

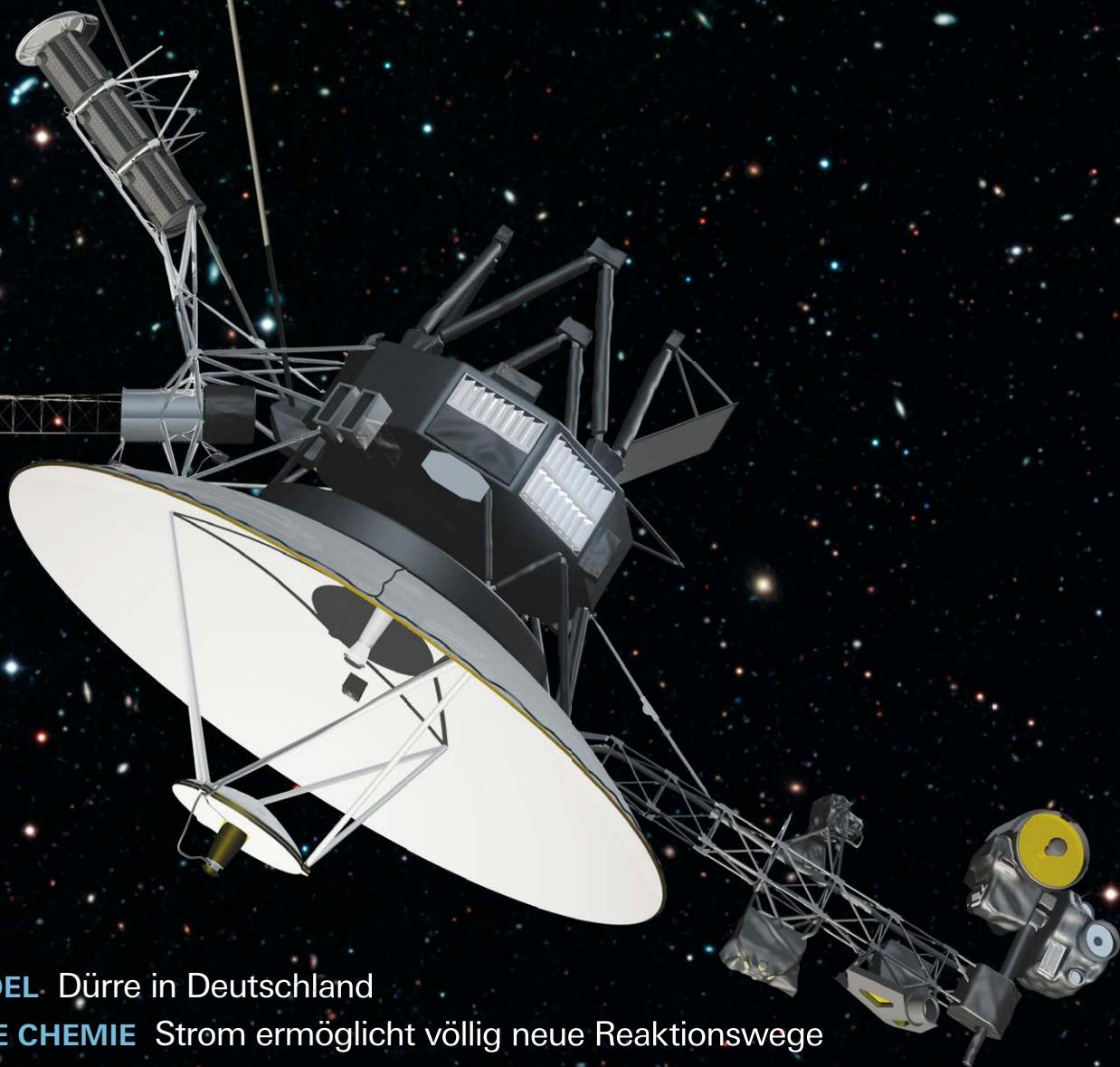
11.22

# Spektrum

der Wissenschaft

## Voyagers Erbe

Einblick in die Grenzen des Sonnensystems



**KLIMAWANDEL** Dürre in Deutschland

**ORGANISCHE CHEMIE** Strom ermöglicht völlig neue Reaktionswege

**NEANDERTALER** Uns ähnlicher als gedacht

# 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](mailto:service@spektrum.de) | Tel. 06221 9126-743

**Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen**



# EDITORIAL DEUTSCHLAND, DÜRRELAND?

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter

[hanser@spektrum.de](mailto:hanser@spektrum.de)

► Dieses Jahr habe ich schnell aufgegeben. Aufgegeben, den Rhododendron vor dem Vertrocknen zu bewahren, unseren Rasen zu sprengen, die Himbeeren am Leben zu halten – kurzum: dafür zu sorgen, dass unser Garten im gewohnten grünen Zustand bleibt. Hatten wir 2018 noch mit aller Kraft gegen die Trockenphase angewässert und 2019 uns immerhin einige Wochen mit Schlauch und Gießkanne gegen die Dürre gewehrt, haben wir jetzt resigniert. Denn alles spricht dafür, dass mediterran anmutende Sommer wie dieser in Zukunft zur neuen Normalität werden. Da passt man doch lieber die Bepflanzung an den Regenmangel und die Hitze an, anstatt Kubikmeter um Kubikmeter Trinkwasser in den Boden zu versenken und trotzdem zuschauen zu müssen, wie das Grün immer gelber und brauner wird. Unseren Schwertlilien geht es jedenfalls blendend, ebenso der Feige und dem Pfirsichbaum, welche die trockenen und heißen Bedingungen mit Rekordernten quittierten.

Letztlich tröstet das aber nur wenig darüber hinweg, dass sich Mitteleuropa in einer dramatischen Umbruchphase befindet: weg vom Wasserüberflussgebiet hin zum drohenden Wassermangel. Wie Claudia Pahl-Wostl, Professorin für Ressourcenmanagement der Universität Osnabrück, ab S. 46 darlegt, ist Deutschland eines der Länder weltweit, deren Wasservorräte am stärksten abnehmen. Aber sie stellt auch durchdachte Gegenmaßnahmen vor, die einer Eskalation vorbeugen können. Hier ist die Politik gefordert, diese konsequent durchzusetzen – genauso wie jeder einzelne von uns.

Was Menschen zu Stande bringen können, wenn der nötige Wille sie antreibt, zeigen in der Wissenschaft die beiden Voyager-Raumsonden geradezu exemplarisch. Die 1977 gestarteten Missionen sollten ursprünglich nur vier Jahre arbeiten, aber sie erwiesen sich als weit erfolgreicher und dauerhafter als anfangs gehofft und senden heute immer noch Daten aus fernen Regionen außerhalb unseres Sonnensystems. Das Titelthema dieser Ausgabe dokumentiert ab S. 12 die schier unglaubliche Erfolgsgeschichte. Meine Hoffnung: Wenn eine solche technische und logistische Meisterleistung möglich ist, sollten wir doch auch unseren Wasserhaushalt in den Griff bekommen können.

Herzlich Ihr



## JETZT AM KIOSK!

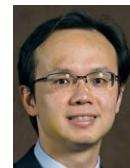
Wer waren sie, die Piraten des Goldenen Zeitalters um 1700? In **Spektrum GESCHICHTE** 4.22 lesen Sie, was Historiker über die Seeräuber vom Schlag eines Blackbeard tatsächlich wissen.

## IN DIESER AUSGABE



### MICHAEL B. HABIB

Der Paläontologe und Dinosaurierexperte zeichnet ab S. 34 nach, wie es im Verlauf der Evolution laut wurde – weil die Tiere anfingen, mehr und mehr Krach zu machen.



### MICHAEL GOLD, HANG LIN, MEAGAN MAKARCZYK

Lässt sich ein komplexes Körperorgan, das aus mehreren Gewebetypen besteht, auf einem Biochip nachbauen? Ab S. 40 schildern die drei Fachleute, wie das geht.



### DAVID W. FRAAYER, DAVORKA RADOVČIĆ

Neandertaler und *Homo sapiens* waren sich ähnlicher als vermutet. Welche Funde dafür sprechen, berichten die beiden Paläoanthropologen ab S. 78.

# INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

24 FORSCHUNG AKTUELL

## Pfadbestimmung im Doppelspalt

Ein Teilchen nimmt verschiedene Wege gleichzeitig.

## Der Schwarze Tod kam aus Kirgisistan

Alte DNA verrät den Ursprung der Mittelalterpest.

## Analoge KI

Physiker bauen neuronale Netze aus Schallwellen.

## Gefahr für Kieselalgen

In sauren Ozeanen fehlt den Einzellern Silizium.

35 SPRINGERS EINWÜRFE

## Der Hunger und die Frauen

Nahrungskrisen treffen die weibliche Bevölkerung eher.

55 FREISTETTERS FORMELWELT

## Vorsicht, Reißzähne!

In der Mathematik stößt man gelegentlich auf Vampire.

64 SCHLICHTING!

## Segelfliegende Spinnen

Elektrische Felder sorgen für Auftrieb.

84 REZENSIONEN

94 ZEITREISE

95 LESEBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

## 12 RAUMFAHRT GRENZGÄNGER DES SONNENSYSTEMS

Die Voyager-Sonden sind weiter ins All gereist als jedes andere menschengemachte Objekt und noch immer in Betrieb. Doch ein baldiges Ende der Mission ist unabwendbar.

Von Tim Folger

## 34 EVOLUTION ALS ES AUF DER ERDE LAUT WURDE

Milliarden Jahre blieb es auf der Erde ruhig – bis einige Geschöpfe anfangen, Lärm zu machen.

Von Michael B. Habib

## 40 BIOTECHNOLOGIE DAS KNIEGELENK AUF EINEM CHIP

Organ-on-a-Chip-Verfahren helfen, schmerzhafte Gelenkerkrankungen zu erforschen und bessere Therapien dagegen zu entwickeln.

Von Michael S. Gold, Hang Lin und Meagan Makarczyk

## 46 WASSERWIRTSCHAFT WEGE AUS DER TROCKENHEIT

Deutschland verliert Wasser – mit verheerenden Folgen. Aber die Austrocknung ist kein Schicksal: Mit der richtigen Herangehensweise können wir gegensteuern.

Von Claudia Pahl-Wostl

## 56 SYNTHESECHEMIE STROM, MARSCH!

Elektrochemische Ansätze bringen oft dort Erfolg, wo die klassische organische Synthese an ihre Grenzen stößt. Immer mehr Forschungsgruppen entdecken derartige Methoden für sich.

Von James Mitchell Crow

## 66 KRYPTOGRAFIE DATENSCHUTZ FÜR BIG DATA

Mit neuen Verschlüsselungsmethoden versuchen Informatiker, sensible Informationen im Einklang mit der individuellen Privatsphäre zu nutzen.

Von Edd Gent

## 72 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

## DAS PROBLEM MIT DEN $10^{80}$ ÄPFELN

Eine harmlos aussehende Aufgabe erfordert einen Ausflug in die Theorie der elliptischen Kurven – und die Lösungen nehmen gigantische Werte an!

Von Christoph Pöppe

## 78 NEANDERTALER MENSCHEN WIE WIR

Die Neandertaler waren ebenso fortgeschritten wie *Homo sapiens*. Etwa deshalb, weil sie sich viele Techniken vom modernen Menschen abgeschaut haben? Nicht unbedingt; Funde aus Kroatien beweisen das Gegenteil.

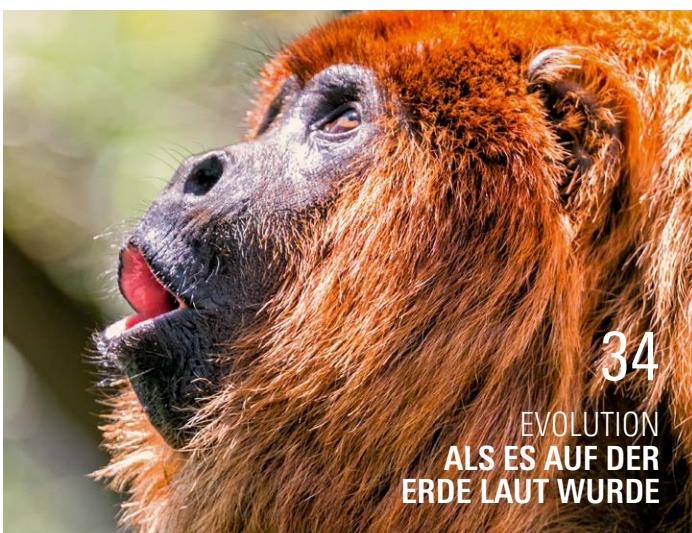
Von David W. Frayer und Davorka Radovčić



12

TITELTHEMA  
VOYAGER-SONDEN

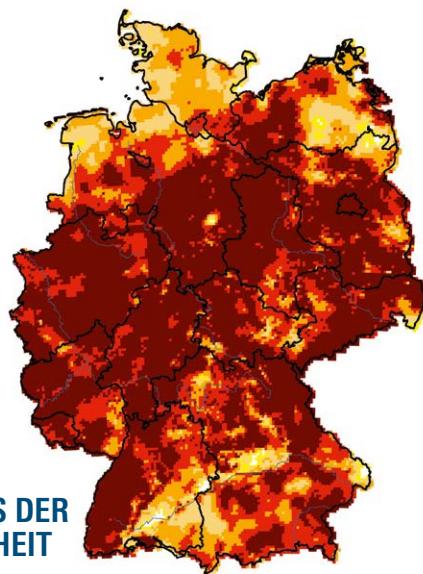
NASA/JPL-CALTECH / GETTY IMAGES / ISTOCK CARPAN / GETTY IMAGES /  
STOCK COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



DC\_COLUMBIA / GETTY IMAGES / ISTOCK

34

EVOLUTION  
ALS ES AUF DER  
ERDE LAUT WURDE



UFZ-DÜRREMONITOR / HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG

46

WASSER  
WEGE AUS DER  
TROCKENHEIT

NASA/JPL-CALTECH / GETTY IMAGES / HINTERGRUND: ESO WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/POTW13BAV / CC BY 4.0  
(CREATIVE COMMONS ORIGINALENSSENSEBY/4.0) LEGALCODE: BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ANUSON NAKOIE / GETTY IMAGES / ISTOCK CARPAN / GETTY IMAGES /  
STOCK COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



SYNTHESECHEMIE  
STROM, MARSCH!

56



CROATIAN NATURAL HISTORY MUSEUM; FOTO: LUKA NJEĐA

NEANDERTALER  
MENSCHEN WIE WIR

78



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

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

# SPEKTROGRAMM

## HUBBLE UND JAMES WEBB: GEMEINSAM NOCH SCHÄRFER

► Übereinandergelegte Aufnahmen der Weltraumteleskope Hubble und James Webb Space Telescope (JWST) ergeben dieses verblüffend detailreiche Bild der Spiralgalaxie Messier 74. Es deckt den Wellenlängenbereich von Infrarot bis Ultraviolet ab.

Messier 74 befindet sich 32 Millionen Lichtjahre entfernt im Sternbild Fische. Die Sterninsel gehört zu einer besonderen Klasse von Spiralgalaxien mit klar ausgeprägten Armen. Gas- und Staubwolken sind rot eingefärbt, junge Sterne blau. Ältere Sterne erscheinen in Cyan- und Grüntönen, Sternentstehungsgebiete in Pink. Diese Vielfalt wurde möglich, weil sich die Fähigkeiten der Weltraumteleskope ergänzen: Hubble bildet im ultravioletten und sichtbaren Bereich ab, JWST im Infrarot.

*Pressemitteilung der ESA vom 29.8.2022*

# SPEKTROGRAMM

## ARCHÄOLOGIE MITTELALTERLICHE MÖNCHE HATTEN VIELE DARMPARASITEN

Mittelalterliche Klöster des Augustinerordens waren in hygienischer Hinsicht vorbildlich: Die Mönche verrichteten ihr Geschäft in abgetrennten Latrinen und wuschen sich dort die Hände. Dennoch waren die Klosterbrüder öfter von Darmparasiten befallen als »einfache Leute«, denen es solcher sanitären Einrichtungen erlangte. Das hat eine Gruppe um Tianyi Wang von der University of Cambridge herausgefunden.

Wang und ihr Team untersuchten Gräber verschiedener Friedhöfe im englischen Cambridge. Während nahe der heute abgerissenen Kirche All Saints by the Castle vor allem Menschen mit sozial niedrigem Status beerdigt wurden, bestattete man innerhalb der Klostermauern sowohl Mönche als auch wohlhabende Bürger. Die Forscherinnen und Forscher beprobten 44 Gräber aus der Zeit zwischen dem 10. und 16. Jahrhundert, deren Sedimente sie nach Resten von Spul- und Peitschenwürmern durchsiebten. Eier dieser Tiere sind sehr

**DER WURM DRIN** Mittelalterliche Mönche werden auf einem Friedhof exhumiert.



CAMBRIDGE ARCHAEOLOGICAL UNIT

robust und im Erdreich lange Zeit nachweisbar. Als infiziert galten Verstorbene, wenn im Bereich ihres Beckens mindestens viermal so viele Parasiteneier vorkamen wie in der Kopf- oder Fußregion. Friedhofserde war im Mittelalter häufig mit solchen Eiern kontaminiert, weshalb diese überall zu finden sind.

Das Team wies in 11 von 19 Mönchsgräbern einen Wurmbefall nach, aber nur in 8 von 25 außerklösterlichen Gräbern. Der letzte Wert entspricht den Erwartungen, da auch auf anderen europäischen Friedhöfen rund jeder dritte mittelalterliche Tote einen Parasitenbefall erkennen lässt.

Hingegen erscheint der Anteil bei den Mönchen deutlich erhöht.

Die Forscher vermuten, der Unterschied röhre daher, wie beide Gruppen mit ihren Ausscheidungen umgehen. Möglicherweise hätten die Mönche ihre Gemüsegärten mit den eigenen Fäkalien gedüngt – im Mittelalter nicht unüblich. Das könnte zu wiederholten Wurminfektionen geführt haben.

Bekannt ist, dass Mönche in ihren Klostergarten häufig Pflanzen anbauten, die gegen Wurmbefall wirken. Schriften jener Zeit geben an, wie diese einzunehmen seien.

*International Journal of Paleopathology*  
10.1016/j.ijpp.2022.06.001, 2022

## PHYSIOLOGIE SÜSSSTOFFE VERÄNDERN ZUCKERSTOFFWECHSEL

Kalorienarme Süßungsmittel wie Saccharin oder Sucralose verschlechtern den Zuckerstoffwechsel und treiben den Blutzucker hoch. Darüber berichtet eine Forschungsgruppe um Jotham Suez vom israelischen Weizmann Institute of Science. Das Team hat den Stoffwechsel von Menschen und Mäusen untersucht und analysiert, wie er mit der Darmflora zusammenhängt.

Suez und seine Kollegen rekrutierten Versuchsteilnehmer, die ausnahmslos auf Süßstoffe verzichten – angesichts des sehr verbreiteten Gebrauchs solcher Substanzen durchaus schwierig. Es fanden sich 120 Probanden, die das Team in sechs Gruppen aufteilte. Vier Gruppen sollten je

zwei Wochen lang täglich Saccharin-, Sucralose-, Aspartam- beziehungsweise Steviatabletten zu sich nehmen, die restlichen zwei dienten zur Kontrolle.

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer absolvierten Glukosetoleranztests, um zu prüfen, wie ihr Organismus auf Zuckerzufuhr reagiert. Dabei stieg der Blutzuckerspiegel in der Saccharin- und der Sucralose-Gruppe signifikant höher als in den anderen Gruppen. Sobald die Probanden aufhörten, Süßstoffe zu verzehren, normalisierte sich ihre Blutzuckerreaktion wieder.

Um den Mechanismus dahinter aufzuklären, analysierte das Team, wie die Zuckerersatzstoffe auf die Darmmikroben der Versuchsteilnehmer wirk-

ten. In allen vier Süßstoffgruppen veränderte sich das Artenspektrum der Darmflora – am deutlichsten bei Saccharin- und Sucralose-Verzehr. Beide Substanzen verweilen lange im Darm und interagieren deshalb ausgiebig mit den dortigen Bakterien.

Suez und sein Team verabreichten Labormäusen zudem Stuhlproben der Probanden. Die Nager hatten zuvor steril gelebt und deshalb kein eigenes Mikrobiom ausgebildet. Infolge des Stuhltransfers siedelten sich die menschliche Darmflora im Mäusedarm an, worauf die Tiere Blutzuckerreaktionen entwickelten, die denen der Spender ähnelten.

*Cell* 10.1016/j.cell.2022.07.016, 2022

**TECHNIK****QUANTENCOMPUTER  
IN DIE SCHRANKEN  
GEWIESEN**

► Im Jahr 2019 verkündete eine Forschungsgruppe des Unternehmens Google, ihr Quantenchip Sycamore habe eine Rechenaufgabe binnen 200 Sekunden gelöst, für die der weltbeste Supercomputer 10 000 Jahre bräuchte. Jetzt haben chinesische Wissenschaftler die gleiche Berechnung mit normalen Prozessoren in ein paar Stunden durchgeführt.

Die Aufgabe, die Sycamore 2019 löste, war so konzipiert, dass sie für konventionelle Computer extrem schwierig, für Quantencomputer aber so leicht wie möglich war. Vereinfacht ausgedrückt bestand der Test aus einer völlig nutzlosen Berechnung für komplexe Zufallszahlen. Die Google-

Gruppe ließ einen Schaltkreis aus gekoppelten Qubits – den quantenmechanischen Pendants zu klassischen Bits – 20 zufällige Rechenoperationen ausführen und las anschließend den Zustand der Qubits aus. Es ergab sich eine 53-stellige Zufallsfolge aus Nullen und Einsen. Den Vorgang lief mehrere Millionen Mal ab. Dabei verstärkten die Wechselwirkungen zwischen den Qubits einige Ergebnisse und löschen andere aus. Nach unzähligen Durchgängen kam eine charakteristische Wahrscheinlichkeitsverteilung für alle errechneten Zufallsfolgen heraus.

Qubits können während des Rechenvorgangs nicht nur die Zustände 0 und 1 annehmen, sondern auch Überlagerungen davon. Deshalb ist mit den 53 Qubits des Sycamore-Chips eine parallele Darstellung von  $2^{53}$  Zuständen möglich. Klassische Rechner, die den Quantenchip simulieren, müssen jede denkbare Abfolge der Rechen-

schritte durchtesten. Mit steigender Qubit-Zahl wächst der Aufwand dafür ins Unermessliche.

Die Fachleute um den Physiker Pan Zhang haben einen anderen Lösungsweg gefunden: Sie stellten die Aufgabe als großes 3-D-Netzwerk so genannter Tensoren dar. Es besteht aus 20 Schichten – eine für jede Operation, die Sycamore im Jahr 2019 absolvierte. Jede Schicht enthält 53 Punkte: einen für jedes Qubit. Die Berechnung beschränkt sich dann im Kern auf die Multiplikation aller Tensoren. Ausgeführt auf 512 Grafikprozessoren, dauert sie 15 Stunden und liefert die erwartete Wahrscheinlichkeitsverteilung. Auf einem Supercomputer würde sie nur wenige Sekunden beanspruchen – sehr viel weniger, als das Google-Team 2019 geschätzt hatte.

*Physical Review Letters 10.1103/PhysRevLett.129.090502, 2022*

**GEOWISSENSCHAFTEN****WARUM DER NYIRAGONGO PLÖTZLICH LAVA SPUCKTE**

► Der Nyiragongo gilt als gefährlichster Vulkan Afrikas. Bei einem Ausbruch 2021 zeigte er keine typischen Vorwarnzeichen. Offenbar unbemerkt war ein gewaltiges unterirdisches Magmaraeservoir entstanden, das binnen kürzester Zeit zur Oberfläche durchbrach, schreibt eine Arbeitsgruppe um Delphine Smittarello vom European Center for Geodynamics and Seismology in Walferdange.

Absolut verlässliche Frühwarnsysteme für Vulkanausbrüche gibt es nicht. Doch wenn ein Feuerberg explodiert, kündigt sich das oft schon Tage zuvor an. Es kommt zu Erdbeben, vulkanische Gase steigen empor, unterirdische Magmakammern füllen sich und blähen den Berg auf. Als aber der Nyiragongo am 22. Mai 2021 detonierte, ließ er nichts dergleichen erkennen.

Der 3470 Meter hohe Vulkan liegt in der Demokratischen Republik Congo, nahe den Städten Goma und Gisenyi. Bei jenem Ausbruch übermittelte das Monitoringsystem erst 40 Minuten vor der Eruption eine starke Aktivität. Der

Lavastrom, der sich anschließend aus der Bergflanke ergoss, verwüstete ein Siedlungsgebiet. 220 Menschen starben, tausende flohen.

Laut Smittarello und ihrem Team belegen die Messdaten, dass das Magma sehr rasch zur Oberfläche durchbrach. Offenbar hatten sich nur 500 Meter unter Goma rund 243 Millionen Kubikmeter Magma in einer flachen Schicht – einem »Dyke« – angesammelt. Ein solches Geschehen ist bisher noch nicht beobachtet worden.

Der sich fortbewegende Dyke kam anscheinend erst am nahe gelegenen Kivu-See zum Halten. Aus Sicht der Forschergruppe deutet das auf ein bislang unbekanntes Risiko hin. Wenn Magma in derart geringer Tiefe fließe, bestehe die Gefahr eines Lavaausflusses mitten in der Stadt – oder auch einer gewaltigen Explosion im Kivu-See infolge des Aufeinandertreffens von flüssigem Gestein und Wasser.

*Nature 10.1038/s41586-022-05047-8, 2022*

**GLUTHITZE** Im Krater des Nyiragongo brodet ein Lavasee.



OLIVER RISER / RETNA IMAGES / ISTOCK

# SPEKTROGRAMM

## ÖKOLOGIE MEERESSPIEGEL WIRD NOCH STÄRKER STEIGEN

► Selbst wenn die ganze Welt sofort aufhört, fossile Brennstoffe zu nutzen, würde der grönlandische Eisschild in den kommenden Jahrzehnten rund 110 Billionen Tonnen Eis verlieren. Zu dieser Erkenntnis kommt ein Wissenschaftlerteam um Jason Box vom Geological Survey of Denmark and Greenland. Ein global gemittelter Meeresspiegelanstieg von mindestens 27 bis zu mehr als 50 Zentimetern sei damit unausweichlich, rechnen die Autoren vor.

Seit den 1980er Jahren verliert Grönlands Eisdecke infolge von Schmelze und Abfluss mehr, als sie durch Niederschläge gewinnt. Mit Klimamodellen versuchen Forscherinnen und Forscher vorherzusagen, wie das künftig weitergehen wird. Die Schmelze auf Grönland gilt als wichtiger Kippunkt: Noch reflektieren Schneeflächen dort den größten Teil des Sonnenlichts; schrumpfen sie jedoch, fällt das Licht auf dunkleren

Grund und wird stärker absorbiert, was den Planeten weiter aufheizt.

Box und seine Gruppe haben anhand von Satellitenaufnahmen, Vor-Ort-Messungen und historischen Daten die Eismenge ermittelt, die in den zurückliegenden Jahren auf Grund der globalen Erwärmung instabil geworden ist. Daraus lässt sich schließen, wie der Prozess künftig fortschreitet. Demnach trägt vor allem der Schmelzwasserabfluss zum Verlust des Eisschildes bei. Wo heller Schnee verschwindet und dunkleres Eis zu Tage tritt, taut im Sommer mehr, als im Winter wieder dazukommt. Zudem schwinden die Gletscher nicht überall gleich schnell, sondern vor allem in den unteren, wärmeren Lagen.

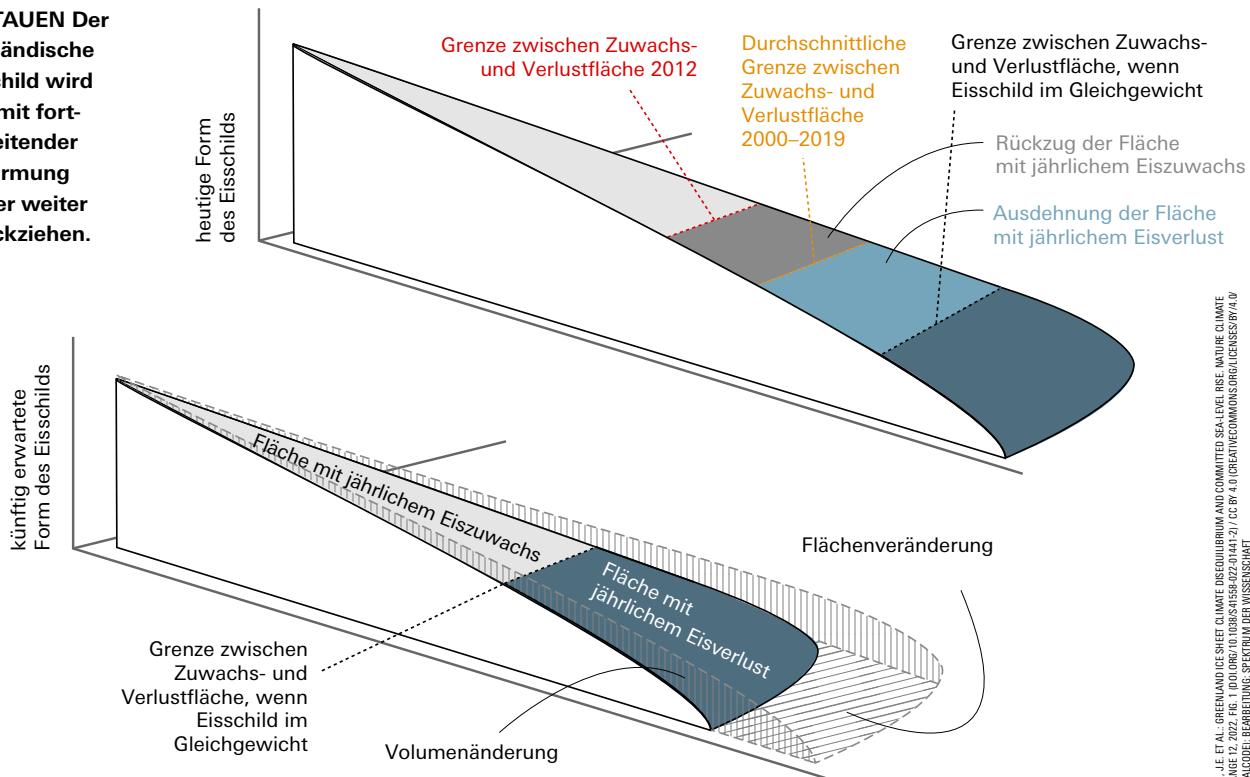
Laut der Studie ist bis zum Ende des Jahrhunderts ein Anstieg des Meeresspiegels um mindestens 27 Zentimeter zu erwarten, wahrscheinlich aber um mehr als doppelt

so viel. Setzt sich die globale Erwärmung fort wie bisher, wird der Zuwachs noch höher ausfallen, betonen die Forscher. Legt man etwa die Schmelzrate von 2012 zu Grunde – die höchste bisher gemessene – und nimmt an, sie würde künftig für jedes Jahr gelten, ergibt sich ein Anstieg von mehr als 78 Zentimeter.

2021 war der Weltklimarat IPCC noch davon ausgegangen, der Meeresspiegel werde infolge der grönlandischen Eisschmelze um maximal 18 Zentimeter bis zum Ende des Jahrhunderts klettern. Viele Fachleute halten das für zu niedrig geschätzt, denn Grönland und die Arktis erwärmen sich deutlich schneller als andere Regionen. Seit dem Jahr 2002 hat die grönlandische Eisdecke rund 4,7 Billionen Tonnen verloren – genug, um die USA einen halben Meter tief unter Wasser zu setzen.

*Nature Climate Change 10.1038/s41558-022-01441-2, 2022*

**AM TAUEN** Der grönlandische Eisschild wird sich mit fortschreitender Erwärmung immer weiter zurückziehen.



BOX J.F. ET AL.: GREENLAND ICE SHEET CLIMATE DISREGULUM AND COMMITTED SEA-LEVEL RISE. NATURE CLIMATE CHANGE 12, 1001–1006 (2022). DOI: 10.1038/s41558-022-01441-2 | CC BY 4.0 | CREATIVE COMMONS BY-NC LICENSE | SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT LEGALCODE: REABFÜHRUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## MEDIZIN

### MEHR NEUROLOGISCHE ERKRANKUNGEN NACH SARS-COV-2-INFektionen

► Wer an Covid-19 erkrankt, trägt noch zwei Jahre später ein erhöhtes Risiko für neurologische und psychiatrische Erkrankungen. Ältere Patienten erleiden häufiger eine Demenz oder eine kognitive Beeinträchtigung; bei infizierten Kindern kommt es rund doppelt so oft zu Psychosen.

Ein Team um den Psychiater Paul Harrison von der University of Oxford hat elektronische Krankenakten von knapp 90 Millionen Menschen ausgewertet, die überwiegend aus den USA stammen. Etwa eine Million davon hatten sich zwischen 2020 und 2022 mit dem Virus Sars-CoV-2 infiziert. Deren Daten verglich die Forschungs-

gruppe mit jenen ähnlicher Personen, die im selben Zeitraum an anderen Atemwegsinfektionen erkrankt waren. So ließen sich relative Gefährdungen erkennen.

Bei erwachsenen Covid-19-Patienten zeigten sich die Risiken für Demenz, Psychosen und Epilepsie noch zwei Jahre nach der Infektion erhöht, ebenso für kognitive Störungen wie »Hirnnebel«. Oberhalb von 65 Lebensjahren waren jeweils mehr als doppelt so viele Covid-Erkrankte davon betroffen wie Menschen mit anderen Atemwegskomplikationen; ihr Demenzrisiko stieg um den Faktor 1,5. Eine vermehrte Sterblichkeit war hingegen nicht nachweisbar.

Bei Kindern häuften sich infolge einer Corona-Infektion vor allem Hirnblutungen, ischämische Schlaganfälle, Psychosen, Schlaflosigkeit und kognitive Störungen. Letztere hielten aber weniger lang an als bei den Erwachsenen.

Harrison und sein Team vermuten, die gestiegenen Krankheitsrisiken beruhen altersbedingt auf unterschiedlichen Ursachen. Bei Erwachsenen gehörten Gefäßschäden zu den vermittelnden Mechanismen, die auch nach der akuten Infektion noch beständen. Bei Kindern sei eher das Immunsystem beteiligt.

Laut den Daten gingen die Delta- und die Omikron-Variante von Sars-CoV-2 mit einem noch höheren Risiko neurologischer und psychiatrischer Probleme einher – darunter für Schlaganfälle, Epilepsien und kognitive Störungen. Daraus lässt sich schließen: Selbst Virusmutanten, die insgesamt weniger lebensbedrohlich sind als der Wildtyp, verursachen eine anhaltende Belastung des Gesundheitssystems.

*The Lancet Psychiatry* 10.1016/S2215-0366(22)00260-7, 2022

## ASTRONOMIE

### VOR 2000 JAHREN WAR BETEIGEZE NOCH GELB

► Je älter und massereicher ein Stern, umso röter erscheint er am Himmel. Der Grund dafür ist die voranschreitende Kernfusion in seinem Innern, die mit einer Aufblähung einhergeht. Der Übergang von Gelb über Orange zu Rot geschieht für astronomische Verhältnisse relativ rasch. Einem internationalen Forschungsteam ist es nun gelungen, einen solchen Farbwechsel zeitlich sehr genau nachzuvollziehen. Aus historischen Überlieferungen entnehmen sie, dass Beteigeuze – der helle rote Riesenstern links oben im Sternbild Orion – aus Sicht irdischer Beobachter noch vor 2000 Jahren gelborange erschien.

Der chinesische Hofastronom Sima Qian etwa äußerte sich um 100 v. Chr. über Sternfarben: Weiß sei wie Sirius, Rot wie Antares, Gelb wie Beteigeuze, Blau wie Bellatrix. Rund 100 Jahre später schrieb der römische Gelehrte Hyginus, Beteigeuze sei von gleicher Farbe wie der gelborange Saturn. Heute ähnelt der Himmelskörper in

Helligkeit und Farbe dem tiefroten Gestirn Antares.

Aus den Überlieferungen und theoretischen Berechnungen lässt sich schließen, dass Beteigeuze etwa 14-mal mehr Masse besitzt als unsere Sonne. Sein Radius beträgt das 900-Fache des ihren, womit er zu den größten Sternen der Milchstraße zählt. Stünde Beteigeuze im Zentrum unseres Sonnensystems, hätte er alle vier inneren Planeten geschluckt und würde an die Umlaufbahn des Jupiters heranreichen. Er ist gut 14 Millionen Jahre alt und befindet sich vermutlich in der Schlussphase seiner Entwicklung. In schätzungsweise 1,5 Millionen Jahren wird er als Supernova explodieren.

Im Winter 2019/2020 hatten Astronomen kurz gehofft, es wäre schon so weit. Damals sackte Beteigeuzes Helligkeit für mehrere Wochen um fast zwei Drittel ab. Fachleute sahen darin ein Indiz für eine baldige Explosion des Himmelskörpers. Später stellte sich

DAVIDBHJAL / GETTY IMAGES / ISTOCK



**ALTER RIESENSTERN** Beteigeuze (oben links) im Sternbild Orion.

heraus, dass die Verdunklung wahrscheinlich auf einen großen kühlen Fleck auf der Südhalbkugel des Sterns und einen Staubschleier zurückging. Seit April 2020 leuchtet Beteigeuze wieder gewohnt hell.

*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 10.1093/mnras/stac1969, 2022

# RAUMFAHRT GRENZGÄNGER DES SONNENSYSTEMS

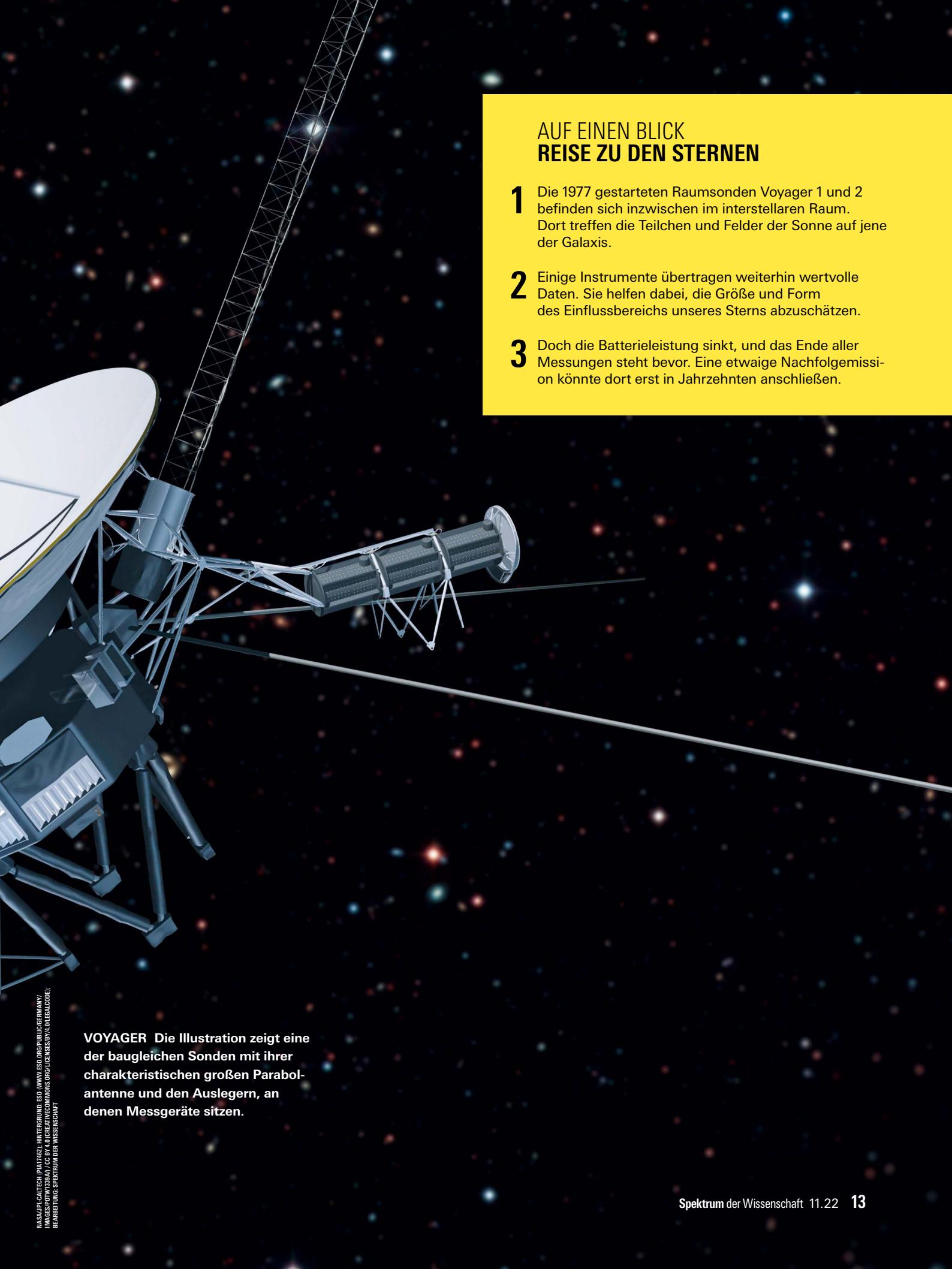
Die beiden Voyager-Sonden sind weiter ins All gereist als jedes andere menschengemachte Objekt – und senden auch nach Jahrzehnten noch immer Daten. Doch die schwindende Energieversorgung macht ein baldiges Ende der Mission unabwendbar.



Tim Folger ist Wissenschaftsjournalist und lebt in New Mexico, USA.

► [spektrum.de/artikel/2057445](http://spektrum.de/artikel/2057445)





## AUF EINEN BLICK REISE ZU DEN STERNEN

- 1** Die 1977 gestarteten Raumsonden Voyager 1 und 2 befinden sich inzwischen im interstellaren Raum. Dort treffen die Teilchen und Felder der Sonne auf jene der Galaxis.
- 2** Einige Instrumente übertragen weiterhin wertvolle Daten. Sie helfen dabei, die Größe und Form des Einflussbereichs unseres Sterns abzuschätzen.
- 3** Doch die Batterieleistung sinkt, und das Ende aller Messungen steht bevor. Eine etwaige Nachfolgemission könnte dort erst in Jahrzehnten anschließen.

**VOYAGER** Die Illustration zeigt eine der baugleichen Sonden mit ihrer charakteristischen großen Parabolantenne und den Auslegern, an denen Messgeräte sitzen.

Zwei der bemerkenswertesten Raumsonden, die jemals gestartet sind, verdanken ihren Weg ins All einem besonders günstigen Zusammentreffen im Sonnensystem. Genau genommen bewegten sich vor etwa 60 Jahren die vier Riesenplaneten langsam in eine seltene Konstellation, die zuletzt im frühen 19. Jahrhundert aufgetreten war. Das planetarische Schauspiel blieb weitgehend unbeachtet – bis ein Doktorand der Luft- und Raumfahrttechnik am California Institute of Technology, Gary Flandro, die Chance erkannte.

1965 hatte die Ära der Weltraumforschung gerade erst begonnen. Nur acht Jahre zuvor hatte die Sowjetunion Sputnik 1 gestartet, den ersten künstlichen Satelliten. Flandro hatte vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA die Aufgabe erhalten, den effizientesten Weg zu finden, um eine Raumsonde zu den großen äußeren Planeten zu schicken, das heißt zu Jupiter, Saturn, Uranus oder gar Neptun. Dazu nutzte er eines der beliebtesten Präzisionswerkzeuge der Ingenieure des 20. Jahrhunderts – einen Bleistift – und zeichnete die Umlaufbahnen auf. Dabei bemerkte er etwas Faszinierendes: In den späten 1970er und frühen 1980er Jahren würden alle vier in einem langen Bogen zur Erde aufgereiht sein wie auf einer himmlischen Perlenkette.

Durch das Zusammentreffen könnte ein Raumflugkörper auf einer passenden Bahn an jedem der Riesenplaneten mit Hilfe von dessen Anziehungskraft ein wenig Schwung nehmen. So ein Manöver wird als Swing-by bezeichnet. Flandro berechnete, dass die wiederholten, beschleunigenden Umlenkungen die Reisezeit zwischen Erde und Neptun von 30 auf 12 Jahre verkürzen würden. Allerdings lagen zwischen der bevorstehenden und der darauf folgenden

derartigen Konstellation 176 Jahre. Um die Anordnung in absehbarer Zeit auszunutzen, musste deswegen bis Mitte der 1970er Jahre ein Raumschiff starten.

Letztlich baute die NASA zwei Raumsonden, Voyager 1 und Voyager 2. Ihre Konstruktion gleicht sich bis ins Detail. Nach dem Start im Sommer 1977, der innerhalb von 15 Tagen erfolgte, sind sie weiter gereist und haben länger durchgehalten als jede andere Mission der Raumfahrtgeschichte – und funktionieren noch heute. Dabei drangen sie in den interstellaren Raum vor, das ist die Grenze zwischen dem Einflussbereich der Teilchen der Sonne und dem Rest der Galaxie. Das ist ihnen als den ersten von Menschenhand geschaffenen Objekten gelungen; eine Auszeichnung, die sie mindestens einige Jahrzehnte lang behalten werden. Und dabei war das Voyager-Programm ursprünglich nur für eine Dauer von vier Jahren angelegt.

