachsen sehen würden oder nicht. Der entscheidende Punkt war der: Sie konnten das Eigentumsrecht an den Blüten gleich wieder zu einem noch höheren Preis weiterverkaufen.«

»Sie haben den Kern der Sache erfasst«, lobst du. »Während der Zeitpunkt des Starts immer näher rückt, steigt die

Erwartung, dass die Kolonie Erfolg haben wird, und Ihr Anteil an dem zu erwartenden Gewinn nimmt an Wert zu. Wenn Sie sich jetzt einkaufen, noch in der Planungsphase, wird Ihnen jemand in 50 Jahren, wenn das Unternehmen konkrete Gestalt annimmt, das Hundertfache bieten.«

»Aber«, wendet Jae ein, »falls die Spekulation platzt, ist unser Anteil wertlos!«

»Da haben Sie ganz Recht«, erwidert du. Es ist beruhigend, zu erfahren, dass die Anfangsgründe der Ökonomie noch immer auf dem Lehrplan stehen. Jetzt wird es Zeit, Tabby einen verschwörerischen Blick zuzuwerfen und mit deinen Fingern ein Spitzdach zu formen. An dem Glanz in Tabbys Augen kannst du erkennen, dass ihr technisch verbesserter Sehsinn eine Lüge aufspüren würde.

»Ich kann garantieren, dass dieses Raumschiff starten wird und dass die Anteile, die Sie mit Ihren bescheidenen Ersparnissen kaufen, ausreichen werden, Ihren Ruhestand zu finanzieren.«

»Aber wie?«, fragt Jae. Tabby schaut erst zu ihm, dann wieder zu dir.

»Ich kann Ihnen an diesem Punkt nur versichern, dass Sie Ihren Schnitt machen werden, sobald die Überweisung getätigt ist.«

Das ist üblicherweise der Punkt, an dem sie aussteigen, wenn überhaupt. Du redest weiter, bevor sie antworten können.

»Ehe Sie sich entscheiden, darf ich Ihnen unser beliebtestes Produkt anbieten, einen Futures-Vertrag. Er besagt, dass wir Ihnen in 50 Jahren, von heute an gerechnet, Ihre Anteile zum 75-Fachen ihres gegenwärtigen Werts abkaufen werden. Wenn die Sache platzt, verlieren wir, nicht Sie.«

Tabby weiß, dass du nicht gelogen hast – nicht wirklich –, und Jae möchte dein Büro nicht mit leeren Händen verlassen. Gemeinsam lesen sie den Vertrag noch einmal durch. Jae nickt Tabby zu, und sie streicht mit dem Handrücken über ihren Scanner. Es piepst.

»Ausgezeichnet«, sagst du. »Jetzt sind wir im Geschäft, darum halte ich mein Wort und erzähle Ihnen die ganze Geschichte. Unsere Firma ist seit Längerem in Überlichtkontakt mit einer anderen Spezies, den so genannten Astrophanen. Sie wissen hoffentlich, was Überlichtkontakt bedeutet?«

»Natürlich«, antwortet Tabby. Die Schlangen sind einfache Ziele, denn ihre Fantasie erledigt für dich die Arbeit.

»Die Astrophanen haben geologische Daten zu allen Planeten in ihrem System gesammelt. Die Astronomen auf unserer Gehaltsliste werden so tun, als würden sie die Daten

innerhalb der nächsten Jahrzehnte nach und nach entdecken, um so das Interesse anzufachen und den Preis der Anteile hochzutreiben. Wenn Sie in Ruhestand gehen, haben Sie ausgesorgt, und auch wir bringen ein hübsches Sümmchen auf die Seite. Eine typische Win-win-Situation.«

»Hm« macht Jae. Bevor sie allzu tief darüber nachdenken können, fährst du fort.

»Natürlich würden die Leute uns für völlig verrückt halten, wenn diese Sache zu früh ans Licht käme. Darum wären wie Ihnen sehr verbunden, wenn Sie diesen diskreten Handel für sich behielten.«

»Sicher«, meint Jae.

»Mmm-hm«, macht Tabby.

Du weißt, sie werden etwas ausplaudern, und das wird ausreichen, um neue Kunden anzulocken, aber nicht konkret genug sein, um die Aufsichtsbehörden aufzuschrecken. Du entlässt das Paar mit einem breiten Lächeln. Erst in der Stille deines Büros kommt dir wieder der Teil der Geschichte zu Bewusstsein, den du nicht erzählt hast.

Du hast ihnen nicht gestanden, dass die Astrophanten die dreckige Arbeit in den Minen verabscheuen und sie lieber gering geschätzten Spezies überlassen. Du hast das Sperrfeld nicht erwähnt und das automatische Arbeitslager, das die Kolonisten erwartet. Du redest dir ein, dass du niemandem Schaden zugefügt hast. Die Kolonisten sind ja noch nicht einmal geboren. Du tröstest dich damit, dass sie, wenn sie aufbrechen werden, dies aus ihrem eigenen freien Willen tun.

Wenn das nicht hilft, erinnerst du dich, dass die Astrophanten zwar die niedere Minenarbeit verachten, aber große Lust zu interstellaren Eroberungen verspüren, wenn die an sie gezahlten Tribute nicht zu ihrer Zufriedenheit ausfallen.

Nachdenklich betrachtest du die kleine Zeitmaschine auf deinem Tisch. Jenes Buch von H. G. Wells handelte eigentlich gar nicht vom Lauf der Zeit. Es malte eine zeitlose Eigenschaft der Menschheit aus, personifiziert in den kindlichen Eloi und den unterirdisch dahinvegetierenden Morlocks. Indem du den Eloi deiner Zeit dienst, schaffst du die nächste Generation von Morlocks. Und so besteht die Menschheit weiter, hinterhältig und gemein wie eh und je – aber nicht mehr allein auf der Welt.