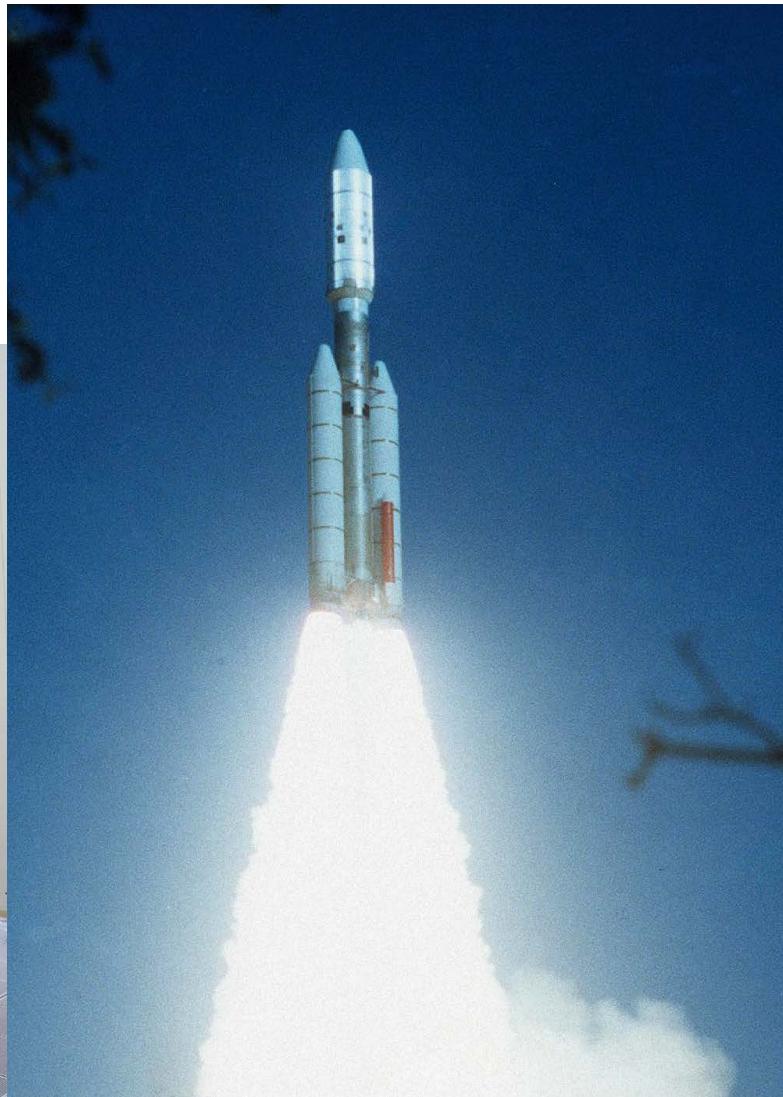
Zu Beginn ihrer Reise ermöglichten die Voyager-Sonden die ersten Nahaufnahmen der Monde von Jupiter und Saturn und enthüllten die Existenz aktiver Vulkane und zerklüfteter Eisfelder auf Himmelskörpern, von denen die Fachwelt angenommen hatte, sie seien äußerlich so unspektakulär wie unser eigener Mond. 1986 flog Voyager 2 als erste und bis heute einzige Raumsonde an Uranus vorbei, drei Jahre später an Neptun. Jetzt sind Voyager 1 und 2 als interstellare Pioniere mehr als 150-mal so weit entfernt von der Erde wie die Sonne und liefern faszinierende Daten aus den unerforschten interstellaren Regionen.

NASA/JPL (PA01480)

**STARTVORBEREITUNGEN** Am Jet Propulsion Laboratory der NASA wurde Voyager 2 letzten Tests unterzogen (links), bevor die Sonde am 20. August 1977 mit einer Rakete abhob (rechts).



NASA/JPL-CALTECH (PA021795)



Die außerordentlich ertragreiche Odyssee geht nun allerdings zu Ende. Im Lauf der Jahre hat die NASA immer mehr nicht zwingend notwendige Komponenten abgeschaltet, um die Mission bis etwa 2030 zu verlängern. Für das Team, in dem viele von Anfang an mitgearbeitet haben, ist es eine bittersüße Zeit. Ralph McNutt vom Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (APL) in Howard County, Maryland, ist stolz auf die Sonden, denen er einen Großteil seiner Karriere gewidmet hat: »Die verflixten Dinger haben das Zehnfache ihrer Garantiezeit durchgehalten.«

Dabei sah es zunächst gar nicht danach aus, als würde aus Flandros Vision Wirklichkeit. Anfangs schmiedete die NASA zwar Pläne für eine so genannte Grand Tour, bei der bis zu fünf Sonden zu den vier Riesenplaneten und zu Pluto geschickt werden sollten. Das war ehrgeizig – und zu teuer für den US-Kongress. »Es gab diesen wirklich großen Traum«, erinnert sich die JPL-Planetenforscherin Linda Spilker, die wenige Monate vor dem Start der Voyager-Missionen zu dem Projekt kam. »Aus Kostengründen wurde er zusammengestrichen.«

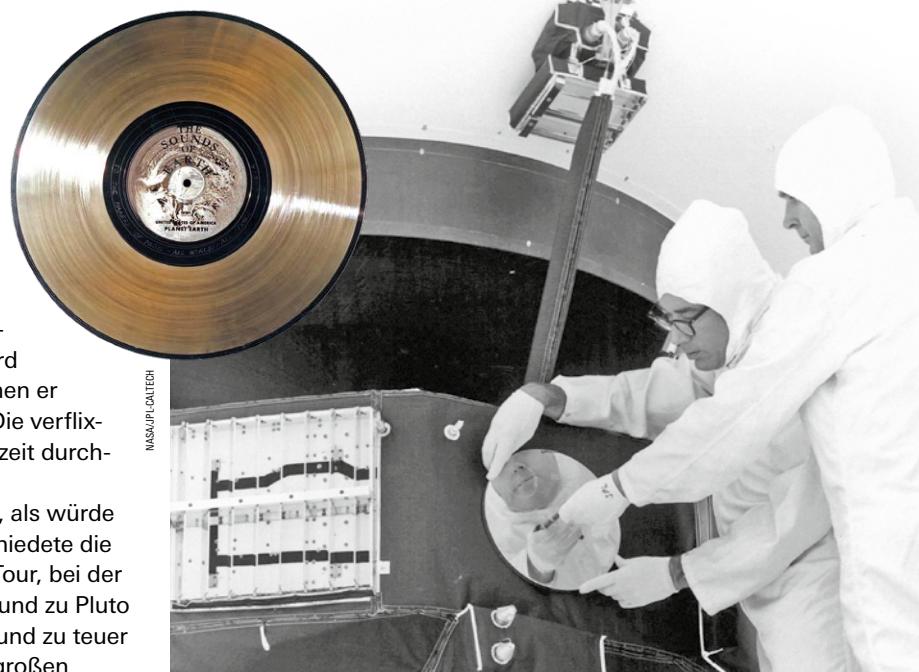
Der Kongress genehmigte lediglich eine abgespeckte Version der Grand Tour, die ursprünglich Mariner Jupiter-Saturn 1977 oder kurz MJS 77 hieß. Zwei Raumsonden sollten zu nur zwei Planeten reisen. Allerdings entwickelten die NASA-Ingenieure heimlich Geräte, die den Beanspruchungen während einer viel längeren Mission standhalten würden. Ihre Hoffnung: Sobald sich die Zwillingssonden bewährt hätten, würde ihre Route anschließend auf Uranus und Neptun ausgedehnt werden, vielleicht sogar darüber hinaus.

### Eine riskante technologische Wette

»Das Hauptziel war eine Missionsdauer von vier Jahren«, berichtet Suzanne Dodd, die nach einer 20-jährigen Auszeit vom Voyager-Team 2010 als Projektleiterin dorthin zurückkehrte. »Doch wenn jemand die Wahl hatte, eine um zehn Prozent teurere Komponente einzubauen, die robuster, aber für vier Jahre nicht unbedingt nötig war, dann hat er das einfach gemacht. Davon hat das Management im Zweifelsfall gar nichts mitbekommen.« Für sogar weitaus bemerkenswerter hält Dodd es, dass auf die Weise zwei Raumfahrzeuge gebaut werden konnten, die beide immer noch funktionieren.

Sowohl in Bezug auf die Technik als auch auf die Navigation im Weltraum war dies Neuland. Das Motto »Scheitern ist keine Option« war längst nicht geprägt worden, und zu der Zeit wäre es auch nicht sehr passend gewesen. Donald Gurnett war Plasmaphysiker an der University of Iowa und einer der ersten Wissenschaftler des Voyager-Teams. Bei einem Gespräch für diesen Artikel einige Wochen vor seinem Tod im Januar 2022 meinte er, nur halb im Scherz und mit Blick auf die hohe Ausfallrate: »Damals starteten wir immer zwei Raumfahrzeuge.«

Als die beiden Voyager-Sonden gebaut wurden, hatte bis dahin nur ein einziger Flugkörper ein Swing-by-Manöver auf dem Weg zu einem anderen Planeten genutzt: Mariner 10



**»GOLDEN RECORD«** Jeweils eine vergoldete Schallplatte an Bord übermittelte Bilder und Töne von der Erde, falls eine der Sonden jemals eine andere Zivilisation erreichen sollte. Geschützt durch eine Aluminiumhülle wurde sie an Voyager 1 (Foto) und ihre Zwillingssonde montiert.

NASA/JPL/CALTECH (PA42740)

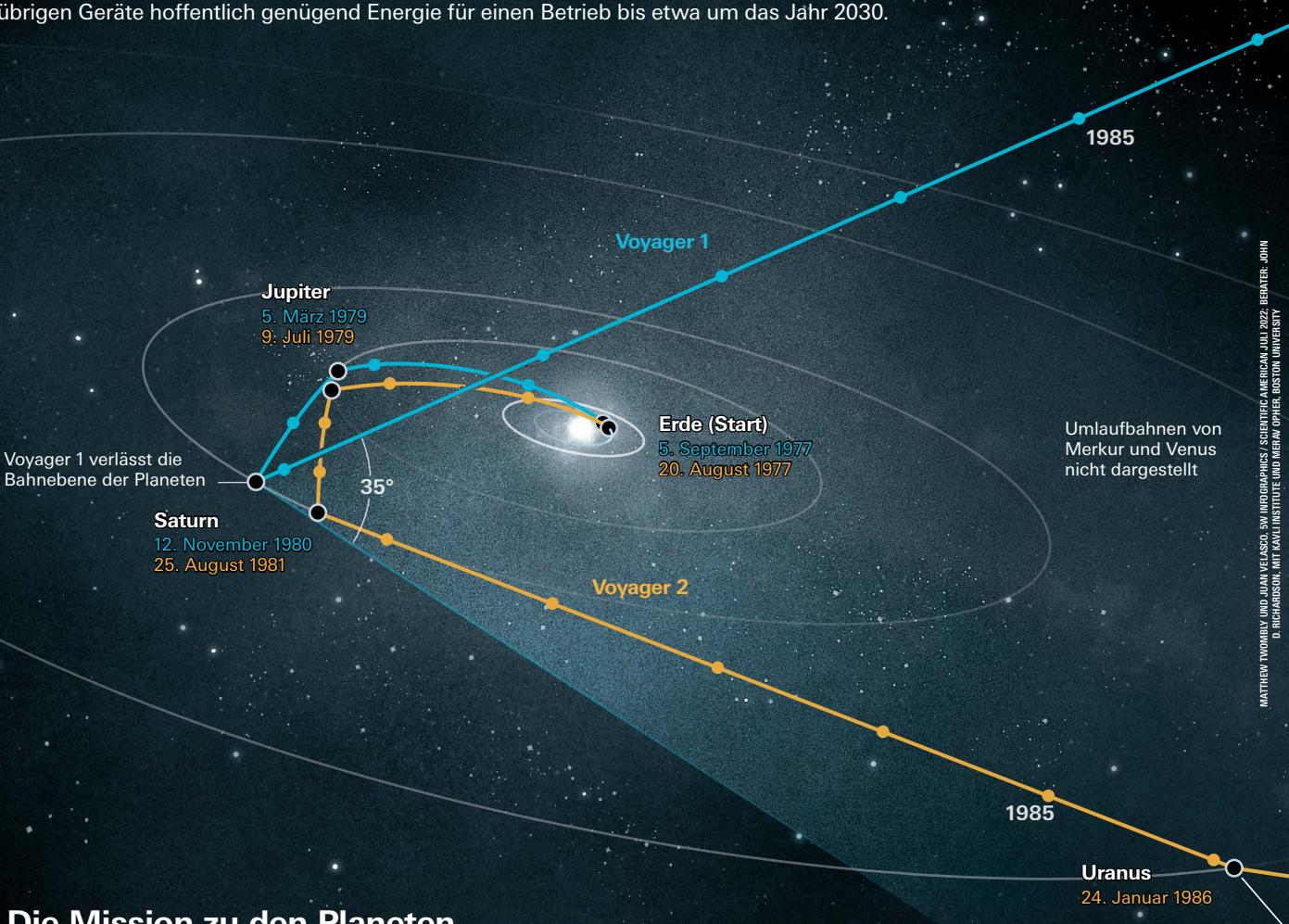
holte auf dem Weg zu Merkur Schwung bei der Venus. Die Voyager-Mission basierte hingegen auf einer Reihe mehrerer, aufeinander abgestimmter Begegnungen, bei denen die Fehlertoleranz lediglich im Bereich einiger zehn Minuten lag. Bereits die erste Station, Jupiter, ist zehnmal weiter von der Erde entfernt als Merkur. Außerdem lag auf dem Weg dorthin der Asteroidengürtel mit potenziell gefährlichen Geschossen. Zu der Zeit war nicht sicher, ob man ihn überhaupt durchqueren könnte, »ohne in Stücke gerissen zu werden«, so McNutt. Doch die Sonden Pioneer 10 und 11 ebneten den Weg. Sie durchflogen in den frühen 1970er Jahren den Gürtel unbeschadet – er erwies sich als größtenteils leerer Raum.

Für all diese Herausforderungen brauchten die etwa kleinwagengroßen Voyager-Sonden leistungsfähige Bordcomputer, die allerdings nach heutigen Maßstäben geradezu lächerlich erscheinen. Mit 69 Kilobyte haben sie »weniger Speicher als der Schlüsselanhänger, mit dem Sie Ihre Autotür öffnen«, wie es Spilker ausdrückt. Alle von den Instrumenten der Raumsonde gesammelten Daten werden auf Magnetbandgeräten gespeichert und dann mit einem 23-Watt-Sender zur Erde geschickt. Das entspricht in etwa der Leistung einer schwachen Glühbirne. Um dennoch erfolgreich mit der Erde zu kommunizieren, ist auf jeder der Sonden eine 3,6 Meter breite Parabolantenne montiert.

»Damals fühlten wir uns auf dem neuesten Stand der Technik«, resümiert Caltech-Physiker Alan Cummings aus dem Voyager-Team. »Zugleich war es erstaunlich, wie schnell alles ging.« Innerhalb von vier Jahren entstanden drei Raumfahrzeuge, darunter ein voll funktionsfähiges Testmodell. Einige Monate vor dem Start erfolgte dann die

# Die weiteste Reise

Heute befinden sich die 1977 gestarteten Zwillingssonden Voyager 1 und 2 in Grenzregionen des Sonnensystems, in die noch kein anderes von Menschen konstruiertes Gerät vorgedrungen ist. Ursprünglich sollten die Sonden bloß an Jupiter und Saturn vorbeifliegen. Danach ging es aber immer weiter. Schließlich verließen die Sonden den Heliophären genannten Einflussbereich der Teilchen und Felder von der Sonne. Sie befinden sich nun im interstellaren Raum zwischen den Sternen. Weiterhin senden sie Daten zur Erde. Nach und nach werden Instrumente an Bord abgeschaltet. So verbleibt für die übrigen Geräte hoffentlich genügend Energie für einen Betrieb bis etwa um das Jahr 2030.



## Die Mission zu den Planeten

5. September 1977  
20. August 1977

### Start

Eine seltene Konstellation der vier Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun erlaubte es, beim Vorbeiflug Schwung zu holen und so Geschwindigkeit auf dem Weg ins äußere Sonnensystem zu gewinnen. Voyager 2 hob zuerst ab, erreichte aber Jupiter und Saturn nach Voyager 1.

1977–1980  
1977–1981

### Hauptziel

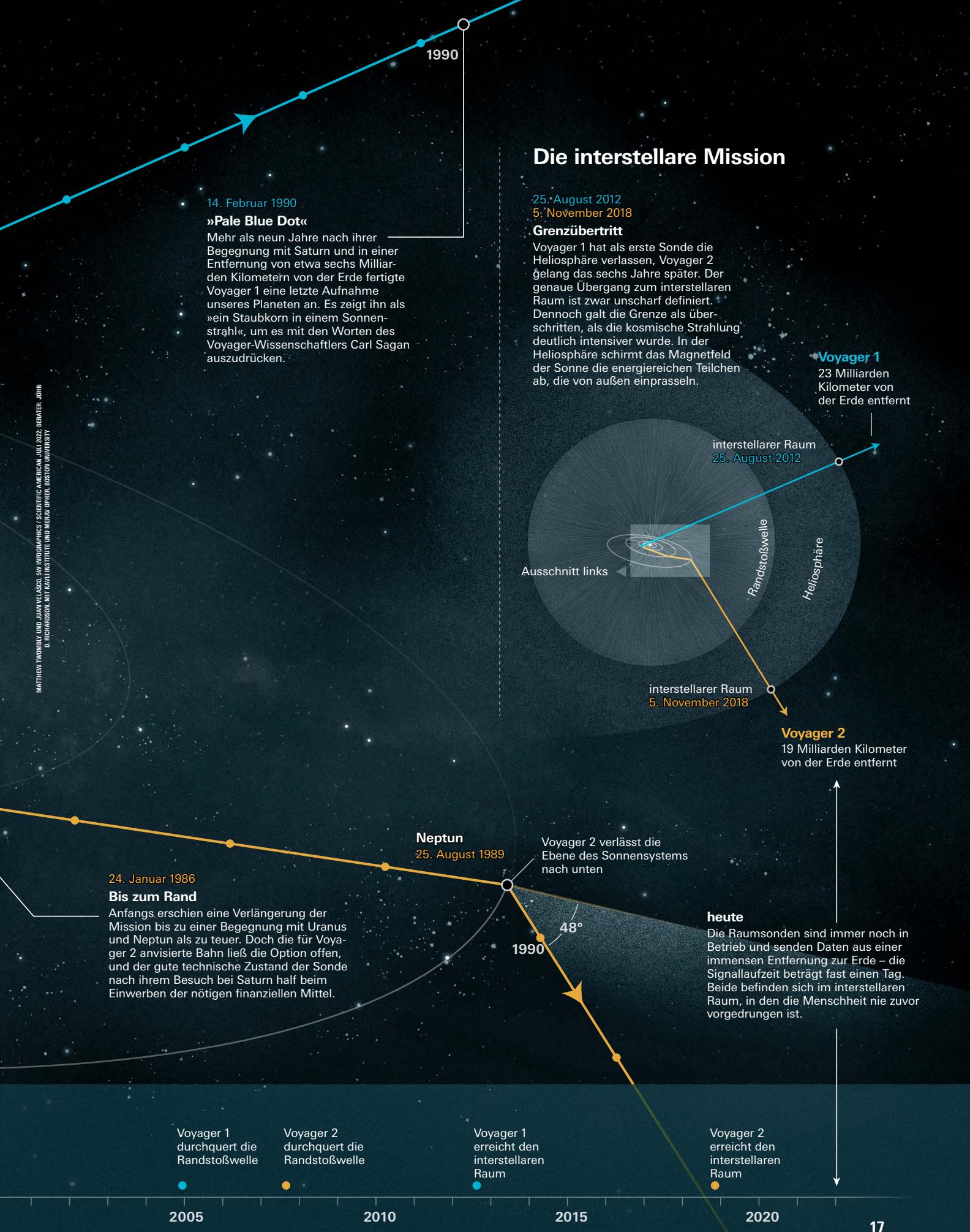
Jupiter und Saturn waren die wichtigsten Studienobjekte der beiden Voyager-Sonden. Die Raumschiffe übermittelten rund 52 000 Bilder von den Planeten und ihren Monden zur Erde.

12. November 1980  
**Ausscheren nach oben**

Die Begegnung mit Saturn und seinem Mond Titan lenkte die Flugbahn von Voyager 1 plötzlich aus der Ebene des Sonnensystems heraus.

### Meilensteine

Start der Sonden	Ankunft bei Jupiter	Voyager 1 erreicht Saturn	Voyager 2 erreicht Saturn	Voyager 2 erreicht Uranus	Voyager 2 erreicht Neptun	»Pale Blue Dot«-Foto	Voyager 1 überholte die Raumsonde Pioneer 10
1977	1979	1981	1981	1985	1989	1990	1995

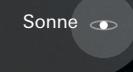


# Schützende Blase

Das Sonnensystem ist von einer Heliosphäre genannten Region umgeben. In sie hinein stößt die Sonne geladene Teilchen aus, die das Magnetfeld der Sonne übermitteln. Dieser Sonnenwind bläst bis etwa zur vierfachen Entfernung zwischen Sonne und Neptun. Mittels ihrer Gravitation wirkt die Sonne noch viel weiter ins All bis zur Oortschen Wolke, einer kugelschalenförmigen Anordnung aus kometenartigen Objekten. Diese befindet sich etwa in halber Distanz zum nächsten Stern.

## unklare Form

Die äußere Struktur der Heliosphäre ist unbekannt. Sie wird oft als Kugel oder mit einem Schweif dargestellt. Jüngere Forschungsergebnisse lassen ebenfalls eine croissantartige Form möglich erscheinen.



Kometenform



Kugel



Croissant

## Heliosphäre

Im Umfeld der Sonne breitet sich der Sonnenwind mit Überschallgeschwindigkeit aus. Weiter außen wird er von den Magnetfeldern des interstellaren Mediums abgebremst und zu einer Randstoßwelle verdichtet.

MATTHEW TWOMBY UND JUAN VELASCO, SWI INFOGRAPHICS / SCIENTIFIC AMERICAN, JULI 2022; BERICHTER: JOHN D. RICHARDSON, MIT KAUAI INSTITUTE UND HERAV OPHEI, BOSTON UNIVERSITY

## Astronomische Entfernungen



Taufe zu Voyager 1 und 2. Cummings kann etwas Besonderes von sich behaupten: »Ich war der letzte Mensch, der die Raumsonden vor dem Start berührt hat.« Er war für zwei Detektoren verantwortlich, mit denen der Fluss von Elektronen und anderen geladenen Teilchen im Umfeld der Riesenplaneten gemessen werden sollte. Die Partikel fielen durch ein kleines Fenster ein, das von einer nur drei Mikrometer dünnen Aluminiumfolie bedeckt war. Weil Cummings befürchtete, Techniker könnten bei letzten Arbeiten versehentlich Löcher in die Folien reißen, »mussten sie unmittelbar vor dem Start überprüft werden. Tatsächlich saß eines der Fenster etwas locker.«

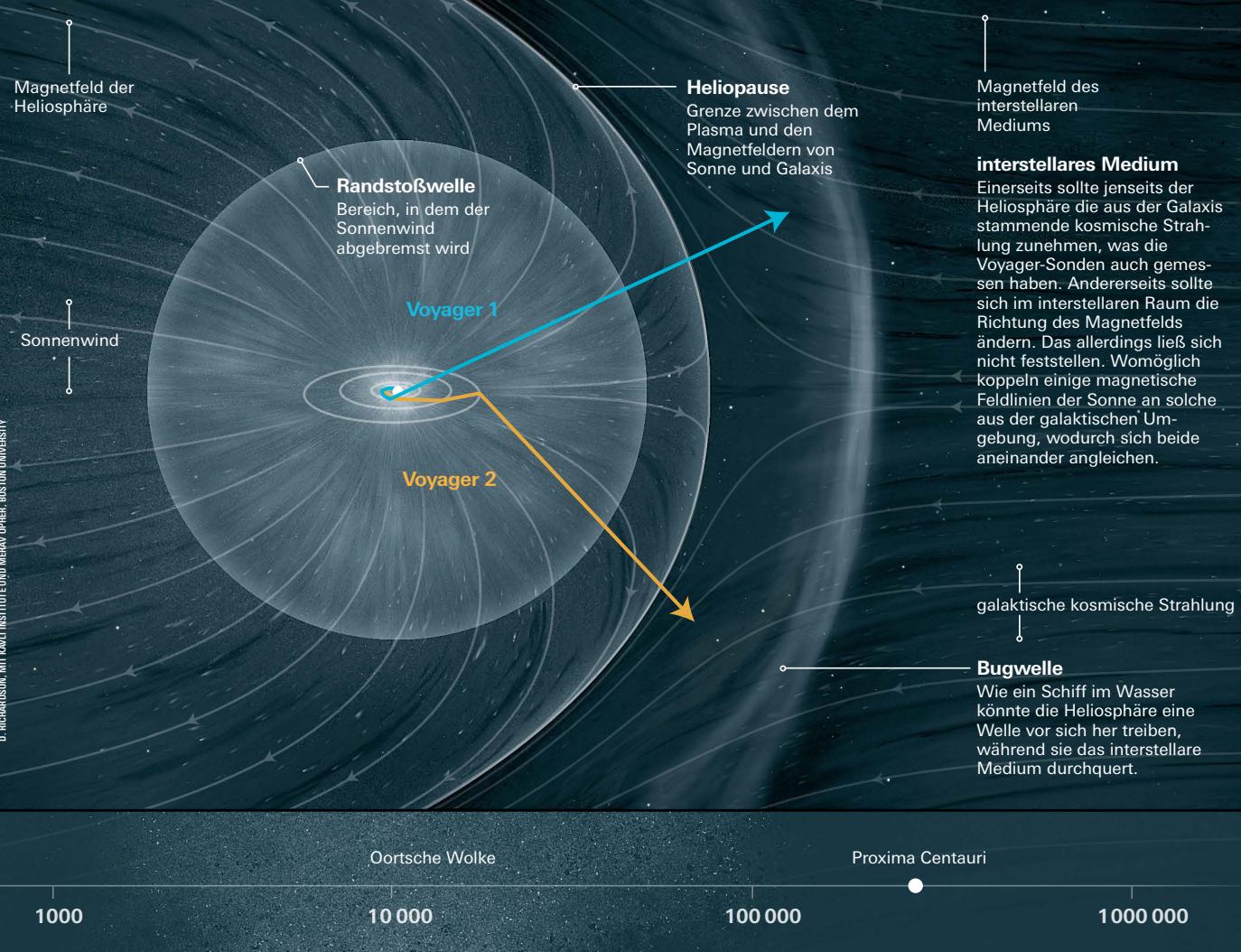
Voyager 1 erreichte Jupiter im März 1979, 546 Tage nach ihrem Start. Voyager 2 folgte einer anderen Flugbahn und kam im Juli desselben Jahres an. Beide erzeugten mit Rot-, Grün- und Blaufiltern Farbbilder. Zur Stabilisierung drehten sich die Sonden, aber lediglich gut 15-mal langsamer als ein Stundenzeiger einer Uhr. Das minimierte die Bewegungsunschärfe der Bilder.

Cummings erinnert sich lebhaft an den Moment, in dem er den ersten Blick auf Io erhaschte, Jupiters drittgrößten Mond. »Ich ging zu einem Gebäude auf dem Campus, wo ein Livestream der einlaufenden Aufnahmen gezeigt wurde«, sagt er. »Da war dieses große, orange-schwarze Bild. Ich dachte, die Studenten hätten sich einen Scherz erlaubt

und ein Foto von einer schlecht gebackenen Pizza aufgespielt.« Die farbenfrohe Optik war völlig unerwartet. Zuvor galten alle Monde im Sonnensystem als mehr oder weniger gleich und unspektakulär. Niemand hatte mit der Vielfalt gerechnet, die im Lauf der Mission enthüllt werden würde.

Den ersten Hinweis auf geologisch überraschend aktive Monde gab es bereits aus einer Entfernung von mehr als einer Million Kilometern. Eines der Instrumente, der LECP-Detektor (für: low-energy charged particle), lieferte seltsame Signale. »Wir identifizierten Ionen von Sauerstoff und Schwefel, die auf den Detektor trafen«, erinnert sich der inzwischen emeritierte Leiter der APL-Raumfahrtabteilung Stamatis Krimigis, der das LECP-System entwickelt hat. Die Menge der Ionen war im Vergleich zu den bis dahin gemessenen Werten um drei Größenordnungen angestiegen. Zunächst dachte sein Team an eine Fehlfunktion. »Wir untersuchten die Daten«, sagt Krimigis, »aber daran schien alles in Ordnung.«

Die Kameras lösten das Rätsel bald auf: Auf Io gibt es Vulkane. Der Mond, der etwas größer als der irdische ist, gilt heute in der Hinsicht sogar als der aktivste Körper im Sonnensystem. »Bis zu diesem Zeitpunkt fand der einzige bekannte Vulkanismus auf der Erde statt«, sagt Edward Stone, der seit 1972 als Projektwissenschaftler für die Voyager-Missionen tätig ist. »Und hier gab es plötzlich auf



einem Mond zehnmal so viel davon.« Die seltsamen Farben von Io stammten ebenso wie die mysteriösen Ionen von dabei ausgestoßenen Elementen. Der größte der Vulkane, Pele, verursacht Ausbrüche mit der 30-fachen Höhe des Mount Everest; seine Auswürfe bedecken ein Gebiet von der Größe Frankreichs.

### Eine beispiellose Bilderflut mit einem letzten Foto unseres Heimatplaneten

Insgesamt haben die Voyager-Sonden mehr als 33000 Fotos von Jupiter und seinen Trabanten gemacht. Mit fast jedem kamen neue Entdeckungen. Beim Abschied von Jupiter erhielten die Sonden von diesem durch Swing-by-Manöver eine zusätzliche Geschwindigkeit von jeweils etwa 15 Kilometern pro Sekunde. Ohne solch einen gravitativen Schubs wären sie nicht in der Lage gewesen, auf der Reise die Anziehungskraft der Sonne dauerhaft zu überwinden und den interstellaren Raum zu erreichen.

Am Saturn trennten sich die Wege. Voyager 1 raste durch die Saturnringe, flog an seinem Mond Titan vorbei und stieß dann nach oben aus der Ebene der Planeten heraus. Voyager 2 indessen bewegte sich weiter zu Uranus, wo sie 1986 dessen Ringsystem sowie zehn bis dahin unbekannte Monde fotografierte (ein elfter wurde erst 1999 auf den Aufnahmen identifiziert). Drei Jahre später kam

Voyager 2 der azurblauen Methanatmosphäre des Neptuns nahe.

Zwar wurde die Mission weiter verlängert in der Hoffnung, bis in den interstellaren Raum vorzudringen, doch erwartete kaum jemand mehr lohnenswerte Fotos, sondern nur endlose Leere vor unvorstellbar fernen Sternen. Die Kameras sollten abgeschaltet werden. Die Bilder von Neptun und seinen Monden wären die letzten gewesen, wenn sich nicht der 1996 verstorbene Astronom Carl Sagan mit einer originellen Idee durchgesetzt hätte.

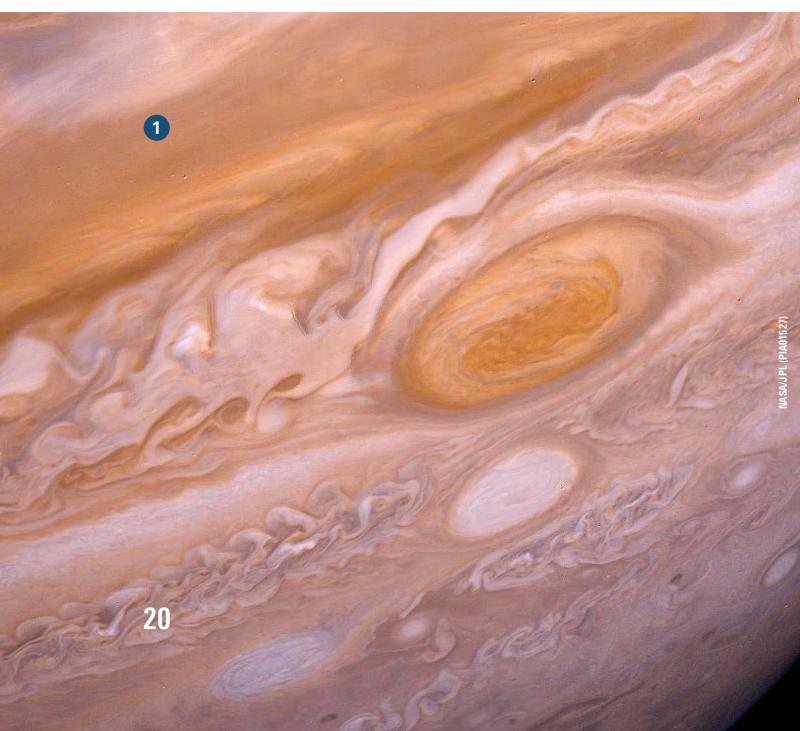
Sagan überzeugte die NASA davon, Voyager 1 eine finale Serie von Bildern übermitteln zu lassen. Am Valentinstag 1990 visierten die Kameras das innere Sonnensystem an und machten in einem Schwenk 60 Aufnahmen. Die eindringlichste von ihnen zeigt die Erde aus einer Entfernung von etwa sechs Milliarden Kilometern, dem rund 40-fachen Abstand zwischen Sonne und Erde (40 Astronomische Einheiten, AE). Sie erscheint als blasser, bläulicher Bildpunkt, als »Pale Blue Dot« – unter dem Namen wurde die Aufnahme berühmt. Im Sonnenlicht, das von der Optik der Kamera reflektiert wurde, ist unsere irdische Heimat kaum noch zu erkennen.

Beide Sonden sind inzwischen so weit von der Erde entfernt, dass ein lichtschnelles Funksignal bis zu Voyager 1 knapp 22 Stunden braucht und gute 18 Stunden bis zu

Voyager 2. Jeden Tag entfernen sie sich um weitere drei bis vier Lichtsekunden. Ihre einzige Verbindung zur Erde ist das Deep Space Network der NASA. Das sind drei Antennenkomplexe, die rund um den Globus verteilt sind und so während der Drehung der Erde eine ständige Kommunikation mit den Raumsonden ermöglichen. Je größer die Entfernung ist, desto schwächer werden die Signale und desto schwieriger wird es, sie aufzufangen.

Doch es lohnt sich, dem Flüstern weiter zuzuhören. Die Daten vom Eintritt in die interstellare Phase der Mission haben viele völlig überrascht. Übrigens warnten Stone und andere aus dem Voyager-Team bei den Interviews zu dem Artikel davor, die Grenzen des interstellaren Raums mit denen des Sonnensystems zu verwechseln. Zum Sonnensystem gehört etwa außerdem die weit entfernte Oortsche Wolke, eine kugelschalenförmige Ansammlung von kometähnlichen Körpern, die sich gerade noch im Einflussbereich der Schwerkraft der Sonne befinden. Die Voyager-Sonden werden den inneren Rand der Oortschen Wolke frühestens in 300 Jahren erreichen. Aber der interstellare Raum liegt viel näher. Er beginnt dort, wo ein Phänomen namens Sonnenwind endet.

Die Sonne schleudert ständig geladene Teilchen von sich, in deren Schlepptau wiederum die solaren Magnetfelder durchs All pflügen. Dieser Sonnenwind strebt wie ein sich aufblähender Ballon in alle Richtungen von der Sonne weg und bildet die »Heliosphäre«. Anfangs ist die Ausbreitung überschallschnell, doch schließlich bremst der Druck der interstellaren Materie die Expansion. Dadurch entsteht eine so genannte Randstoßwelle (englisch: termination shock) als erste Grenze zum interstellaren Raum. Danach folgt schließlich ein Bereich, in dem sich die nunmehr langsamer gewordenen solaren Teilchen und Magnetfelder mit denen des interstellaren Mediums mischen (Heliohülle, heliosheath). Die endgültige Grenze zum interstellaren Raum, ab der kein Einfluss der Sonnenpartikel mehr zu erkennen ist, heißt Heliopause. Vor der Ankunft der Voyager-Sonden schwankten die Schätzungen der Entfernung bis dorthin dramatisch.



»Offen gestanden waren einige der Werte nur geraten«, so Gurnett. Eine frühe Angabe sah die Heliopause so nahe wie den Jupiter. Gurnett berechnete 1993 eine etwa 25-mal weitere Entfernung von 116 bis 177 AE. Diese Zahlen, erinnert er sich, seien im Kollegium nicht gut angekommen. 1993 hatte Voyager 1 bereits 50 AE hinter sich. »Wenn die Heliopause bei 120 AE liegen sollte, bedeutete das, wir hatten zusätzliche 70 AE vor uns.« Somit würden die Sonden mit einem Tempo von etwa 3,5 AE pro Jahr zwei Jahrzehnte brauchen, bevor sie die Heliosphäre verließen.

Daraufhin stellten sich beunruhigende Fragen: Würden die Voyagers so lange durchhalten? Wie steht es um die Finanzierung der Mission? Diese war auch in der Erwartung verlängert worden, die Heliopause bei etwa 50 AE aufzufinden. Doch hier war keines der erwarteten Anzeichen eines interstellaren Transits festzustellen. So hätte die entspre-

## Die größten Hits

Die Zwillingssonden statteten den vier größten Planeten einen Besuch ab, zunächst Jupiter **1** und Saturn **2**. Insbesondere die Jupitermonde bargen Überraschungen: Europa **3** offenbarte eine dicke, zerfurchte Eiskruste und Io **4** den intensivsten Vulkanismus des Sonnensystems. Voyager 2 flog danach weiter zu Uranus **5** und Neptun **6** und ist bis heute die einzige Raumsonde, die den Eisriesen nahe kam.

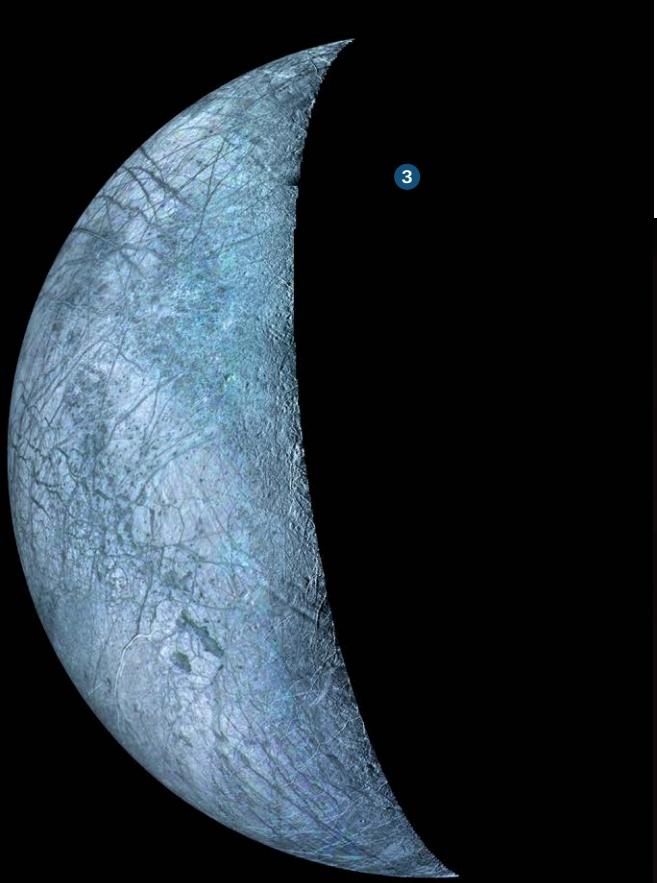


chende Voyager-Sonde einen starken Anstieg der galaktischen kosmischen Strahlung registrieren müssen, die von Supernovae und anderen energiereichen Prozessen im umliegenden Weltraum stammt. Das Magnetfeld der Heliosphäre lenkt die meisten niederenergetischen kosmischen Strahlen ab, bevor sie das innere Sonnensystem erreichen. »Es schirmt uns von mindestens 75 Prozent

dessen ab, was da draußen vorgeht«, sagt Stone. Das Voyager-Team erwartete außerdem einen Richtungswechsel des vorherrschenden Magnetfelds. Die interstellaren Felder stammen vermutlich von nahen Sternen und riesigen Wolken aus ionisiertem Gas und haben aller Wahrscheinlichkeit nach eine andere Orientierung als das Magnetfeld der Heliosphäre. Auch hier zeigte sich im Bereich von 50 AE keine Veränderung.

Die Schätzungen von Gurnett erwiesen sich als prophetisch – tatsächlich erreichte erst zwei Jahrzehnte später eine der Sonden endlich die Heliopause. Bis dahin gelang es gerade eben, die weitere Finanzierung sicherzustellen, währenddessen schrumpfte das Team von Hunderten auf ein paar Dutzend. Die meisten von ihnen sind immer noch im Einsatz und fühlen sich umso enger verbunden. »Bei

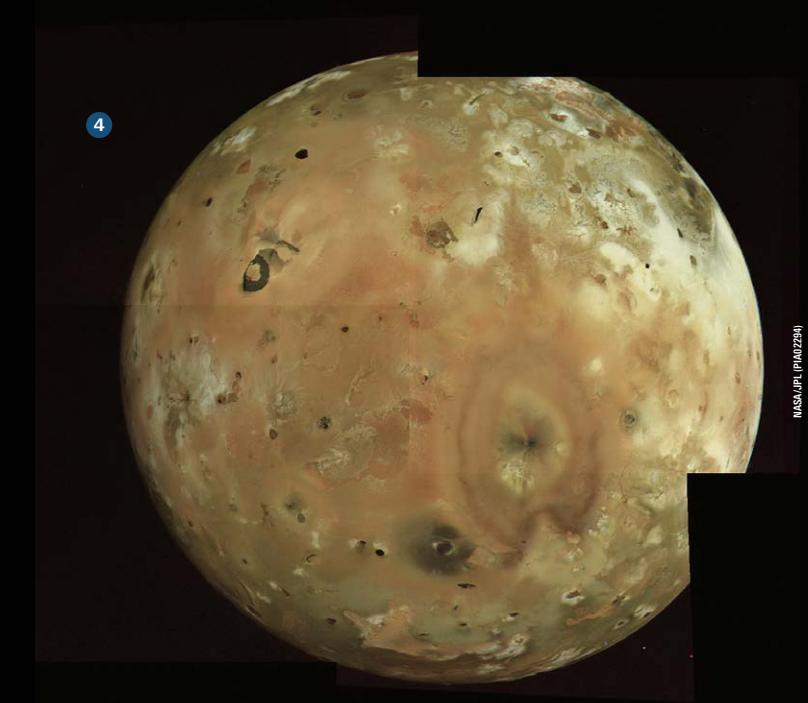
NASA/JPL/USGS (PIA00255)



NASA/JPL-Caltech (PIA18182)

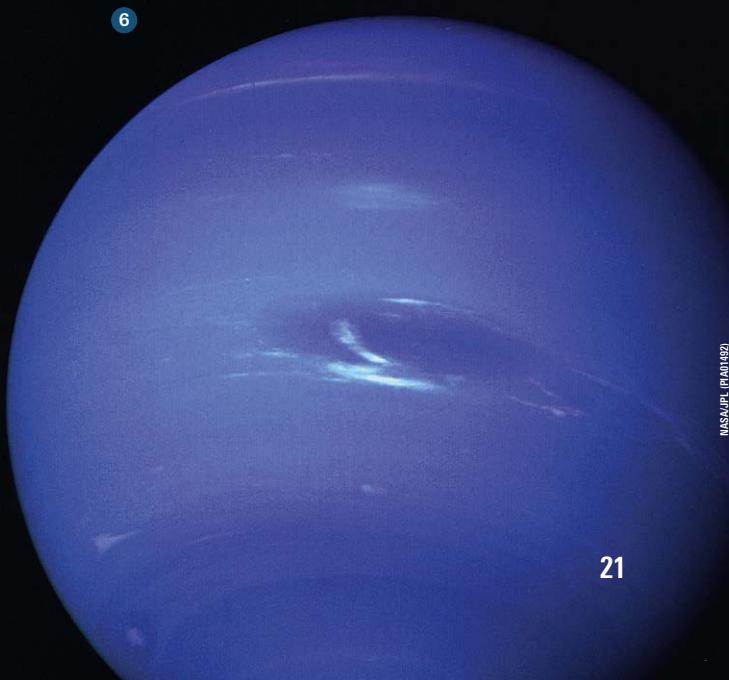


NASA/JPL (PIA02254)



NASA/JPL (PIA01892)

NASA/JPL-Caltech (PIA18182)



**PALE BLUE DOT Das Foto**  
zeigt unsere Erde aus Sicht von  
Voyager 1. Zum 30. Jahrestag  
der ikonischen Aufnahme hat  
die NASA die 1990 entstande-  
nen Bilddaten mit modernen  
Methoden nachbearbeitet, so  
dass die Farben hier ausgewo-  
gener erscheinen.

einer so langen Mission werden die Beteiligten allmählich zu einer Familie«, erzählt Spilker. »Wir wurden ungefähr zur gleichen Zeit Eltern. Wir haben gemeinsam Urlaub gemacht. Inzwischen arbeiten wir generationenübergreifend, und einige der jüngeren Teammitglieder waren beim Beginn der Mission nicht einmal geboren.«

Als Voyager 1 im August 2012 schließlich die Heliopause durchquerte, waren einige der Daten verblüffend. »Wir haben die Bekanntgabe herausgezögert, weil wir uns nicht darüber einig werden konnten, ob der interstellare Raum wirklich erreicht war«, erinnert sich Cummings. »Die Diskussionen liefen etwa ein Jahr lang.« Voyager 1 hatte tatsächlich die erwartete sprunghafte Änderung in der Plasmadichte festgestellt. Laut dem von Gurnett entwickelten Plasmawellendetektor stieg sie auf das 80-Fache. Allerdings gab es keine Anzeichen für eine veränderte Ausrichtung des umgebenden Magnetfelds. »Das war ein Schock«, meint Cummings. »Und es beunruhigt mich immer noch.«

### Zweiter Grenzübertritt mit neuen Rätseln

Auch Voyager 2 erreichte schließlich die Grenze. Als es im November 2018 so weit war, zeichneten ihre Instrumente ebenfalls keine Abweichung beim Magnetfeld auf. Ein weiteres Rätsel kam hinzu: Die Sonde stieß bei einer Entfernung von 120 AE auf die Heliopause – dieselbe Distanz wie bei ihrem Zwilling sechs Jahre zuvor. Die gute Übereinstimmung passte nicht zu den theoretischen Modellen, laut denen sich die Heliosphäre im Einklang mit dem elfjährigen Aktivitätszyklus der Sonne ausdehnen und zusammenziehen sollte. Im Lauf dieser Zeitspanne ebbt der Sonnenwind ab und nimmt zu. Voyager 2 kam an der Heliopause an, als die Auswirkungen ziemlich ausgeprägt und die Grenzregionen entsprechend weiter außen hätten sein sollen. »Das hatte niemand so erwartet«, sagt Krimigis. »Die Theorie erschien im Licht der Messungen als unzureichend.«

Jetzt, da es echte Daten gibt, werden die Modelle der Wechselwirkungen zwischen der Heliosphäre und der

interstellaren Umgebung immer komplexer. Gary Zank, Astrophysiker an der University of Alabama in Huntsville, erläutert das inzwischen vorherrschende Bild: Unsere Sonne ging zunächst aus einer heißen, ionisierten Region der Milchstraße hervor und trat dann in ein nur teilweise ionisiertes Areal ein. Die heiße Region bildete sich wahrscheinlich als Folge von Supernovae. Ein oder mehrere nahe gelegene alte Sterne explodierten am Ende ihres Lebens und entrissen mit der dabei ausgesandten Energie den umliegenden Atomen die Elektronen. Die angrenzenden Bereiche kann man sich laut Zank als »eine Art Meeresbrandung vorstellen, mit aufgewirbeltem Wasser und durcheinanderlaufenden Wellen«. Wir befänden uns in einer solchen turbulenten Region, erklärt er. »Die Magnetfelder werden verdreht und verlaufen nicht so glatt, wie es Theoretiker gern hätten.« Das Ausmaß der Turbulenzen kann indessen je nach Art der Beobachtung unterschiedlich ausgeprägt sein. Die Voyager-Daten zeigen auf großen Skalen nur geringe Feldschwankungen, aber viele kleinräumige Fluktuationen um die Heliopause. Sie werden durch den Einfluss der Heliosphäre auf das interstellare Medium verursacht. Irgendwann dürften die Raumsonden diese aufgewühlten Zonen verlassen und endlich auf das ungetrübte interstellare Magnetfeld treffen.

Vielleicht ist das Bild aber auch völlig falsch. Manche Forscher wie Lennard Fisk von der University of Michigan glauben, die Voyager-Sonden hätten die Heliosphäre noch immer nicht hinter sich. »Es gibt keinen Grund dafür, dass die Magnetfelder in der Heliosphäre und im interstellaren Medium genau die gleiche Ausrichtung haben«, so Fisk. Er hat zusammen mit seinem Kollegen George Gloeckler, einem langjährigen Angehörigen des Voyager-Missionsteams, an einem neuen Modell der Heliosphäre gearbeitet. Es verlagert den Rand der Heliosphäre um weitere 40 AE nach außen.

Die meisten Fachleute finden jedoch den gemessenen dramatischen Anstieg der galaktischen kosmischen Strah-

lung und der Plasmadichte überzeugend genug. »Angesichts dessen ist es sehr schwierig zu argumentieren, die Sonden befänden sich nicht wirklich im interstellaren Raum«, meint Cummings. »Andererseits es ist ja auch nicht so, dass alles perfekt zusammenpasst. Deshalb brauchen wir eine interstellare Sonde.«

McNutt setzt sich schon seit Jahrzehnten für eine neue Mission ein. Seine Gruppe an der Johns Hopkins University hat in einem ausführlichen Bericht Pläne für eine interstellare Sonde formuliert. Sie könnte in den 2030er Jahren starten und innerhalb von 15 Jahren die Heliosphäre erreichen, also 20 Jahre schneller als Voyager 1. Im Gegensatz zur Voyager-Mission wäre die interstellare Sonde speziell für die Untersuchung der äußeren Zonen der Heliosphäre konzipiert. Noch steht die Entscheidung durch die Dachorganisation der US-Wissenschaftsakademien aus, ob die Mission zu den Prioritäten der NASA für das kommende Jahrzehnt zählen soll.

Eine interstellare Sonde könnte eine grundlegende Frage über die Heliosphäre beantworten: Wie sieht die Struktur aus, wenn man von außen darauf schaut? »Wir wissen es einfach nicht«, räumt McNutt ein. »Es ist so, als würde man ein Goldfischglas aus der Sicht des Fisches beschreiben wollen. Wir müssen irgendwie in die Lage kommen, alles von außen zu betrachten.« Laut einigen Modellen fließt die interstellare Materie mit einer Geschwindigkeit von rund 200 Kilometern pro Sekunde sanft an der Heliosphäre vorbei wie Wasser am Bug eines Schiffs. Das sollte zu einer Form mit einem lang gezogenen Schwanz wie bei einem Kometen führen. Ein Computermodell, das von einem Team um die Astronomin Merav Opher von der Boston University entwickelt wurde, sagt hingegen eine turbulentere Dynamik voraus, die der Heliosphäre eher die Form eines Croissants verleiht. »Darüber kann man sich auf wissenschaftlichen Konferenzen vortrefflich streiten«, kommentiert McNutt die Lage, »aber man muss schon Messungen machen, um zu sehen, was tatsächlich los ist.«

### Langlebige Technik mit unerbittlich schwindender Stromversorgung

Die Voyager-Sonden laufen mit 50 Jahre alter Hardware. »So etwas wie Software ist praktisch gar nicht vorhanden«, sagt Krimigis. »Es gibt keine Mikroprozessoren an Bord – die waren damals gar nicht verfügbar!« Die Konstrukteure konnten sich für den Betrieb nicht auf Tausende von Codezeilen verlassen. Krimigis glaubt, die Technik hat so lange durchgehalten, weil fast alles fest verdrahtet war. »Die Ingenieure von heute haben keine Ahnung, wie man das macht. Ich weiß nicht, ob es überhaupt möglich wäre, noch einmal eine so einfache Raumsonde zu bauen. Die Voyager-Mission ist die letzte ihrer Art.« Cummings unterstreicht, wie schwer es allen fällt, sich davon zu verabschieden: »Wir sind bis zur Heliopause gekommen und haben damit etwas wirklich Erstaunliches erreicht.«

Bei Voyager 2 funktionieren noch fünf Instrumente, bei Voyager 1 vier. Alle werden von einem Bauteil angetrieben, das Wärme aus dem radioaktiven Zerfall von Plutonium in Strom umwandelt. Die Leistung nimmt um etwa vier Watt pro Jahr ab. 2019 war die NASA gezwungen, die Heizung

für den Detektor für kosmische Strahlung abzuschalten, der für die Bestimmung des Moments entscheidend war, in dem die Heliopause durchschritten wurde. Alle erwarteten ein Versagen des Geräts. »Die Temperatur fiel um 60 oder 70 Grad Celsius, weit außerhalb der getesteten Betriebsgrenzen«, erzählt Spilker, »und das Instrument funktionierte weiter. Es war unglaublich.«

Die letzten Überlebenden werden wahrscheinlich ein Magnetometer und ein Plasmadetektor sein. Sie befinden sich im Rumpf des Raumschiffs, wo sie durch die dort abgegebene Wärme auf Betriebstemperatur gehalten werden. Die anderen Instrumente sind an einem Ausleger montiert. »Wenn man die Heizung ausschaltet«, sagt Dodd, »werden sie sehr, sehr kalt.« Wie lange werden die Voyagers also durchhalten? Spilker hofft: »Wenn alles gut läuft, können wir die Missionen vielleicht bis in die 2030er Jahre verlängern. Es hängt nur von der Stromversorgung ab. Das ist der limitierende Faktor.«

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



NASA / STS-130 CREW MEMBER

Auch nach dem Ende der Mission werden die Reisen der Voyager-Sonden weitergehen. Sie werden mehr oder weniger intakt durch die Milchstraße driften, selbst wenn unsere Sonne längst nicht mehr existiert. Sollten sie irgendwann von einer außerirdischen Zivilisation entdeckt werden, überbringen sie jeweils eine letzte Nachricht auf einer metallenen Schallplatte. In deren Rillen sind Bilder und Töne verschlüsselt, die einen Eindruck von der Welt vermitteln sollen, aus der sie stammen. So ist neben dem Zirpen von Grillen und dem Geräusch fallenden Regens eine Aufnahme von Bachs Zweitem Brandenburgischem Konzert zu hören. Außerdem ist eine Erklärung von Jimmy Carter darauf, der zum Zeitpunkt des Raketenstarts Präsident der USA war. »Wir senden diese Botschaft in den Kosmos«, heißt es dort. »Wir wünschen uns, eines Tages, nachdem wir unsere Probleme gelöst haben, einer Gemeinschaft galaktischer Zivilisationen beizutreten. Diese Schallplatte steht für unsere Hoffnung, unsere Entschlossenheit und unseren guten Willen inmitten eines unermesslichen, Ehrfurcht gebietenden Universums.« ▲

### QUELLEN

**McNutt, R.L. et al.:** Interstellar probe – destination: Universe! Acta Astronautica 196, 2022

**Opher, M. et al.:** A turbulent heliosheath driven by the Rayleigh-Taylor instability. The Astrophysical Journal 922, 2021

**Stone, E.C. et al.:** Cosmic ray measurements from Voyager 2 as it crossed into interstellar space. Nature Astronomy 3, 2019

## QUANTENPHYSIK PFADBESTIMMUNG IM DOPPELSPALT

Mit einem trickreichen Experiment lässt sich messen, zu welchen Anteilen sich Neutronen entlang zweier Pfade bewegen. Es beweist: Ein einzelnes Teilchen kann tatsächlich verschiedene Wege gleichzeitig nehmen.

Das Doppelspaltexperiment ist eines der grundlegenden Experimente zur Quantenmechanik. Ursprünglich hat es der Engländer Thomas Young 1802 durchgeführt, um zu beweisen, dass Licht aus Wellen besteht. Seit den 1920er Jahren wird damit auch an Materiepartikeln untersucht, ob sie Wellen- oder Teilchencharakter haben. Es setzte sich schnell die Erkenntnis durch, dass beides der Fall ist: Materie wie Licht zeigen etwas, was unter dem Begriff Welle-Teilchen-Dualismus bekannt ist. Fliegen Quantenobjekte wie beispielsweise Elektronen, Photonen oder Neutronen durch einen Doppelspalt auf einen Detektionsschirm, beobachtet man ein Interferenzmuster, das sich durch deren Wellennatur erklären lässt. Mathematisch wird diese durch ihre Wellenfunktion ausgedrückt. An jedem Spalt entsteht eine Sekundärwelle, und die gegenseitige Verstärkung und Auslöschung rufen auf dem Schirm die Streifen eines Interferenzmusters hervor. Sobald man die Wellen aber detektiert, erscheinen sie als Teilchen. Jedes davon erzeugt auf dem Schirm nur einen Punkt. Das Interferenzmuster wird erst allmählich durch deren statistische Verteilung sichtbar. Interessanterweise funktioniert das

auch dann, wenn man Teilchen einzeln ankommen lässt und sich niemals mehrere gleichzeitig im Versuchsaufbau befinden.

Diese »Einteilchen-Interferenz« ist bereits ein erster Hinweis darauf, dass jedes Objekt beide Wege zeitgleich geht. Weil aber das Interferenzmuster erst am Kollektiv sichtbar wird, sind auch Deutungen der Quantenmechanik denkbar, die den individuellen Teilchen eine eindeutig bestimmte Flugbahn zuweisen. Die bohmische Mechanik (»Spektrum« Oktober 2020, S. 12) deutet die Wellenfunktion als »Pilotwelle«, die gewissermaßen aus forscht, welche Trajektorien möglich sind. Jedes Teilchen bewegt sich dann auf einer scheinbar zufällig ausgewählten Bahn, die allerdings für sich klar lokalisiert ist. Laut der Viele-Welten-Theorie wiederum werden alle Möglichkeiten in getrennten Parallelwelten ausgelebt.

Um solche Zusammenhänge näher zu untersuchen, müsste man messen, welchen Weg ein einzelnes Teilchen nun wirklich nimmt. Doch sobald man das Experiment so konstruiert, dass das Vorbeifliegen der Teilchen am Spalt detektiert werden kann, verschwindet die Interferenz. Deren Sichtbarkeit  $V$  und das Vermögen  $P$ , den Pfad zu bestimmen, sind komple-

mentär, mathematisch ausgedrückt durch  $P^2 + V^2 \leq 1$ .

Mit einer neuen Strategie ist es uns, der Neutroneninterferometrie-Gruppe der TU Wien, nun trotzdem gelungen, die Präsenz der Teilchen in den einzelnen Pfaden zu bestimmen – bei voller Interferenz. Aus praktischen Gründen verwendeten wir keinen klassischen Doppelspalt, sondern ein Interferometer. Hier stehen den von uns genutzten Neutronen ebenfalls zwei Pfade offen, die sie gleichzeitig beschreiben können, nämlich die beiden Arme des Interferometers. An dessen zwei Ausgängen treffen die Neutronen auf Detektoren, die im einfachsten Fall die Intensitäten des Interferenzmaximums und -minimums anzeigen. Man kann auch alle Positionen dazwischen abtasten und ein komplettes Muster aufnehmen. Die zwei Pfade innerhalb des Interferometers liegen so weit auseinander, etwa zehn Zentimeter, dass wir sie bequem getrennt manipulieren können.

Beispielsweise lässt sich der Spin des Neutrons, das ist sein quantenmechanischer Drehimpuls, auf einem der Wege ein wenig verdrehen. So bekommt das Teilchen selbst eine Markierung, die man in den Ausgängen wiederum analysieren kann. Das

**VERSUCHSAUFBAU** Die Messungen fanden in einem Labor im Institut Laue Langevin in Grenoble mit dort erzeugten Neutronenstrahlen statt.

alleine reicht bloß noch nicht, um die Komplementarität zu überlisten. Denn je stärker man den Spin kippt, desto genauer kann man zwar den so gekennzeichneten Pfad bestimmen, doch desto schwächer wird das Interferenzmuster. Wenn man ihn komplett umklappt, verschwindet es ganz.

Sofern man den Spin auf einem Weg nur sehr wenig verdreht, bleibt die Interferenz praktisch komplett erhalten. Man gewinnt dann lediglich minimale Pfadinformation, aber diese kann man sammeln, indem man das Vorgehen oft genug wiederholt. Diese Strategie wird schwache Messung genannt und das Messergebnis »schwacher Wert«.

### Welchem Pfad folgt das Neutron?

Der schwache Wert ist ähnlich definiert wie der so genannte Erwartungswert einer Observablen. Dieser wird aus dem anfangs präparierten Zustand des Teilchens berechnet und sagt aus, welche Ergebnisse in Zukunft im Mittel zu erwarten sind. Im Gegensatz dazu fließt in den schwachen Wert auch der Endzustand ein, in dem das Teilchen tatsächlich beobachtet wurde. Er erlaubt, rückwirkend auf dessen Zustand in der Zeit zwischen Präparation und Detektion zu schließen.

Unsere Frage nach dem Weg eines Neutrons kann man quantenmechanisch durch den »Pfadprojektionsoperator« ausdrücken. Dessen Eigenwerte sind 1 (das Teilchen ist im Pfad vorhanden) und 0 (das Teilchen ist nicht präsent). Sein Erwartungswert liefert die durchschnittliche Präsenz der Teilchen. Bei einem symmetrisch geteilten Interferometer ist sie genau 1/2. Mit einem asymmetrischen Strahlteiler kann man aber auch jede andere Wahrscheinlichkeit präparieren, beispielsweise 4/5 in einem Pfad und 1/5 im anderen. Der schwache Wert des Pfadprojektionsoperators berücksichtigt hingegen zusätzlich, in welchem

Ausgang des Interferometers die Neutronen gelandet sind. Bei symmetrischer Strahlteilung und konstruktiver Interferenz landen alle im Plus-Ausgang (siehe »Interferometer«), und die dazugehörige Teilchenpräsenz in den beiden Pfaden, gegeben durch die schwachen Werte, beträgt wiederum je 1/2. Über die schwachen Werte im Minus-Ausgang lässt sich nichts sagen, weil die Intensität dort auf Grund der destruktiven Interferenz Null ist.

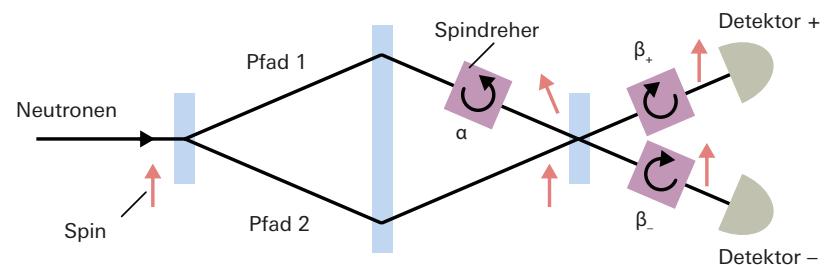
Interessanter wird es daher bei einem asymmetrischen Strahlteiler. Hier verschwindet die Intensität nie ganz. Beim Beispiel von  $p_1 = 4/5$  und  $p_2 = 1/5$  landen die Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p_+ = 9/10$  im Plus-Ausgang (Interferenzmaximum) und zu  $p_- = 1/10$  im Minus-Ausgang (Interferenzminimum). Für Teilchen im Plus-Ausgang ergibt sich eine Präsenz in den beiden Pfaden von  $\omega_{1+} = 2/3$  und  $\omega_{2+} = 1/3$ . Das entspricht dem Verhältnis der Amplituden der Wellenfunktion in den Pfaden. Für Teilchen im Minus-Ausgang ergibt sich allerdings eine Präsenz von  $\omega_{1-} = 2$  und  $\omega_{2-} = -1$ . Das sind so genannte abnormale schwache Werte. Es ist nicht ganz klar, was man sich darunter vorstellen soll, wenn ein Teilchen in einem Pfad doppelt vorhanden war und im anderen Pfad minus ein Mal. Dennoch sind die Werte notwendig, um bei einer Mittelung über die Ausgänge wieder die ursprünglichen Wahrscheinlichkeiten  $p_1$  und  $p_2$  zu erhalten:  $p_1 = p_+ \omega_{1+} + p_- \omega_{1-}$  und  $p_2 = p_+ \omega_{2+} + p_- \omega_{2-}$ .

Die Bedeutung der schwachen Werte war lange Zeit umstritten, insbesondere auch deshalb, weil sie über schwache Messungen gewonnen wurden und daher nur Mittelwerte über das Ensemble darstellten. Über die Präsenz individueller Teilchen in den beiden Pfaden konnte man daher immer noch nichts aussagen. Vorarbeiten für ein besseres Verständnis lieferten Anfang der 2000er Jahre der Japaner Masanao Ozawa und der Australier Michael J. Hall. Sie bemerkten, dass der statistische Fehler eines geschätzten Messwerts durch die schwachen Werte aller Endzustände ausgedrückt werden kann. Es war seinerzeit noch unklar, wie sich das im Experiment umsetzen ließe und was die Konsequenzen wären.

Das änderte sich 2021, als Holger F. Hofmann von der Universität Hiroshima die Methode der »Feedback Compensation« entwickelte. Damit lassen sich schwache Werte und ihr statistischer Fehler im Labor bestimmen. Dieses Konzept haben wir auf die Frage nach dem Weg von Neutronen im Interferometer angewandt. Die Versuche führten wir am Institut Laue-Langevin in Grenoble durch, der weltstärksten Neutronenquelle.

Wir schickten polarisierte Neutronen durch ein Interferometer und teilten den Strahl dabei wie oben beschrieben asymmetrisch im Verhältnis 4:1. Zusätzlich verdrehten wir den Neutronenspin in einem der Pfade um einen kleinen Winkel  $\alpha$ . In den Ausgangsstrahlen des Interferometers

**INTERFEROMETER** Das Experiment teilt einen Neutronenstrahl auf zwei mögliche Pfade auf. Während sich ein Teilchen entlang von Pfad 1 bewegt, kippt sein Spin geringfügig um den Winkel  $\alpha$ . An den beiden Ausgängen des Interferometers werden die Spins der Strahlen in Gegenrichtung um den Winkel  $\beta$  gedreht, bevor Detektoren die Neutronen registrieren.



rotierten wir ihn um den Winkel  $\beta$  wieder zurück. Durch Ausprobieren ermittelten wir, welches  $\beta$  notwendig war, um den Spin in die ursprüngliche Richtung zu bringen. Die optimale Kompensation hängt vom Endzustand ab, das heißt vom Ausgang des Interferometers – daher die Bezeichnung Feedback Compensation.

Eine genaue Analyse zeigt: Das Verhältnis  $\beta/\alpha$  entspricht dem schwachen Wert des Pfadprojektionsoperators, also der Präsenz des Neutrons im Pfad der Spindrehung. Wenn man den Spin beispielsweise um  $\beta = 2/3 \alpha$  korrigieren muss, um die ursprüngliche Richtung wiederherzustellen, hat das Neutron den  $\alpha$ -Spindreher sozusagen nur zu  $2/3$  gespürt, war demnach nur zu  $2/3$  im dortigen Pfad präsent. Wir konnten alle oben genannten schwachen Werte im Experiment bestätigen. Dabei wurde die Übereinstimmung umso besser, je kleiner der Winkel  $\alpha$  war, folglich je weniger das System gestört wurde.

Nun ist eine bestimmte eingestellte Kompensation nichts anderes als die Annahme eines bestimmten schwachen Werts. Wirkt die Kompensation, war die Annahme richtig. Das Raffinierte daran ist, dass ein perfekt

angepasstes  $\beta$  wirklich alle Neutronen wieder in den ursprünglichen Spinzustand zurückbringt. Die Messwerte streuen dann nicht mehr, und der statistische Fehler verschwindet. Das bedeutet: Die schwachen Werte sind nicht mehr nur Mittelwerte über das ganze Ensemble, sondern gelten für jedes einzelne Neutron. Es war also tatsächlich jedes individuelle Teilchen über beide Pfade delokalisiert, und zwar genau in den Verhältnissen, die durch die schwachen Werte ausgedrückt werden.

Wie ist dieses Ergebnis mit der Komplementarität von Interferenz und Pfadinformation vereinbar? Wir müssen den Winkel  $\beta$  durch Ausprobieren ermitteln. Wie bei einer schwachen Messung sammeln wir also die Pfadinformation über viele wiederholte Versuche. Die Methode der Feedback Compensation erlaubt dann, dieses gesammelte Vorwissen an allen weiteren Teilchen zu verifizieren. Wie Michael J. Hall gezeigt hat, kann der Messfehler einer solchen Verifikation im besten Fall tatsächlich Null werden, und das gemessene Objekt wird dabei nicht einmal gestört.

Die Erkenntnisse bewegen sich komplett im Rahmen der etablierten

Quantenmechanik. Sie dürfen jedoch Folgen dafür haben, welche Deutungen der Theorie man zulässt. Wie beschrieben, lokalisieren manche Interpretationen ein Teilchen vollständig entlang eines Weges. Dann wäre die gemessene Verteilung – auf vier Neutronen im einen Pfad kommt hier eines im anderen – eine Frage der Statistik über viele Durchläufe. Wir haben nun aber gezeigt: Es ist jedes einzelne Teilchen, das sich in genau bestimmmbaren Verhältnissen über mehrere Wege verteilt. Die Konsequenzen daraus werden sicher Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, mit dem Ziel, ein klareres Verständnis der Quantenmechanik zu erlangen. ▲

Die Quantenphysiker **Hartmut Lemmel** und **Stephan Sponar** arbeiten am Atominstitut der TU Wien, **Holger F. Hofmann** forscht an der Universität Hiroshima.

## QUELLEN

**Lemmel, H. et al.:** Quantifying the presence of a neutron in the paths of an interferometer. *Physical Review Research* 4, 2022

**Hofmann, H.F.:** Direct evaluation of measurement uncertainties by feedback compensation of decoherence. *Physical Review Research* 3, 2021

## ARCHÄOGENETIK DER SCHWARZE TOD KAM AUS KIRGISISTAN

Im 14. Jahrhundert ging eine Seuche in Kirgisistan um. Genanalysen an menschlichen Überresten zeigen, dass es sich um eine Urform der Beulenpest gehandelt hat, die wenig später Europa heimsuchte.

Der Schwarze Tod, eine der verheerendsten Pandemien der Menschheitsgeschichte, hatte seinen Ursprung wohl an der Seidenstraße. Dort, wo heute Kirgisistan liegt, waren im 14. Jahrhundert Menschen an der Pest gestorben: Sie hatten sich mit dem Bakterium *Yersinia pestis* infiziert. Dieses gehört Bakterienstämme an, aus denen einige Jahre später die Erreger der mittelalterlichen Pest in Europa hervorgegangen waren, wie eine aktuelle Studie ergab.

»Es ist, als würde man den Ort finden, an dem alle Stammeslinien zusammenkommen – wie beim Coronavirus, wo wir Alpha, Delta, Omikron haben, die alle aus diesem einen Virenstamm in Wuhan hervorgingen«, sagt Johannes Krause, Archäogenetiker am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig und einer der Hauptautoren der Studie.

Zwischen 1346 und 1353 verheerte die Pest das westliche Eurasien. In einigen Regionen raffte die Pandemie

bis zu 60 Prozent der Bevölkerung dahin. Schriftquellen lassen annehmen, dass die Beulenpest aus dem Osten kam: Als das Heer der Mongolen im Jahr 1346 die Stadt Caffa auf der Halbinsel Krim belagerte, kam es zu einem der frühesten bekannten Pestausbrüche. Fachleute vermuteten daher als Ursprungsorte der Erkrankung den Kaukasus oder Zentralasien.

Heute noch weisen die Stämme von *Y. pestis* in China die weltweit größte genetische Vielfalt auf. Dies deutet

indirekt darauf hin, dass der Schwarze Tod seinen Ursprung in Ostasien gehabt haben könnte. »In der Literatur findet man alle möglichen Hypothesen. Es war aber bisher nicht wirklich bekannt, woher die Krankheit genau kam«, sagt Krause.

Vor einigen Jahren stieß der Wirtschafts- und Umwelthistoriker Philip Slavin von der University of Stirling auf Aufzeichnungen zu zwei Friedhöfen in Kirgisistan. Die Orte aus dem 14. Jahrhundert schienen viel versprechend, um den Ursprung der mittelalterlichen Pest zu eruieren. Denn in den Nekropolen Kara-Djigach und Burana stammen besonders viele Grabsteine aus den Jahren 1338 und 1339 – und auf zehn der Grabmarkierungen nennen Inschriften eine Seuche als Todesursache. »Wenn an einem Ort die Sterblichkeit für ein oder zwei Jahre auffällig hoch ist, heißt das: Hier geht etwas Seltsames vor sich«, so Slavin.

### Der genetische Nachweis

Ob die Bestattungen auf den kirgisischen Friedhöfen tatsächlich mit dem späteren Schwarzen Tod zusammenhängen, klärte Slavin zusammen mit Krause auf. Sie machten die Überreste aus den Bestattungen ausfindig, die in den 1880er und 1890er Jahren ausgegraben und nach St. Petersburg gebracht wurden. Die Archäogenetikerin Maria Spyrou von der Universität Tübingen sequenzierte mit ihrem Team anschließend die DNA von sieben Toten – und entdeckte in drei Bestattungen von Kara-Djigach Erbgut von *Y. pestis*.

Aus den Proben konnten die Forscherinnen und Forscher zwei vollständige Genome von *Y. pestis* gewin-

nen. Beide stellten sich als direkte Vorläufer von Bakterienstämmen heraus, die für die Pestpandemie in Europa sorgten. Sie ließen sich auch mit einer Probe in Verbindung bringen, die von einem mittelalterlichen Toten aus London stammte und ebenfalls Spuren von *Y. pestis* aufwies. Krauses Team hatte dieses Genom 2011 sequenziert. Der Erreger aus Kara-Djigach erwies sich zudem als Vorläufer der meisten heute noch existierenden Gruppen von Pestbakterien. Laut Krause hatte sich der Erreger, kurz bevor der Schwarze Tod Europa heimsuchte, in zahlreiche Stämme aufgegliedert. »Es war wie der Urknall der Pest«, sagt der Archäogenetiker.

Es gibt weitere Indizien dafür, dass die mittelalterliche Pest in diesem Teil von Zentralasien seinen Ursprung hatte. Bei heutigen Murmeltieren und anderen Nagern in Kirgisistan, Kasachstan und der autonomen Region Xinjiang im Nordwesten Chinas, also in der Umgebung des Tienschan-Gebirges, fanden sich Pesterreger, die weltweit am engsten mit den Proben aus Kara-Djigach verwandt sind. »Wir können nicht wirklich sagen, dass es genau aus diesem Dorf oder diesem Tal kam, aber es ist wahrscheinlich diese Region«, erklärt Krause.

Nagetiere sind das natürliche Reservoir für *Y. pestis*. Menschen erkranken nur an der Beulenpest, wenn ein Überträger wie Flöhe die Infektion weitergibt. Krause vermutet, dass enger Kontakt zwischen Menschen und infizierten Murmeltieren der Epidemie in Kirgisistan den Weg bereitete. In Europa befeuerten dann »immunologisch naive« Rattenpopulationen den Schwarzen Tod: Die hiesi-



**URSPRUNG** Wie Genanalysen ergaben, stammte die mittelalterliche Pest aus Kirgisistan.

gen Tiere waren zuvor nicht mit dem Bakterium infiziert gewesen, weshalb ihr Immunsystem kaum Abwehrmöglichkeiten besaß und die Ansteckung vermutlich besonders rasant erfolgte.

Slavin zufolge überrascht es wenig, dass die Mittelalterpest aus der Region von Tienschan kommt. Das Gebiet liegt an der Seidenstraße, einer alten Handelsroute. Das belegen auch die kirgisischen Gräber: Als Beigaben fanden sich in Kara-Djigach Perlen aus dem Indischen Ozean und Korallen aus dem Mittelmeer. Archäologen haben unweit der Friedhöfe zudem Münzhorte entdeckt – die Geldstücke waren an Stätten im heutigen Iran, Afghanistan oder Kasachstan geprägt worden, also hunderte Kilometer vom Fundplatz entfernt. Somit dürften Waren aus entlegenen Gebieten hierher gelangt sein. »Wir können demnach annehmen, dass sowohl der Fern- als auch der regionale Handel eine wichtige Rolle bei der Ausbreitung des Erregers in Richtung Westen gespielt haben muss«, so Slavin.

Dass es Krause und seinem Team gelungen ist, die Pestgenome von Vorläufern des Schwarzen Tods zu entziffern, ist »ein großer Forschungsdurchbruch«, sagt die US-Historikerin Monica Green. »Die Grabsteine sind so etwas wie Totenscheine. Damit wissen wir, dass es diesen *Y.-pestis*-Stamm damals schon gab.« Sie ist jedoch nicht von der Schlussfolgerung der Studie überzeugt, wonach sich der »Urknall«



**DOKUMENT** Die geritzte Inschrift auf diesem Grabstein aus Kara-Djigach nennt als Todesursache eine Seuche. Vermutlich ist die Pest gemeint.

der Pest in der Zeit der kirgisischen Gräber von 1338 bis 1339 ereignete. Green zufolge sprechen genetische und historische Belege eher für ein anderes Szenario: Demnach förderte bereits im 13. Jahrhundert die Expansion des Mongolenreichs die Ausbreitung und Diversifizierung des *Y. pestis*-Bakteriums, das dann letztlich die Epidemie in Europa auslöste.

Für die Bioarchäologin Sharon Dewitte von der University of South Carolina in Columbia ermöglichen die neuen Forschungsergebnisse, den Schwarzen Tod auch außerhalb Europas zu untersuchen; ebenso die davon ausgelöste Pestpandemie, die einige Jahrhunderte lang während des Mittelalters und der Neuzeit immer wieder aufflammte. Dafür will Dewitte die

Bevölkerungs- und Sterbedaten der Pesttoten aus Kara-Djigach mit solchen aus europäischen Pestfriedhöfen vergleichen.

»Es wäre sehr interessant, mehr Pestproben aus dem alten Asien und China zu haben, um weitere Belege für den asiatischen Ursprung der ersten und zweiten Pestpandemie ausfindig zu machen«, fügt Simon Rasmussen hinzu. Der Computerbiologe von der Universität Kopenhagen hat alte Erbgutsequenzen von *Y. pestis* analysiert. Mit der ersten Pestpandemie bezieht er sich auf die so genannte Justinianische Pest, die im 6. Jahrhundert im Mittelmeerraum umging.

Krause hofft ebenfalls, menschliche Überreste aus China untersuchen zu können. Er will herauszufinden, welche

Spuren die Pandemie, die Europa so schwer getroffen hat, in Ostasien hinterließ. »Wir würden wirklich gern mehr über den östlichen Teil der Geschichte wissen.«

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

## QUELLEN

**Bos, K.I. et al.:** A draft genome of *Yersinia pestis* from victims of the Black Death. *Nature* 478, 2011

**Spyrou, M.A. et al.:** The source of the Black Death in fourteenth-century central Eurasia. *Nature* 606, 2022

## nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
*Nature* 606, S. 635–636, 2022

## NEURONALE NETZE ANALOGE KI

**Indem sie gängige physikalische Gesetzmäßigkeiten ausnutzen, wollen Forschungsgruppen nun leistungsfähigere neuronale Netze aus Schallwellen, Laserstrahlen und Supraleitern bauen.**

In einer Kiste befindet sich eines der schlechtesten neuronalen Netze der Welt. Als diesem ein Bild mit einer handgeschriebenen Zahl (6) präsentiert wurde, spuckte es nach einem kurzen Moment das Ergebnis aus: Null. Der Physiker und Ingenieur Peter McMahon von der Cornell University, der das Projekt leitet, verteidigt die KI mit einem verlegenen Lächeln – immerhin sei die Zahl wirklich schlampig notiert worden.

Trotz der dürftigen Vorführung ist das neuronale Netz eine Sensation. Öffnet man die Kiste, findet man keine Computerchips, sondern ein Mikrofon, das auf eine Titanplatte mit einem dahinter befindlichen Lautsprecher ausgerichtet ist. Während gewöhnliche KI mit Nullen und Einsen arbeitet, nutzt dieses Gerät kontinuierliche Schallwellen. Es wandelt die Pixel eines Bilds in Töne um. Dass die Maschine manchmal überhaupt richtig liegt, können selbst ihre Entwickler

kaum glauben. Trotz der bisher noch primitiven Fähigkeiten, hoffen McMahon und sein Team, dass solche schallbetriebenen Systeme die Computertechnik revolutionieren werden.

Üblicherweise gilt bei KI die Regel: je mehr, desto besser. Stattet man ein neuronales Netz mit zusätzlichen künstlichen Neuronen aus, wird es einen Dackel besser von einem Mops unterscheiden können. Inzwischen meistern die Programme sogar kreative Aufgaben; sie verfassen etwa Aufsätze oder produzieren Bilder. Dieses Potenzial hat viele Forscher motiviert, nach effizienteren Berechnungsmethoden zu suchen.

McMahon und einige andere Forschungsgruppen verfolgen hingegen einen außergewöhnlichen Ansatz: Sie wollen das Universum für sich rechnen lassen. »Zahlreiche physikalische Systeme können Berechnungen auf natürliche Weise viel effizienter durchführen als Computer«, so McMahon.

Wenn Ingenieure zum Beispiel ein Flugzeug entwerfen, können sie die Baupläne digitalisieren und diese stundenlang an einem Supercomputer modellieren. Oder sie stecken die Maschine in einen Windkanal und beobachten direkt, ob sie abhebt. Damit kann man jedoch lediglich Aerodynamik simulieren. Forscher wie McMahon suchen hingegen nach physikalischen Systemen, die alles lernen können. Jüngste Arbeiten haben gezeigt, dass sich Schall- oder Lichtwellen sowie Supraleiter dafür eignen könnten.

Bis zu diesem Jahrtausend waren Gehirne die einzigen Netzwerke, die effizient lernen konnten. Deren Struktur inspirierte Informatiker, tiefe neuronale Netze zu entwickeln – die heute beliebtesten künstlichen Lernmodelle. Sie bestehen aus Schichten von Knotenpunkten (Neuronen), die mit anderen Neuronen in benachbarten Schichten durch artifizielle Synapsen verbunden sind. Anfangs haben diese

Synapsen zufällige Werte, so genannte Gewichte. Wenn ein Netz eine Eingabe (etwa eine handgeschriebene 4) erhält, übermittelt man der ersten Neuronenschicht den Farbton der Pixel als Zahlenwert. Das Programm überträgt die Information Schicht für Schicht und multipliziert dabei die Pixelwerte mit den dazugehörigen synaptischen Gewichten. Das Neuron mit dem höchsten Wert in der letzten Schicht entspricht der Ausgabe des Netzes. Ist es zum Beispiel das zweite Neuron, lautet das Ergebnis 2.

Um das Netzwerk zu verbessern, bestimmt ein Lernalgorithmus die

Differenz zwischen dem Resultat und der richtigen Antwort. Dann durchläuft es das Netz rückwärts und ermittelt, wie man die Gewichte anpassen muss, damit die Werte der letzten Neurone korrekt ausfallen. Dieses Verfahren, die »Backpropagation«, ist das Herzstück des Deep Learning. Indem man wiederholt rät und optimiert, ergibt sich irgendwann eine passende Konfiguration der Synapsen. Das Netzwerk spuckt daraufhin mit hoher Wahrscheinlichkeit den richtigen Wert zu einem gezeigten Bild aus.

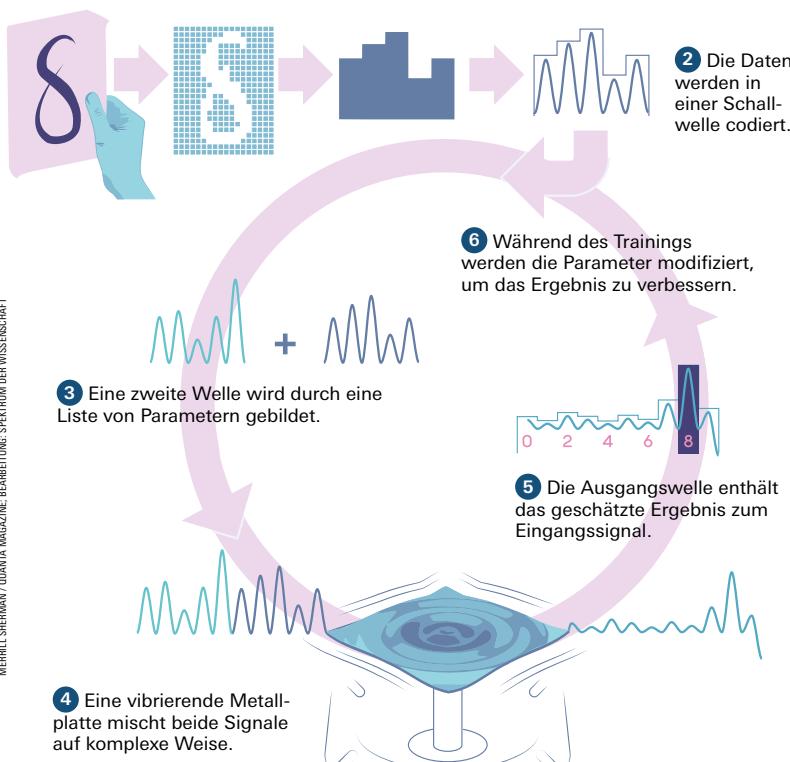
Die größten künstlichen neuronalen Netze müssen aktuell mehr als eine

halbe Billion Zahlen erfassen und verarbeiten. Das ist extrem zeit- und energieaufwändig. Das Universum bewältigt hingegen ständig Aufgaben, die weit über die mageren Fähigkeiten von Computern hinausgehen: In einem Raum können Trilliarden an Luftmolekülen herumhüpfen – für Rechner unmöglich zu simulieren. Aber die Gesetze der Physik sorgen dafür, dass sich die Teilchen korrekt verhalten. Das wollen Informatiker nun nutzen, um die aufwändigen KI-Berechnungen zu erleichtern. Die Herausforderung besteht darin, physikalische Systeme zu entwickeln, die sowohl »denken« (zum Beispiel ein Bild klassifizieren) als auch »lernen« (die Klassifizierung nach und nach verbessern) können.

## Intelligente Schwingungen

Physiker haben einer vibrierenden Metallplatte beigebracht, handgeschriebene Zahlen zu entziffern. Die Platte vermischt Eingangsdaten mit bestimmten Zahlenwerten, den Parametern des Systems, um eine Ausgabe zu erzeugen. Nach jedem Versuch passt man die Parameter an, damit das Ergebnis dem korrekten Wert entspricht.

- 1 Ein Eingangsbild wird in eine Reihe von Zahlen umgewandelt, die den Pixeln entsprechen.



### Ein System lernt zu denken

Der ersten Schwierigkeit hat sich McMahon gestellt. Ihn inspirierte die Tatsache, dass tiefere Netze besser abschneiden. Durch die zusätzlichen Schichten fallen die Rechenoperationen weniger gestuft aus und nähern sich einer glatten Kurve an. Das brachte den Physiker auf die Idee, direkt ein kontinuierliches physikalisches System zu nutzen, das die Hürden des digitalen Ansatzes umgeht. Dazu musste er eine Möglichkeit finden, das Verhalten eines komplexen Systems durch Training anzupassen.

McMahon und seine Mitarbeiter wählten dafür eine Titanplatte: Damit sie wie ein neuronales Netz funktioniert, beschallten die Forscher sie mit einem Ton, der das Eingangsbild codiert, und einem anderen, der die synaptischen Gewichte repräsentiert. Die Amplituden der Schallwelle müssen die Platte in genau den richtigen Momenten treffen, damit das Gerät die Töne passend zusammenführt (»interferiert«) und eine Antwort liefert – zum Beispiel einen Ton, der in der sechsten Millisekunde am lautesten ist und somit die Klassifizierung »6« darstellt.

Die Gruppe hat ihre Idee auch in einem optischen System umgesetzt. Man codiert das Eingangsbild und die Gewichte durch gepulste Lichtstrahlen, die ein Kristall miteinander vermischt. Darüber hinaus haben die Forscherinnen und Forscher einen

elektronischen Schaltkreis entwickelt, der ähnlich funktioniert: Hier übertragen Stromspannungen die Informationen. Im Prinzip ist jedes System mit komplexem Verhalten geeignet, aber der optische Ansatz scheint besonders vielversprechend: Ein Kristall lässt das Licht extrem schnell interferieren, zudem lassen sich zahlreiche Daten in Form von Lichtwellen verschlüsseln.

Allerdings erfordert das Training der Modelle herkömmliche Computer. Für die Backpropagation betreibt man ein neuronales Netz in umgekehrter Richtung, aber die Prozesse in Platten und Kristallen lassen sich nicht ohne Weiteres umkehren. Daher konstruierte die Gruppe um McMahon ein digitales Modell der Systeme und ließ einen Backpropagation-Algorithmus auf einem Laptop ablaufen, um die geeigneten Gewichte zu berechnen.

Mit diesem Training lernte das akustische System, handgeschriebene Ziffern in 87 Prozent der Fälle richtig zu klassifizieren. Der Schaltkreis und der Laser erreichten 93 Prozent beziehungsweise 97 Prozent Genauigkeit. Die zitternde Metallplatte reicht zwar nicht an aktuelle KI-Algorithmen heran, aber McMahon sieht seine Geräte als eindrucksvollen Beweis dafür, dass man kein Gehirn oder Computerchip braucht, um zu denken: »Jedes physikalische System kann ein neuronales Netzwerk sein.«

Der nächste Schritt besteht nun darin, einem physikalischen System beizubringen, eigenständig zu lernen. Der Physiker Florian Marquardt vom Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen schlug 2021 mit seinen Kollegen einen Backpropagation-Algorithmus vor, der in einem Lasersystem laufen könnte.

Dafür haben sie einen Aufbau simuliert, der dem von McMahon ähnelt: Die einstellbaren Gewichte sind in einer Lichtwelle codiert, die sich mit einer anderen Eingangswelle (etwa ein Bild) vermischt. Die theoretischen Physiker beschreiben die benötigten optischen Komponenten, um den Prozess umzukehren und die Wellen zu entmischen. Aktuell arbeiten sie mit Experimentatoren zusammen, um die Idee im Labor umzusetzen.

Wenn man sich auf Systeme beschränkt, die in umgekehrter Richtung ablaufen können, bleiben nur wenige Möglichkeiten. Deshalb lassen einige Forscher die Backpropagation hinter sich und wenden sich anderen Lernmechanismen zu. Zum Beispiel haben der Mathematiker Benjamin Scellier von der ETH Zürich und der Informatiker Yoshua Bengio von der Université de Montréal 2017 die so genannte Gleichgewichtsausbreitung entwickelt. Dazu kann man sich ein Netzwerk aus Pfeilen (Neurone) vorstellen, deren Ausrichtung null oder eins entspricht und die durch Federn (synaptische Gewichte) verbunden sind. Je lockerer eine Feder, desto weniger ändern die Pfeile ihre Position. Zunächst verdreht man die Pfeile in der äußersten linken Reihe (Eingabeschicht) so, dass sie die Pixel der handgeschriebenen Ziffer widerspiegeln. Man hält sie fest, während sich die restlichen Pfeile ausrichten. Wenn das System im Gleichgewicht ist, entsprechen die Pfeile ganz rechts der Ausgabe.

### Erste praktische Umsetzungen

Anschließend verbindet man eine weitere Gruppe von Pfeilen, die das gewünschte Ergebnis zeigen, mit dem unteren Bereich des Netzwerks. Diese beeinflussen den oberen Teil, und das gesamte Netz stellt erneut ein Gleichgewicht her. Dann vergleicht man die Konfiguration mit der alten und spannt oder lockert jede Feder entsprechend. Über viele Versuche hinweg erhält man so die passenden Spannungen.

Die ersten Arbeiten zur Gleichgewichtsausbreitung waren rein theoretischer Natur. In einer bald erscheinenden Veröffentlichung beschreiben die Physikerin Julie Grollier und ihr Kollege Jérémie Laydevant vom Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), wie ein D-Wave Quantencomputer den Algorithmus ausführt. Der Apparat besteht aus einem Netzwerk mit tausenden wechselwirkenden Supraleitern, die sich wie die Pfeile in einem Federmodell verhalten.