Doch jetzt heftest du erst einmal den neuen Vertrag ab, genehmigst dir einen Drink und wartest auf den nächsten Kunden. ◀

DER AUTOR

S.R. Algernon studierte unter anderem Biologie an der University of North Carolina in Chapel Hill. Er hat neben zwei Bänden mit Sciencefiction-Stories den Roman »Warming Season« (2020) publiziert.

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 570, S. 552, 2019

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

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Michael Springer

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, 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 € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-. 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. 43 vom 1.1.2022.

Einem Teil der Auflage liegt Werbung von Plan International Deutschland bei.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

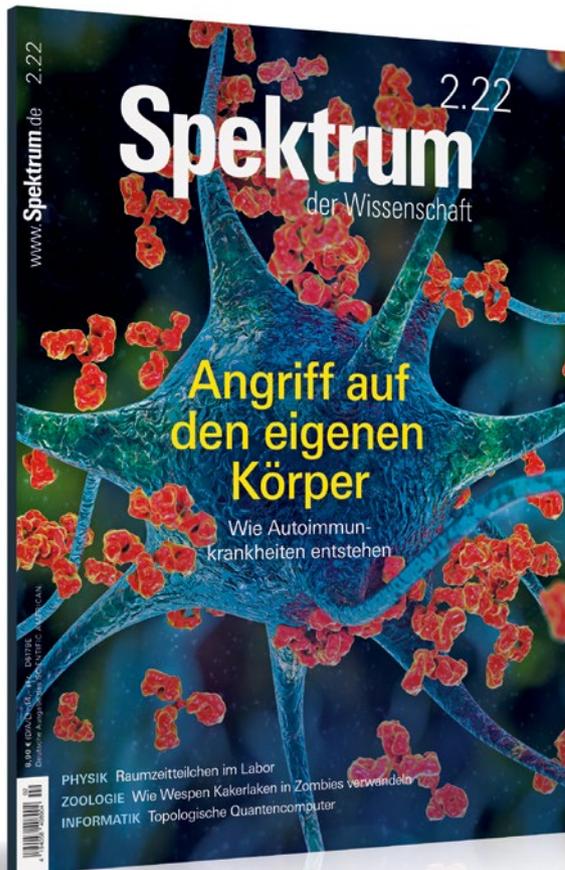
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmut
Executive Vice President: Michael Florek
Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



VORSCHAU



DR. MICROBE / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

WARUM DER KÖRPER SICH SELBST ANGREIFT

Hunderte Autoimmunkrankheiten sind bekannt, von Alopecia areata bis Zöliakie. Früher nahmen Forscher an, diese Leiden gingen allein vom Immunsystem aus. Inzwischen zeichnet sich ab, dass die angegriffenen Körperzellen selbst zur Krankheit beitragen, indem sie die Immunabwehr übertrieben stark alarmieren – ausgelöst durch Virusinfekte, Umweltchemikalien oder ein verändertes Mikrobiom.

ZOMBIE MIT SECHS BEINEN

Mit gezielten Stichen verwandelt die Juwelwespe wehrhafte Kakerlaken in hilflose Wirte für ihren Nachwuchs. Dazu muss sie sowohl ihr Gift als auch ihr Ei präzise am Körper des Opfers platzieren. Wie gelingt ihr das?



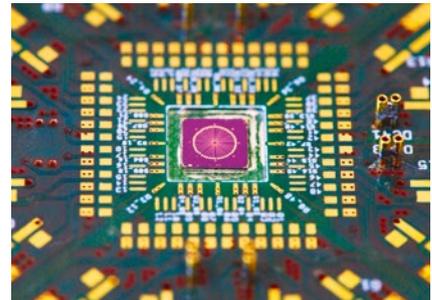
KENNETH C. CARAWA



XIHO / GETTY IMAGES / ISTOCK

LABOR FÜR DIE RAUMZEIT

Möglicherweise entsteht das Gefüge von Raum und Zeit aus einer Art Quantenverschränkung. In Experimenten sollen kalte Atome nun mit ihren physikalischen Wechselwirkungen Hinweise auf viel versprechende theoretische Ansätze geben.



IST AUSTRIA

TOPOLOGISCHE QUANTENCOMPUTER

Eine neue Art von Qubit könnte den Weg zu einem universellen Quantencomputer ebnen. Doch noch ist nicht klar, ob eine solche Informationseinheit überhaupt existiert.

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](https://www.spektrum.de/newsletter)

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



Sie haben die freie Wahl

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



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

Spektrum.de/aktion/sdwabo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
Die Woche

NR **42** 25.10.2021

- > Taucher entdeckt Schwert eines Kreuzritters
- > Kugelsternhaufen blieb nach galaktischer Einverleibung übrig
- > Schlaue Anpassung an dauerhafte Dunkelheit

TITELTHEMA: GESCHLECHTERFORSCHUNG

Männlichkeit im Wandel

Viele Männer leiden unter einem traditionellen Rollenbild. Um das zu ändern, sollten sie sich mit ihrer Identität auseinandersetzen.

NEGATIVE EMISSIONEN
Vulkangestein soll Klimaziele retten

HYBRIDE IMMUNITÄT
Das Rätsel der Corona-Superimmunität

URSPRUNG DER ZAHLEN
Die Rechenkünste der Neandertaler

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

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

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