Ein Team um den Physiker Sam Dillavou von der University of Pennsylvania hat 2021 einen elektronischen Schaltkreis hergestellt, der sowohl

Denken als auch Lernen erledigt. In dem System sind Widerstände (Gewichte) gekoppelt und die dazwischen gemessenen Spannungen entsprechen Neuronen. Um eine Eingabe zu verarbeiten, wandelt man die Daten in Spannungsmuster um. Der elektrische Strom folgt dann dem Weg, der am wenigsten Energie verbraucht, was die Spannung beeinflusst.

Die wichtigste Neuerung ist das »gekoppelte Lernen«, das der Gleichgewichtsausbreitung ähnelt. Während ein Schaltkreis Daten aufnimmt und eine Antwort rät, startet ein zweiter, identischer Schaltkreis mit dem richtigen Ergebnis und integriert sie in sein Verhalten. Am Ende passt die Elektronik die Werte automatisch an, um eine möglichst gute Konfiguration zu erreichen. Der Aufbau konnte so drei Blumensorten mit 95-prozentiger Genauigkeit unterscheiden. Jetzt tüfteln Dillavou und sein Team an einem leistungsfähigeren Aufbau.

Zwar wird auch das Upgrade nicht annähernd an einen modernen Siliziumchip heranreichen. Dennoch vermuten die Physiker, dass digitale neuronale Netze in Zukunft von ihren analogen Varianten überholt werden. Denn die herkömmlichen KI-Algorithmen können nur bis zu einem gewissen Grad mit den wachsenden Anforderungen mithalten, was bei physikalischen Netzen nicht der Fall ist.

**Charlie Wood** ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in New York.

### QUELLEN

**Dillavou, S. et al.:** Demonstration of decentralized, physics-driven learning. ArXiv: 2108.00275, 2021

**McMahon, P.L. et al.:** Deep physical neural networks trained with backpropagation. Nature 601, 2022



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »How to Make the Universe Think for Us« 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.

# MEERESFORSCHUNG SAURE OZEANE BEDROHEN KIESELALGEN

**Die Meere versauern infolge der zunehmenden Kohlendioxidemissionen.  
Das verändert die Löslichkeit der Schalen von Kieselalgen – und damit auch  
die Verteilung von Nährstoffen und Plankton in den Meeren.**

In weiten Teilen des Ozeans stellen Kieselalgen, auch Diatomeen genannt, die größte Gruppe einzelliger Organismen. Eine Forschungsgruppe um Jan Taucher vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel hat jetzt untersucht, wie sich die Ozeanversauerung auf diese Organismen auswirkt und darüber die Biogeochemie in den Meeren beeinflusst. Ihre Experimente, Beobachtungen und Modelle legen unabhängig voneinander nahe: Die Ozeanversauerung wird weit reichen-

de Folgen auf den Export von Elementen in die Tiefsee haben.

Jede Diatomeenzelle ist von einer Schale aus Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) umhüllt. Wie gut das Silizium (Si) in dem Biomineral verbleibt, hängt vom pH-Wert des umgebenden Wassers ab: Je saurer das Meerwasser, desto weniger Silizium löst sich darin. Diese Eigenschaften von Kieselalgen sind in der Meeresforschung zwar bekannt, doch bislang hatte niemand untersucht, wie sie sich im Zusammenhang mit der Versauerung der Ozeane auf

künftige biogeochemische Kreisläufe auswirken.

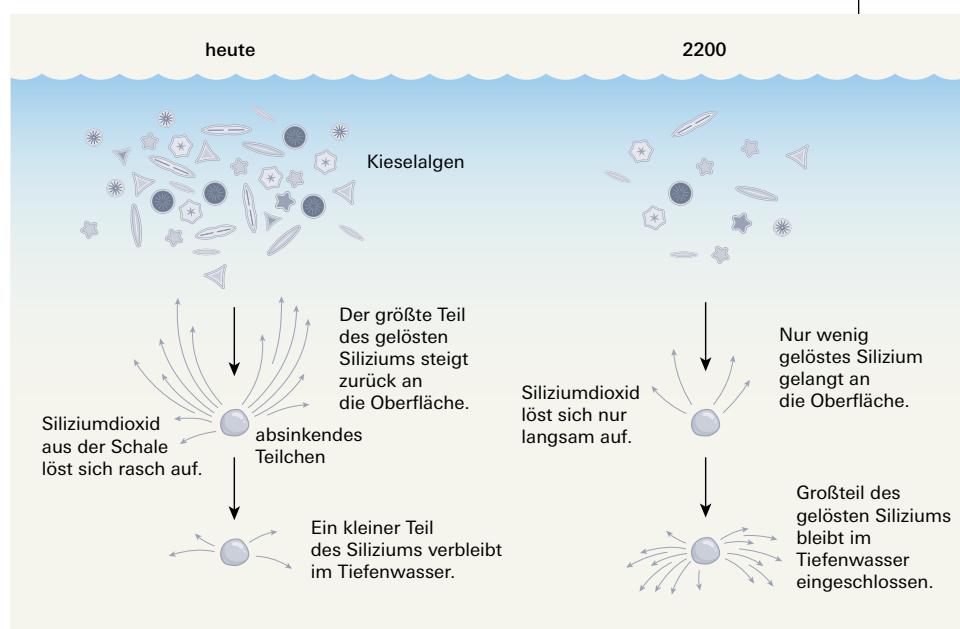
So wandeln Kieselalgen im Wasser gelöstes Kohlenstoffdioxid sehr effizient durch Fotosynthese in organische Kohlenstoffverbindungen um. Diese bilden zusammen mit Siliziumdioxid aus abgestorbenen Diatomeen Partikel, die daraufhin rasch in die Tiefe sinken. Daher gelten Kieselalgen mit als die wichtigsten Motoren einer »biologischen Pumpe«, die Kohlenstoff in die Tiefsee verfrachtet, wo er lange gebunden bleibt.

## Silizium-Senke

Die Löslichkeit von Kieselalgen-schalen in versauerten Ozeanen wirkt sich auf die Siliziumströme im Meer aus. Einzellige Phytoplanktonarten, bekannt als Kieselalgen, haben Schalen aus Siliziumdioxid und produzieren durch Fotosynthese an der Meeresoberfläche organische Kohlenstoffverbindungen. Nach dem Absterben der Organismen sinken Partikel, bestehend aus den organischen Substanzen und Siliziumdioxid, auf den Meeresboden.

Derzeit löst sich ein Großteil des Siliziumdioxids beim Absinken der Partikel relativ schnell auf. Das daraus freigesetzte, im Wasser gelöste Silizium gelangt mit dem aufsteigenden Wasser wieder an die Oberfläche, wo es das Wachstum weiterer Kieselalgen fördert.

Der Ozean versauert, da er immer mehr Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre aufnimmt. Wie Taucher und seine Kollegen ermit-



telt haben, löst sich dadurch weniger Siliziumdioxid aus den Partikeln, wenn diese absinken.

Die Modelle der Autoren deuten darauf hin, dass bis zum Jahr 2200 deutlich weniger gelöstes Silizium

an die Meeresoberfläche zurückkehren dürfte, da ein Großteil des marinen Siliziumgehalts in der Tiefsee gefangen sein wird. In der Folge werde die Zahl der Kieselalgen drastisch zurückgehen.

Taucher und seine Kollegen haben nun eine Reihe von fünf Experimenten in verschiedenen Teilen des Ozeans durchgeführt. Dort züchteten sie natürliche Phytoplankton-Gemeinschaften in großen Behältern mit einem Volumen von 35 bis 75 Kubikmetern, so genannten Mesokosmen, und simulierten darin eine Ozeanversauerung, wie sie bei moderaten bis starken CO<sub>2</sub>-Anstiegen für das Jahr 2100 geschätzt wird.

Während die Partikel aus dem Material abgestorbener Kieselalgen auf den Grund sanken, stieg ihn ihnen das Verhältnis von Silizium zu Stickstoff – und zwar viel deutlicher als im Ozeanwasser heutzutage. Die siliziumhaltigen Schalen der Kieselalgen lösten sich also in den untersuchten saureren Meerwasserumgebungen wesentlich langsamer auf als stickstoffhaltige Verbindungen in demselben absinkenden Material. Mit anderen Worten: Silizium wurde in tiefere Gewässer exportiert, und zwar bevorzugt gegenüber Stickstoff. Eine weitere Untersuchung desselben Forschungsteams bestätigte diesen Befund: Die Fachleute zeichneten das Verhältnis beider Elemente in sinkendem biologischen Material im offenen Ozean auf und setzten es in Bezug zum pH-Wert des Meerwassers.

**Der Unterschied wird größer**  
Ozeanografen wissen seit Langem, dass Silizium aus Kieselalgenschalen beim Absinken der Partikel langsamer in gelöste Formen umgewandelt wird als andere Elemente. Das Silizium reichert sich in den Partikeln gegenüber weiteren Stoffen demnach immer stärker an, je tiefer die Teilchen in der Wassersäule sinken. Die Gruppe um Taucher hat nun jedoch erstmals festgestellt, dass die Ozeanversauerung den bereits bestehenden Unterschied in den Auflösungsraten von Elementen in den herabsinkenden Überbleibseln von Diatomeen erheblich verstärkt. Gegenüber heutigen Werten war das Verhältnis von Silizium zu Stickstoff in ihren Experimenten um rund 17 Prozent erhöht.

Ihre Erkenntnisse speisten die Studienautoren in ein ausgefeiltes bioge-

chemisches Computermodell ein und extrapolierten damit die unterschiedliche Remineralisierung bis zum Jahr 2200. Den Berechnungen zufolge könnte durch eine weiträumige Versauerung der Meere ein großer Teil des marinen Siliziumbestands in der Tiefsee eingelagert werden, weil stark mit Silizium angereicherte Partikel durch die biologische Pumpe abwärts transportiert werden (siehe »Silizium-Senke«). Dadurch steht wesentlich weniger des essenziellen Nährstoffs für das Kieselalgenwachstum in sonnenbeschienenen Oberflächengewässern zur Verfügung. Das Modell sagt daher für die Zukunft einen drastischen Rückgang des weltweiten Diatomeenvorkommens voraus: Denn den Einzellern fehlt dann schlicht das gelöste Silizium, das sie zum Aufbau ihrer Schalen benötigen.

Doch wie wirkt sich die ebenfalls ablaufende globale Erwärmung der Ozeane aus? Zwar legen die Autoren überzeugend dar, dass eine zunehmende Versauerung der Ozeane die Löslichkeit von Siliziumdioxid-Partikeln verringert wird, aber gleichzeitig werden die Wassertemperaturen steigen und die Auflösungsraten erhöhen. Nach den Berechnungen werden die negativen Folgen der Versauerung die positiven Einflüsse der Erwärmung wahrscheinlich überwiegen. Da sich Silizium jedoch in sämtlichen Wassertiefen aus den sinkenden Partikeln löst, hängt das Gesamtergebnis davon ab, wie gut das Modell die relativen Geschwindigkeiten erfassst, mit denen die durch CO<sub>2</sub> verursachte Versauerung und Erwärmung von der Oberfläche in den tieferen Ozean übertragen werden.

Darüber hinaus ist die Frage zu klären, wie sich die Kohlenstoffeinlagerung durch die biologische Pumpe verändert, wenn sich Silizium durch die Versauerung langsamer aus sinkenden Partikeln löst. Das Siliziumdioxid, das die Kieselalgen produzieren, ist dichter als organisch gebundener Kohlenstoff. Daher liegt es nahe anzunehmen, dass Partikel mit verhältnismäßig mehr Siliziumdioxid rascher absinken und den Kohlenstoffexport in die Tiefsee so effizienter machen.

In ihren Mesokosmen beobachteten Taucher und Kollegen bei den sinkenden Partikeln jedoch keine offensichtlichen pH-bezogenen Veränderungen im Verhältnis von Silizium zu Kohlenstoff. Sie führen dies darauf zurück, dass sich die Ozeanversauerung höchst unterschiedlich auf das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis der Partikel auswirkt, welche die verschiedenen Phytoplanktongemeinschaften in den fünf Experimenten produzieren. Wenn das zutrifft, wird es äußerst schwierig zu bestimmen sein, wie sich künftige Änderungen der Auflösungsraten von Siliziumdioxid auf den Kohlenstoffexport in die Tiefsee durch Diatomeen unterm Strich auswirken.

## Wie reagieren andere Nährstoffe?

Die in der Studie aufgeworfenen Fragen, wie Umweltveränderungen im Ozean die Tiefenprofile der Remineralisierung biologisch wichtiger Elemente beeinflussen, könnte man auch für andere Nährstoffe stellen. So begrenzt Eisen in weiten Teilen der Meeresoberfläche die fotosynthetische Produktion organischer Verbindungen, insbesondere bei Kieselalgen. Eisen und Silizium lösen sich beim Absinken von Partikeln derzeit in ähnlichen Tiefen im Ozean auf, aber die Versauerung wird die Löslichkeit von Eisen beim Absinken wahrscheinlich erhöhen. In sauren Meeren sollte daher mehr Eisen aus sinkendem Material in flachen Gewässern frei werden – statt weniger, wie es bei Silizium der Fall ist. Dieses zusätzliche gelöste Eisen könnte dann für Kieselalgen und anderes Phytoplankton, das nahe der Meeresoberfläche wächst, leicht verfügbar werden.

**David A. Hutchins** ist Professor für Biologie an der University of Southern California in Los Angeles.

## QUELLE

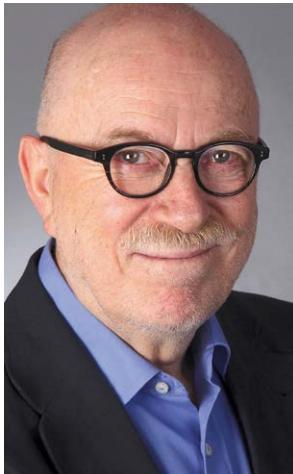
**Taucher, J. et al.:** Enhanced silica export in a future ocean triggers global diatom decline. *Nature* 605, 2022

## nature

© Springer Nature Limited

[www.nature.com](http://www.nature.com)

*Nature* 605, S. 622–623, 2022



# SPRINGERS EINWÜRFE DER HUNGER UND DIE FRAUEN

**Die globale Ernährungskrise trifft die weibliche Bevölkerung am härtesten. Zugleich sind Frauen der Schlüssel zur Bewältigung.**

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

► [spektrum.de/artikel/2057466](https://spektrum.de/artikel/2057466)

Die Welternährung leidet unter einer ganzen Serie von Rückschlägen, beginnend mit der Lebensmittelpreiskrise 2007 und 2008, gefolgt von der Covid-19-Pandemie und zuletzt dem aktuellen Krieg in der Ukraine – ganz zu schweigen von vielen regionalen Konflikten und den langfristigen Folgen des Klimawandels. Die Hälfte der davon Betroffenen sind Frauen und Mädchen.

Tatsächlich sind sie sogar die Ersten, die hungern. Wenn angesichts steigender Preise das Haushaltsgesamt nicht mehr reicht, schränken oft die Frauen ihren Nahrungskonsum ein, damit die übrige Familie genug zu essen hat. Schon vor der Pandemie wurde der weibliche Anteil an unterernährten Menschen auf 60 Prozent geschätzt. Selbst in Haushalten, die nicht als arm gelten, hungern Frauen und Kinder eher als Männer.

Mit dem Ukrainekrieg verschärft sich die Krise. Deswegen haben sich die Weltbank und die westlichen Industrienationen verpflichtet, mehr als 40 Milliarden US-Dollar für Hungerhilfe aufzubringen. Die US-amerikanischen Umwelt- und Ernährungswissenschaftlerinnen Elizabeth Bryan, Claudia Ringler und Nicole Lefore bezweifeln jedoch, dass diese Mittel denen zugutekommen werden, die sie am dringendsten benötigen; sie befürchten, dass die herrschende Ungleichheit damit sogar noch verstärkt wird (*Nature* 609, S. 28–31, 2022).

Denn die Hilfsprogramme bevorteilen traditionell die Männer. In der Regel geht die Unterstützung an kommerziell betriebene Landwirtschaftsbetriebe, während die kleinräumige Subsistenzwirtschaft, mit der die Frauen ihre Familien ernähren, leer ausgeht.

Zudem haben die auf Grund von Covid-19 verhängten Lockdowns in aller Welt zahlreiche Gelegenheitsarbeiter aus den Städten aufs Land vertrieben. Dort verdrängen sie ihrerseits die in der Landwirtschaft tätigen Frauen. Diese sehen sich gezwungen, ihre kleinen Läden und Marktstände aufzugeben.

Ein erster Schritt zur Abhilfe besteht darin, die Verantwortlichen auf solche Zusammenhänge aufmerksam zu machen. In Indien, wo die coronabedingte Stadtflucht 2020 besonders krass ausfiel, versorgte die größte Frauengewerkschaft des Landes, die Self Employed Women's Association, die Regierung erstmals mit Informationen über das Schicksal der unregistrierten weiblichen Arbeitskräfte.

Oft nützen schon einfachste Maßnahmen. In Bangladesch erhielten arme Familien im Rahmen einer Untersuchung mehrere Jahre lang Speiseöl, um zu verhindern, dass sie aus Not ihre minderjährigen Töchter zwangsverheiraten. Das Programm senkte die Anzahl solcher Frühehen um 19 Prozent und die von halbwüchsigen Müttern um 12 Prozent.

Weibliche Arbeitskräfte brauchen besondere Unterstützung. Kenia reserviert seit Längerem ein Drittel seiner Arbeitsbeschaffungsmaßnahmen für Frauen. Senegal bevorzugt Bäuerinnen beim Ankauf von Getreide für das staatliche Ernährungsprogramm. Viele Nichtregierungsorganisationen richten Kindergärten für Textilarbeiterinnen ein, um ihnen die Doppelrolle als Mutter und Ernährerin zu erleichtern.

Außerdem brauchen Frauen Zugang zu eigenem Geld. In Bangladesch haben Mikrokreditprogramme es ihnen ermöglicht, ausreichend Land zu pachten und darauf Nahrungsmittel für ihre Familien anzubauen.

Das alles sind bloß Tropfen auf den heißen Stein. Nach Überzeugung der drei Forscherinnen lassen sich künftige globale Krisen nur wirksam bewältigen, wenn die Stimme der Frauen bei der Planung der Gegenmaßnahmen von Anfang an gehört wird.

In unseren wohlhabenden Ländern findet die Gleichberechtigung breite Zustimmung. Dort aber, wo Hunger herrscht, wächst sie sich regelmäßig zum Problem auf Leben und Tod aus.

# EVOLUTION ALS ES AUF DER ERDE LAUT WURDE

**Milliarden Jahre blieb es vergleichsweise still auf unserem Planeten – bis Tiere die Fähigkeit entwickelten, Krach zu machen.**



**Michael B. Habib** ist promovierter Paläontologe am Natural History Museum in Los Angeles (USA). Er interessiert sich vor allem für Anatomie und Biomechanik von Pterosauriern, Vögeln sowie gefiederten Dinosauriern.

► [spektrum.de/artikel/2057448](http://spektrum.de/artikel/2057448)

► Wir halten es für selbstverständlich, dass nahezu jeder Lebensraum von den Lautäußerungen der Tiere erfüllt ist: von ergreifenden Walgesängen im Meer über die ausgelassenen Konzerte der Vögel, Frösche und Insekten im Wald bis hin zum tosenden Lärm des Menschen mit samt seinen technischen Geräten in der Stadt. Doch während der längsten Zeit in der Geschichte unseres Planeten erklangen lediglich die akustischen Ereignisse der unbelebten Natur wie das Rauschen von Wellen, Wind und Regen, unterbrochen von einem gelegentlichen Donnerschlag.

Als Paläontologe versuche ich, die Lebensweise ausgestorbener Tiere zu ergründen: Wie bewegten sie sich fort, was fraßen sie oder welche Laute gaben sie möglicherweise von sich? Darüber hinaus konsultiert man mich als

Berater bei Ausstellungen, Fernsehserien, Kinofilmen oder Computerspielen, wenn es um Animationen und Design von Lebewesen geht. Zu den häufigsten Herausforderungen, die ich im Rahmen solcher Projekte zu bewältigen habe, zählen Tierlaute. Ganz gleich, ob jemand längst ausgestorbene Flugsaurier für eine wissenschaftliche Untersuchung rekonstruiert oder ein Geschöpf für einen Kinokassenschlager entwirft: Geräusche sind von entscheidender Bedeutung, um vergangene oder imaginäre Welten zum Leben zu erwecken.

Jüngste Erkenntnisse zur Evolution von Schallphänomenen bei Tieren haben zu einem neuen Verständnis darüber geführt, wie die Geräuschkulisse des Lebens entstanden ist. Fossilien verraten uns, wann die grundlegenden Arten von Schallerzeugungs- und Schallwahrnehmungsstrukturen erstmals bei den Vorläufern heutiger Wirbelloser und Wirbeltiere auftraten. In einigen Fällen gelang es Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern durch geschicktes Modellieren sogar, die Laute jener urzeitlichen Tiere wieder-aufleben zu lassen. Auch wenn zahlreiche Details noch unerforscht bleiben, können wir nun endlich das Puzzle der Lärmentstehung zusammensetzen.

Wie Fossilien belegen, begann das Leben auf der Erde vor 3,7 Milliarden Jahren. Die frühen Organismenformen, darunter Mikroben sowie später quallenartige Lebewesen, waren jedoch ausnahmslos schweigsame Zeitgenossen. Erst während der evolutionären Explosion im Kambrium (541–485,4 Millionen Jahre vor heute) erwarben Tiere einige elementare geräuscherzeugende Verhaltensweisen, die im Zusammenhang mit Fortbewegung und Beuteerwerb standen. Aber selbst dann wurde die Stille unter Wasser, wo diese Tiere lebten, womöglich nur durch das Rascheln von über den Sand huschenden Arthropodenfüßchen oder durch das leise Knirschen eines Kopffüßlers unterbrochen, der eine Muschel zermalmte. Auf dem Festland herrschte währenddessen weitgehend Ruhe. Mehr als 200 Millionen Jahre sollten vorübergehen, bevor das Summen von Insekten allmählich die Luft erfüllte und eine vollkommen neue akustische Welt erschloss.

Das nachweislich älteste mutmaßliche Insekt lebte vor 408 Millionen Jahren und war wahrscheinlich stumm und

## AUF EINEN BLICK DIE EVOLUTION DES LÄRMS

- 1 In der Tierwelt spielte Schall zunächst eine untergeordnete Rolle, bis spezialisierte Lautbildungsorgane entstanden und den Weg freimachten für zirpende Insekten, brüllende Säugetiere und singende Vögel.
- 2 Manche Tiere wie Fledermäuse oder Wale entwickelten Echoortungssysteme, so dass sie Schall zur Orientierung einsetzen können.
- 3 Mit der menschlichen Sprache erreichte die Evolution der Lautbildung und -wahrnehmung ihren Höhepunkt.

**LAUTSTARK**

Der in Südamerika  
heimische Rote  
Brüllaffe ficht mit sei-  
nen Artgenossen  
eine Rangordnung  
akustisch aus.



taub. Wenngleich Wissenschaftler nicht exakt sagen können, wann Insekten zum ersten Mal Laute erzeugten und wahrnahmen, liefern Fossilien einen Mindestzeitpunkt: Eine ungefähr 250 Millionen Jahren alte Heuschrecke besaß bereits die für die Insektenordnung charakteristischen anatomischen Merkmale zur Schallproduktion. Auch die frühesten bekannten Versteinerungen von Verwandten der Zikaden datieren aus jener Zeit. Indem sie trommelartige Strukturen an ihrem Körper – die so genannten Tymbalorgane – mit hoher Geschwindigkeit ein- und ausdellen, können diese Kerbtiere außergewöhnlich laute Geräusche produzieren (siehe »Das Tymbalorgan der Insekten«). In einigen Insektenfossilien blieben die schallerzeugenden Strukturen derart gut erhalten, dass sich die ursprünglichen Gesänge der Tiere rekonstruieren ließen. 2012 beschrieben chinesische Wissenschaftler eine urzeitliche Laubheuschrecke, die Lieder im Frequenzbereich von geschätzt 6,4 Kilohertz zirpte – etwa eine Oktave über dem höchsten von Mariah Carey je gesungenen Ton.

### Wettstreit um die Lautstärke

Jenen ersten lautgebenden Insekten brachte die Fähigkeit zur Schallerzeugung und -wahrnehmung zahlreiche Vorteile. Sie konnten über Entfernungen hinweg miteinander kommunizieren, anschleichende Fressfeinde hören und vielleicht sogar Beutetiere anlocken, indem sie deren Laute imitierten und sich so als potenzielle Geschlechtspartner ausgaben. Denn Schall bot den Männchen neue Möglichkeiten, um Weibchen zu werben, und führte zu einem bis dahin unbekannten biologischen Wettstreit: der Evolution der Lautstärke.

Ungefähr zur selben Zeit, als die Insekten zu summen und zirpen begannen, fingen wohl auch die Wirbeltiere an, in begrenztem Umfang mit Schall zu experimentieren. Alle heutigen Amphibien, Reptilien und Säugetiere tragen am oberen Ende ihrer Luftwege einen Kehlkopf (Larynx), den sie demnach von ihrem letzten gemeinsamen Vorfahren geerbt haben (siehe »Der Kehlkopf der Landwirbeltiere«). Damit wäre die Struktur fast so alt wie die Landwirbeltiere selbst, die vor rund 300 Millionen Jahren auftauchten. Dennoch verstrichen vermutlich Jahrtausende, bis sich bei diesen Tieren wirklich spezialisierte und effektive Formen der Tonproduktion herausbildeten. Über die frühen Stadien der Lauterzeugung bei Wirbeltieren weiß man relativ wenig – nicht zuletzt, weil der Kehlkopf aus Knorpel besteht, der normalerweise nicht lange überdauert.

Bekannt ist allerdings, dass die Wirbeltiere vor etwa 230 Millionen Jahren, also im Mesozoikum (Erdmittelalter), ein breites Spektrum an stimmlichen Fähigkeiten hervorbrachten. Damals wurde es auf der Erde richtig laut. So tauchten die Frösche mit ihrem umfangreichen Repertoire an Rufen und Gesängen erstmals im Erdmittelalter auf. Auch die ersten Säugetiere traten nun in Erscheinung und äußerten sich wahrscheinlich schon frühzeitig durch ihr charakteristisches Fiepen, Knurren und Fauchen.

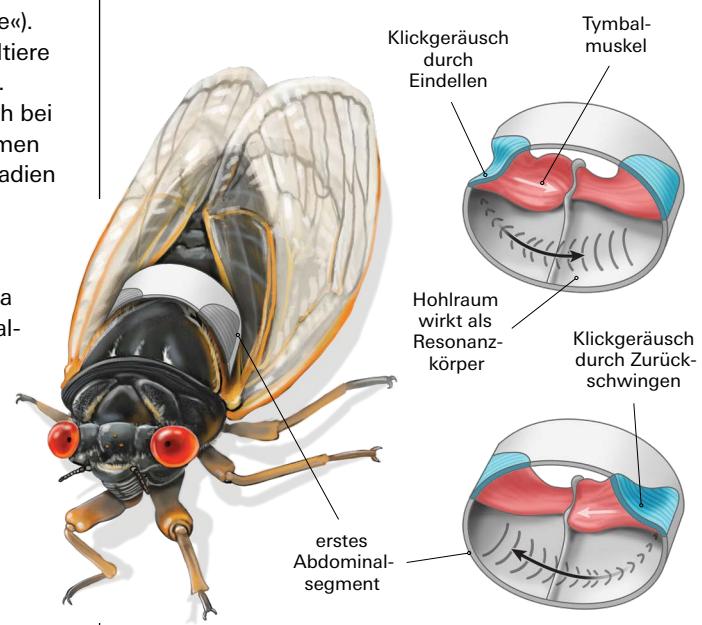
Während es kaum direkte Nachweise für einen Schallerzeugungsapparat bei frühen Säugetieren gibt, existieren eindrucksvolle fossile Belege ihres Hörorgans.

Das Sägerohr stellt eine einzigartige Errungenschaft dar: Sein Mittelohr weist drei Knöchelchen auf, von denen zwei sich aus Knochen ableiten, die bei den meisten anderen Wirbeltieren den Kiefer bilden. Diese speziellen Ohren eignen sich recht gut, um hohe Schallfrequenzen zu hören – was wohl beim Aufspüren summender Insekten half. Womöglich waren die Säger aber auch selbst in der Lage, hochfrequente Laute zu erzeugen, so dass sie mit ihren Artgenossen in einem Frequenzbereich kommunizieren konnten, der den meisten anderen Tieren verschlossen blieb.

Zu den akustisch begabtesten Wesen des Mesozoikums zählten zweifellos die Dinosaurier. 1981 unternahm der US-amerikanische Paläontologe David Weishampel einen der ersten Versuche, die Laute eines urzeitlichen Tiers zu rekonstruieren. Sein Untersuchungsobjekt war der Pflanzenfressende Entenschnabelsaurier *Parasaurolophus*, dessen Kopf ein gewaltiger, mit den Atemwegen verbundener Knochenkamm schmückte. Wie Weishampel demonstrierte, bildete diese Struktur einen exzellenten Resonanzraum. Unter Berücksichtigung von Größe und Form des Kamms gelang es dem Wissenschaftler, das Lautrepertoire von *Parasaurolophus* zu ermitteln und mit einem selbst gebau-

### Das Tymbalorgan der Insekten

Zikaden singen mit Hilfe des Trommel- oder Tymbalorgans. Dabei wölbt ein Muskel eine straff gespannte Platte des Außenskeletts am Hinterleib ein, die daraufhin zurückschwingt. Das schnelle Ein- und Ausdellen erzeugt ein durchdringendes Geräusch. Wie Fossilien belegen, existierten solche lautbildenden Strukturen bereits vor etwa 250 Millionen Jahren.



MESA SCHUMACHER / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2022

ten Modell, das Weishampel liebevoll seinen »Tröter« nennt, zu reproduzieren.

Immer ausgefeilte digitale Werkzeuge ermöglichen solch tief greifende Studien auch an anderen Vertretern der Dinosaurier. Seit 2008 kombiniert das Team des Paläontologen Lawrence Witmer von der Ohio University computertomografische Aufnahmen mit strömungsmechanischen Modellen, um die Schallerzeugung bei verschiedenen Spezies zu rekonstruieren. Dabei entdeckten die Forscher in zahlreichen Saurierschädeln komplexe Kammern, die bei hindurchströmender Luft für Verwirbelungen sorgten. Dieser Luftstrom dürfte bei der Regulierung der Körpertemperatur geholfen haben, ermöglichte den Tieren aber vielleicht auch verschiedenartigste Lautäußerungen.

Die Rekonstruktion von Dinosaurierlauten fand schnell Anklang in der Filmindustrie. Das donnernde Gebrüll im Sciencefiction-Klassiker »Jurassic Park« zählt zu den berühmtesten Darstellungen der Stimmen ausgestorbener Tiere. Doch laut Analysen von Forschern um Tobias Riede von der Midwestern University in Glendale klangen räuberische Dinosaurier wie *Tyrannosaurus rex* eher vogel- als säugetierartig. Daraufhin schrieben einige Journalisten, die Furcht erregenden Tyrannosaurier hätten wohl gegurrt statt gebrüllt. Bevor man sich jetzt aber *T. rex* als eine Art Riesentaube vorstellt, sollte man sich vergegenwärtigen, dass die Wissenschaftler auf die Biomechanik der erzeugten Stimme abzielten: Es handelte sich um ein Geräusch, das größtenteils durch die Nase bei geschlossener Mundöffnung entstand und mit dem Vibrieren von tief im Inneren der Brust gelegenen Strukturen einsetzte. In Anbetracht der Körpergröße eines Dinosauriers muss das wie die dröhnende Fanfare einer gigantischen Kriegstrompete geklungen haben. Die Bestien könnten mit der geballten Wucht sämtlicher Blechbläser eines Sinfonieorchesters losgelegt haben, wenn sie mit ihren meterlangen, knochenbrechenden Kiefern in den Kampf zogen.

### Ein zu langer Weg für komplexe Laute

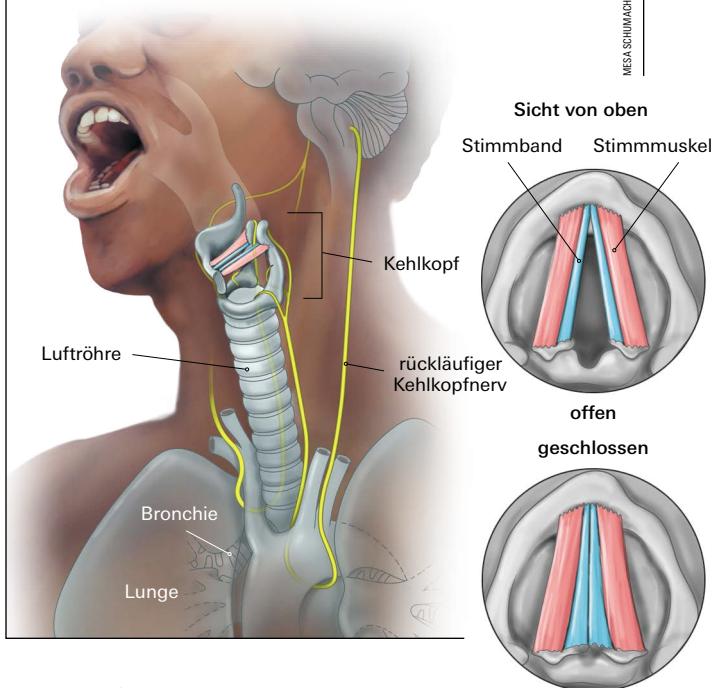
Dennoch traten einige Dinosaurier vermutlich weit weniger lautstark auf als häufig dargestellt. Im ersten Teil der »Jurassic-Park«-Serie trompeteten die langhalsigen Brachiosaurier wie Elefanten, während sie in Wirklichkeit wohl nahezu stumm blieben oder höchstens zischen konnten. Bei allen Tetrapoden – der Gruppe der Landwirbeltiere – steuert hauptsächlich der rückläufige Kehlkopfnerv die primäre Lautbildung im Kehlkopf. Dieser Nerv zeigt immer denselben merkwürdigen Verlauf: Er zieht sich die gesamte Halslänge hinunter, umschlingt große Blutgefäße im oberen und mittleren Brustkorb und läuft schließlich den Hals hinauf zurück zum Kehlkopf. Nervensignale zur Lauterzeugung müssen daher ungefähr die doppelte Länge des Halses zurücklegen.

Bei kurzhalsigen Tieren, zu denen auch der Mensch gehört, bleibt die resultierende Verzögerung in der Signalübertragung unerheblich. Bei einem riesigen, langhalsigen Dinosaurier wäre sie dagegen enorm – so groß, dass das Tier keine Möglichkeit hätte, die schnellen Bewegungen der Stimbänder bei der Bildung komplexer Laute korrekt zu steuern.

## Der Kehlkopf der Landwirbeltiere

Alle heutigen Säugetiere, Reptilien und Amphibien besitzen einen Kehlkopf (Larynx), mit dem sie ein breites Spektrum an Lauten von sich geben. Gesteuert über den rückläufigen Kehlkopfnerv spannt der Stimmuskel die Stimbänder, die durch die vorbeiströmende Atemluft in Schwingungen versetzt werden. Vermutlich besaßen schon die letzten gemeinsamen Vorfahren der Landwirbeltiere vor rund 300 Millionen Jahren einen Kehlkopf, dessen knorpelige Struktur allerdings kaum als Fossil überdauert.

MESA SCHUMACHER / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2022



Mit großer Wahrscheinlichkeit gaben zahlreiche Dinosaurier beeindruckende Vokalisten ab, aber vor allem eine Gruppe unter ihnen stach durch eine der raffinertesten Lautäußerungsformen im gesamten Tierreich heraus. Ihre Vertreter leben noch heute: die Vögel. Die frühesten bekannten Vogelfossilien stammen aus zirka 150 Millionen Jahre alten Ablagerungen; die einzigartigen stimmlichen Fähigkeiten dieser Tiere entwickelten sich jedoch vermutlich erst später.

Vögel besitzen ein spezielles Stimmungsorgan, den Stimmkopf (Syrinx), der nahezu ausschließlich den Gesang steuert (siehe »Der Stimmkopf der Vögel«). Im Gegensatz zum reduzierten Kehlkopf, der sich am oberen Ende der Hauptluftwege befindet, sitzt die Syrinx an deren Basis, wo sich die Luftröhre in die beiden zur Lunge führenden Hauptbronchien gabelt. Diese anatomische Anordnung bietet einige Vorteile. Ein ganz wesentlicher, den Riede und seine Mitarbeiter 2019 beschrieben, besteht in einer beträchtlichen Erhöhung der Resonanzeffizienz. Mit anderen Worten: Ein Vogel produziert bei gleichem Energieaufwand mehr Schall. Ein weiterer Vorteil des Stimmkopfs liegt darin, dass

sich die Luftströme aus rechtem und linkem Lungenflügel unterschiedlich nutzen lassen. Singvögel sind in dieser Hinsicht besonders geschickt: Sie können Töne auf beiden Seiten gleichzeitig oder unabhängig voneinander erzeugen, was es dem Vogel erlaubt, mit sich selbst im Duett zu singen. Dabei kann sogar jede Körperhälfte auf einen unterschiedlichen Frequenzbereich spezialisiert sein.

Der Ursprung der Syrinx liegt noch weitgehend im Dunkeln. Der bislang älteste Nachweis stammt von einem Exemplar des ausgestorbenen Vogels *Vegavis* und wurde 2016 von der Arbeitsgruppe der Geowissenschaftlerin Julia Clarke von der University of Texas in Austin beschrieben. *Vegavis* lebte während der späten Kreidezeit von vor 69 bis vor 66 Millionen Jahren. Sein Stimmkopf wies jedoch bereits einige Spezialisierungen auf: einen erweiterten Resonanzraum sowie eine Asymmetrie, die mit beidseitiger Schallerzeugung assoziiert wird. Vermutlich ist eine primitivere Version des Gesangsorgans schon früher entstanden.

Interessanterweise fehlte eine Syrinx bei den anderen fliegenden Wirbeltieren des Mesozoikums: den Pterosauriern. Im Gegensatz zu dem, was Hollywood uns weismachen will, klangen Flugsaurier also nicht wie Vögel. Ihre Laute ähnelten wohl eher denen anderer Reptilien; vielleicht haben sie geknurrt, gezischelt, Klicklaute erzeugt oder mit den Schnäbeln geklappt. Bei einem Monstrum mit einem drei Meter langen Schädel muss dieses Schnabelklappern für andere Lebewesen geradezu markierschütternd geklungen haben.

Mit Beginn des Känozoikums vor 66 Millionen Jahren entstand ein völlig neues Prinzip zur akustischen Erkundung der Welt: die Echoortung. Sowohl Fledermäuse als auch Wale, die beide schon früh in diesem Erdzeitalter auftreten, entwickelten die Fähigkeit, mit Hilfe von Schall zu sehen. Die Methode erfordert jedoch eine etwas aufwändigere Anatomie. Bei der Echoortung muss ein Tier zunächst einen Schallimpuls erzeugen, ihn dann in die gewünschte Richtung lenken, auf das Echo lauschen und dieses anschließend so verarbeiten, dass es daraus Entfernung, Geschwindigkeit und Form jedes Objekts, das den Schall zurückwirft, bestimmen kann. Das Verfahren ist ein raffinierter Trick, um sich bei Dunkelheit oder in trüben Gewässern zurechtzufinden und zu jagen.

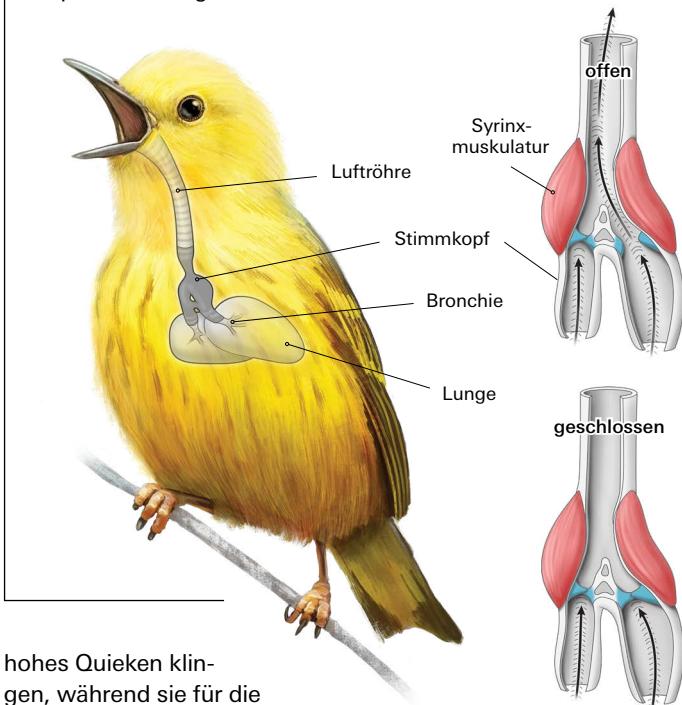
### Mit den Ohren sehen

Die minimale Größe, die mit Hilfe von Echoortung registriert werden kann, errechnet sich – ähnlich wie beim Licht – aus der Hälfte der Wellenlänge des emittierten Schallsignals. Allerdings sind Schallwellen bedeutend länger als Lichtwellen. Um ein vernünftiges Bild von seiner Umgebung zu erhalten oder winzige Insekten zu erfassen, muss das Tier hochfrequente Schallimpulse aussenden, die kürzere Wellenlängen besitzen als niederfrequente. Die Rufe, die Fledermäuse mit Hilfe des Kehlkopfs und der Zunge erzeugen, sind in der Regel viel zu hoch, um vom Menschen wahrgenommen zu werden. Bei rund 20 000 Hertz stößt das menschliche Gehör an seine Grenze; die Schreie der Fledertiere reichen dagegen von etwa 10 000 bis zu schwindelerregenden 200 000 Hertz. Wir hören – wenn überhaupt – nur die tiefsten Fledermausrufe, die für uns wie

## Der Stimmkopf der Vögel

Das Lautbildungsorgan der Vögel, der Stimmkopf (Syrinx), sitzt am unteren Ende der Luftröhre, wo diese sich in die beiden zur Lunge führenden Hauptbronchien gabelt. Die Syrinxmuskulatur kontrolliert unabhängig voneinander die Luftströme aus rechtem und linkem Lungenflügel, so dass der Vogel einen vielfältigen Gesang trällern kann. Die ältesten bekannten Vogelfossilien sind 150 Millionen Jahre alt; die spezialisierte Anatomie ihres Stimmapparats hat sich vermutlich aber erst später herausgebildet.

MESA SCHUMACHER / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2022



hohes Quiaken klingen, während sie für die Tiere selbst eher einer Bassstimme entsprächen.

Wann in etwa die Fledertiere mit der Echoortung begannen, konnten Wissenschaftler anhand von Charakteristika der Ohrenanatomie in fossilen Exemplaren feststellen. Um das Echo von Ultraschallrufen wahrnehmen zu können, benötigen Fledermäuse vergleichsweise riesige Innenoahnen. Den zentralen Teil des Hörorgans im Schädel bildet die Hörschnecke (Cochlea). Linke und rechte Hörschnecke des Menschen passen zusammen locker auf eine Zehn-Cent-Münze. Besäßen wir Ohren wie Fledermäuse, wäre dagegen jede Cochlea ungefähr so groß wie ein Golfball. Ein in Wyoming gefundener Schädel eines der nachweislich frühesten Fledertiere, der 50 Millionen Jahre alten Spezies *Icaronycteris index*, zeigt bereits Merkmale, die bei heutigen Fledermäusen mit der Echoortung in Verbindung gebracht werden.

Die Entwicklung der Echoorientierung bei Fledermäusen läutete eine beachtliche ökologische Revolution ein: Fortan konnten Wirbeltiere bei völliger Dunkelheit Insekten im Flug fangen. Nach 275 Millionen Jahren hatten flugfähige Kerb-

tiere keinen Platz mehr zum Verstecken. Als Folge dieser Innovation gediehen die Ultraschalljäger prächtig und bilden heute rund ein Viertel aller Säugerarten. Die meisten Fledermäuse machen von der Echoorientierung Gebrauch; nur einige wenige verlassen sich beim Jagen ausschließlich auf ihren Sehsinn.

In der Luft funktioniert Echoortung zwar schon recht gut, doch Ozeane und Flüsse eignen sich in mancher Hinsicht sogar noch besser, um Objekte mit Hilfe reflektierter Schallwellen zu lokalisieren. Wasser überträgt Schall mit bedeutend geringerem Signalverlust pro Entfernungseinheit; darin lebende Tiere erzielen daher beim Echoorten größere Reichweiten als ihre terrestrischen Pendants. Hochfrequente Schallsignale breiten sich bei gleicher Umgebung weniger weit aus als niederfrequente; dennoch schaffen es einige Delfine, bis zu 200 Meter entfernte Objekte unter Wasser auszumachen. Fledermäuse können dagegen selbst große Objekte in der Luft nicht mehr lokalisieren, wenn sie mehr als 50 bis 100 Meter weit weg sind; bei kleineren Beuteorganismen wie Insekten verringert sich die Reichweite entsprechend.

Meeresdelfine wie der Große Tümmler verschaffen sich bei Nacht oder in trüben Gewässern per Echoortung über größere Entfernungen einen »ersten Eindruck«. Flussdelfine etwa im Amazonas nutzen die Technik noch intensiver. Sie leben häufig in extrem schwefstoffhaltigem Wasser; zudem sind ihre Augen im Vergleich mit denen anderer Wale kleiner und besitzen eine geringere Sehschärfe. Bei der Orientierung und Nahrungssuche verlassen sich die Flussdelfine daher besonders stark auf die Echoortung.

Auch in anderen Disziplinen der Akustik brechen Meeresäuger Rekorde. Wenn es darum geht, Geräusche mit größtmöglicher Reichweite zu erzeugen, ohne ihr Echo zu erfassen, erweisen sich Schallwellen mit sehr niedriger Frequenz als sinnvollste Lösung. Große Meerestiere genießen hier einen natürlichen Vorteil. Es überrascht daher kaum, dass die riesigen Bartenwale als Champions für die höchsten Schallreichweiten aufwarten. Mit ihrem über einen halben Meter langen Kehlkopf und den tiefen, für das menschliche Ohr nicht mehr wahrnehmbaren Rufen produzieren einige dieser Tiere Gesänge, die sich über Hunderte, wenn nicht Tausende von Kilometern fortpflanzen. Die Welt der Fledermäuse und Wale erscheint wohl weitaus geräuschvoller, als wir Menschen es uns vorstellen können.

Etwa 230 Millionen Jahre nachdem die Geräusche der ersten Säugetiere die Welt durchdrangen, übernahm die Lautäußerung mit der Evolution der menschlichen Sprache eine neue Rolle. Die anatomischen Voraussetzungen zum Sprechen – ein sich rasch anpassender Kehlkopf sowie ein ausgeklügeltes Zusammenspiel zwischen diesem und der Zunge – scheinen mindestens bis zum Ursprung unserer Gattung *Homo* zurückzureichen. Die Vorfahren des Menschen könnten demnach schon vor 2,8 Millionen Jahren eine Form von Sprache besessen haben. Wann genau eine *Homo*-Spezies – und welche – zum ersten Mal gesprochen hat, wird allerdings nach wie vor diskutiert. Voraussetzung für die Entwicklung von Sprache war nicht nur eine passende Anatomie, sondern auch die Fähigkeit zum symbolischen Denken. Die meisten Forscher gehen davon aus,

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/fossilien](http://spektrum.de/t/fossilien)



ISTOCK / SCOTTORR

dass *Homo erectus*, der vor etwa 1,8 Millionen Jahren die Weltbühne betrat, als erster Hominide Symbole verwendete. Die vollkommen ausgereifte menschliche Sprache mit ihren komplexen Grammatik- und Syntaxregeln stellt dagegen höchstwahrscheinlich eine einzigartige Errungenschaft unserer Spezies dar und entstand folglich erst in den letzten 100 000 Jahren.

Aber nicht nur der Besitz von Sprache erscheint äußerst wirkmächtig, sondern auch die Fähigkeit, sie zu erlernen, an andere weiterzugeben und schriftlich festzuhalten – Eigenschaften, die ausschließlich dem Menschen vorbehalten sind. Zwar haben Wissenschaftler einigen anderen Primaten erfolgreich Zeichensprache beigebracht, doch keiner dieser Affen war in der Lage, das Wissen an seine Artgenossen weiterzugeben – selbst wenn sich die Gelegenheit dazu bot: Als ein Schimpanse, der von Primatenforschern der Duke University Zeichensprache erlernt hatte, wieder zu seiner Gruppe geführt wurde, versuchte dieser, seine neuen Kommunikationsfähigkeiten bei den anderen Schimpansen einzusetzen. Nachdem er es eine Woche lang probiert hatte, fanden ihn die Tierpfleger zurückgezogen in einer Ecke des Geheges. Als sie ihn per Zeichensprache fragten, warum er nicht bei seinen Artgenossen sei, gab er zurück: »weil sie Insekten sind.«

Die menschliche Sprache stellt eines der bedeutsamsten biologischen Merkmale dar, das sich im Lauf der Evolution entwickelt hat. Auf ihr beruht die Entstehung sozialer Gruppen, Gesellschaften und Zivilisationen. Indem wir unsere Absichten mit Hilfe von Sprache koordinierten, erfanden wir alles Erdenkliche von der Landwirtschaft bis zum Spaceshuttle – Errungenschaften, die ihrerseits zur heutigen Geräuschkulisse beitragen. Von Menschen verursachte Schallereignisse zählen sicher nicht zu den ersten, lautesten oder gar schönsten Klängen der Erde, aber sie haben die Welt wohl am meisten verändert. ▲

## QUELLEN

**Clarke, J. A. et al.:** Fossil evidence of the avian vocal organ from the Mesozoic. *Nature* 538, 2016

**Gu, J.-J. et al.:** Wing stridulation in a Jurassic katydid (Insecta, Orthoptera) produced low-pitched musical calls to attract females. *PNAS* 109, 2012

**Riede, T. et al.:** Coos, booms, and hoots: The evolution of closed-mouth vocal behavior in birds. *Evolution* 70, 2016

**Riede, T. et al.:** The evolution of the syrinx: An acoustic theory. *PLoS Biology* 17, 2019

**Weishampel, D. B.:** Acoustic analyses of potential vocalization in lambeosaurine dinosaurs (Reptilia: Ornithischia). *Paleobiology* 7, 1981

# BIOTECHNOLOGIE DAS KNIEGELENK AUF EINEM CHIP

**Organ-on-a-Chip-Verfahren helfen, schmerzhafte Gelenkerkrankungen zu erforschen und bessere Therapien dagegen zu entwickeln.**



**Michael S. Gold** (links) ist Professor für Neurobiologie an der University of Pittsburgh.

**Hang Lin** (Mitte) arbeitet ebenda als Dozent in der Abteilung für orthopädische Chirurgie; die Bioingenieurin **Meagan Makarczyk** ist eine Mitarbeiterin von ihm.

► [spektrum.de/artikel/2057451](http://spektrum.de/artikel/2057451)

► Gelenkerkrankungen wie Arthritis und Arthrose sind ein großes medizinisches Problem; in Deutschland leiden schätzungsweise sechs Millionen Menschen an diesen qualvollen Einschränkungen. Damit gehören sie zu den häufigsten Krankheiten des Bewegungsapparats. Die derzeitigen Behandlungsmöglichkeiten sind begrenzt, bergen Risiken und verlieren mit der Zeit an Wirkung.

Seit 2014 forschen wir in der Abteilung für orthopädische Chirurgie der University of Pittsburgh darüber, wie sich die Therapieoptionen verbessern lassen. Dabei arbeiten wir mit künstlichen, auf Zellkulturen basierenden Gelenk-Imitationen. Sie erlauben uns, die Mechanismen der Arthrose zu untersuchen, um die Krankheit besser zu verstehen und wirksam zu behandeln. Im Jahr 2022 haben wir ein System entwickelt, mit dem sich verschiedene Gewebetypen auf einem Biochip züchten und manipulieren lassen. Damit analysieren wir, wie die krankheitsbedingten Schmerzen entstehen, und testen Arzneistoffkandidaten zum Lindern der Qual. Mit unserem Versuchsaufbau führen wir Laborexperimente durch, in denen wir den Ursachen von Gelenkschmerzen auf den Grund gehen, ohne dabei auf Tierversuche angewiesen zu sein.

Indem wir verschiedene Gewebe, ihre Funktionen und Wechselwirkungen auf unserem Chipsystem nachbilden, erforschen wir, woher die Schmerzen bei diesen Gelenkbeschwerden röhren. Wir erhalten so wertvolle Daten, die zu besseren und möglicherweise sogar personalisierten Therapien führen können.

Arthrose ist schon lange eine Geißel der Menschheit – davon zeugen historische Skelettfunde, Kunstwerke und medizinische Texte. Sie gehört zu den am weitesten verbreiteten Gelenkerkrankungen, befällt Hände, Knie, Hüften, Schultern und Knöchel und betrifft bis zu 35 Prozent der über 50-Jährigen. Viele Faktoren erhöhen das Arthroserisiko, darunter ein gehobenes Alter, vorherige Gelenkverletzungen, das Einsetzen der Wechseljahre, Übergewicht, Schiefstellungen der Extremitäten und übermäßige Gelenkbelastung. Am häufigsten betroffen sind die Knie. Der per-



## AUF EINEN BLICK WIDER DEN BEWEGUNGSSCHMERZ

- 1** Unter Gelenkerkrankungen leiden allein in Deutschland mehrere Millionen Menschen. Am häufigsten betroffen sind die Knie.
- 2** Per Bildgebung nachweisbare Schäden hängen kaum mit dem Grad der Schmerzen zusammen. Derzeitige Behandlungsverfahren richten sich nur gegen die Symptome und gehen mit schweren Nebenwirkungen einher.
- 3** Organ-on-a-Chip-Verfahren erlauben es, künstliche Gelenke auf Biochips herzustellen. Daran lassen sich die Krankheitsmechanismen erforschen und neue Behandlungsansätze finden, ohne Tierversuche durchzuführen.

Bildgebung nachweisbare Gelenkschäden steht jedoch kaum in Zusammenhang mit dem Ausmaß der Pein, weshalb unklar ist, welche physiologischen Veränderungen sie hervorbringen.

Das Knie setzt sich aus verschiedenen Gewebetypen zusammen, darunter Knochen, Knorpel, Gelenkschleimhaut, Fettkörper unterhalb der Kniescheibe, Bänder, Meniskus und Muskeln. Mit Ausnahme des gesunden Knorpels enthalten all diese Strukturen Nervenzellen und sind darüber an das körpereigene Nervensystem angeschlossen. Wenn sich eine Arthrose ausprägt, nehmen Neurone zusätzlich noch Kontakt mit dem Knorpel auf. Daher gibt es viele mögliche Ursachen für den krankhaften Gelenkschmerz, unter dem die Betroffenen leiden.

### Komplizierte Struktur

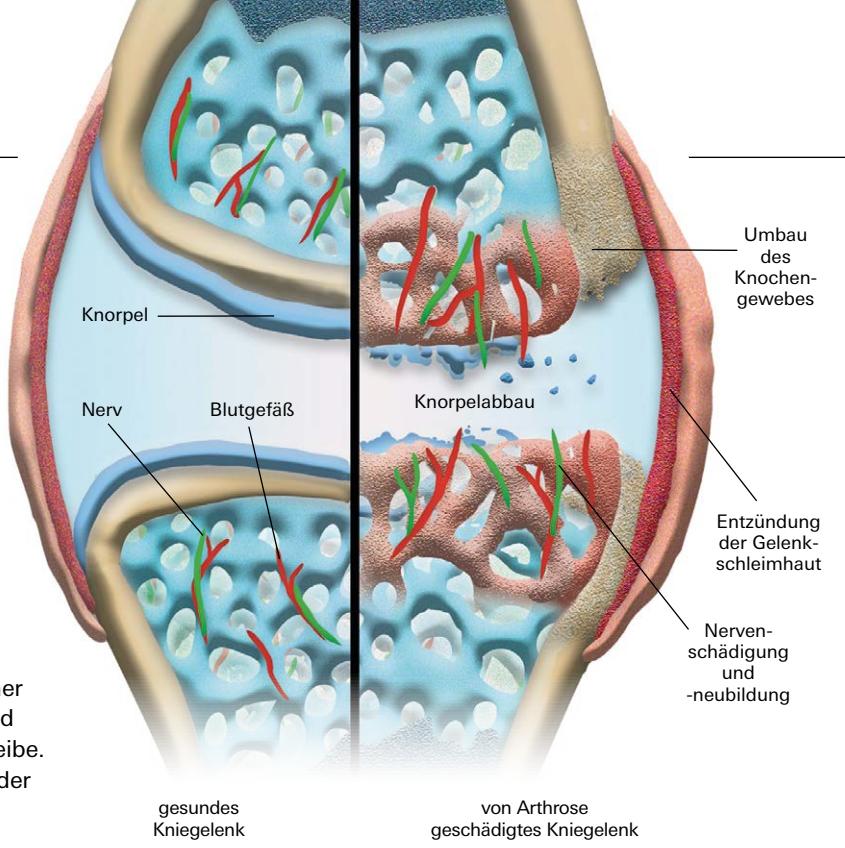
Die beschriebenen Gewebetypen sind allesamt notwendig, damit das Knie seine Hauptfunktionen erfüllen kann: das Tragen des Körpergewichts im Stehen und die Fortbewegung im Gehen, Laufen und Springen. Die Knochen sorgen für mechanische Unterstützung; Bänder und Muskeln stabilisieren die Struktur; der Knorpel minimiert die Reibung, die bei Bewegungen innerhalb des Gelenks entsteht. Meniskus und Fettkörper unterhalb der Kniescheibe dämpfen einwirkende Kräfte und schützen die Struktur so zusätzlich vor Schäden. Die Gelenkschleimhaut, auch Synovialis genannt, kleidet das Gelenk aus, gibt die Gelenkflüssigkeit (Synovia) ab und schmiert den Knorpel. All diese Gewebe interagieren miteinander und sind von Arthrose-Erkrankungen potenziell betroffen, was es schwierig macht, den Quell der Pein zu lokalisieren.

Es gibt keine zugelassenen Therapien, um das Fortschreiten einer Arthrose zu verlangsamen oder umzukehren. Daher zielen die meisten derzeitigen Behandlungen darauf ab, die Symptome zu kontrollieren, vor allem die Schmerzen. Zumal diese in der Regel der Grund sind, warum die Betroffenen einen Arzt aufsuchen. Leider gibt es

**SCHWACHSTELLE** Das Kniegelenk erkrankt besonders häufig an Arthrose. Für die Betroffenen kann das sehr schmerhaft sein.

## Umfassende Schädigung

Arthrose ist eine Erkrankung des gesamten Gelenks. Ihr bekanntestes Symptom ist der fortschreitende Verlust des Knorpels, der am Ende dazu führt, dass Knochen auf Knochen reibt. Weiterhin zeichnet sich die Krankheit durch eine Verdickung des Knochens aus sowie durch dessen abnormalen Wuchs in Form von Sporonen, die den Gelenkspalt einengen und die Bewegungsfähigkeit einschränken. Außerdem kommt es zu einem Verfall der Bänder und des Meniskus sowie zu einer Entzündung der Gelenkschleimhaut und des Fettkörpers unterhalb der Kniestiefe. All diese Veränderungen tragen entweder einzeln oder im Zusammenspiel zu den arthrosebedingten Schmerzen bei.



MARAKOZYK, M.J. ET AL. CURRENT MODELS FOR DEVELOPMENT OF OSTEOARTHRITIS. TISSUE ENGINEERING PART C: METHODS 27, 10.1089/TEC.2020.0398, 2021, FIG. 1. MAT THIL, LIV. VON HANG UND BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

keine langfristig lindernden Maßnahmen, die ohne schädliche Nebenwirkungen auskommen.

Der Arzneistoff Paracetamol dient zur Behandlung leichter Arthroseschmerzen, ruft aber Vergiftungserscheinungen der Leber hervor. Entzündungshemmende Substanzen wie die nichtsteroidalen Antirheumatika Acetylsalicylsäure und Ibuprofen werden gegen leichte bis mittelschwere Arthroseschmerzen eingesetzt, können jedoch Nieren- und Leberschäden und potenziell tödliche Magen-Darm-Blutungen verursachen. Darüber hinaus verlieren sie mit der Zeit ihre Wirksamkeit, was die Patientinnen und Patienten sowohl der Pein als auch den Nebenwirkungen aussetzt. Opioide stellen die letzte Verteidigungslinie bei mäßigen bis starken Arthroseschmerzen dar, allerdings sind deren Nebenwirkungen vielfach noch problematischer: erhöhtes Sturzrisiko, Medikamentenabhängigkeit und Atemstörungen bis hin zum Tod.

Ist eine Arthrose so weit fortgeschritten, dass die Schmerzen das tägliche Leben stark einschränken, empfehlen viele Ärzte und Ärztinnen einen vollständigen Gelenkersatz. Obwohl er mittlerweile zu den Routineeingriffen gehört, geht er mit erheblichen Risiken einher, und die Implantate haben eine begrenzte Lebensdauer. Deshalb kommt diese Option für jüngere Menschen oft nicht in Frage. Zudem leiden etwa 20 Prozent der Arthrosepatienten, die ein künstliches Gelenk eingesetzt bekommen, anschließend weiterhin unter Schmerzen. All dies zeigt, dass dringender Bedarf an sicheren und wirksamen Behandlungsverfahren besteht.

Früher waren Tierversuche mit Ratten und Mäusen die wichtigste Erkenntnisquelle, um die Mechanismen der Arthrose zu erforschen. Bei solchen Studien beschädigen Forscherinnen und Forscher die Kniegelenke der Tiere,

indem sie Chemikalien injizieren, die das Gewebe verwunden oder eine Entzündung hervorrufen, oder indem sie Verletzungen operativ herbeiführen. Anschließend untersuchen sie, welche Folgen das hat. In anderen Experimenten deaktivieren sie Gene, die für die Gelenkgesundheit wichtig sind, oder sie aktivieren Erbanlagen, die unter Verdacht stehen, an Gelenkerkrankungen beteiligt zu sein. Die so behandelten Tiere absolvieren dann Verhaltenstests zum Bewerten ihrer Schmerzempfindlichkeit. Die dabei gewonnenen Daten sollen helfen, die zu Grunde liegenden physiologischen Prozesse aufzuklären.

Tierversuche tragen noch heute dazu bei, die Mechanismen der Arthroseschmerzen zu enträtseln und Arzneistoffkandidaten im vorklinischen Stadium zu testen. Aber sie liefern nicht genug Informationen. Ihre Aussagen sind nur bedingt auf den Menschen übertragbar, da sich der humane Stoffwechsel unzureichend im Tiermodell abbilden lässt. Studien an menschlichen Zellen sind ethisch weniger problematisch und generieren oft relevantere und genauere Daten.

## Verschmelzung von Biologie und Technik

Mit menschlichen Zellen lässt sich sogar ein Miniorganismus erschaffen, der die humane Physiologie nachahmt. Das Grundprinzip dabei lautet, unter Zuhilfenahme technischer Systeme – mikroskopisch kleiner Kanäle, in denen Flüssigkeiten strömen, und halbleiterbasierter Sensoren – lebende Strukturen zu erzeugen, die ähnlich funktionieren wie Körperfektgewebe des Menschen. So genannte Organ-on-a-Chip-Geräte sind Biochips, die menschliche Organe in einer Zellkultur simulieren (siehe »Die Natur nachahmen«). Sie ermöglichen es, Krankheiten zu untersuchen, ohne Tests an Tieren oder Patienten durchzuführen.

Um einen Organ-on-a-Chip herzustellen, lassen sich sowohl entwickelte Gewebezellen als auch Stammzellen nutzen, insbesondere induzierte pluripotente Stammzellen (iPSCs). Diese gewinnen wir aus Körperzellen, etwa der Haut oder des Bluts, und programmieren sie so um, dass sie sich – je nach Kulturbedingungen – in die jeweils gewünschte Zellsorte des menschlichen Organismus ausdifferenzieren. Arthrose betrifft das gesamte Gelenk, und die Wechselwirkungen zwischen seinen verschiedenen Komponenten spielen eine entscheidende Rolle beim Entstehen und Fortschreiten der Krankheit. Mit iPSCs können wir alle Gewebetypen des Kniegelenks im Mikrometermaßstab auf einem Biochip nachbilden und untersuchen.

In den 2010er Jahren begannen wir damit, solche »mikrophysiologischen« Systeme zum Simulieren des Knie zu entwickeln. Unsere Arbeiten mündeten in das »miniJoint«-System, einen Organ-on-a-Chip, der Knochen- und Knorpel-, Gelenkschleimhaut- und Fettgewebe enthält und inzwischen auch noch Nervengewebe. Er erlaubt uns, Arthrose-»Schmerzen« unter kontrollierten Laborbedingungen zu erzeugen und zu analysieren.

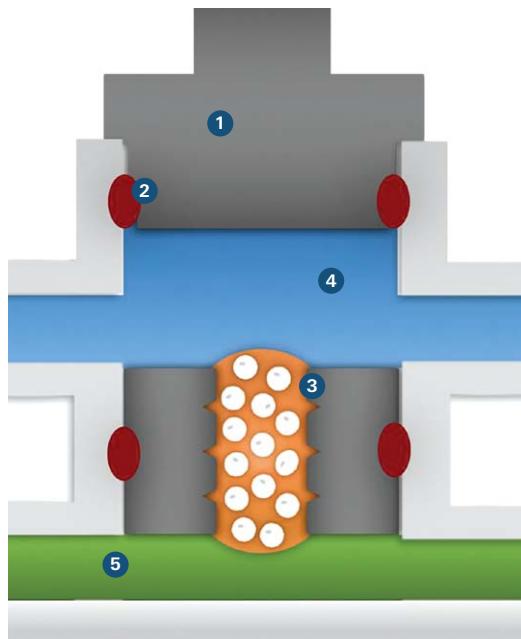
Mit miniJoint ist es – anders als bei Tieren und Menschen – möglich, die Vernetzungen der Nervenzellen mit den anderen Gewebetypen vollständig zu überwachen und permanent zu beobachten, wie sie sich im Zuge einer Arthrose verändern. Unser System ist in zweierlei Hinsicht außergewöhnlich: Seine Neurone stammen von humanen Spinalganglien, Nervenknoten innerhalb des Wirbelkanals (erhalten von Organspendern unter Zustimmung der Angehörigen); und sämtliche Komponenten des Knorpel- und Gelenkschleimhautgewebes sind ebenfalls menschlichen Ursprungs. Letzteres setzt sich sowohl aus Bindegewebs- als auch Immunzellen (Makrophagen) zusammen. Das imitiert das natürliche Vorbild bestmöglich. Es war uns wichtig, die Immunzellen in unser System einzubeziehen, da sie unter Verdacht stehen, maßgeblich an Arthroseschmerzen mitzuwirken.

Über feine Kanäle unseres Biochips treten die Neurone mit den anderen Zellarten in Kontakt. Die unterschiedlichen Gewebetypen befinden sich dabei in jeweils eigenen, voneinander getrennten Kammern. Mit Hilfe von Mikropumpen lassen wir Flüssigkeiten und Nährstoffe durch den

## Die Natur nachahmen

Das Organ-on-a-Chip-System des Autorenteams (linkes Bild) enthält Knochen- und Knorpel-, Gelenkschleimhaut- und Fettgewebe, jeweils in einer von drei außen liegenden Kammern, sowie Nervengewebe in einer zentralen Kammer. Über Mikrokanäle treten die Nervenzellen mit den anderen Gewebetypen in Kontakt; zudem fließen dort Nährstofflösungen, um eine dynamische Umgebung zu schaffen, die den menschlichen Organismus nachahmt.

Im Innern jeder Kammer (rechtes Bild) bergen abdichtende Einsätze **1** und Dichtungsringe **2** das jeweilige Gewebe **3** und sorgen dafür, dass es mit den Mikrokanälen in Verbindung steht. **4** Nährmedium; **5** strömendes Medium, über das die verschiedenen Gewebearten miteinander interagieren können.



MIT FOTO: GEN. VON HANS LIN



LI Z. ET AL.: HUMAN MESENCHYMAL STEM CELL-DERIVED MINIATURE JOINT SYSTEM FOR DISEASE MODELING AND DRUG TESTING. ADVANCED SCIENCE 9, 2022, FIG. 2B DOI:10.1002/ADSC.20210509 | CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODES-BEARBEITUNG DER WISSENSCHAFT)

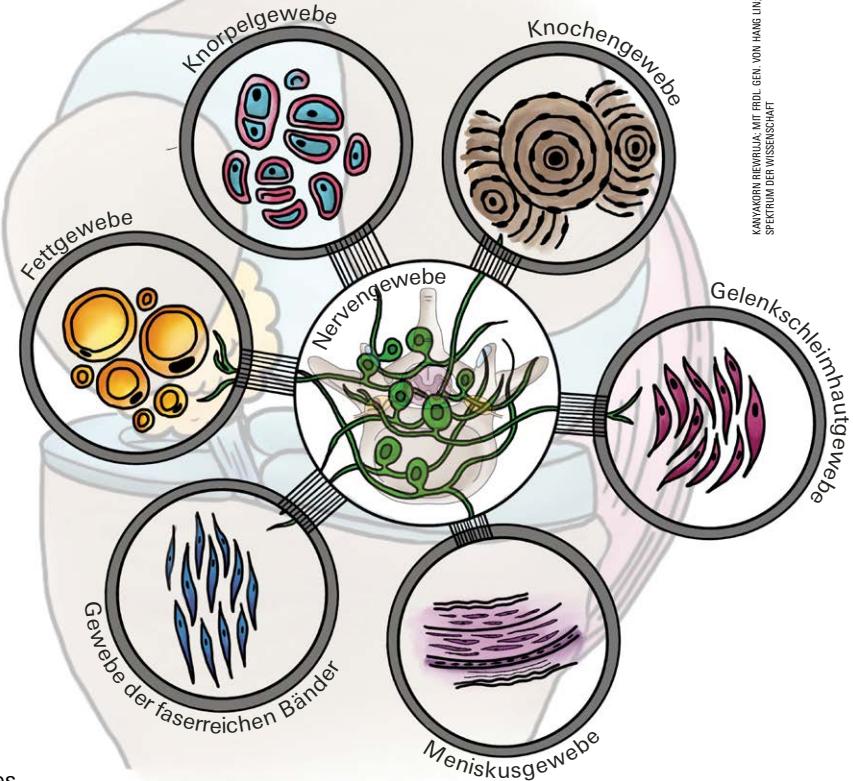
**DAS GANZE PAKET** Schema eines Organ-on-a-Chip-Systems, das sämtliche Gewebearten des Kniegelenks beherbergt. In der zentralen Kammer werden Nervenzellen kultiviert, die mit den Gewebesorten der umliegenden Kammern in Verbindung treten. Verwendet man hierfür Körperzellen von individuellen Patienten, lassen sich personalisierte Untersuchungen durchführen.

Chip strömen und schaffen so ein dynamisches Umfeld, das den menschlichen Organismus nachahmt. Sie fließen nacheinander durch die verschiedenen Kammern, so dass die Gewebe miteinander wechselwirken können. Anschließend saugen wir das Medium ab und untersuchen die löslichen Bestandteile darin. Das erlaubt uns, auf die Aktivitäten der beteiligten Zellen rückzuschließen.

In unseren jüngsten Arbeiten konzentrierten wir uns darauf, einen krankheitsähnlichen Zustand im Gelenkschleimhautgewebe zu erzeugen, indem wir es mit entzündungsfördernden Botenstoffen des Immunsystems behandelten. In unserem Chip breiten sich die Fortsätze der Spinalganglionzellen durch die Mikrokanäle des Chips hindurch in die anderen Kammern aus. Nachdem wir das dortige Gewebe arthrosetypisch geschädigt hatten, konnten wir beobachten, wie sich dadurch die Vernetzung und die Aktivität der Nervenzellen änderten. Es zeigte sich: Geschädigtes Knorpelgewebe setzt Substanzen frei, die die Neurone zum Feuern veranlassen und das Gelenkschleimhautgewebe dazu bringen, entzündungsfördernde Proteine herzustellen. Das gibt uns einen ersten Einblick in die komplexen Vorgänge, die sich bei einer Kniegelenksarthrose abspielen.

#### Neue Behandlungsansätze im Blick

Derzeit entwickeln wir ein miniJoint-System mit insgesamt vier verschiedenen Gewebetypen. Wenn wir darin die verschiedenen Komponenten beeinflussen und verfolgen, wie sich das auf ihre Interaktionen auswirkt, können wir ermitteln, was genau die Neurone feuert und so zur Schmerzwahrnehmung führt. Dies wird dazu beitragen, den Quell der Pein zu finden, sprich jene Untergruppen der Neurone zu identifizieren, die für die quälende Empfindung verantwortlich sind. Wir hoffen, dass sich so der Mechanis-



mus der Arthroseschmerzen aufklären lässt und neue Ansätze für eine wirksame Behandlung sichtbar werden. Sobald das in die Entwicklung neuer Arzneistoffkandidaten mündet, können wir diese mit dem miniJoint testen.

Da unser Biochip mit menschlichen Zellen funktioniert, ermöglicht er individuelle, auf einzelne Patienten zugeschnittene Untersuchungen. Das verspricht bessere Behandlungsergebnisse. Indem man die Stammzellen des jeweiligen Patienten verwendet und sein persönliches Krankheitsgeschehen auf dem Chip simuliert, lässt sich eventuell die spezifische Ursache seiner Arthroseschmerzen ermitteln und eine passgenaue Therapie finden. Wir sind zuversichtlich, mit unserem Organ-on-a-Chip-Verfahren künftig auf diesem Weg voranzukommen. ▲

#### QUELLEN

**Cross, M. et al.:** The global burden of hip and knee osteoarthritis: Estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. *Annals of the Rheumatic Diseases* 73, 2014

**Lin, H. et al.:** Human mesenchymal stem cell-derived miniature joint system for disease modeling and drug testing. *Advanced Science* 9, 2022

**Makarczyk, M. et al.:** Current models for development of disease-modifying osteoarthritis drugs. *Tissue Engineering Part C Methods* 27, 2021

AMERICAN  
**Scientist**

© American Scientist  
[www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org)



#### Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/anatomie](http://spektrum.de/t/anatomie)

ORLA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Seit  
2010



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

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.500 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

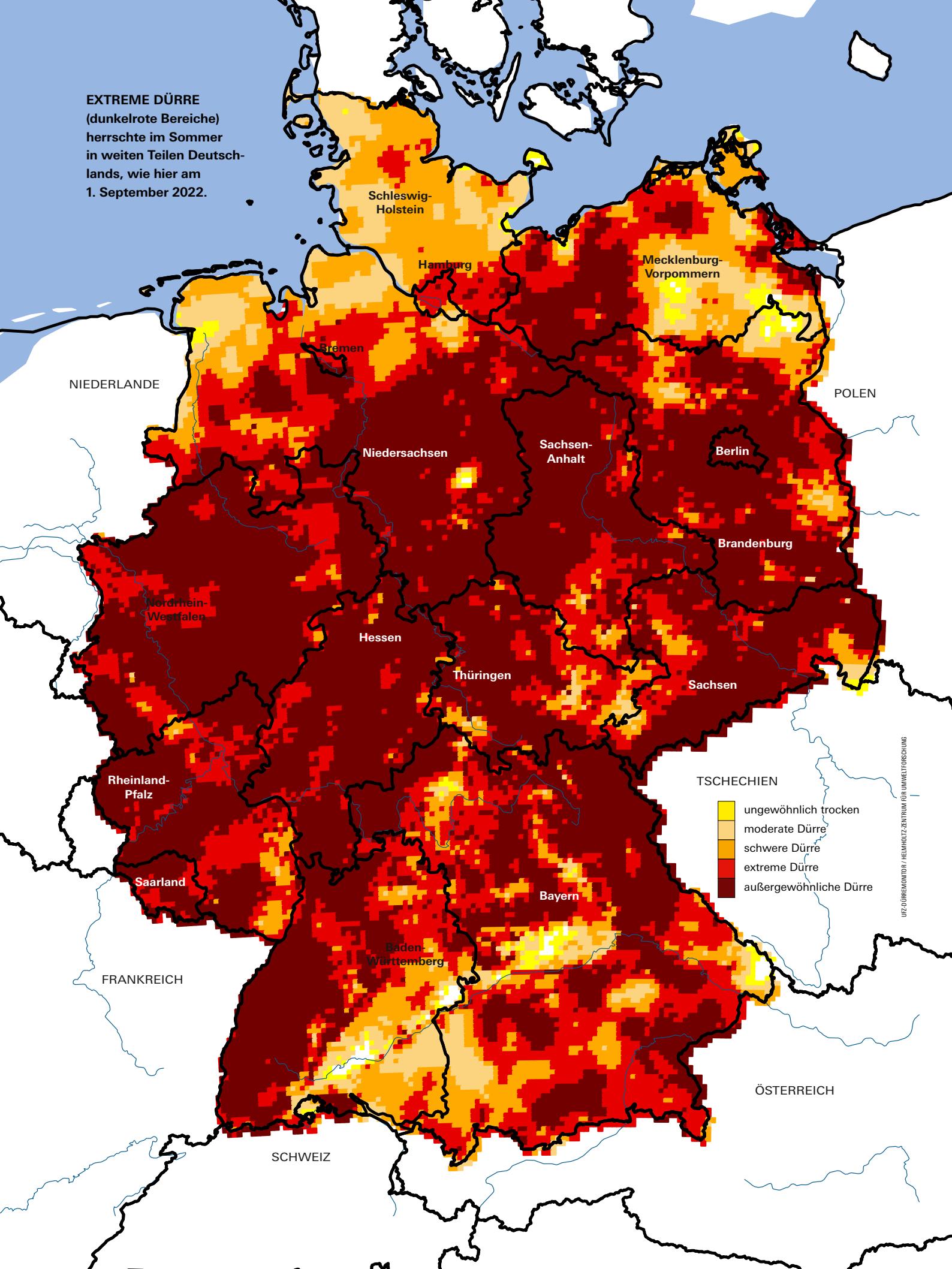
[www.academia-net.org](http://www.academia-net.org)

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

**EXTREME DÜRRE**  
(dunkelrote Bereiche)  
herrschte im Sommer  
in weiten Teilen Deutsch-  
lands, wie hier am  
1. September 2022.



# WASSERWIRTSCHAFT WEGE AUS DER TROCKENHEIT

**Deutschland war einmal ein wasserreiches Land. Heute gehört es zu den Regionen, die weltweit am meisten Wasser verlieren. Seit 2018 beschleunigt sich die Entwicklung noch weiter. Doch die Austrocknung ist kein Schicksal: Mit der richtigen Herangehensweise können wir gegensteuern.**



UNIVERSITÄT OSNABÜRK / SCHOLZ

**Claudia Pahl-Wostl** ist Professorin für Ressourcenmanagement an der Universität Osnabrück. Sie beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Frage, wie der Umgang mit dem kostbaren Gut Wasser nachhaltig zu handhaben ist – regional, aber auch weltweit.

► [spektrum.de/artikel/2057454](https://spektrum.de/artikel/2057454)

In Sachsen und Brandenburg brannten Wälder. Der Rhein führte zeitweise so wenig Wasser, dass Schiffe Probleme hatten, ihn zu passieren: So und ähnlich lauteten die Schlagzeilen des Sommers. Auf einmal, so scheint es, ist das Thema Trockenheit mitten in Deutschland angekommen. Das war bis vor einigen Jahren ganz anders – weder in der Öffentlichkeit noch in den wissenschaftlichen Fachgremien interessierten sich die Menschen für Wassermangel. Doch jetzt, nach mehreren aufeinanderfolgenden Dürrejahren, hat sich das geändert.

Wie konnte es dazu kommen? Hat der Klimawandel Deutschland schlagartig aus einer Situation des Überflusses in eine Lage des Mangels katapultiert? Ganz so einfach ist es nicht, denn verschiedene Faktoren spielen eine Rolle, wenn Wasserknappheit entsteht (siehe »Viele Faktoren«).

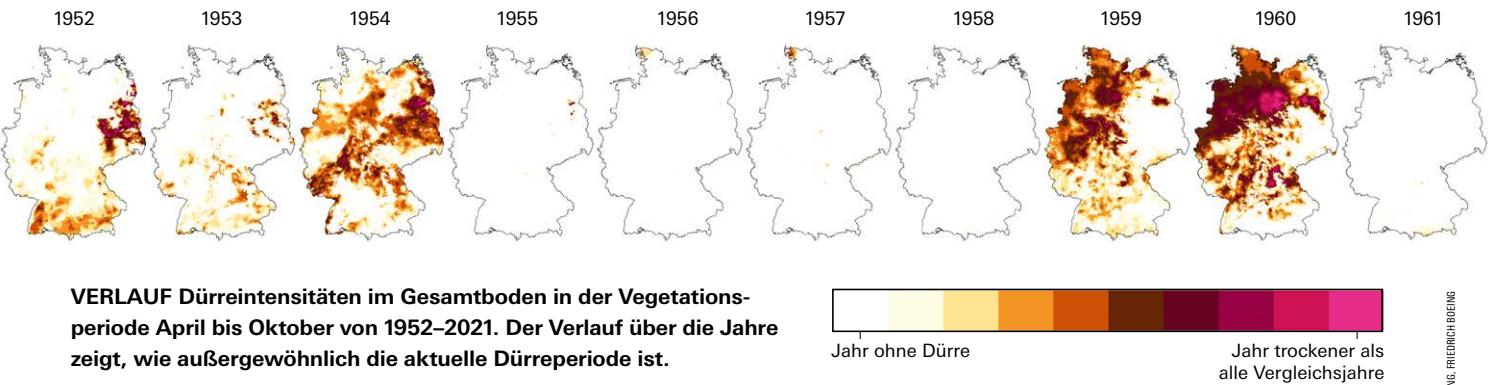
Im Vergleich zu den regenarmen und trockenen Regionen der Welt war und ist Deutschland weiterhin ein relativ wasserreiches Land. Auf Grund der günstigen klimatischen Gegebenheiten ist man hier lange recht sorglos mit dem kostbaren Gut umgegangen. Wie man das Wasser sparsam einsetzt, wo natürliche Landschaften als Wasserspeicher dienen können und wie sich die Landnutzung auf den Wasserhaushalt auswirkt, wurde kaum beachtet. Doch die Dürreperiode von 2018 bis 2020 sowie auch der extrem trockene Sommer 2022 – sehr wahrscheinlich eine Folge des Klimawandels und ein Vorbote dafür, wie sich die Situation in Zukunft entwickeln wird – haben deutlich

gezeigt, wie wenig nachhaltig wir mit den kostbaren Gut Wasser umgehen. Wenn wir für die Zukunft gerüstet sein wollen, müssen wir jetzt umsteuern. Das bedeutet einen Paradigmenwechsel im Wassermanagement, einen grundlegenden Wandel in Umgang mit der Ressource in der Landschaft. Denn es genügt langfristig nicht, bestimmte Arten der Wassernutzung während Extremphasen zeitweise zu verbieten oder neue Fernwasserleitungen zu bauen.

Ein Blick auf die Webseiten des Umweltbundesamts offenbart noch nicht viel von der sich abzeichnenden Wasserkrise in Deutschland. Dort heißt es lediglich: »Der Entnahmemenge von rund 24 Milliarden Kubikmeter (Mrd. m<sup>3</sup>) steht in Deutschland ein potenzielles Dargebot von 188 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser (Zeitperiode 1961–1990) gegenüber. Damit ist Deutschland ein wasserreiches Land. ... Berechnet wird das Wasserdargebot als langjähriges statistisches

## AUF EINEN BLICK UMGANG MIT WASSERMANGEL

- 1** Seit Jahren sinken die Grundwasserstände. Hitze und ausbleibender Regen werden das Problem künftig noch verschärfen.
- 2** Wie viel Wasser verfügbar ist, hängt von diversen Faktoren ab. Die meisten von ihnen können wir direkt beeinflussen: etwa, wie wir Flächen nutzen, wie die Ressource bei Mangel verteilt wird oder ob wir effizient damit umgehen.
- 3** Unter den sich ändernden klimatischen Bedingungen brauchen wir ein neues Wassermanagement. Erfolgreiche Projekte zeigen, wie das funktionieren kann.



UFZ-DÜRREMONITOR / HELMHOZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG, FRIEDRICH BOEING

Mittel für eine in der Regel 30-jährige Zeitperiode sowie als so genannte erneuerbare Wasserressource für Einzeljahre.“ Das Wasserdargebot bezeichnet dabei die Menge an Süßwasser, die für eine bestimmte Zeit aus dem natürlichen Wasserkreislauf zur Verfügung steht.

Gemeinsam mit einer Grafik, nach welcher der Wassernutzungsindex über die Jahre von 1991 bis 2016 abgenommen hat, suggeriert das einen anhaltenden positiven Trend und legt die Schlussfolgerung nahe: Es besteht kein Anlass, bezüglich Wasserknappheit beunruhigt zu sein. Durch dieses Narrativ sind wir lange recht sorglos mit der Ressource Wasser umgegangen. Abgesehen von wenigen Regionen, die traditionell mit Wasserknappheit zu kämpfen hatten, konzentrierte sich das Wassermanagement eher auf Qualitäts- als auf Quantitätsprobleme.

Die Aussage zum Wasserdargebot bezieht sich jedoch auf Erfahrungen der vergangenen Jahrzehnte. Das ist eine höchst problematische Grundlage für Prognosen in die

Zukunft, denn durch den Klimawandel nimmt das Wasserdargebot ab. Deutlich erkennt man das, wenn man sich die Wasserbilanz für Deutschland für die Jahre 2000 bis 2018 ansieht. Während die erneuerbare Wassermenge im langjährigen Mittel noch bei 188 Milliarden Kubikmetern lag, so betrug sie über diesen Zeitraum durchschnittlich nur 169 Milliarden Kubikmeter. Je näher man der Gegenwart kommt, desto stärker zeigt sich die Diskrepanz: Legt man den Zeitraum 2009 bis 2018 zu Grunde, sind es nur noch 155 Milliarden Kubikmeter. Weiterhin sieht man, wie enorm die Menge von Jahr zu Jahr variiert – auf das Jahr 2002 mit Rekordniederschlägen und Elbehochwasser folgte ein Jahr mit extremer Hitze und Trockenheit.

### Langfristiger Wasserverlust

Nach vier Dürrejahren seit 2018 hat sich die Wahrnehmung der Wassersituation hier zu Lande geändert. Die extreme Dürre betraf ganz Deutschland – nicht nur die traditionell trockenen Regionen im Osten und in der Mitte des Landes (siehe »Extreme Dürre«).

Durch die veränderten klimatischen Bedingungen hat sich bereits in den letzten 10 bis 20 Jahren weniger Grundwasser neu gebildet. Im Frühjahr und Sommer fiel nicht ausreichend Regen, gleichzeitig verdunstete durch höhere Temperaturen mehr Wasser. Starkregenfälle nehmen zu, so dass ein geringerer Anteil des Niederschlags in der Landschaft gespeichert wird und stattdessen oberflächlich abfließt. Derweil benötigen Landwirtschaft und Haushalte in den Hitzeperioden mehr Wasser. Diese Beobachtungen bestätigen, was die Analysen von Satellitendaten ergeben haben. Auf deren Basis lässt sich die Wasserbalance einer Region berechnen. Jay Famiglietti, der Direktor des Global Institute for Water Security an der University of Saskatchewan in Kanada, hat solche Analysen für Deutschland durchgeführt und ist zu dem Schluss gekommen, dass das Land im letzten Jahrzehnt in etwa so viel Wasser verloren hat, wie der Bodensee fasst. Damit gehört es zu den Ländern mit den größten Wasserverlusten weltweit – ein höchst beunruhigender Befund.

Die anhaltende Dürre wirkte sich in verschiedenen Bereichen gravierend aus: Wie die Ergebnisse der Waldzustandserhebung von 2021 zeigen, haben Waldschäden stark zugenommen, insbesondere bei Nadelbäumen und hier vor allem bei der Fichte. Flüsse und Seen fallen trocken. Das stresst aquatische Ökosysteme, die überwiegend

## Wasserstress

Der Grad an Wasserstress ist einer von mehreren Indikatoren zur Erreichung des UN-Nachhaltigkeitsziels, bis 2030 jedem Menschen Zugang zu sauberem Wasser und Sanitäreinrichtungen zu gewährleisten (UN-Nachhaltigkeitsziel 6). Der Indikator gibt an, welchen Anteil an den verfügbaren Süßwasserressourcen der Mensch für seine Aktivitäten nutzt. Man spricht von Wasserstress, wenn dieses Verhältnis 20 Prozent übersteigt. Im Gegensatz zu den bislang üblichen Berechnungen für Wasserstress berücksichtigt der Indikator explizit die Wasserbedürfnisse ökologischer Systeme und gibt damit ein wesentlich realistischeres Bild der Nachhaltigkeit der Wassernutzung. Für den Zeitraum von 2013 bis 2018 lag der Grad an Wasserstress für Deutschland bei zirka 35 Prozent. Im globalen Vergleich ist das noch moderat.

Mehr über den Indikator unter:  
<https://sdg6data.org/indicator/6.4.2>

1962

1963

1964

1965

1966

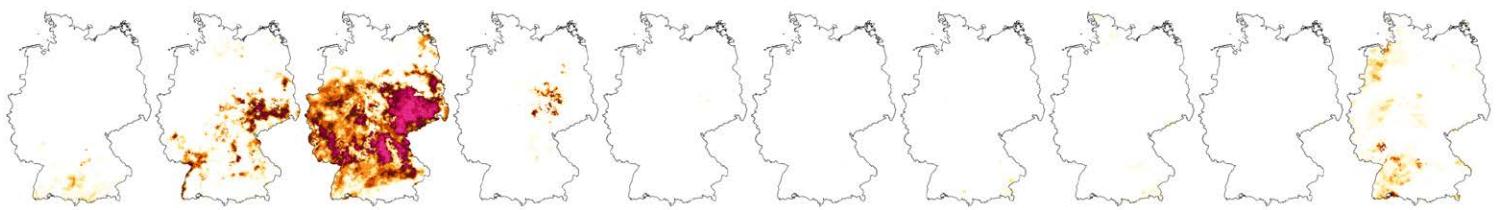
1967

1968

1969

1970

1971

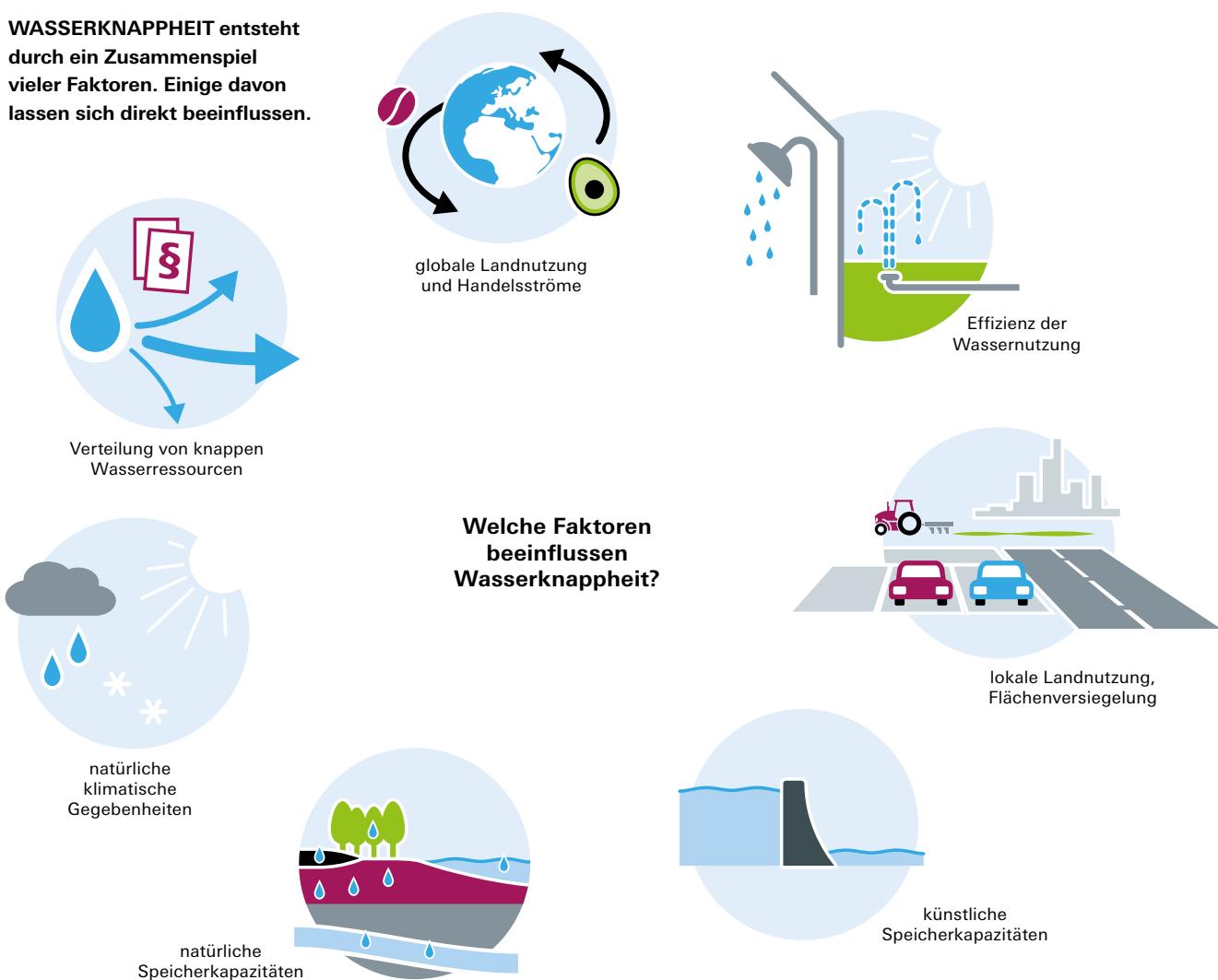


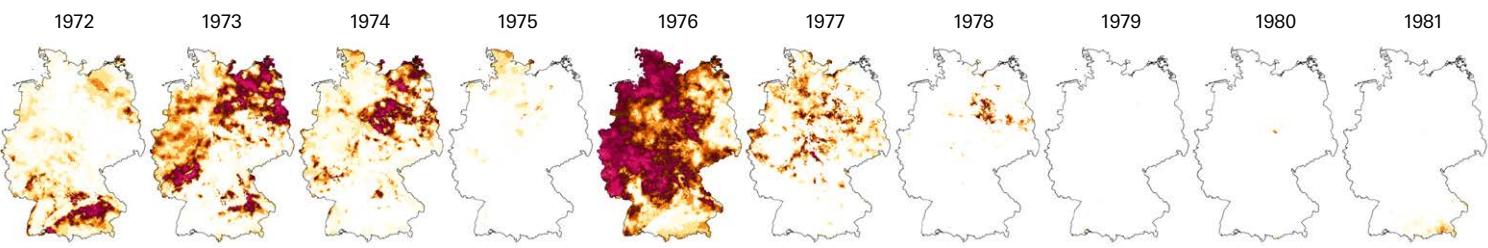
in einem schlechten ökologischen Zustand sind, zusätzlich. Quellen versiegen, und die Trinkwasserversorgung ist zumindest regional gefährdet. Landwirtschaftliche Betriebe müssen ihre Flächen zunehmend bewässern, was bereits zu Nutzungskonflikten führt. Ein einzelnes Jahr mit ausreichenden Niederschlägen – 2021 – hat nicht gereicht, um die Bodenwasserspeicher wieder zu füllen. Und auch 2022 dürfte wieder ein Dürrejahr sein.

Der Klimawandel wird die Wasserbilanz immer weiter verschlechtern, da die Niederschläge – wie jetzt schon zu beobachten – abnehmen, während die Temperatur zunimmt. Wie stark der Effekt sein wird, ist noch unsicher, wie zwei Studien im Auftrag des Umweltbundesamts aus dem Jahr 2021 nahelegen. Einerseits ist nicht klar, wie sich

die globale Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre entwickeln wird. Andererseits ist es schwierig zu ermitteln, welche regionalen klimatischen Veränderungen sich aus den globalen Treibhausgaskonzentrationen ergeben und wie sich diese wiederum auf den regionalen Wasserhaushalt auswirken. Die Modelle legen jedoch nahe, dass man nichtlineare Effekte erwarten muss, wenn die globale Durchschnittstemperatur eher um 3 als um 2 oder 1,5 Grad steigen wird. Das bestätigen unter anderem die Ergebnisse des Forschungsprojekts »Hochauflöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1,5 Grad« (HOKLIM) des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung (UFZ) von 2018, in dem Fachleute um Stephan Thober die potenziellen Auswirkungen auf Dürren und Hochwasser in

### **WASSERKNAPPHEIT entsteht durch ein Zusammenspiel vieler Faktoren. Einige davon lassen sich direkt beeinflussen.**



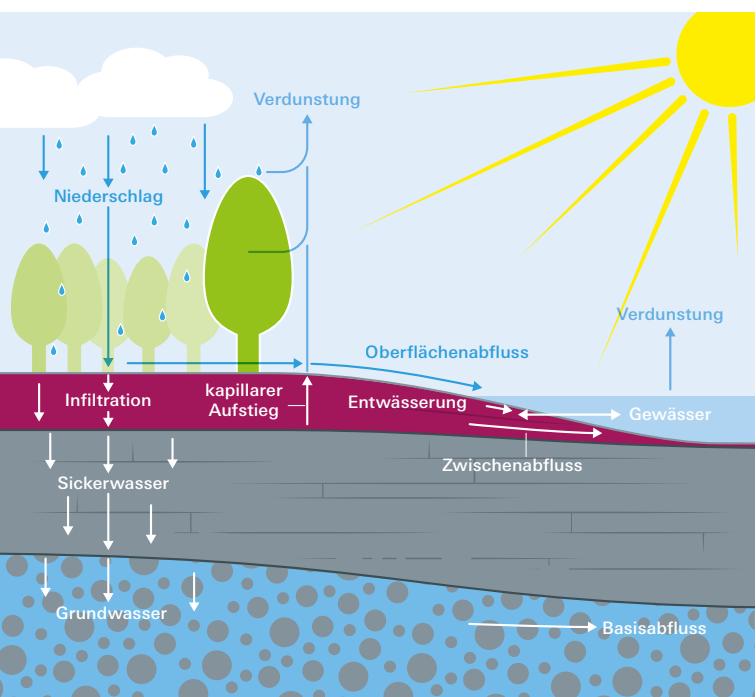


Deutschland ermittelt haben. Ein Team um Andreas Wunsch vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) kommt zu dem gleichen Schluss: Sie haben in einer 2022 veröffentlichten Studie mit Hilfe künstlicher Intelligenz die Grundwasserstände für Deutschland in verschiedenen Temperaturszenarien vorausgesagt.

Je dramatischer die Auswirkungen, desto schwieriger wird es sein, mit den Klimaveränderungen umzugehen. Wenn die Anpassungsgrenzen überschritten werden, hat das katastrophale Folgen für Wirtschaft, Gesellschaft und Natur. Es ist daher extrem dringlich, die globale Temperaturerhöhung auf maximal 2 Grad zu begrenzen. Wie auch immer diese Bemühungen ausfallen werden, in den nächsten Jahren werden wir auf jeden Fall mit weiteren Auswirkungen des Klimawandels konfrontiert sein. Daher brauchen wir weit reichende Strategien, um für bevorstehende Situationen gerüstet zu sein.

Eine umfassende Anpassungsstrategie macht eine Region weniger anfällig für die Extremereignisse und Unsicherheiten, die der Klimawandel mit sich bringt. Die Schwierigkeit: Verschiedene Sektoren und Gruppen von Nutzerinnen und Nutzern müssen eine solche Strategie gemeinsam erarbeiten und umsetzen. Denn die Wasserressourcen einer Region werden nur dann nachhaltig verwendet, wenn die unterschiedlichen Nutzungen zusammengekommen die verfügbare Menge an Süßwasser

#### **WASSERKREISLAUF (schematisch und vereinfacht): Wie viel Wasser im Boden gespeichert werden kann, hängt stark von der Landschaftsart ab.**



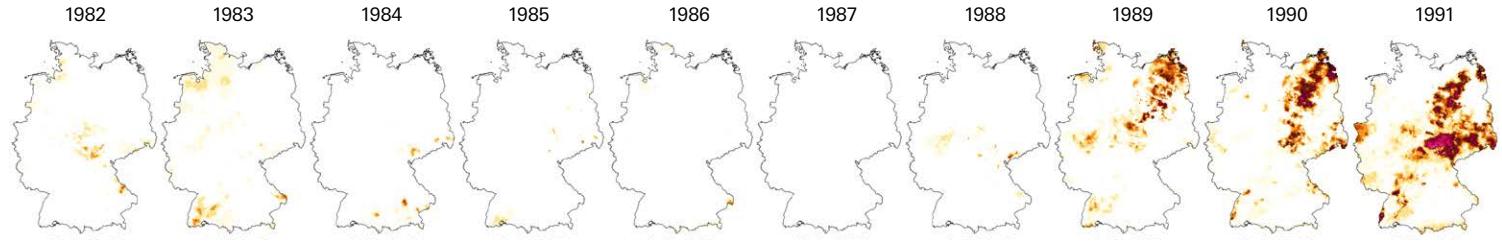
längerfristig nicht überschreiten. Es gibt bereits weithin praktizierte Maßnahmen – etwa, dass das Wasser während extremer Knappheit für bestimmte Zwecke nicht verwendet werden darf –, doch diese wirken nur punktuell. Um die zur Verfügung stehende Wassermenge zu erhöhen, helfen außerdem Talsperren, Fernwasserleitungen oder neue Brunnen. Werden solche Maßnahmen auf Grundlage historischer Daten geplant, sollte allerdings Vorsicht geboten sein. Durch den Klimawandel ist die Gefahr hoch, die Wasserressourcen zu überschätzen und daher zu übernutzen.

#### **Der richtige Boden speichert viel Wasser, wenn man ihn lässt**

Vernachlässigt wurde über lange Zeit, welch herausragende Rolle der Bodenwasserspeicher und das nachhaltige Management des Wasserhaushalts einer Region spielen. Landnutzung und Klimawandel beeinflussen wesentlich, welche Menge an Wasser durch Versickerung im Boden gespeichert wird (Infiltration) und wie viel aus Boden und Vegetation verdunstet (siehe »Wasserkreislauf«).

Wasser wurde und wird immer noch aus der Landschaft abgeleitet, um Flächen für menschliche Zwecke nutzbar zu machen. Moore und Flussauen wurden trockengelegt. Forstwirtschaftlich genutzte Wälder speichern weniger Wasser, da zum einen auch hier Wasser abgeleitet wird und zum anderen Nadelbäume, insbesondere Fichten, dominieren, die per se weniger Wasser speichern. Praktiken der konventionellen Landwirtschaft zerstören die Mikrofauna und ändern die Struktur des Bodens und damit auch dessen Aufnahmefähigkeit für Wasser. Täglich steigt außerdem nach Zahlen des Statistischen Bundesamts die Siedlungs- und Verkehrsfläche um knapp 60 Hektar (45 Prozent davon sind versiegelt), das ist fast doppelt so viel wie das Ziel von 30 Hektar, das die Bundesregierung in ihrer Nachhaltigkeitsstrategie für 2030 anpeilt. Versiegelte Flächen aber speichern keine Niederschläge; diese fließen oberflächlich ab oder verdunsten.

Durch den Klimawandel werden lang anhaltende Dürreperioden und Starkniederschläge zunehmend wahrscheinlicher. Weil die Landschaft weniger Wasser speichert, treten zum einen Hochwasserereignisse häufiger auf, zum anderen fehlt das Wasser in Zeiten der Trockenheit. Im schlimmsten Fall versteppen dann Regionen, wie es in Brandenburg in den nächsten Jahren bereits der Fall sein könnte. Dieser Teufelskreis ließe sich durch zahlreiche Maßnahmen durchbrechen, die dafür sorgen, dass Wasser in der Landschaft gespeichert wird statt oberflächlich abzufließen: beispielsweise, indem man Moore erhält oder wiederherstellt (siehe »Wiedervernässung von Mooren«).



Solche Konzepte werden aber noch viel zu selten umgesetzt.

Sehr positiv ist in dieser Hinsicht die nationale Wasserstrategie zu bewerten, die das Bundesumweltministerium im Juli 2021 vorgestellt hat. Sie wurde als Antwort auf die sich abzeichnenden Herausforderungen des Klimawandels entwickelt und hat zahlreiche Interessengruppen einbezogen. Das Resultat ist eine wissenschaftlich gut fundierte – und erstmalig ganzheitliche – Strategie, die verschiedene Aspekte des diversen und in viele Verantwortlichkeiten zersplitterten Wassersektors integriert. Die Ziele beinhalten etwa, einen naturnahen Wasserhaushalt wiederherzustellen oder Flächen gewässerverträglich und dem Klima angepasst zu nutzen. All das kann Wasserknappheit und Nutzungskonflikten entgegenwirken. Ein zentrales Problem für die Umsetzung der ambitionierten Ziele besteht jedoch in den fragmentierten und unflexiblen Verwaltungsstrukturen und Entscheidungsprozessen. Die nationale Wasserstrategie thematisiert das zwar und fordert, eine leistungsfähige Verwaltung zu schaffen. Dieser Herausforderung wird in meinen Augen aber nicht die notwendige Bedeutung und Priorität beigemessen.

Wenn wir Hochwasser oder Hitzeperioden, die statistisch alle 100 Jahre vorkommen sollten, nun mehrmals

innerhalb von 10 Jahren beobachten, dann ist das ein starkes Anzeichen dafür, dass die Vergangenheit keine gute Grundlage für eine Planung der Zukunft darstellt. Es ist jedoch immer noch gängig und teilweise sogar vorgeschrieben, die Vergabe von Wasserrechten oder die Erschließung neuer Wassergewinnungsanlagen auf Datenreihen aus den letzten Jahrzehnten zu stützen.

Das widerspricht jeglichen Erkenntnissen der Wissenschaft, die bereits seit Jahren auf Grund des Klimawandels und der komplexen Zusammenhänge in Mensch-Umwelt-Systemen anpassungsfähige Managementansätze fordert. Systemwissenschaftlich formuliert, können wir unsere Wasserressourcen nur durch ein »adaptives, integratives und transformatives« Landschaftsmanagement nachhaltig bewirtschaften. Das bedeutet, regionale Systeme aus Mensch und Umwelt resilenter gegenüber dem Klimawandel zu machen. Dabei muss man die verschiedenen Funktionen einer Landschaft berücksichtigen: Sie kann gleichzeitig Wasser speichern, Tieren Lebensraum geben, Menschen Erholung bieten, das Klima regulieren und Nahrung produzieren. Der regionale Wasserhaushalt steht bei einer nachhaltigen Bewirtschaftung im Mittelpunkt. Idealerweise ist diese eingebunden in ein Konzept dafür, wie die Landschaft genutzt und verwaltet wird.

## Wiedervernässung von Mooren

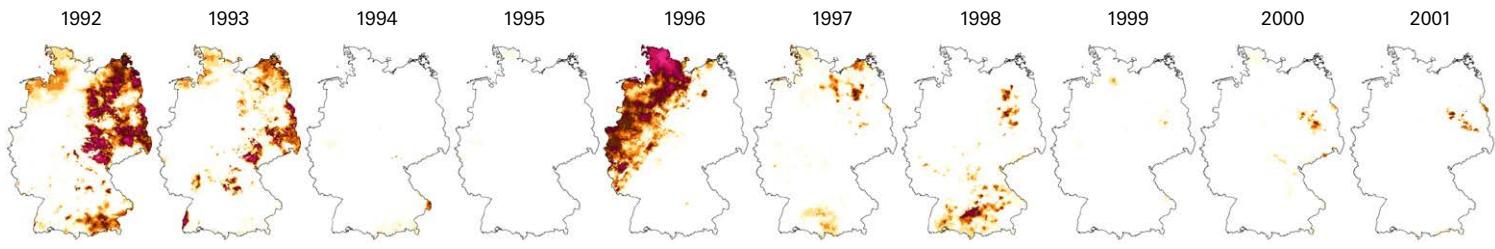
Mehr als 90 Prozent aller Moorflächen in Deutschland wurden entwässert, um Platz für Land- und Forstwirtschaft zu gewinnen und Torf abzubauen. Dabei spielen die Feuchtgebiete eine bedeutende Rolle im Landschaftswasserhaushalt. Während natürliche Hochmoore 90 Prozent des Niederschlags speichern, fließt dieser von drainierten Moorflächen zum größten Teil oberflächlich ab.

Darüber hinaus fungieren intakte Moore als wichtige Kohlenstoffspeicher: Sie speichern pro Quadratmeter wesentlich mehr Kohlenstoff als Wälder. Werden die Flächen dagegen entwässert und der

Boden abgebaut, dann werden sie zu Quellen für die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid und Methan. Auch für die Biodiversität sind sie von Bedeutung.

Genügend Gründe, die Landschaftsform zu erhalten – sollte man annehmen. Jedoch kommt die Wiedervernässung von Mooren nur schleppend voran, trotz verschiedener Schutzstrategien auf nationaler und Bundeslandebene. Eine interessante Entwicklung, um Nutzungs-konflikte zumindest teilweise zu entschärfen, ist die Paludikultur (siehe Spektrum 1/22, S. 32). Dabei werden diverse Formen erprobt, um wiedervernässte Moorflächen

wirtschaftlich zu nutzen. Das gelingt derzeit primär durch den Anbau nachwachsender Rohstoffe wie Röhricht oder Torfmoos, die in der Bau- und Möbelindustrie wie auch im Gartenbau eingesetzt werden. Allerdings erfordert diese Art der Nutzung hohe Investitionen und ist daher nur auf großen Flächen wirtschaftlich sinnvoll. Um bei der Wiedervernässung voranzukommen, braucht es entschiedenes politisches Handeln: Umfassende Förder- und Koordinationsprogramme müssen aufgelegt und schädliche Subventionen für die Nutzung entwässerter Moorflächen abgebaut werden.



UFZ-DURRERMONITOR / HELMHOZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG, FRIEDRICH BOEGE

Um dem Klimawandel und der Komplexität der Zusammenhänge gerecht zu werden, werden Unsicherheiten und Lernprozesse beim Planen und Entscheiden systematisch berücksichtigt. Wir wissen weder, wie viel Wasser in einer bestimmten Region künftig zur Verfügung stehen wird, noch, wie sich die Nachfrage verändert. Beeinflusst werden beide Faktoren durch den Klimawandel, wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen sowie die Wirksamkeit von Maßnahmen. Will man die Unsicherheiten systematisch mit einbeziehen, muss man zwischen ihren verschiedenen Quellen unterscheiden und entsprechende Strategien entwickeln, um mit ihnen umzugehen.

Manche Unsicherheiten entstehen aus der eingeschränkten Verfügbarkeit von Daten (beispielsweise über Grundwasserstände) und dem begrenzten Verständnis komplexer Wirkungszusammenhänge in natürlichen und gesellschaftlichen Systemen. Sie lassen sich reduzieren, indem man weitere Daten erhebt und gezielt daran forscht, die Zusammenhänge besser zu verstehen.

### Mit Unsicherheiten umgehen

Darüber hinaus sind gewisse Prozesse per se nicht vorhersehbar. Das veranschaulicht der berühmte Schmetterlingseffekt für die chaotische Natur von Wetterphänomenen: Der Flügelschlag eines Schmetterlings könnte in Ausnahmefällen durch eine Kaskade nichtlinearer Verstärkungen einen Tornado auslösen. Den Schmetterling kann man dabei kaum als Ursprung des Unwetters sehen, da noch viele andere Faktoren eine Rolle spielen. Entsprechend schwierig ist es vorauszusagen, wie stark der weltweite Klimawandel ausfallen wird und wie er sich auf verschiedene Regionen auswirkt: Zwar lassen sich gewisse Wettermuster absehen – etwa, dass Dürreperioden zunehmend wahrscheinlicher werden –, doch es ist weitgehend unmöglich, eine konkrete regionale Entwicklung für die nächsten Jahre zu bestimmen. So ist es durchaus denkbar, dass die Jahre 2022 bis 2024 in Deutschland wieder eine vergleichbare Dürreperiode wie 2018 bis 2020 bringen werden. Genauso könnten aber 2023 mehr Niederschläge fallen, was analog zum Jahr 2021 potenzielle Hochwassereignisse mit sich brächte. Auf diese Art von Unsicherheiten muss man sich einstellen und entsprechend robuste Strategien entwickeln, die es uns erlauben, uns anzupassen. Dazu gehören auch Notfallpläne für Extremsituationen, etwa Regeln, nach denen die Wasserruteilung bei extremem Mangel priorisiert wird.

Eine weitere, oft vernachlässigte Quelle für Unsicherheiten liegt in der Mehrdeutigkeit: Aus einer und derselben Faktenlage lässt sich – je nach Interpretation – unterschiedlicher Handlungsbedarf ableiten. Muss man neue Quellen

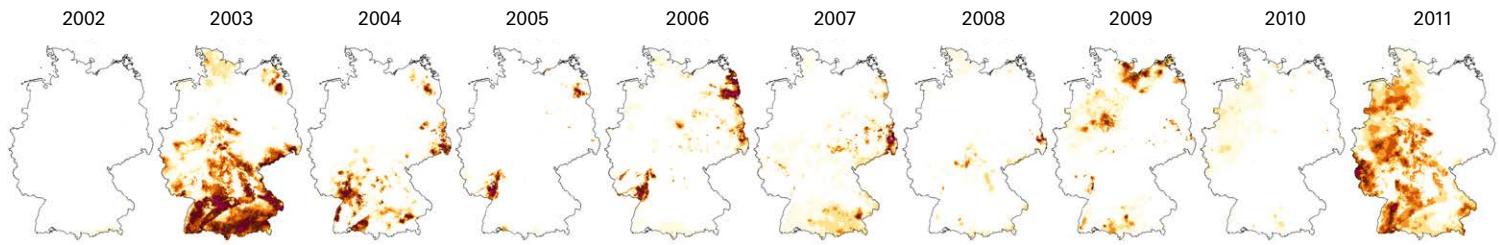
für die Wasserversorgung erschließen oder lassen sich Engpässe vermeiden, indem die Menschen ihr Verhalten ändern oder gewisse Arten der Wassernutzung verboten werden? Sollen Rechte zur Bewässerung in der Landwirtschaft für eine bessere Planungssicherheit für 10 oder 15 Jahre vergeben werden – oder ist das unverantwortlich angesichts der Unwägbarkeiten, die der Klimawandel mit sich bringt? Sind bereits in den nächsten Jahren ähnlich anhaltende Dürreperioden wie in den Jahren 2018 bis 2020 zu erwarten oder war die Episode ein Extremfall, der so schnell nicht wieder eintreten wird? Auf diese Fragen gibt es keine richtige oder falsche Antwort. Je nachdem, welche Unsicherheiten man mit einbezieht und wie man einzelne Faktoren bewertet, kann man ausgehend von den gleichen Daten zu gegenteiligen, aber mit der Faktenlage kompatiblen Schlussfolgerungen kommen. Solche Widersprüche lassen sich nur in einem offenen Dialog aufzeigen und thematisieren.

Ein adaptiver Planungs- und Managementprozess muss die zahlreichen Quellen von Unsicherheiten angemessen berücksichtigen. Doch wie funktioniert das?

Bereits im ersten Schritt, wenn man die Situation analysiert und die Ziele festlegt, gilt es, Interessengruppen mit einzubeziehen und unterschiedliche Perspektiven zu berücksichtigen. In unserem Projekt »Wasser für die Region« haben sich beispielsweise Vertreterinnen und Vertreter von Behörden, Wasserversorgern, Land- und Forstwirtschaft, Industrie, Naturschutzinitiativen und kommunalen Verwaltungen zusammengesetzt und gemeinsam Ziele für die Wasserversorgung und die Verteilung der zunehmend knappen Wasserressourcen bestimmt.

Im nächsten Schritt legt man Szenarien zu Grunde, um künftige Maßnahmen zu planen und mögliche Konflikte der Wassernutzung früh zu erkennen. Dabei wählt man solche Handlungsstrategien, die unter verschiedenen Szenarien

**Es ist weitgehend unmöglich, eine konkrete regionale Entwicklung für die nächsten Jahre zu bestimmen**



noch zufrieden stellende Ergebnisse liefern (»Prinzip der robusten Entscheidungen«). Weiterhin prüft man, welche Kosten entstehen, sollte man eine Entscheidung rückgängig machen müssen, etwa für hohe Investitionen in technische Infrastruktur.

In unserem Projekt könnte das bedeuten: Die Beteiligten konzentrieren sich auf Maßnahmen, um das Wasser in der Fläche stärker zurückzuhalten. Dafür nutzen sie beispielsweise ausgewählte Waldgebiete nicht mehr forstwirtschaftlich, sondern bewirtschaften sie in erster Linie als Wasserspeicher. Auf den Bau eines neuen Förderbrunnens verzichten sie, da dieser die Grundwasserressourcen übernutzen könnte, falls sich das Klima in der Region entsprechend verändert.

### **Starre Regularien machen es schwer, lernende Prozesse durchzusetzen**

Lernprozesse, experimentelle Ansätze und innovative Kooperationsmodelle sind Teil des Projekts. So könnte man beispielsweise ein Pilotprojekt starten, das Ansätze der Agroforstwirtschaft verfolgt (also die Kombination von Ackerkulturen mit Gehölzen), und anhand der Ergebnisse weitere solcher Maßnahmen ergreifen.

Um unerwünschte Entwicklungen früh zu erkennen, zieht man begleitend zum Prozess unterschiedliche Formen des Wissens heran. Denkbar sind hier Erhebungen durch technische Messinstrumente, Citizen Science oder neue Erkenntnisse aus der Forschung. So könnten Bürgerinnen und Bürger Grundwasserstände messen und online veröffentlichen. Oder man ermutigt die Bevölkerung, Veränderungen in der Natur wie trockenfallende Bäche zu dokumentieren und auf einer dafür eingerichteten Webseite hochzuladen.

Im gesamten Prozess sind Lernprozesse die Grundlage, um Ziele und Maßnahmen anzupassen. Möglicherweise wird es sogar nötig, grundlegende Ziele zu überdenken, etwa welche Art von Landnutzungen in einer Region noch möglich und wünschenswert sind: Bringt es die Kommune weiter, wenn sich neue Industrie- und Gewerbebetriebe ansiedeln? Versiegelt das geplante neue Wohngebiet nicht viel zu viel Fläche, die sonst wertvolles Wasser speichern könnte?

Ein Vorgehen nach diesem Konzept funktioniert nur, wenn man Vertreter aus verschiedenen Sektoren – wie Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Regionalplanung und Naturschutz – einbezieht. Höchstwahrscheinlich gibt es auch viele Vorschriften in den unterschiedlichen Bereichen, die sich teils widersprechen und nicht mehr zeitgemäß sind. Um trotzdem Fortschritte zu erreichen, muss man verschiedene Steuerungsinstrumente einsetzen und flexibel

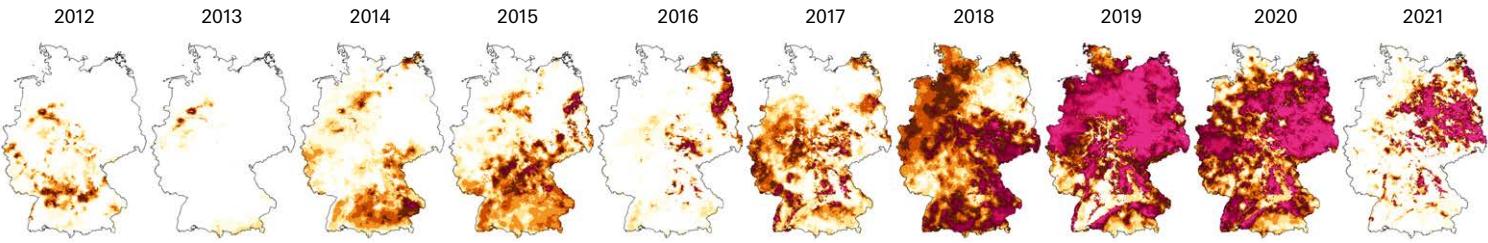
kombinieren (man spricht von hybriden Governance-Ansätzen): Hierarchische Steuerung, marktwirtschaftliche Anreize sowie Netzwerke und freiwillige Kooperationen müssen sich ergänzen.

Konkrete könnte das heißen: Die Wassernutzung wird über Wasserrechte und Bewässerungsverbote in Extremsituationen gesteuert. Gleichzeitig erhalten Waldbesitzer, die den Wald primär zur Wasserspeicherung bewirtschaften und dabei auf Profite aus der Holzproduktion verzichten, eine Prämie. Begleitend stimmen sich die Beteiligten bei runden Tischen oder anderen Formaten zu Maßnahmen ab, Onlineplattformen fördern den Wissensaustausch.

Das skizzierte Idealbild eines flexiblen Prozesses, der Sektoren und Verwaltungsebenen übergreift, steht im Widerspruch zur Realität der Abläufe in Politik und öffentlicher Verwaltung. Das haben wir in zahlreichen Projekten erfahren, die wir mit kommunalen Verwaltungen durchgeführt haben. Die formalen Zuständigkeiten in der Verwaltungsbürokratie sind auf die verschiedenen Sektoren zugeschnitten. Starre Regelungen machen es schwer, mit

### **Blick über den Tellerrand**

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Wasserressourcen können wir die Systemgrenzen nicht an staatlichen Grenzen festmachen. Die überwiegende Menge unseres Wasserverbrauchs steckt in den Gütern, die wir täglich konsumieren: etwa 30-mal so viel wie die rund 130 Liter, die wir pro Tag direkt aus der Leitung beziehen! Die Organisation »Water Footprint Network« hat den »Wasserfußabdruck« für verschiedene Lebensmittel und Verbrauchsgüter ermittelt. Demnach benötigt man für die Produktion von einem Kilogramm Rindfleisch zirka 15 000 Liter Wasser, für ein Kilogramm Avocados rund 1000 bis 1500 Liter. Etliche importierte Lebensmittel sowie Futtermittel für die Intensivtierhaltung kommen aus Regionen, in denen Wasser knapp ist und in denen Wälder für den Anbau gerodet werden. Je mehr wir auf die Herkunft der Produkte achten, desto weniger verschärfen wir also den Wassermangel in anderen Weltregionen. Das bekannte Motto »global denken und lokal handeln« sollte auch bei der Lösung von Wasserproblemen als Maxime unser Handeln leiten.



Unsicherheiten umzugehen. An Stelle einer Planung, die sich auf Szenarien stützt, werden noch immer Prognosen eingesetzt, die auf historischen Daten basieren. Die Wissenschaft fordert jedoch seit Jahrzehnten einen systematischen Umgang mit Unsicherheiten und betont, dass adaptive und nachhaltige Wassermanagementprozesse benötigt werden. Es existieren bereits zahlreiche Leitfäden. Aber erst jetzt, bedingt durch die nun sichtbaren Folgen des Klimawandels, dringen diese Konzepte langsam in Politik und Praxis vor.



## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:  
[spektrum.de/t/ressource-wasser](https://www.spektrum.de/t/ressource-wasser)

ISTOCK / STEVEN\_KRIEMADIS

Wir benötigen einen Umgang mit Risiken, der eigenverantwortliches Handeln unterstützt. Sonst kann in unsicheren Situationen niemand Entscheidungen treffen, weil klare Zuständigkeiten fehlen und nicht geregelt ist, wie verschiedene Handlungsoptionen abzuwählen sind. Planen und Entscheiden unter Unsicherheit und Handeln in komplexen Systemen lässt sich aber nicht vollständig regulieren. Will man den Wasserhaushalt einer Region ganzheitlich managen, braucht man also faire und transparente Prozesse. Natürlich müssen sie auch gewissen Regeln folgen, damit Effektivität, Transparenz und Fairness gewährleistet sind und einflussreiche Gruppen nicht ihre eigenen Interessen durchsetzen. Mit dieser Art von Steuerung gibt es noch wenig Erfahrung, und so wäre es wünschenswert, Pilotprojekte und Lernplattformen einzurichten. Die Tragweite der notwendigen Transformation dürfen wir nicht unterschätzen. Allerdings haben wir keine Zeit, weitere Jahrzehnte mit einer Umsetzung zu warten. Die Probleme sind dringend, und daher müssen wir schnell und entschlossen handeln.

Der Umbau des nordrhein-westfälischen Flusses Emscher ist ein ermutigendes Beispiel dafür, wie sektorenübergreifende Kooperation weit reichende Veränderungen in einer Region in Gang setzen kann. Durch Bergbau und Urbanisierung wurde die Emscher ab Ende des 19. Jahrhunderts als offener Abwasserkanal genutzt, sie galt als »die Kloake des Ruhrgebiets« – tot, stinkend, die Menschen mieden sie. Mit dem Ende des Steinkohlebergbaus in den

1980er Jahren wollte man die Situation verbessern. Der »Masterplan Emscher-Zukunft« wurde zum Entwicklungsmotor einer ganzen Region. Heute sind weite Teile der Emscher renaturiert, Flussabschnitte in die Stadtplanung integriert. Es gibt Erholungs- und Freizeiträume, von den renaturierten Auengebieten profitieren Hochwasserschutz und Artenvielfalt. Ein Faktor für diesen Erfolg ist das Genossenschaftsprinzip, das die Städte und Unternehmen in der Region zu Trägern des Wasserwirtschaftsverbands macht. Wesentlich erfolgsentscheidend jedoch: Die verschiedenen Beteiligten waren bereit, im Rahmen eines Masterplans zusammenzuarbeiten, das gemeinsame Ziel konsequent zu verfolgen und rechtliche Spielräume auszuschöpfen.

Mit der Wasserknappheit ist es ähnlich wie mit vielen anderen Bereichen, in denen Mensch und Natur aufeinandertreffen: Wir wissen genau, woher die Probleme stammen, wie bedrohlich sich das Nichtstun auswirkt und was wir für eine nachhaltigere Entwicklung tun können. Doch wir setzen es nicht um, erkennen die Dringlichkeit der Lage. Wir brauchen keine schnellen Notlösungen und Aktivismus, sondern grundlegende strukturelle Veränderungen. Hier können wir auf vielen Ebenen etwas tun – und das Beispiel der Emscher zeigt, dass wir viel erreichen können, wenn wir zusammenarbeiten. ▲

## QUELLEN

**Pahl-Wostl, C.:** Water governance in the face of global change – from understanding to transformation. In: Water governance: concepts, methods and practice, Vol. 1. Springer International Publishing, 2015.

**Rakovec, O. et al.:** The 2018–2020 multi-year drought sets a new benchmark in Europe. *Earth's Future* 10, 2022

**Riedel, T. et al.:** Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. Umweltbundesamt, 2021

**Thober, S. et al.:** Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, 2018

**Wunsch, A. et al.:** Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change. *Nature Communications* 13, 2022

## WEBLINKS

<https://www.spektrum.de/news/2041591>  
Verdunstung lässt Europa austrocknen.

<https://www.spektrum.de/news/2039422>  
Der Brotbaum verdurstet: Hat die Fichte noch eine Zukunft?



# FREISTETTERS FORMELWELT **VAMPIRZAHLEN – VORSICHT, REISSZÄHNE!**

**Mit Vampiren hat man es vor allem im Fantasy- und Horrorgenre zu tun. Aber mit ein bisschen Kreativität findet man sie auch in der Mathematik.**

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

► [spektrum.de/artikel/2057469](http://spektrum.de/artikel/2057469)

Inzwischen sollte allgemein bekannt sein, dass es sehr viele Zahlen gibt (sogar mehr als unendlich viele – doch das ist eine andere Geschichte). Es ist aber immer wieder erstaunlich, nach welchen Gesichtspunkten sich Zahlen gruppieren lassen.

Zum Beispiel kann man diese simple Gleichung betrachten:

$$1260 = 21 \cdot 60$$

Sofort lässt sich feststellen, dass die Rechnung korrekt ist. Schaut man ein wenig genauer hin, fällt einem vielleicht auf, dass sowohl links wie rechts des Gleichheitszeichens identische Ziffern auftauchen. Die »1« und die »2« der 12 sind bei der 21 zwar vertauscht, bei der Multiplikation wurden allerdings nur die Ziffern verwendet, die auch im Ergebnis erscheinen. Und schließlich könnte man noch bemerken, dass die vierstellige Zahl 1260 aus dem Produkt von zwei zweistelligen Zahlen entsteht. Das ist nicht selbstverständlich; 1260 = 126 · 10 wäre ebenfalls korrekt.

Nimmt man all das zusammen, kommt man auf die Definition der so genannten »Vampirzahlen«. Das sind natürliche Zahlen, die sich aus einer geraden Anzahl von Ziffern bilden lassen. Außerdem müssen die zwei Faktoren jeweils halb so viele Ziffern haben wie die Ausgangszahl und zusammen alle Ziffern der Ursprungszahl enthalten (in beliebiger Reihenfolge, aber es dürfen nicht beide eine »0« am Anfang oder Ende haben).

Für das Beispiel heißt das: Weil 1260 aus vier Ziffern besteht, sind zwei zweistellige Zahlen gesucht, die sich aus 1, 2, 6 und 0 zusammensetzen und miteinander multipliziert 1260 ergeben. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass bloß 10, 12, 20, 21 und 60 in Frage kommen. Lediglich  $21 \cdot 60$  liefert das korrekte Ergebnis.

Neben 1260 gibt es nur sechs weitere vierstellige Vampirzahlen: 1395, 1435, 1530, 1827, 2187 und 6880 (allerdings unendlich viele mit mehr als vier Stellen). Entdeckt hat sie der Wissenschaftsjournalist und Autor Clifford Pickover im Jahr 1994.

Damals war gerade der Film »Interview mit einem Vampir« populär, was ihn bei der Namensgebung inspirierte: So wie demnach Vampire unerkannt unter Menschen leben, existieren auch diese Zahlen unbemerkt (zumindest aus damaliger Sicht) zwischen all den anderen. Das mag etwas weit hergeholt sein, aber Vampirzahlen sind seit 1994 ein fixer Bestandteil der Unterhaltungsmathematik. Die beiden Faktoren, aus denen sie berechnet werden, nennt man dementsprechend Reißzähne.

Es gibt Vampirzahlen, die mehr als ein Paar Reißzähne haben. Die kleinste davon ist 125460, die sich als  $204 \cdot 615$  sowie als  $246 \cdot 510$  schreiben lässt. Um ein Beispiel mit drei Reißzahnpaaren zu finden, muss man bis zu 13078260 gehen – und sogar noch weiter, möchte man Zahlen mit besser ausgestatteten Gebissen entdecken.

**M**it einer Vampirquadratzahl hat man es zu tun, wenn die beiden Reißzähne identisch sind (etwa  $5267275776 = 72576 \cdot 72576$ ), und bei einer Vampirprimzahl bestehen die Reißzähne aus Primfaktoren (die kleinste ist  $117067 = 167 \cdot 701$ ). Man kann außerdem nach doppelten Vampirzahlen suchen, deren Reißzähne selbst wieder Vampirzahlen sind. Tatsächlich findet man auch im Binärsystem oder in anderen Zahlensystemen Vampirzahlen – und es klappt sogar mit römischen Zahlen.

Ob diese seltsamen Zahlenvertreter irgendwann abseits der Unterhaltung zu mathematischer Erkenntnis beitragen werden, muss sich noch zeigen. Doch wenn Vampire eines haben, dann ist es Zeit.

# SYNTHESECHEMIE STROM, MARSCH!



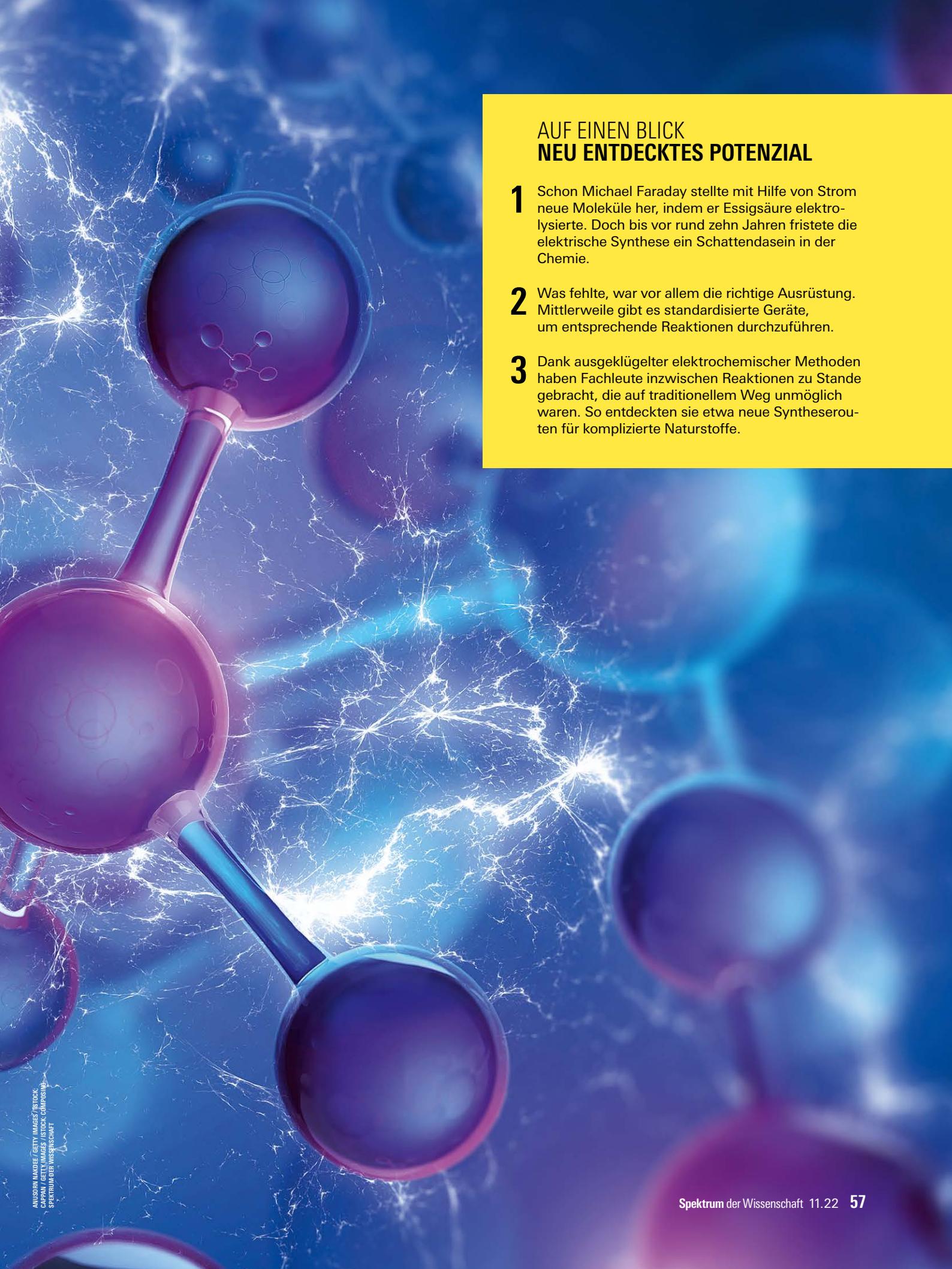
**Die organische Chemie fremdelt oft mit elektrochemischen Methoden. Dabei können derartige Ansätze gerade dort unverhofft durchschlagende Lösungen liefern, wo die traditionelle Synthese an ihre Grenzen stößt.**



**James Mitchell Crow** ist Wissenschaftsjournalist in Melbourne, Australien.

► [spektrum.de/artikel/2057457](http://spektrum.de/artikel/2057457)

**REANIMATION** Mittels Strom hauchen Chemiker tot geglaubten Reaktionen neues Leben ein und revolutionieren die organische Synthese.



## AUF EINEN BLICK NEU ENTDECKTES POTENZIAL

- 1** Schon Michael Faraday stellte mit Hilfe von Strom neue Moleküle her, indem er Essigsäure elektrolysierte. Doch bis vor rund zehn Jahren fristete die elektrische Synthese ein Schattendasein in der Chemie.
- 2** Was fehlte, war vor allem die richtige Ausrüstung. Mittlerweile gibt es standardisierte Geräte, um entsprechende Reaktionen durchzuführen.
- 3** Dank ausgeklügelter elektrochemischer Methoden haben Fachleute inzwischen Reaktionen zu Stande gebracht, die auf traditionellem Weg unmöglich waren. So entdeckten sie etwa neue Syntheserouten für komplizierte Naturstoffe.

Einer der elegantesten und effizientesten Wege, ein komplexes organisches Molekùl aufzubauen, stammt aus der Natur: die Herstellung der Terpene. Sie beginnt mit wenigen, verblüffend einfachen Ausgangsstoffen wie Isopentenylpyrophosphat und reiht sie zu einem so genannten Polyolefin-Vorläufer aneinander. Dann setzt eine Kaskadenreaktion ein, bei der Enzyme die Kohlenstoffatome des langen Moleküls an den richtigen Stellen zu Ringen verknüpfen und so ein komplexes dreidimensionales Gebilde aufbauen (siehe »Meisterhafte Modularität«).

Seit fast 100 Jahren gilt die Terpenbiosynthese als Referenz, an der synthetische organische Chemiker ihr Können messen. So auch Phil Baran vom kalifornischen Scripps Research Institute. Seine Gruppe hat jetzt einen ungewöhnlichen Versuch unternommen, um Verbindungen ähnlich ausgefeilt herzustellen wie Enzyme. Dazu benutzte sie ein Werkzeug, das die meisten Fachleute in dem Bereich meiden: elektrischen Strom.

Viele bisherige Ansätze konzentrierten sich darauf, die Polyzyklisierung zu perfektionieren – die raffinierte Ausbildung des Ringsystems aus einem gegebenen Polyolefin-Vorläufer. Dabei erhält man schlussendlich eine maßgeschneiderte Route zu einem bestimmten Molekùl. Phil Barans Team hatte jedoch etwas anderes im Sinn: Es suchte nach einem Weg, bereits den Polyolefin-Vorläufer aus einfachen Bausteinen modular zusammenzusetzen. Die kleinen Moleküle müssten sich unter Abspaltung von  $\text{CO}_2$  leicht aneinanderknüpfen lassen, so ihre Idee. Für diese Decarboxylierung, wie die Reaktion in der Fachsprache

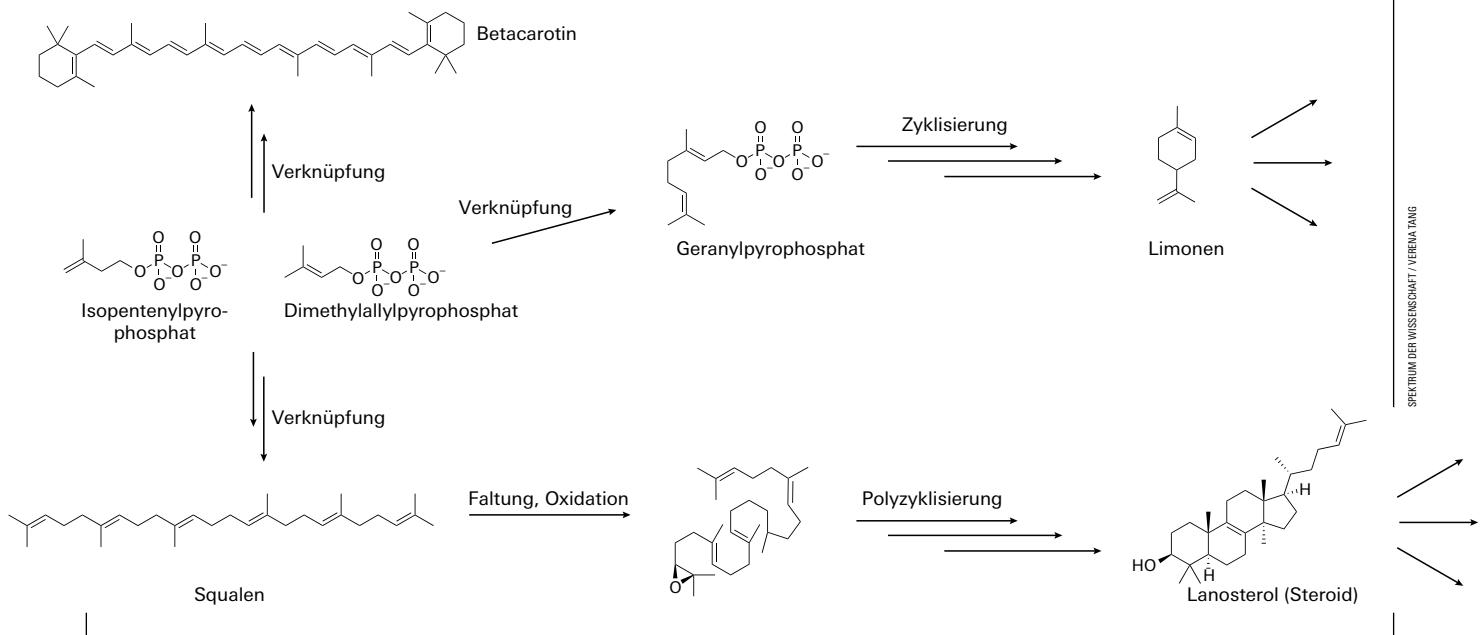
heißt, wollten sie allgemeine Bedingungen finden, so dass sich durch die Variation der Ausgangsstoffe eine Vielfalt an Terpenen erzeugen ließe. Statt einer maßgeschneiderten Route für einen speziellen Naturstoff würden sie so einen breiten Zugang zu einer ganzen Stoffklasse schaffen.

Das erwies sich als äußerst knifflig. Wie sich herausstellte, gelang der entscheidende Reaktionsschritt, die Decarboxylierung, nur durch starken chemischen Zwang: Man benötigte große Mengen starker Reagenzien, extrem niedrige Temperaturen und musste die Teile der Moleküle, die nicht reagieren sollten, durch »Schutzgruppen« chemisch verändern und hinterher diese Schutzgruppen wieder entfernen, um das gewünschte Molekùl wiederherzustellen. Das Vorhaben drohte zu scheitern.

Doch dann hauchte der damalige Doktorand Steven Harwood dem Projekt mit einer elektrochemischen Herangehensweise neues Leben ein. Zwar kannte er sich auf dem Gebiet anfangs nicht wirklich aus, wie sein Doktorvater Phil Baran erzählte, doch ihm blieb keine Wahl: »Er nutzte sie nur, weil sie sein Projekt rettete«, so Baran. Letzten Endes entwickelte Harwood mit einigen Kolleginnen und Kollegen ein elektrochemisches Verfahren für den entscheidenden Schritt im Aufbau des Polyolefin-Vorläufers. Die Reaktion lieferte alles, was sich die Chemiker wünschten: eine hohe Ausbeute, milde Bedingungen sowie Unempfindlichkeit gegenüber zahlreichen chemischen Gruppen (die umzusetzenden Moleküle konnten also verschiedene chemische Gruppen gleichzeitig tragen, ohne dass diese durch die Reaktion in unerwünschter Weise verändert wurden). Mit

## Meisterhafte Modularität

Aus nur zwei einfachen Ausgangsstoffen (Mitte links) synthetisiert die Natur über enzymatische Kaskadenreaktionen eine Fülle an unterschiedlichen Molekülen, darunter Steroide, Carotinoide und vieles mehr. Hier sieht man beispielhaft die Entstehung von Limonen, Betacarotin und Lanosterol.



jener Methode ließen sich nicht nur ein, sondern ganze 13 komplexe Terpene in bemerkenswert wenigen Schritten herstellen.

Das Beispiel ist nur das jüngste in einer Reihe ähnlicher Projekte, bei denen organische Reaktionen, die sonst nur schwer oder gar nicht zu bewerkstelligen sind, dank Elektrochemie effizient vorstatten gehen. Barans Labor hat in den letzten acht Jahren maßgeblich die Renaissance der Elektrochemie mit betrieben. Elektroden übernehmen jetzt die Aufgabe der Reagenzien: Indem sie anderen Substanzen Elektronen zur Verfügung stellen oder sie ihnen entziehen, treiben sie die Reaktion voran. Der organische Chemiker will sich dabei nur die wirklich schwierigen chemischen Probleme vornehmen. »Jede elektrochemische Reaktion, die wir veröffentlicht haben, ist der einfachste, günstigste und direkteste Weg, die Reaktion durchzuführen«, sagt er.

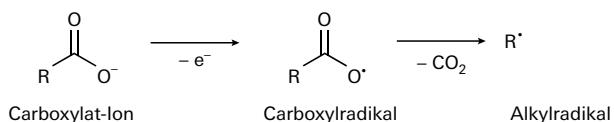
Die plötzliche Wiedergeburt der elektrochemischen organischen Synthese ist bemerkenswert. Noch vor einem Jahrzehnt befasste sich fast niemand in der akademischen Forschung mit dem Feld. »Als ich vor etwa zehn Jahren damit anfing, war es ein kleines Nischengebiet, an dem niemand ernsthaft interessiert war«, erinnert sich Kevin Lam von der Greenwich University in Großbritannien. Er hat als organischer Chemiker angefangen und arbeitet heute hauptsächlich elektrochemisch. »Auf diesem Gebiet gab es so viel zu tun, so viele unbeantwortete Fragen – aber niemand wollte sich damit befassen, es bestanden riesige Hürden«, erinnert er sich.

### Erst kam Michael Faraday – dann tat sich lange Zeit nichts mehr

Elektrochemisch zu arbeiten, bedeutet für synthetische organische Chemikerinnen und Chemiker, komplett neu zu denken. Neue und ungewohnte Variablen sind zu berücksichtigen, von der Wahl des Elektrodenmaterials bis zur Art der Elektrolyse. Bislang gab es außerdem kaum Geräte, die für eine solche Art der Synthesechemie geeignet waren. Die Forschung »kostete Zeit, man musste seine eigene Ausrüstung bauen und von anderen Bereichen der Chemie lernen«, erzählt Lam. »Es brauchte eine gewisse Neugier.«

Lam war nicht der Erste, der diese Neugier verspürte. Bereits Michael Faraday (1791–1867) spaltete 1834 die Carboxylgruppe von Essigsäure elektrolytisch ab. »Die Geschichte des Fachgebiets steht ein wenig Kopf – sie begann mit Faraday, doch dann trieb die Industrie das Thema später voran«, erzählt Lam. »In den 1960er Jahren kamen die großen Namen aus der Industrie. Unternehmen wie BASF und Monsanto beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Elektrosynthese, machen aber kein großes Aufheben darum.«

Im großtechnischen Maßstab kommen vor allem elektrolysebasierte Verfahren zum Einsatz, mit denen man Grundstoffe wie Aluminium oder Chlor gewinnt. Doch manche Anwendungen ähneln tatsächlich eher der organischen Synthese. Mit dem Baizer-Verfahren etwa, der kathodischen Reduktion von Acrylnitril zu Adiponitril, stellt man Polyamide wie das klassische Nylon-6.6 her. Die BASF produziert aus *p*-tert-Butyltoluol auf elektrochemischem Weg *p*-tert-Butylbenzaldehyd, einen Baustein für den Duftstoff Lysmeral. Daneben gebe es weitere Produktionen, die



**DECARBOXYLIERUNG** Ein Carboxylat-Ion (links) gibt ein Elektron an die Anode ab und wird dadurch zum Carboxylradikal (Mitte). Anschließend spaltet sich  $\text{CO}_2$  ab – die eigentliche Decarboxylierung –, und das entsprechende Alkyllradikal (rechts) bleibt zurück.

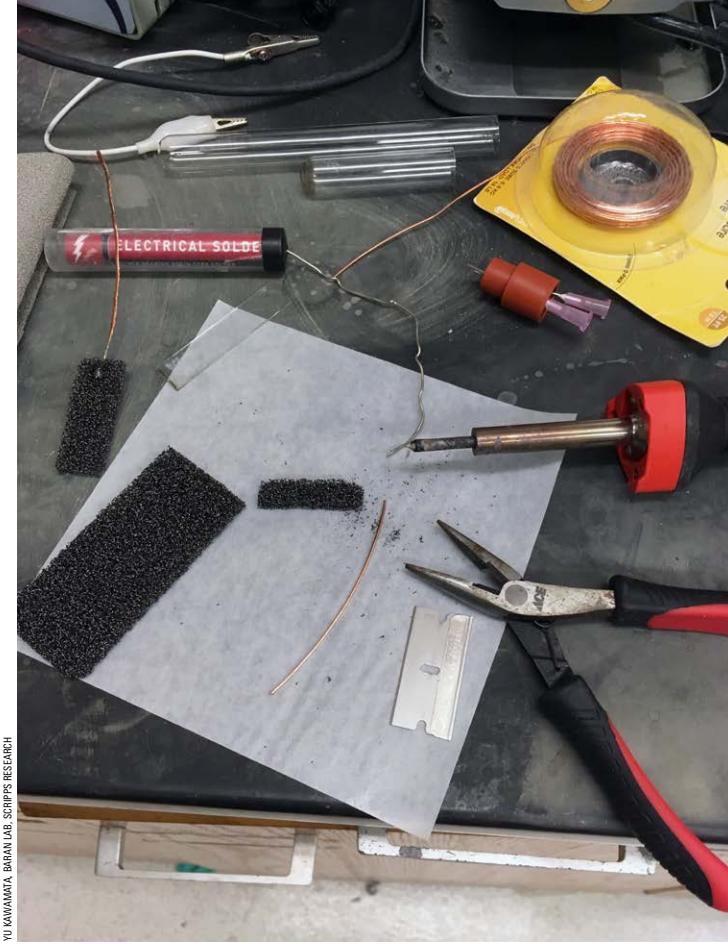
kleiner seien und nicht groß beworben würden, erzählt Lam. Die konkreten Herstellungswege seien meist in Patenten verborgen und daher schwer zu finden.

Das jüngste akademische Interesse an der Elektrochemie konzentrierte sich meist auf die Energieforschung. Aber hier liegen die Prioritäten ganz anders, wie Shelley Minteer von der University of Utah in Salt Lake City (USA) erklärt: »Für Anwendungen wie die Reduktion von Kohlenstoffdioxid ist eine extrem hohe Effizienz entscheidend, damit jedes Elektron, das hineingeht, die gewünschte chemische Wirkung hat«, sagt sie. Bei der pharmazeutischen Elektrosynthese hingegen sei es viel wichtiger, dass die Umwandlung hochselektiv ablaufe.

Doch seit Kurzem interessiert sich die Wissenschaft wieder vermehrt für letzteren Bereich. Um zu zeigen, dass die Elektrochemie eine äußerst praktische Methode für den Aufbau organischer Moleküle ist, hat sich Lams Labor bis zu den Ursprüngen des Fachgebiets vorgearbeitet. »Die Decarboxylierung hat bereits Faraday beschrieben«, erinnert Lam, »und wir entdecken immer noch neue Dinge, die wir damit anfangen können. Das finde ich erstaunlich.«

Die Reaktion beginnt, indem das Carboxylat ein Elektron an die Anode abgibt und dadurch zum Carboxylradikal wird (siehe »Decarboxylierung«). Im nächsten Schritt spaltet sich  $\text{CO}_2$  ab, und das entsprechende Alkyllradikal bleibt zurück. Würde man diese Radikale auf chemischem Weg erzeugen, könnte man nicht viel mit ihnen anstellen. Denn sie sind so reaktiv, dass sie sich mit allem verbinden würden, was sie antreffen, beispielsweise mit Lösungsmittelmolekülen. »Doch in der Elektrochemie ist entscheidend, was direkt neben der Elektrode passiert, an der die Reaktion abläuft. Wir können so viele Radikale erzeugen, dass sie anfangen, sich miteinander zu verbinden«, erzählt Lam. Wie er gezeigt hat, können dabei nützliche Stoffe entstehen – von Produkten, die sich durch intramolekulare Ringbildung bilden, bis zu einer Reihe so genannter Orthoester.

Diese findet Lam besonders interessant. »Vor etwa einem Jahr haben wir uns mit den ungeliebten Kindern der Chemie befasst: mit all den Verbindungen, die zwar möglicherweise sehr nützlich sind, die aber niemand verwendet, weil sie sehr schwierig herzustellen sind und es nur wenige auf dem Markt gibt«, sagt Lam, »meine Favoriten sind Orthoester – ein einziges Kohlenstoffatom trägt darin gleich drei Sauerstoffatome.« Diese Sauerstoffatome sind jeweils mit einem weiteren Molekülrest verbunden. Bislang ließ sich die eigenwillige Spezies nur in einem Verfahren mit



YU KAWAMATA, BARAN LAB, SCRIPPS RESEARCH

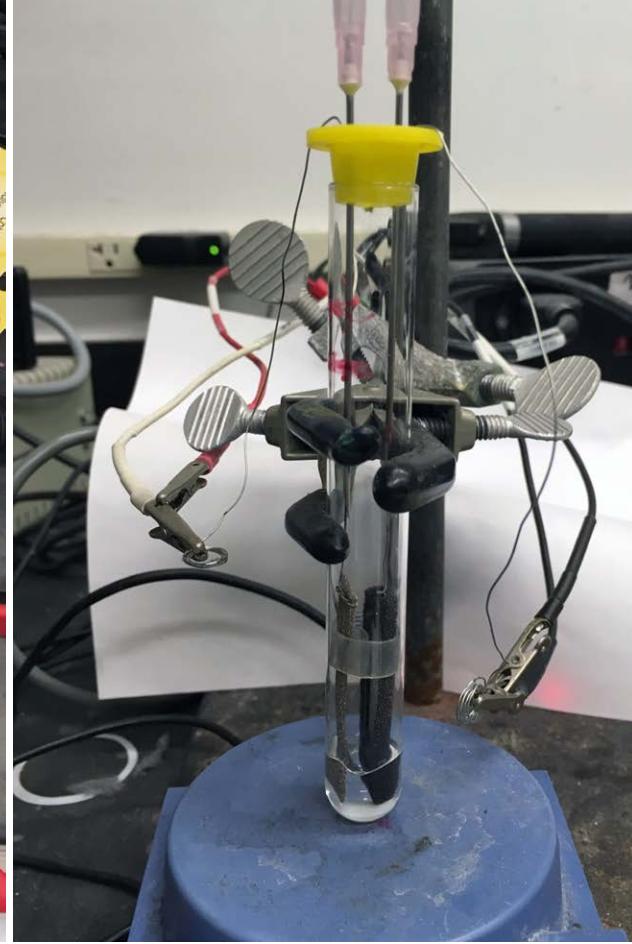
**DIE ANFÄNGE Weil es weder Verfahren noch Ausrüstung gab, musste Phil Barans Team Zange und Lötkolben in die Hand nehmen.**

geringer Ausbeute und unter Verwendung von Chlorwas-serstoffgas gewinnen.

»Wir haben eine extrem milde elektrochemische Methode entwickelt, um sie zu erhalten. Damit lassen sich erstmals Orthoester mit speziellen chemischen Funktionen in guter Ausbeute gewinnen, ohne dass man sie aufreinigen und trocknen muss«, unterstreicht Lam die Bedeutung seiner Erfindung. Es sei einfacher, etwas elektrochemisch zu synthetisieren als unter Einsatz ausgeklügelter Katalysatoren, die oft luft- und feuchtigkeitsempfindlich sind, argumentiert er. »Die Elektrochemie kann ein wirklich praktisches Werkzeug sein, das weniger Probleme macht als die Reaktion in einem Kolben – man mischt alles, holt sich einen Kaffee und hat das Produkt, wenn man zurückkommt«, ist Lam überzeugt.

Doch so attraktiv war die Beschäftigung mit dem Werkzeug in der synthetischen Chemie lange nicht. Wie hoch die Hürden sind, erfuhr Phil Baran, als er vor knapp zehn Jahren mit einigen seiner Labormitglieder daran arbeitete, das Naturprodukt Dixiamycin herzustellen.

Das Team hatte eine insgesamt zehnstufige Synthese ersonnen, aber im letzten Schritt ging es nicht weiter. Zwei identische Moleküle sollten sich durch Oxidation miteinander verbinden. Die Fachleute probierten eine lange Liste von Oxidationsmitteln aus, um die gewünschte Reaktion einzuleiten, doch nichts davon funktionierte. »Ich musste die Studenten mehrmals regelrecht anflehen, ein Cyclov-



YU KAWAMATA, BARAN LAB, SCRIPPS RESEARCH

tammogramm (siehe Glossar) zu erstellen, um herauszufinden, ob wir ein chemisches Oxidationsmittel mit dem richtigen Oxidationspotenzial für diesen letzten Schritt einsetzen konnten«, erzählt Baran, »aber niemand wollte elektrochemisch arbeiten. Was immer das Gegenteil von Mainstream ist, das war damals die Elektrochemie.«

### Ein letzter Ausweg

Als es keine anderen Möglichkeiten mehr gab, versuchte es das Team schließlich doch mit Cyclovoltammetrie. »Aber dann fanden sie etwas Bemerkenswertes«, erzählt Baran: »Bei der Analyse sahen sie, dass sich die Moleküle bei einem bestimmten Potenzial tatsächlich miteinander verbanden.« Bei höheren und niedrigeren Spannungen zersetzen sich dagegen die Ausgangsstoffe oder reagierten gar nicht. Also nutzten die Wissenschaftler die passenden elektrochemischen Bedingungen, um die Synthese abzuschließen. »Unter keiner der chemischen oder fotochemischen Bedingungen, die wir untersuchten, konnten wir diese Reaktion zu Stande bringen«, sagt Baran. »Das war für mich der Moment der Erleuchtung: Wir haben eine digitale Methode, mit der wir die treibende Kraft einer Reaktion und ihre Geschwindigkeit modulieren können – und trotzdem interessiert sich niemand dafür. Also beschlossen wir herauszufinden warum.«

Ein offensichtliches Hindernis war der Mangel an kommerziell verfügbaren Elektrosynthesegeräten. »Wie überwindet man die Hürde der fehlenden Ausstattung, durch die diese Wissenschaft im Grunde aus einem Haufen Leute besteht, die sich am Lagerfeuer Geschichten erzählen?«, fragt Baran. »Am Anfang hatte jeder seine eigene Methode – einige benutzten Blockbatterien, andere Handyadapter,

wieder andere besaßen 5000 Dollar teure Potentiostaten«, erinnert er sich. »Allein das in einem Unternehmen zu tun, ist schon mit Hindernissen verbunden. Und jetzt muss man auch noch einen Doktortitel in Kunsthandwerk erwerben, einen Lötkolben und eine Glasbläserausrüstung kaufen und Elektroden finden? Das können Sie vergessen«, fasst der Forscher die Situation sarkastisch zusammen.

Also schloss sich die Baran-Gruppe mit dem Laborausstatter IKA zusammen. »Wir haben zwei Jahre lang wie verrückt gearbeitet, um herauszufinden, wie man ein leicht zu verwendendes, robustes Gerät bauen kann«, sagt Baran.

Das Ergebnis namens ElectraSyn 2.0 ist mittlerweile das Standardgerät für die elektrochemische Synthese im Labormaßstab (siehe »Rasche Entwicklung«). »Heute arbeiten wir vorrangig damit«, erzählt Lam, »denn wenn die Reaktion mit diesem Apparat nicht funktioniert, haben wir wahrscheinlich 99 Prozent der Leute verloren, die sich für unsere Forschung interessieren würden.« Daneben benutzte das Team noch andere Zellen, von größeren Anlagen bis zu einem Apparat mit Wasserkühlung. Denn »letzten Endes sollte man sich nicht von der Ausrüstung einschränken lassen, sondern allein von der Chemie«.

Die einfache Verfügbarkeit standardisierter Geräte hat es organischen Chemikern sicherlich erleichtert, die Elektrochemie auszuprobieren, erzählt Song Lin, der an der Cornell University in New York auf dem Gebiet der synthetischen organischen Elektrochemie forscht. Lange Zeit hätten sich organische Chemiker dagegen gesträubt, Technologien wie Elektrochemie und Fotochemie (durch Licht initiierte Reaktionen) einzusetzen. »Erst in jüngster Zeit gab es einen regelrechten Boom bei der Verschmelzung von Technologie und organischer Chemie«, erzählt er. Und ist überzeugt, dass die Fotochemie vielen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern den Blick dafür geöffnet hat, wie stark sie von einer neuen Technik profitieren können.

In Zusammenarbeit mit Fachleuten von Merck hat Lins Gruppe kürzlich einen elektrochemischen Reaktor mit 24 Vertiefungen im Mikromäßigstab entwickelt, der Hochdurchsatzstudien zur Entdeckung und Optimierung von Reaktionen ermöglichen soll. »Ich glaube, dass mit diesen standardisierten Reaktoren mehr Forscherinnen und Forcher Elektrochemie betreiben werden und die Barriere beginnen wird zu bröckeln«, sagt er.

Wer das erste Mal mit einem elektrochemischen Reaktor arbeitet, muss zunächst viel lernen. Seit Kurzem gibt es Leitfäden, die organische Chemiker in den Aufbau und die Optimierung einer elektrochemischen Reaktion einführen. Einer davon stammt von Baran und ein weiterer von Shannon Stahl, die an der University of Wisconsin-Madison in den USA forscht. »Bei der Elektrochemie existieren ein paar mehr Variablen, was die Sache meiner Meinung nach spannender macht: Man kann die Reaktivität und Selektivität auf eine Weise modulieren, die in einem einfachen Rundkolben nicht möglich ist«, sagt Baran. Es braucht zwar ein paar Wochen, bis man die neuen Reaktionen beherrsche, aber wenn sie das einmal gelernt hätten, wollten die Studierenden nicht mehr damit aufhören.

Doch wo nützt die elektrische Synthese nun wirklich? Spannend ist, dass sie sich auf alle möglichen Probleme



JONATHAN MEINHARDT, CORNELL UNIVERSITY

**RASCHE ENTWICKLUNG** Die Pioniere bastelten ihre Elektrolysegeräte noch selbst zusammen. Heute gibt es standardisierte Ausrüstung zu kaufen (unten). Beide Fotos stammen aus dem Labor von Song Lin an der Cornell University in New York.



JONATHAN MEINHARDT, CORNELL UNIVERSITY

## Elektrifizierte Enzyme

Obwohl die Elektrochemie erstaunlich selektive Reaktionen ermöglicht, stößt sie bei komplizierteren Substraten mitunter an ihre Grenzen. Selbst innerhalb eines kleinen Potenzialfensters können eine Menge chemischer Reaktionen ablaufen. »Es ist immer eine Herausforderung, sicherzustellen, dass man keine unerwünschte Nebenreaktion durchführt«, sagt Shelley Minteer von der University of Utah in den USA.

Dabei kann die Zugabe von Enzymen helfen. In Minteers Labor lässt sich die elektrische Synthese gut mit der Biokatalyse kombinieren, also der Nutzung von Enzymen. Dank ihrem Schlüssel-Schloss-Mechanismus verwandeln diese ein Substrat hochselektiv in das gewünschte Produkt.

Läuft eine solche biokatalytische Reaktion unter elektrochemischen Bedingungen ab, kann das zwei wesentliche Nachteile überwinden, die bei Enzymen häufig auftreten. Erstens benötigt man bei der Enzymkatalyse oft teure Kofaktoren wie NADH oder NADPH in großen Mengen. Unter elektrochemischen Bedingungen lassen diese sich aber leicht direkt in der Reaktionsmischung erzeugen, so dass man sie nur sozusagen als ersten Startimpuls in katalytischen Mengen benötigt. Zweitens liegt das Reaktionsgleichgewicht oft nicht auf der Seite des Produkts, es wird also nur wenig davon gebildet, während der größere Teil der Ausgangsmoleküle nicht reagiert. Mittels Elektrochemie lässt sich jedoch eine Reaktion weit jenseits des chemischen Gleichgewichts durchführen, was höhere Ausbeuten ermöglicht.

Minteer hat Methoden entwickelt, um elektrochemische biokatalytische Reaktionen in zweiphasigen Systemen durchzuführen. Solche Bedingungen braucht es, um wasserlösliche Enzyme zur Reaktion mit unpolaren organischen Substraten zu bringen. Auf diese Weise hat ihr Team im Jahr 2019 mit Distickstoff ( $N_2$ , wie er in der Luft vorkommt) chirale Amine hergestellt – wichtige Bausteine für biologisch aktive Substanzen, Pharmazeutika oder auch Pflanzenschutzmittel. Die Anwendung zeigt nach Ansicht der Forscherin das Potenzial der Technologie: »Wir haben ein Enzymsystem genommen, das sich eigentlich nicht für den großen Maßstab eignet, weil der Kofaktor regeneriert werden muss und das Gleichgewicht auf Seite der Ausgangsstoffe liegt«, erzählt die Wissenschaftlerin, »und mit unserem elektrochemischen System haben wir beide Probleme auf einmal gelöst.«

anwenden lässt – von komplexen Herausforderungen wie bei der Terpensynthese bis hin zu einfachen Umwandlungen, für die man bislang palladiumhaltige Katalysatoren benötigt. In Barans Augen ist das Verschwendug, wo doch die gleiche Reaktion mit einer elektrochemischen Zelle gelingt.

»Ein weiterer Lieblingsversuch von mir ist der, den wir mit rasch wechselnder Polarität durchgeführt haben«, fügt er hinzu. Statt wie gewohnt mit Gleichstrom zu arbeiten, polte das Team den Strom in seiner elektrischen Zelle in kurzen Zeitabständen um und schaffte es so, gezielt bestimmte Carbonylgruppen in einem komplexen Molekül zu reduzieren, während andere unberührt blieben. »Eine chemoselektive Reduktion allein durch Änderung der Wellenform des elektrischen Stroms zu erreichen, ist wie etwas aus einer anderen Welt«, sagt der Chemiker. Seine Begeisterung ist ihm anzumerken: Es sei schwer vorstellbar, dass jemals ein besserer Ansatz für Redoxreaktionen entwickelt werden könnte. »In 100 Jahren kann ich mir keine effizientere Methode für die Redoxchemie vorstellen, als Elektronen direkt in die Lösung zu pumpen.«

### Eine Reaktion statt sieben: Neue Möglichkeiten für die Herstellung von Medikamenten

In jeder seiner Arbeiten vergleicht Baran das Ergebnis der elektrochemischen Reaktion mit dem der konventionell chemisch durchgeföhrten. Alle Ansätze, die er veröffentlicht hat, seien »entweder der einfachste, billigste oder direkteste Weg«, eine Umwandlung zu Stande zu bringen.

Die pharmazeutische Industrie beobachte die Entwicklung, sagt Lam. Kürzlich hat er gemeinsam mit der Firma Janssen in Belgien Nitrilgruppen (C–N-Gruppen) in Heteroaromataten eingeföhrt, eine Kombination, die in vielen Arzneimittelmolekülen auftaucht. Bisher brauchte es mehrere Schritte, teure Katalysatoren und gefährliche Zyanidquellen, um die Strukturen herzustellen. Außerdem ließ sich nur eine begrenzte Auswahl an Substraten umsetzen. »Wir haben mit Elektrochemie alles in einem Schritt gemacht«, sagt Lam. Nicht nur, dass sich eine große Bandbreite an Substanzen für die elektrochemische Umsetzung eignet, die Methode toleriert auch viele funktionelle Gruppen. Das bedeutet, dass weitere chemische Einheiten, die sich am Molekül befinden und die nicht reagieren sollen, in ihrer Form bestehen bleiben und sich nicht durch eine unerwünschte Nebenreaktion verändern. Deshalb eignet sich Lams Vorgehensweise gut, um Arzneimittelkandidaten erst gegen Ende des Herstellungsprozesses mit speziellen Funktionen zu versehen (Late-Stage-Funktionalisierung).

Lin hat ebenfalls mit Fachleuten aus der medizinischen Chemie zusammengearbeitet, die an der späten Funktionalisierung von Arzneimitteln tüftelten. Das Team der Firma Genentech wollte den »magischen Methyleffekt« ausnutzen – das Phänomen, dass sich die Wirkung eines Medikaments manchmal stark erhöht, wenn man an einer Stelle ein Wasserstoffatom durch eine Methylgruppe ersetzt. Dies ist aber meist nicht ohne Weiteres möglich, und so muss man die neue Komponente oft von Grund auf zusammenbauen. Das war hier der Fall: Genentech hatte herausgefunden, dass ein spezielles Molekül durch eine Methylierung stark an Wirksamkeit zulegen sollte, doch den modifizierten

## Glossar

**Acrylnitril**

**Adiponitril**

**Cyclovoltammogramm:** eine elektrochemische Methode, um herauszufinden, bei welchem Potenzial eine Reaktion abläuft. Dazu legt man elektrische Spannung an eine Arbeitselektrode an und lässt sie erst linear ansteigen, dann wieder absteigen. Findet bei einem bestimmten Potenzial ein chemischer Prozess statt, fließt Strom.

**Heteroaromat:** ein Heterozyklus mit aromatischer Struktur, das heißt delokalisierten Elektronen im Ring.

Beispiel: Pyridin

**Heterozyklus:** ein ringförmiges organisches Molekül, das zusätzlich zu Kohlenstoffatomen auch andere Elemente im Ring trägt, typischerweise Stickstoff, Sauerstoff oder Schwefel.

Beispiel: Piperidin

**p-tert-Butylbenzaldehyd**

einige der reaktionsträgsten Moleküle aktivieren und auf der anderen Seite gezielt eine funktionelle Gruppe in einem komplexen Molekül oxidierten. Das ist das Spannende für uns«, erzählt der Forscher.

Barans Ziel im Hinblick auf die ideale Totalsynthese ist es, möglichst viele nicht strategische Schritte zu vermeiden. Jede Reaktion soll den Aufbau des Gerüsts der gewünschten Substanz einen Schritt weiterbringen. Als das Team kürzlich seine eigenen Fortschritte auf dem Weg zur synthetischen Idealität bewertete, stellte es allerdings fest, dass es bis dahin noch weit ist. Oft muss man an bestimmten Molekülteilen Schutzgruppen anbringen, damit sie im nächsten Schritt nicht reagieren; hinterher entfernt man diese und stellt die ursprüngliche Funktion wieder her.

Die Elektrochemie könnte genau solche Umwege überflüssig machen, denn die Reaktionen sind häufig mit vielerlei chemischen Gruppen kompatibel. Die Methode »basiert in vielen Fällen auf Radikalen, was sie oft deutlich selektiver macht«, sagt Baran. »Die Ein-Elektronen-Chemie kümmert sich nicht um Zwei-Elektronen-Probleme, so dass wir Schutzgruppen und funktionelle Gruppenumwandlungen vermeiden und direkt zum Produkt gelangen können.«

Der organische Chemiker betrachtet sich indes nicht als Missionar, sondern sieht die Methode als praktisches Werkzeug. »Vielleicht betreiben wir in fünf Jahren keine Elektrochemie mehr«, fügt er hinzu, »wir wollen niemandem etwas aufdrängen. Aber für unser Labor und unsere Aufgabe scheint sie gut zu funktionieren. Sie ist eine Wissenschaft, die süchtig macht.« ▲

## QUELLEN

**Harwood, S. et al.:** Modular terpene synthesis enabled by mild electrochemical couplings. *Science* 375, 2022

**Kawamata, Y. et al.:** Chemoselective electrosynthesis using rapid alternating polarity. *Journal of the American Chemical Society* 143, 2021

**Leech, M., Lam, K.:** Electrosynthesis using carboxylic acid derivatives: new tricks for old reactions. *Accounts of Chemical Research* 53, 2020

**Möhle, S. et al.:** Modern electrochemical aspects for the synthesis of value-added organic products. *Angewandte Chemie International Edition* 57, 2018

**Rosen, B. R. et al.:** Total synthesis of Dixiamycin B by electrochemical oxidation. *Journal of the American Chemical Society* 136, 2014

© Royal Society of Chemistry  
Nutzung genehmigt von der Royal Society of Chemistry aus [www.chemistryworld.com](http://www.chemistryworld.com)

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/periodensystem](http://spektrum.de/t/periodensystem)



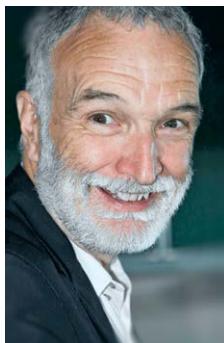
NATROS / STOCK.ADOBE.COM

Stoff erhielt man nur, indem man ihn über sieben bis neun Reaktionsschritte aus kleinen Molekülen zusammensetzte.

Um aus dem Wirkstoffmolekül die verbesserte Version zu erhalten, müsste man eine Methylgruppe an einem Kohlenstoffatom anbringen, das neben einem Stickstoffatom platziert ist. Das ist mit der »Shono-Oxidation« möglich, bei der man das Substrat in Methanol elektrolysiert. »Diese Reaktion ist seit Jahrzehnten bekannt, wurde aber bisher hauptsächlich für die Synthese kleiner, einfacher Moleküle genutzt. Sie ist nicht kompatibel mit Heterozyklen und Iminen, die in der medizinischen Chemie sehr wichtig sind«, erläutert Lin (Strukturen siehe »Glossar«). Sein Team untersuchte den Reaktionsmechanismus und stellte fest, dass die Oxidation des Lösungsmittels Methanol mit der gewünschten Reaktion konkurrierte. Indem die Fachleute die Methode veränderten und das Lösungsmittel wechselten, machten sie die Reaktion tauglich für die Late-Stage-Funktionalisierung komplexer Pharmazeutika oder Naturstoffe. »Jetzt können wir die C–H-Methylierung direkt am Arzneimittelmolekül durchführen«, freut sich Lin.

Ihr im Grunde unbegrenzter Redoxbereich ist in Lins Augen der große Vorteil der Elektrochemie. »Wir können

# SCHLICHTING! SEGELFLIEGENDE SPINNEN



**Einige Spinnenarten segeln mit ihren Fäden durch die Luft. Dafür nutzen sie nicht nur Wind und Thermik. Zusätzlich verschafft ihnen das elektrostatische Feld der Erde selbst bei Flaute den nötigen Antrieb.**

**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/2057472](http://spektrum.de/artikel/2057472)

**Ja wäre nur ein Zaubermantel mein,  
und trüg er mich in fremde Länder**

Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)

► Spinnen haben keine Flügel, und deswegen sollten sie eigentlich nicht fliegen können. Manchmal sieht man sie allerdings an langen Seidenfäden durch die Luft schweben und wird dadurch auf anschauliche Weise eines Besseren belehrt. Diese Technik des Segelflugs ist bei vielen Spinnenarten seit Langem bekannt. Schon Darwin hatte auf seinem Forschungsschiff »Beagle« achtbeinigen Besuch erhalten. Er beschrieb, wie eine an Bord gelandete Spinne wieder Abschied nahm, indem sie »vier oder fünf Fäden hervorstieß. Sie waren mehr als einen Meter lang und strebten von den Drüsenausführungen ausgehend nach oben voneinander weg. Plötzlich löste die Spinne ihren Griff vom Pfosten und wurde schnell außer Sichtweite getragen.«

Laut Darwin war es an jenem Tag heiß und windstill. Er machte winzige thermische Konvektionsbewegungen dafür verantwortlich, dass die Spinne trotz Flaute abheben konnte. Die These vermag in der Tat manche wesentliche Aspekte des Phänomens zu erklären. Außerdem vermutete Darwin bereits, obendrein könnten elektrostatische Kräfte im Spiel sein. Dafür sprach die fächerartige Ausbreitung der herausschießenden Fäden – als würden diese sich gegenseitig abstoßen. Allerdings herrschte trotz solcher Hinweise auf mögliche Ladungseffekte bis in unsere Tage die Überzeugung vor, der Spinnenflug hänge ausschließlich von aerodynamischen Faktoren ab. Das war wissenschaftlich gut zu begründen. In den letzten Jahren wurden jedoch Untersuchungsergebnisse

publiziert, die elektrostatischen Vorgängen eine zusätzliche tragende Rolle zusprechen.

Zu den jüngsten Entwicklungen dürften Schwierigkeiten beigetragen haben, die bei genauerer Betrachtung auftreten, wenn man den aerodynamischen Auftrieb allein verantwortlich machen will. So ist unklar, wie sich die bis zu 100 Milligramm schweren Spinnen mit ihrem Faden auffällig schnell in die Höhe katapultieren, während kaum ein Lüftchen weht. Hinzu kommt das schon von Darwin notierte Aufspreizen der bündelweise ausgestoßenen Fäden. Darüber hinaus fand man fliegende Spinnenarten in vier Kilometer Höhe vor – strömungsdynamisch eine ziemliche Herausforderung.

Solche Probleme lassen sich beseitigen, wenn man die Wirkungen des so genannten atmosphärischen Potenzialgradienten mit einbezieht. Hierbei geht es um Ladungsdifferenzen zwischen Atmosphäre und Boden: Die in mehr als etwa 70 Kilometer Höhe gelegene Ionomosphäre ist überwiegend positiv geladen, die Erdoberfläche hingegen negativ. Der Unterschied wirkt sich auf den gesamten dazwischen gelegenen Bereich aus. So ist die ungestörte Atmosphäre oberhalb des Bodens im Vergleich zu diesem positiv geladen, so dass zwischen einem Punkt auf der Erde und einem in der darüber befindlichen Luft eine elektrische Spannung herrscht. Sie kann immerhin rund 100 Volt pro Meter betragen. Die Stärke des Effekts schwankt indes und hängt sehr stark von den Wetterbedingungen ab.

Bereits die gegenseitige Abstoßung der von der Spinne abgegebenen Fäden zeigt: Auch die Seidenfasern sind elektrisch geladen. Es kommt daher zwangsläufig zu einer Wechselwirkung zwischen ihnen und dem Feld der Luft, die eine Bewegung verursacht. Doch wie kann die Spinne im Voraus erkennen, ob die Kräfte stark



### FADENSCHUSS Eine Spinne stößt aus ihrem aufgerichteten Hinterleib eine Seidenfaser in die Luft.

genug sind, um sie mitsamt ihrem Faden zu tragen? Dazu muss sie elektrische Felder wahrnehmen und nach ihrer Stärke beurteilen. Dass zumindest einige Insekten dazu in der Lage sind, ist seit mehreren Jahren bekannt (siehe »Spektrum« April 2020, S. 60).

2018 haben Erica Morley und Daniel Robert von der University of Bristol untersucht, wie Spinnen auf Felder reagieren. Sie setzten in Laborversuchen Baldachin-spinnen (Linyphiidae) elektrischen Feldern aus, die in ihrer Stärke denen in der Atmosphäre unter verschiedenen Wetterbedingungen entsprachen. Tatsächlich reagierten die Spinnen darauf mit eindeutigen Flugvorbereitungen. Die segelnden Tiere gewannen oder verloren beim Ein- und Ausschalten der Felder an Höhe. Somit kann für den Aufstieg nicht nur der aerodynamische Auftrieb verantwortlich sein, vielmehr muss ebenso die elektrische Wechselwirkung zwischen den Tieren und den äußeren Feldern eine Rolle spielen. Spezifische Bewegungen bestimmter Tasthaare auf der Körperoberfläche der Tiere in Reaktion auf elektrische Felder legen die Vermutung nahe, dass diese so genannten Trichobothrien den Spinnen die Wahrnehmung der Felder ermöglichen.

Die fliegenden Spinnen sind zwar weitgehend dem atmosphärischen Potenzialgradienten und den aerodyn-

mischen Gegebenheiten ausgeliefert. Trotzdem können sie wohl ein wenig Einfluss auf das Geschehen nehmen. In einer Veröffentlichung von 2022 haben Charbel Habchi von der libanesischen Notre-Dame-Universität Louaize und Mosbeh M. Khalid Jawed von der University of California in Los Angeles die Ergebnisse von Computersimulationen präsentiert. Aus diesen folgerten die beiden Ingenieurwissenschaftler, dass die Spinnen sowohl die strömungsphysikalischen als auch die elektrostatischen Verhältnisse steuern können, indem sie die Anzahl der Fäden und deren Länge verändern. Damit verfügten die Tierchen in der Luft immerhin über gewisse Steuerungsmöglichkeiten.

Bisher ist ungeklärt, auf welche Weise die Spinnfäden aufgeladen werden. So werden sich dieser faszinierenden natürlichen Umsetzung eines elektrischen Antriebs vermutlich noch über Jahre hinaus weitere Geheimnisse entlocken lassen.

### QUELLEN

**Darwin, C.R.:** Journal of researches into the natural history and geology of the countries visited during the voyage of H.M.S. Beagle round the world, under the Command of Capt. Fitz Roy, R.N. John Murray, 1845

**Habchi, C., Jawed, M.K.:** Ballooning in spiders using multiple silk threads. *Physical Review E* 105, 2022

**Morley, E.L., Robert, D.:** Electric fields elicit ballooning in spiders. *Current Biology* 28, 2018

# KRYPTOGRAFIE DATENSCHUTZ IN DER WELT VON BIG DATA

**Von der Bekämpfung von Finanzbetrug bis zur Früherkennung von Krankheiten: Daten können die Menschheit enorm voranbringen. Mit neuen Verschlüsselungsmethoden versuchen Informatiker, sensible Informationen im Einklang mit der individuellen Privatsphäre zu nutzen.**



**Edd Gent** ist Wissenschaftsjournalist in Bangalore, Indien.

► [spektrum.de/artikel/2057460](http://spektrum.de/artikel/2057460)

► Wie jeder Mediziner möchte auch Jacques Fellay seinen Patienten die bestmögliche Behandlung zu kommen lassen. Dabei greift er nicht auf ein Skalpell oder Stethoskop zurück, sondern nutzt etwas viel Mächtigeres: Daten. In allen Menschen sind genetische Marker verborgen, die Ärztinnen und Ärzten wie Fellay verraten könnten, welche Personen anfälliger für Erkrankungen wie Aids oder Hepatitis sind. Anhand solcher Hinweise ließe sich künftig prognostizieren, wer eine frühzeitige Behandlung benötigt.

Das könnte Leben retten. Nur: Um die Zusammenhänge zwischen genetischen Markern und Krankheiten aufzudecken, braucht man Daten. Und zwar sehr viele – mehr, als jedes noch so große Krankenhaus besitzt. Leider ist es nicht einfach, Informationen aus verschiedenen medizinischen Einrichtungen zusammenzuführen. Denn die Daten enthalten alle möglichen sensiblen Details über Menschen, die zu Peinlichkeiten, Diskriminierung oder Schlimmerem führen könnten. Ethische Bedenken dieser Art sind für Fellay, der am Universitätsspital Lausanne in der Schweiz arbeitet, ein ernsthaftes Hindernis. »Wir verfügen über die nötigen Technologien und Ideen«, sagt er. »Aber in den meisten Fällen scheitert unser Vorhaben an der Zusammenstellung eines ausreichend großen Datensatzes.«

Dies stellt nur ein Beispiel dar für eines der größten technologischen Probleme der Welt. Die Unfähigkeit, Daten sicher auszutauschen, behindert den Fortschritt in fast allen

Bereichen: von der Aufdeckung von Finanzkriminalität über die effiziente Verwaltung von Staaten bis hin zur Reaktion auf Katastrophen. Doch eine neue Art der Verschlüsselung ermöglicht es nun, Datenmengen auszuwerten, ohne dass eine Person sie jemals zu Gesicht bekommt. Damit ließe sich das Datenschutzproblem von Big Data lösen – und Fellays Patientinnen und Patienten könnten unter den Ersten sein, die davon profitieren.

Vor mehr als 15 Jahren tauchte erstmals das heute verbreitete Sprichwort auf, Daten seien das neue Öl. Diesen Ausspruch prägte der britische Mathematiker und Marketingexperte Clive Humby. Inzwischen haben wir uns an den Gedanken gewöhnt, dass persönliche Informationen wertvoll sind. Firmen wie Meta (zu dem Facebook gehört) oder Alphabet (das Mutterunternehmen von Google) haben sich zu milliardenschweren Giganten entwickelt, indem sie Nutzerdaten sammeln und an Werbekunden verkaufen, die dann gezielte Anzeigen schalten können.

Daten sind aber nicht nur für die Big-Tech-Konzerne interessant, sie könnten für uns alle nützlich sein. Fellays



## AUF EINEN BLICK **DATEN – DAS NEUE GOLD**

- 1** Könnte man die Patientendaten aller Krankenhäuser nutzen, würde das den medizinischen Fortschritt stark vorantreiben. Solche Informationen müssen aber vertraulich behandelt werden.
- 2** Daher entwickeln Informatiker Verfahren, die Daten auswerten können, ohne dass ein Mensch sie direkt einsieht. Einer der vielversprechendsten Ansätze ist die homomorphe Verschlüsselung.
- 3** Bei der Methode chiffriert man die Informationen und streut zudem zufälliges Rauschen ein, um sicherzustellen, dass niemand Rückschlüsse auf Einzelpersonen ziehen kann.



### SERIE

#### **Kryptografie**

Teil 1: September 2022

**Schutz vor Quantenhackern**  
Manon Bischoff

Teil 2: Oktober 2022

**Auf der Jagd nach unknackbaren Funktionen**  
Erica Klarreich

Teil 3: November 2022

**Datenschutz in der Welt von Big Data**  
Edd Gent

**BIG DATA** Wir hinterlassen überall digitale Spuren. Diese kann man sinnvoll nutzen, etwa um das Risiko für Erkrankungen einzuschätzen. Doch unsere Privatsphäre muss dabei geschützt bleiben.

Arbeit ist ein Beispiel dafür, wie sich medizinische Information verwenden ließe, um Menschen zu heilen. Und auch die großen Internetfirmen setzen die Daten unter anderem für gute Zwecke ein: Meta gibt etwa anonymisierte Nutzerdaten an Hilfsorganisationen weiter, um im Rahmen des Projekts »Disaster Maps« zu untersuchen, wie man bestmöglich auf Umweltkatastrophen wie Überschwemmungen oder Waldbrände reagieren kann. In den USA analysieren mittlerweile rund 1400 Universitäten die akademischen Laufbahnen ihrer Studierenden, um jene auszumachen, die mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ihren Abschluss abbrechen dürften. Damit können die Lehreinrichtungen sie gezielt unterstützen. Das sind nur wenige Beispiele der viel versprechenden Möglichkeiten von Big Data. Inzwischen haben sich Informationen zu einer Art Währung entwickelt, die ein essenzieller Bestandteil unserer modernen Welt ist – auch wenn wir es nicht immer direkt wahrnehmen.

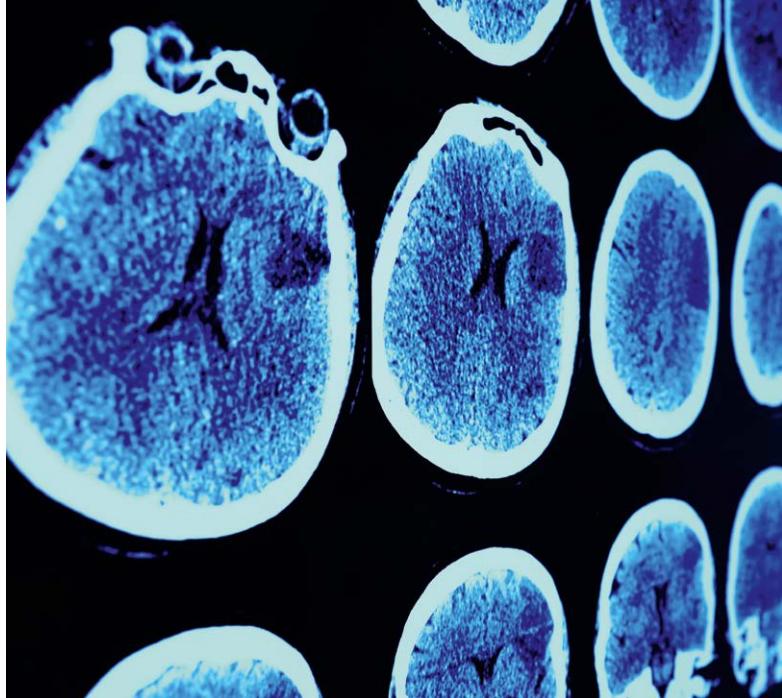
Hat eine Organisation Daten erhoben, muss sie diese auswerten, um an die gewünschte Information heranzukommen. Doch das ist nicht immer einfach, denn oftmals sind besondere Anforderungen oder Algorithmen (die meist dem Firmengeheimnis unterliegen und daher geschützt sind) nötig, um die Datensätze zu verarbeiten. Dann muss man diese veröffentlichen – oder zumindest an Unternehmen oder Fachleute weitergeben, die über das entsprechende Know-how verfügen. Und selbst wenn man nicht auf Analysen eines Dritten angewiesen ist, muss man die Daten irgendwo speichern – was oft bedeutet, dass sie auf einem Server eines externen Konzerns liegen.

Rohdaten dürfen aber nicht einfach unbedacht weitergegeben werden. Sie enthalten in der Regel personenbezogene Daten, die von Namen und Adressen bis hin zu Wahlunterlagen und medizinischen Angaben reichen. Solche Informationen sind zu Recht geheim – nicht zuletzt auch dank strenger Datenschutzgesetze wie der Allgemeinen Datenschutzverordnung der Europäischen Union (DSGVO). Verstöße können hohe Geldstrafen nach sich ziehen.

#### Wie anonymisiert man personenbezogene Daten?

In den letzten Jahrzehnten haben Forscherinnen und Forcher Wege gefunden, um die Privatsphäre der Menschen während des Datenaustauschs zu schützen. Der herkömmliche Ansatz besteht darin, gezielt jene Informationen zu entfernen oder zumindest zu verschleiern, die eine Person identifizieren könnten, erklärt der Datenschutzexperte Yves-Alexandre de Montjoye vom Imperial College London. Zum Beispiel, indem man das Geburtsdatum durch eine Altersgruppe ersetzt. »In den 1990er Jahren war das in Ordnung, aber inzwischen reicht das nicht mehr aus«, warnt de Montjoye. Im Internet kursieren etliche Daten über so gut wie jeden Menschen, so dass sich selbst scheinbar unbedeutende Details mit öffentlich einsehbaren Informationen abgleichen lassen, um eine Person zu identifizieren.

Eine solche Datenpanne trug sich 2021 zu. Damals verkaufte das Unternehmen Grindr, das eine Dating-App betreibt, die hauptsächlich von Homosexuellen genutzt wird, anonymisierte Informationen an einen Datenbroker. Das Medienunternehmen The Pillar konnte auf diese Daten



**VERNETZEN** Indem Krankenhäuser medizinische Daten wie Schädel-CTs miteinander teilen, ließe sich viel über bestimmte Krankheiten lernen.

SUDOKU / GETTY IMAGES / ISTOCK

zugreifen und machte eine erstaunliche Entdeckung: Als es die Standortmeldungen eines bestimmten Mobiltelefons mit den öffentlich bekannten Bewegungen eines hochrangigen katholischen US-Priesters verglich, fand es eine Übereinstimmung. Damit wurde publik, dass der Geistliche die Dating-App benutzt hatte und daher höchstwahrscheinlich homosexuell ist. Das führte zu einem Skandal, da katholische Priester verpflichtet sind, sich von sexuellen Beziehungen fernzuhalten – und die Kirche insbesondere gleichgeschlechtliche Handlungen als Sünde betrachtet.

Glücklicherweise könnte es in Zukunft einen Schutz vor solchen Situationen geben. Mit der so genannten differenzierten Privatsphäre haben Kryptografinnen und Kryptografen in den 1970er Jahren eine raffiniertere Methode entwickelt, um den Datenschutz zu wahren. Bei diesem Ansatz gibt der Verwalter eines Datensatzes niemals alle Informationen frei. Stattdessen erlaubt man es Dritten lediglich, Fragen zu den statistischen Eigenschaften der Daten zu stellen, etwa »Welcher Anteil der Patienten leidet an Krebs?« – und zu beantworten.

Das klingt nach einer guten Lösung. Wenn man jedoch genügend geschickte Fragen stellt, ist es dennoch möglich, dass private Details entweichen. Daher muss ein Datenbankverwalter zusätzlich stochastiche Techniken einsetzen, die auf zufällige Weise Fehler in die Antworten einbauen. Zum Beispiel, indem man beim Zusammenzählen krebskranker Personen einige fälschlicherweise hinzählt oder nicht. Bei sorgfältigem Vorgehen beeinträchtigt das nicht die Aussagekraft der Ergebnisse – erschwert es aber, Rückschlüsse auf Einzelpersonen zu ziehen. Das US Census Bureau (Volkszählungsamt) hat diese Methode übernommen, als es die Resultate der Volkszählung aus dem Jahr 2020 veröffentlichte.

Die differenzierte Privatsphäre hat allerdings ihre Grenzen, gerade wenn es um die Vielfalt der möglichen Anwen-

dungen geht. Sie kann nämlich nur statistische Muster liefern. Falls man aber wie Fellay bestimmte Eigenschaften von Individuen – beispielsweise jene mit erhöhtem Krankheitsrisiko – ausmachen möchte, kommt man damit nicht weiter. Zudem lässt sich die differenzierte Privatsphäre, trotz ihrer Eleganz, nicht immer problemlos praktisch umsetzen.

Doch es gibt Hoffnung. Bei einem anderen Ansatz, dessen Ursprünge ebenfalls mehrere Jahrzehnte zurückreichen, werden Daten derart verschlüsselt, dass Dritte sie analysieren und auswerten können, ohne sie zu Gesicht zu bekommen. Das wäre in etwa so, als würde man einen Edelstein in einen Handschuhkasten legen: einen luftdichten Behälter, der häufig in Laboren anzutreffen ist, wenn man mit gefährlichen Materialien arbeitet. Fachleute können ihre Arme in die Handschuhe stecken und das wertvolle Objekt untersuchen – aber sie haben keinen direkten Zugang dazu und können ihn nicht stehlen. Auf analoge Weise soll die so genannte homomorphe Verschlüsselung unsere Daten schützen.

Auf diesen Gedanken kamen die Kryptografen Ronald Rivest, Len Adleman und Michael Dertouzos vom Massachusetts Institute of Technology im Jahr 1978. Sie entwickelten eine theoretische Methode, um das mathematische Äquivalent eines Handschuhkastens zu schaffen, das sensible Informationen sichert. Der Ansatz beruht auf so genannten Homomorphismen, die es ermöglichen, Daten von einer Form in eine andere zu verwandeln, ohne dabei die zu Grunde liegende Struktur zu verändern. Das heißt, die ursprünglichen Daten haben ein neues Gewand, die Berechnungen mit ihnen verlaufen aber analog. Das ermöglicht es, mit chiffrierten Werten zu operieren. Ein Großteil der von Rivest, Adleman und Dertouzos entwickelten Methode beruht darauf, Zahlen mit Hilfe von Techniken aus der Algebra auf unterschiedliche Weise darzustellen.

Wenn man etwa das durchschnittliche Gehalt  $Z$  mehrerer Personen ermitteln möchte, kann man ihr Einkommen  $x$  durch eine Funktion  $f(x)$  verschleiern und an ein Unternehmen weitergeben, das die Daten analysieren soll. Dieses berechnet aus den verschlüsselten Eingaben  $f(x)$  einen Mittelwert, indem es alle Zahlen aufsummiert und durch ihre Anzahl teilt. Daraus ergibt sich das Ergebnis  $f(Z)$ . Wenn man die Funktion  $f$  kennt, kann man schließlich das durchschnittliche Gehalt  $Z$  berechnen. Bedingung hierfür ist, dass die verschlüsselten Zahlen  $f(x)$  sich ebenso verhalten wie  $x$ , indem etwa  $f(x)+f(y)$  dem Wert  $f(x+y)$  entspricht.

**HOMOMORPHE VERSCHLÜSSELUNG**  
Indem man den Klartext durch eine Funktion (hier:  $f(x) = 2x$ ) verschlüsselt, kann man damit Berechnungen durchführen und erhält am Ende ein chiffriertes Ergebnis. Dieses kann man durch die Umkehrfunktion wieder entschlüsseln.

### Addition

$$\begin{array}{ccc} 2 + 5 & & = 7 \\ \text{Verschlüsseln} & \downarrow & \uparrow \text{Entschlüsseln} \\ f(x) = 2x & & f(x) = \frac{1}{2}x \\ & \downarrow & \uparrow \\ 4 + 10 & & = 14 \end{array}$$

### Multiplikation

$$\begin{array}{ccc} 2 \cdot 5 & & = 10 \\ \text{Verschlüsseln} & \downarrow & \uparrow \text{Entschlüsseln} \\ f(x) = 2x & & f(x) = \frac{1}{4}x \\ & \downarrow & \uparrow \\ 4 \cdot 10 & & = 40 \end{array}$$

Durch ein solches Vorgehen hat die Analysefirma zu keinem Zeitpunkt Zugang zu den geheimen Daten  $x$ . Da der Konzern keinen Schlüssel zum Entziffern besitzt, kann er die Informationen nicht direkt einsehen – aber dennoch auswerten. »Die Methode hat extrem viel Potenzial«, so Tom Rondeau von der US-amerikanischen Verteidigungsbehörde Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) – eine von zahlreichen Organisationen, die den Ansatz untersuchen. »Die Fähigkeiten einer solchen Technologie sind kaum abzuschätzen.«

Über die Jahrzehnte haben Forscherinnen und Forscher verschiedene homomorphe Verschlüsselungssysteme entwickelt. Allerdings lassen sich mit ihnen bloß eine sehr begrenzte Auswahl von Operationen mit den Daten durchführen, etwa Additionen oder Multiplikationen. Um die Informationen zu verarbeiten, braucht man jedoch mehr Handlungsspielraum, denn die Analyseprogramme führen allerlei Arten von Berechnungen durch.

### Verschlüsselungen, die allen Operationen standhalten

Fachleute begannen daher, von einer vollständig homomorphen Verschlüsselung (fully homomorphic encryption, kurz: FHE) zu träumen, mit der sich jedes beliebige Programm mit den verschlüsselten Daten ausführen lässt. Aber lange blieb das Ziel in weiter Ferne. »FHE war für uns der Heilige Gral«, erinnert sich Marten van Dijk vom CWI, dem niederländischen Forschungsinstitut für Mathematik und Computerwissenschaften. »FHE schien unerreichbar.«

Man musste eine Verschlüsselungsmethode finden, die es erlaubte, möglichst flexibel mit den Daten umzugehen. Dazu sucht man nach einem mathematischen Problem, das ohne zusätzliche Informationen (die den Schlüssel darstellen) schwer zu knacken ist. Ein Beispiel dafür ist die Zerlegung von großen Zahlen in ihre Primfaktoren – dieser Aufgabe sind selbst Supercomputer nicht gewachsen.

Einen Ansatz zur homomorphen Verschlüsselung bietet die so genannte gitterbasierte Kryptografie, die inzwischen als viel versprechender Kandidat für Post-Quanten-Algorithmen gilt (siehe »Spektrum« September 2022, S. 12). Das mathematische Problem hat mit hochdimensionaler Geometrie zu tun: Zum Beispiel muss man den nächstgelegenen Knotenpunkt in einem 512-dimensionalen Gitter ausmachen. Für die homomorphe Verschlüsselung funktionierte diese Methode jedoch nur bis zu einem bestimmten Punkt. Denn, um die Privatsphäre zu wahren, wird den Daten nach

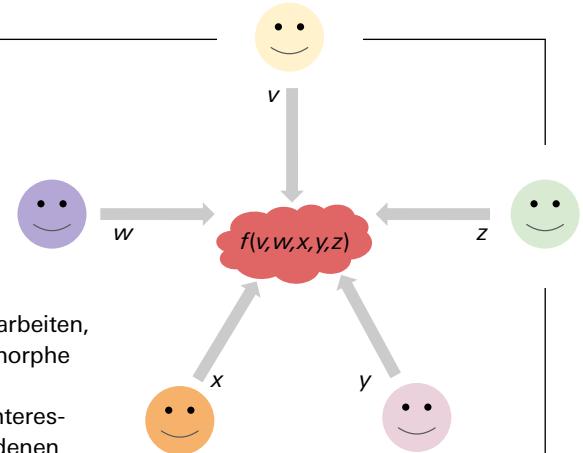
## Wie man Geheimnisse sicher teilt

Bis zu Beginn der 1970er Jahre bestand das Hauptziel der Kryptografie darin, Daten zu verschleiern. Doch mit dem anbrechenden Computerzeitalter wuchsen die Ansprüche an die Disziplin. Man suchte nach Methoden, um Informationen aus Datensätzen zu erhalten und dabei die Privatsphäre von Einzelpersonen zu wahren. Dafür ist es nötig, die Dokumente zu bearbeiten, ohne sie direkt einzusehen. Eine Möglichkeit dazu bietet die homomorphe Verschlüsselung.

Doch manchmal sind mehrere Personen an einer Datenmenge interessiert, wie im Fall des Arztes Fellay, der Patientenakten mit verschiedenen medizinischen Einrichtungen austauschen möchte. Auch dafür haben Kryptografinnen und Kryptografen ausgeklügelte Techniken entwickelt: Durch Protokolle wie »Secret Sharing« können verschiedene Parteien Geheimnisse teilen, ohne sie preiszugeben.

Als Beispiel für solche Verfahren kann man sich fünf Kollegen vorstellen, die herausfinden möchten, wie viel sie durchschnittlich verdienen. Allerdings will keiner von ihnen über sein Gehalt sprechen. Um den Mittelwert dennoch zu berechnen, kann jede Person sein Einkommen in eine Summe aus fünf Zahlen aufspalten und die Summanden auf jeweils einen Zettel notieren. Wie man die Addition wählt, ist dabei völlig willkürlich, etwa:  $2000 = 1500 + 1000 - 500 + 3400 - 3400$ .

Jede Person verteilt vier der Papiere an ihre Kollegen und behält einen für sich. Am Ende haben alle fünf Zettel, auf denen Zahlen stehen, die allerdings für sich genommen nichts über das Gehalt der anderen verraten. Wenn man nun aber die Werte zusammenzählt, erhält man die korrekte Summe für den Gesamtverdienst der fünf Personen. Teilt man das Ergebnis durch fünf, hat man damit das durchschnittliche Gehalt bestimmt, ohne das Einkommen der einzelnen Kollegen preiszugeben.



**MEHRPARTEIENBERECHNUNG**  
**Aus den Daten mehrerer Parteien berechnet eine Funktion  $f$  ein Ergebnis, ohne dass individuelle Informationen preisgegeben werden.**

jedem Rechenschritt ein gewisses Maß an Zufälligkeit hinzugefügt. Wenn man eine komplizierte Berechnung durchführt, die auf vielen Operationen basiert, wachsen die stochastischen Beiträge so stark an, dass die Antwort nicht mehr aussagekräftig ist.

Schließlich gelang Craig Gentry als Doktorand an der Stanford University in Kalifornien im Jahr 2009 der Durchbruch. Er entwickelte eine Methode, um die stochastischen Beiträge während einer Berechnung regelmäßig zu beseitigen. Dafür braucht man eine zweite Verschlüsselungsschicht, unter deren Schutzmantel man die Daten immer wieder entziffert. Das ist, als würde man einen weiteren Handschuhkasten außerhalb des ersten errichten, in dem sich der Edelstein befindet. So kann man den inneren Kasten bedenkenlos öffnen, solange der äußere den Inhalt noch immer verschleiert. Damit hatte der damalige Doktorand das erste praktikable FHE-Verfahren gefunden.

Die Methode funktionierte, war aber recht langsam: Berechnungen mit FHE-verschlüsselten Daten konnten millionenmal länger dauern als mit Rohdaten. Nach seiner Doktorarbeit trat Gentry eine Stelle bei IBM an, um sich weiter mit dem Problem zu beschäftigen. Im Lauf des nächsten Jahrzehnts gelang es ihm und anderen Fachleuten, das Verfahren zu beschleunigen, indem sie die zu Grunde liegenden mathematischen Ansätze verbesserten. Doch inzwischen stehe das nicht mehr im Fokus der Forschung, sagt Michael Osborne von IBM Research in Zürich.

Anstatt an den mathematischen Methoden zu basteln, konzentriere man sich nun darauf, wie man die Verschlüsselung optimalerweise für bestimmte Anwendungen einsetzt. »So erreichen wir Ergebnisse, die um Größenordnungen besser sind«, erklärt Osborne.

IBM verfügt inzwischen über eine Reihe von FHE-Werkzeugen, die künstliche Intelligenz und andere algorithmische Analysemethoden mit verschlüsselten Daten durchführen können. Die Forscherinnen und Forscher des Unternehmens haben gezeigt, dass sie mit einem künstlichen neuronalen Netzwerk, das bis zu 4000 Datensätze pro Sekunde verarbeitet, betrügerische Transaktionen in chiffrierten Kreditkartendaten erkennen können. Zudem waren sie in der Lage, auf diese Weise verschlüsselte CT-Scans von Lungen von mehr als 1500 Menschen auf Anzeichen einer Covid-19-Infektion hin zu untersuchen.

Darüber hinaus sind zahlreiche weitere Projekte mit unterschiedlichen Kunden in Arbeit. 2020 hat IBM die Ergebnisse einer Pilotstudie vorgestellt, die das Unternehmen mit der brasilianischen Bank Banco Bradesco durchgeführt hat. Die Forscher konnten zeigen, dass man mit Hilfe von maschinellem Lernen verschlüsselte Transaktionen von Bankkunden analysieren kann, um vorherzusagen, ob die Personen in der Zukunft einen Kredit aufnehmen werden. Das System war in der Lage, innerhalb von 10 Sekunden Vorhersagen für mehr als 16 500 Kunden zu treffen – und war dabei ebenso präzise wie mit unverschlüsselten Daten.

Natürlich interessieren sich auch andere Unternehmen für diese Form der Verschlüsselung. Die Informatikerin Shafi Goldwasser, Mitbegründerin des Start-ups für Datenschutztechnologie Duality, sagt, ihre Firma erreiche sogar deutlich höhere Geschwindigkeiten, indem sie den Kunden helfe, ihre Daten besser zu strukturieren und die Systeme auf ihre Probleme zuzuschneiden. Die Verschlüsselungs-technologie von Duality wurde bereits in Software des Technologieriesen Oracle integriert, um Finanzkriminalität aufzudecken.

Trotz dieser beeindruckenden Ergebnisse ist die FHE-Verschlüsselung bei den meisten Anwendungen allerdings immer noch ziemlich langsam. Im Vergleich zu Rohdaten dauert die Analyse der chiffrierten Informationen mindestens 100 000-mal länger, erklärt Rondeau. Deshalb hat die US-Behörde DARPA im Jahr 2020 ein Projekt namens Data Protection in Virtual Environments (Datenschutz in virtuellen Umgebungen) ins Leben gerufen, um maßgeschneiderte Chips zu entwickeln, die FHE effizient ausführen. Denn ein Problem bei der Verarbeitung besteht darin, dass Daten, die mit gitterbasierten Verfahren verschlüsselt sind, in ungewöhnlich großen Einheiten vorliegen.

Mehrere an dem Projekt beteiligte Forschungsteams, darunter eines unter der Leitung von Duality, suchen daher nach Möglichkeiten, um die Schaltkreise darauf anzupassen. Damit soll die Hardware diese Art von Daten effizient bearbeiten, speichern und bewegen können. Ziel ist es, dass es nur etwa zehnmal länger dauert, FHE-verschlüsselte Informationen zu analysieren, so Rondeau, der das Projekt leitet.

### Lieber selbst analysieren, als homomorph zu verschlüsseln

Doch auch, wenn es blitzschnell ginge, wäre FHE nicht fehlerfrei. Van Dijk betont, dass die kryptografische Methode mit bestimmten Arten von Analyseprogrammen schlecht funktioniert. Sobald diese beispielsweise Verzweigungslogik enthalten (»wenn jener Fall eintritt, dann mache das«), komme es zu Problemen. Der Datensicherheitsforscher Martin Albrecht von der Royal Holloway University of London gibt hingegen zu bedenken, dass man FHE in den allermeisten Situationen gar nicht brauche. Die Verschlüsselung sei nur sinnvoll, wenn man Daten zur Analyse an eine dritte Partei weitergebe. Viele routinemäßige Datenanalysen seien allerdings gar nicht so kompliziert – sie selbst durchzuführen könne manchmal einfacher sein, als sich mit FHE zu befassen.

Andere Fachleute wie de Montjoye möchten sich dagegen nicht auf eine einzige Technologie festlegen, um Daten zu schützen. Daher kombinieren sie mehrere Ansätze miteinander. De Montjoye betont, FHE sei eine großartige Ergänzung dieses Werkzeugkastens, aber kein alleiniger Gewinner. Das sehen Fellay und seine Kollegen auch so. Sie setzen ebenfalls auf unterschiedliche Methoden, um medizinische Daten gemeinsam zu nutzen.

Der Arzt hat dafür mit Informatikerinnen und Informatikern der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne zusammengearbeitet, die FHE mit einer anderen Technik zur Wahrung der Privatsphäre kombinieren, der

sicheren Mehrparteienberechnung (secure multiparty computation, kurz: MPC). Dadurch können verschiedene medizinische Einrichtungen Teile ihrer Daten so zusammenfügen, dass sich keine privaten Details von einer einzigen Partei abrufen lassen.

In einer im Oktober 2021 veröffentlichten Arbeit nutzten die Beteiligten eine Verbindung aus FHE und MPC, um die Wirksamkeit von Krebstherapien vorherzusagen und spezifische Variationen im Genom von Menschen zu ermitteln, die auf das Fortschreiten einer HIV-Infektion hindeuten. Der Versuch war so erfolgreich, dass das Team das Verfahren nun einsetzt, damit die fünf Schweizer Universitätsspitäler auf sichere Weise Patientendaten austauschen können – sowohl zur medizinischen Forschung als auch, um die Ärzte bei der Personalisierung von Behandlungen zu unterstützen. »Wir setzen die Technologie in die Praxis um«, sagt Fellay. »So können die Daten der Schweizer Krankenhäuser gemeinsam genutzt werden, um beliebige Forschungsfragen zu beantworten – natürlich sofern die dafür benötigten Daten vorhanden sind.«

Wenn Daten das neue Öl sind, dann scheint der Durst der Welt danach nicht nachzulassen. FHE könnte sich als hilfreiche Methode erweisen, um einige der wertvollsten, derzeit unzugänglichen Lagerstätten zu erschließen. Aktuell mag die geringe Verarbeitungsgeschwindigkeit ein Hindernis sein. Aber, wie Goldwasser betont, es ist wenig sinnvoll, die Technologie mit einer völlig unverschlüsselten Verarbeitung zu vergleichen: »Wenn man der Meinung ist, dass Sicherheit ein Muss ist, dann gibt es kein Argument dagegen.« ▶

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FOTOLIA / TOMASZ ZAJDA

### QUELLEN

**Froelicher, D. et al.:** Truly privacy-preserving federated analytics for precision medicine with multiparty homomorphic encryption. *Nature Communications* 12, 2021

**Gentry, D.:** A fully homomorphic encryption scheme. PhD Thesis 10.5555/1834954 Stanford University, 2009

**Masters, O. et al.:** Towards a homomorphic machine learning big data pipeline for the financial services sector. *Cryptology ePrint Archive* 1113, 2019

**Rivest, R. et al.:** On data banks and privacy homomorphisms. *Foundations of Secure Computation*, Academia Press, 1978

# MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

## DAS PROBLEM MIT DEN $10^{80}$ ÄPFELN

Eine harmlos aussehende Rechenaufgabe erfordert einen Ausflug in die Theorie der elliptischen Kurven – und die Lösungen nehmen gigantische Ausmaße an!



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

► [spektrum.de/artikel/2057475](http://spektrum.de/artikel/2057475)

► Manchmal begegnen einem merkwürdige Aufgaben im Internet: Es gibt ein Gleichungssystem zu lösen, und damit beim Betrachter nicht gleich die gefürchtete Mathephobie ausricht, stehen da Äpfel, Birnen oder sonstige sympathische Objekte für die Unbekannten statt Buchstaben wie  $x$  und  $y$ . Ganz nebenbei vermittelt diese Bildsprache die Nachricht, dass die Lösungen der Gleichungen positive ganze Zahlen sein sollen. Es handelt sich um so genannte diophantische Gleichungen, benannt nach dem antiken Mathematiker Diophantos von Alexandria, der mit seinen nur teilweise erhaltenen Werken den Grundstein für Algebra und Zahlentheorie legte.

Hinzu kommt eine »challenge« wie zum Beispiel »95 Prozent aller Menschen können diese Gleichung nicht lösen«; will sagen: Zeige doch, dass du es kannst, und beweise dir selbst, dass du zu den 5 Prozent Klügsten gehörst.

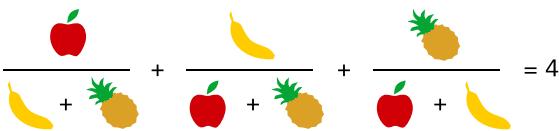
Das mag sogar ein netter Zeitvertreib sein. Man darf nur nicht den Fehler machen, auf die Aufgabe zu klicken. Dann kommt nämlich nicht die Lösung des Problems, sondern eher ein Angebot für Viagra oder eine todsichere Geldanlage, die todsicher nur deren Anbieter reich macht.

Eine solche Aufgabe, die vor etlichen Jahren durchs Internet geisterte (hier eine Nachzeichnung, da das Original nicht verfügbar ist), enthält allerdings darüber hinaus noch eine weitere Heimütcke: Sie sieht harmlos aus, ist aber geeignet, auch Fachleuten die größten Schwierigkeiten zu bereiten!



**SYMBOLISCHE  
GLEICHUNGEN mit  
Äpfeln, Birnen und  
diversem anderen Obst  
können manchmal  
selbst Fachleute in die  
Irre führen.**





Die Behauptung, 95 Prozent der Menschen könnten sie nicht bewältigen, trifft zweifellos zu. Aber die naheliegende Vermutung, die restlichen fünf Prozent seien ohne Weiteres dazu in der Lage, wäre maßlos übertrieben.

Die gute Nachricht: Es gibt einen Lösungsweg. Er verlangt nicht einmal vertiefte Kenntnisse in der Zahlentheorie, jenem Zweig der Mathematik, der sozusagen die Hauptzuständigkeit für diophantische Gleichungen hat. Vielmehr besteht die Kunst darin, das Problem so umzuformulieren, dass es eine geometrische Gestalt annimmt, und zwar in der ganz gewöhnlichen Geometrie der Ebene. Dort einen Weg zum Ziel zu finden, ist so einfach wie die entsprechende Aufgabe in der Realität, wenn man einen Stadtplan zur Verfügung hat – na ja, fast so einfach.

Den Umgang mit einem Stadtplan übt man in einer Gegend, in der man sich schon auskennt. Deshalb befassen wir uns zum Aufwärmen zunächst mit einer wohlbekannten diophantischen Gleichung:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Natürliche Zahlen  $a, b, c$ , die diese Gleichung erfüllen, bezeichnet man als pythagoreische Tripel, weil nach dem Satz des Pythagoras ein Dreieck mit derartigen Seitenlängen  $a, b$  und  $c$  rechtwinklig ist. Pythagoreische Tripel gibt es reichlich; das bekannteste ist 3, 4, 5, und zu einem solchen Tripel ein weiteres zu finden, ist nicht schwer: Es genügt, alle drei Zahlen mit derselben natürlichen Zahl  $u$  zu multiplizieren. Wenn nämlich  $a^2 + b^2 = c^2$  ist, dann gilt auch  $(ua)^2 + (ub)^2 = (uc)^2$ , denn man kann beide Seiten der alten Gleichung mit  $u^2$  multiplizieren. Gleichungen mit dieser Eigenschaft – jedes Vielfache einer Lösung ist wieder eine Lösung – bezeichnet man als homogen.

Allerdings liefert solches Multiplizieren mit einer Konstanten keine zusätzlichen Informationen. Für die antiken

Geometer, die in ein Seil Knoten gleichen Abstands knüpften, das klassische Dreieck mit den Seitenlängen 3, 4 und 5 aufspannten und so beim Feldmessen einen rechten Winkel realisierten, läuft das auf die eher belanglose Freiheit hinaus, jedes Seilstück zwischen zwei Knoten mit weiteren gleichmäßig verteilten Markierungen zu versehen. Menschen mit einer Vorliebe für Systematik neigen daher dazu, alle in diesem Sinne gleichartigen pythagoreischen Tripel in einen Topf zu werfen. Das gelingt mit einem einfachen Trick: Man dividiert die ganze Gleichung durch  $c^2$ , führt die neuen Unbekannten  $x = a/c$  und  $y = b/c$  ein und erhält  $x^2 + y^2 = 1$ . Dabei hat sich jeder gemeinsame Faktor  $u$ , der möglicherweise in der Lösung enthalten war, herausgekürzt. Die Variablen  $x$  und  $y$  sind nun allerdings nicht mehr ganzzahlig, sondern Quotienten ganzer Zahlen: rationale Zahlen.

Da wir unter Ausnutzung der Homogenität die Anzahl der Unbekannten von 3 auf 2 reduziert haben, ist das Problem jetzt in der Ebene darstellbar, und zwar ziemlich einfach. Die Menge aller Punkte, welche die Gleichung  $x^2 + y^2 = 1$  erfüllen, ist in dem üblichen Koordinatensystem der Kreis um den Nullpunkt mit Radius 1, der so genannte Einheitskreis. Es geht also darum, rationale Punkte auf dem Einheitskreis zu finden, das heißt solche, bei denen beide Koordinaten rational sind.

Dass es auf einer derartigen Kurve überhaupt rationale Punkte gibt, ist alles andere als selbstverständlich. Das zeigt die berühmteste diophantische Gleichung aller Zeiten,  $a^n + b^n = c^n$ . Der große Satz von Fermat besagt, dass die Kurve  $x^n + y^n = 1$  für  $n \geq 3$  gar keine rationalen Punkte enthält, bis auf den trivialen Fall, dass  $x$  oder  $y$  gleich null ist.

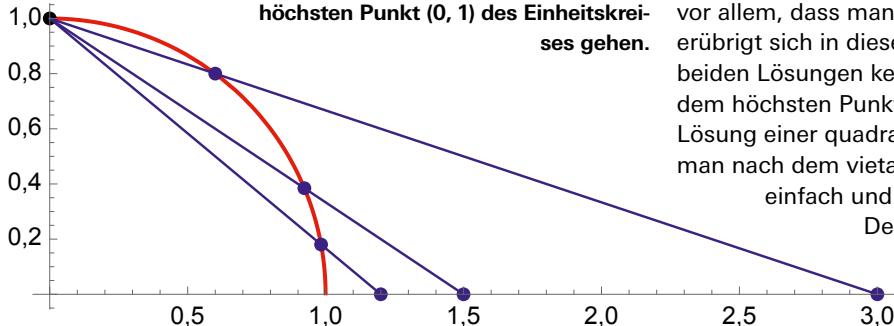
Der Fall  $n = 2$  lässt sich dagegen auf geometrischem Weg lösen. Man zieht eine Gerade durch einen rationalen Punkt  $p/q$  auf der x-Achse und den obersten Punkt  $(0, 1)$  des Einheitskreises. Der zweite Schnittpunkt der Geraden mit dem Kreis ist ein rationaler Punkt und umgekehrt, das heißt, jede Gerade durch den Punkt  $(0, 1)$  und einen rationalen Punkt des Kreises trifft die x-Achse in einem rationalen Punkt (siehe »positive rationale Zahlen«).

Wieso? Für die Gerade gilt  $y = 1 - (q/p)x$ ; zusammen mit der Gleichung  $x^2 + y^2 = 1$  für den Kreis ergibt das ein Gleichungssystem mit den beiden Unbekannten  $x$  und  $y$ . Das  $y$  ist schnell eliminiert, und es bleibt eine quadratische Gleichung für  $x$  übrig.

Nach der berüchtigten Mitternachtsformel ist damit zu rechnen, dass die Gleichung zwei Lösungen hat und vor allem, dass man eine Wurzel ziehen muss. Aber das erübrigt sich in diesem speziellen Fall, denn eine der beiden Lösungen kennen wir bereits:  $x = 0$  entsprechend dem höchsten Punkt des Kreises. Und wenn man eine Lösung einer quadratischen Gleichung hat, bekommt man nach dem vietaschen Wurzelsatz die andere sehr einfach und insbesondere ohne Wurzelziehen.

Der gesuchte Schnittpunkt hat die Koordinaten

**POSITIVE RATIONALE ZAHLEN** und positive rationale Punkte auf dem Einheitskreis lassen sich umkehrbar eindeutig aufeinander abbilden. (Da es um die Gleichung  $x^2 + y^2 = 1$  geht, bringen negative Werte für  $x$  oder  $y$  nichts Neues.) Die Abbildung wird vermittelt durch Geraden, die durch den höchsten Punkt  $(0, 1)$  des Einheitskreises gehen.



$$x = \frac{2pq}{p^2 + q^2}, \quad y = \frac{p^2 - q^2}{p^2 + q^2}$$

also sind  $x$  und  $y$  so rational wie  $p/q$  und umgekehrt.

Damit hat man eine Tabelle sämtlicher pythagoreischen Tripel in aller wünschenswerten Übersichtlichkeit gewonnen: Jede rationale Zahl größer als 1 erzeugt ein solches Tripel, und zwar ein »primitives«, das heißt das jeweils kleinste unter den unendlich vielen, die sich nur durch Multiplikation mit einer Konstanten voneinander unterscheiden. Und wenn man ein nicht primitives haben will, schreibt man den Bruch  $p/q$  nicht wie üblich vollständig gekürzt, sondern erweitert: Man multipliziert Zähler und Nenner mit demselben Faktor, was am Wert der Zahl nichts ändert.

Nach dieser Aufwärmübung sind wir gerüstet für das Problem mit den Äpfeln, Ananas und den Bananen. Als Erstes kehren wir von der Obstdarstellung zur üblichen Schreibweise zurück, indem wir Buchstaben für die Unbekannten notieren:

$$\frac{a}{b+c} + \frac{b}{c+a} + \frac{c}{a+b} = 4$$

Ein bisschen Probieren mit kleinen Werten für  $a$ ,  $b$  und  $c$  führt nicht zum Ziel. Es hilft noch nicht einmal, wenn man mit einer Kombination der drei Zahlen in der Nähe der Vier landet. Allmähliches Nachbessern einer annähernd richtigen Lösung funktioniert nicht; wir sind ja nicht in den reellen Zahlen, wo man an jeder der drei Größen nur ein bisschen wackeln kann und dadurch dem Ziel näher kommt. Ändert man eine von ihnen um 1 – weniger geht

## Eine spezielle elliptische Kurve

Das obere Bild zeigt die Menge der Lösungen der im Text genannten Polynomgleichung. Für große positive wie negative Werte von  $x$  und  $y$  nähern sich die drei Zweige der Kurven Geraden an. Ein Ausschnitt (unten) zeigt das Verhalten der Kurve in der Nähe des Nullpunkts. Das Bild ist symmetrisch bezüglich Spiegelung an der 45-Grad-Achse, was die Tatsache wiedergibt, dass man  $x$  und  $y$  vertauschen kann, ohne dass sich an der Gleichung etwas ändert.

In den üblichen Darstellungen sehen elliptische Kurven deutlich anders aus: spiegelsymmetrisch zur  $x$ -Achse, mit einem eiförmigen Zweig links und einem ins Unendliche gehenden Zweig rechts davon. Eine geeignete Transformation der Variablen würde auch die obige dreizweigige Form in die Standardgestalt überführen; für unsere Zwecke müssen wir diesen Aufwand nicht treiben.

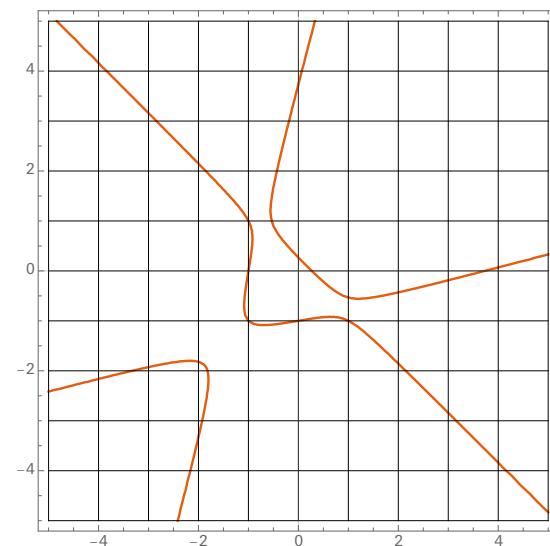
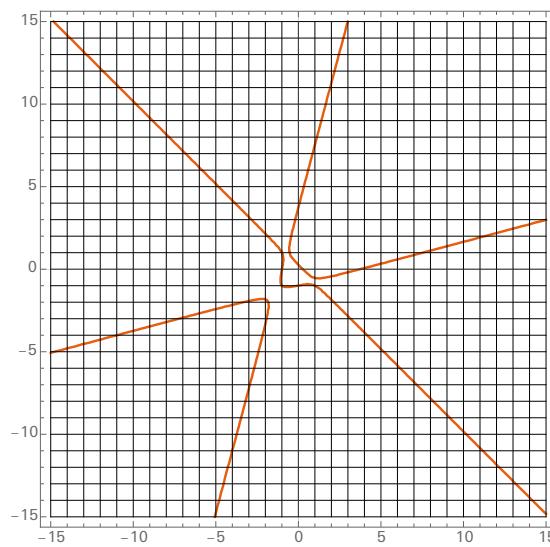
nicht –, springt das Ergebnis gleich weit weg. Es gilt also systematischer vorzugehen. In dieser Situation gibt es eine Standardumformung: Wir multiplizieren die ganze Gleichung mit dem Hauptnenner. Unbekannte im Nenner sind nämlich immer lästig, und man versucht sie möglichst loszuwerden, auch wenn die umgeformte Gleichung nicht wirklich schöner aussieht:

$$\begin{aligned} a(a+b)(a+c) + b(a+b)(b+c) + c(b+c)(a+c) \\ = 4(a+b)(a+c)(b+c) \end{aligned}$$

Immerhin kann man jetzt alle Klammern ausmultiplizieren. Dabei geht die Gleichung vorübergehend auf wie ein Hefekuchen, aber nach etwas Aufräumen sieht sie einigermaßen manierlich aus:

$$a^3 + b^3 + c^3 - 3(a^2b + a^2c + ab^2 + b^2c + ac^2 + bc^2) - 5abc = 0$$

Auch diese Gleichung ist homogen: Multipliziert man  $a$ ,  $b$  und  $c$  mit derselben Konstanten  $u$ , so läuft das nur darauf hinaus, dass obige Gleichung mit  $u^3$  multipliziert



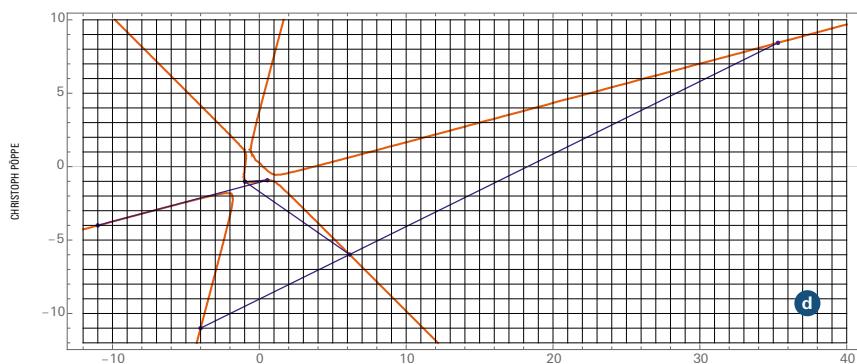
CHRISTOPH RUPPE

## Tücken der Addition auf elliptischen Kurven

Außer den Punkten  $(-11, -4)$  und  $(-4, -11)$  springen auf der elliptischen Kurve mehrere Punkte mit ganzzahligen Koordinaten ins Auge:  $(1, -1)$ ,  $(0, -1)$ ,  $(-1, -1)$ ,  $(-1, 0)$  und  $(-1, 1)$ . Abgesehen davon, dass sie negative Werte enthalten, entsprechen sie schon deshalb keinen Lösungen des ursprünglichen Problems, weil man beim Umrechnen in die Unbekannten  $a$ ,  $b$  und  $c$  durch null dividieren müsste.

Das allein macht sie allerdings noch nicht ungeeignet als Absprungpunkte für eine Hüpttour nach der im Text beschriebenen Art. Vielmehr gehen die Tangenten an jedem dieser Punkte entweder durch einen anderen der fünf Punkte oder durch gar keinen weiteren Punkt der Kurve. Für den letzten Fall definiert die Theorie einen »unendlich fernen Punkt«; der gilt als der Schnittpunkt, der sonst fehlen würde. Zu allem Überfluss ist der unendlich ferne Punkt das Nullelement der additiven Gruppe, die durch diese spezielle Verknüpfung definiert wird.

Dass eine Teilmenge von Punkten bei allen Additionen »unter sich bleibt«, kommt vor. Eine solche Teilmenge heißt Untergruppe. Die additiven Gruppen, die zu verschiedenen elliptischen Kurven gehören, haben im Allgemeinen unterschiedliche (und unterschiedlich komplizierte) Untergruppen. Vom Standpunkt der Kryptografie ist die zusätzliche Komplikation eher günstig als störend, weil sie die Analyse erschwert.

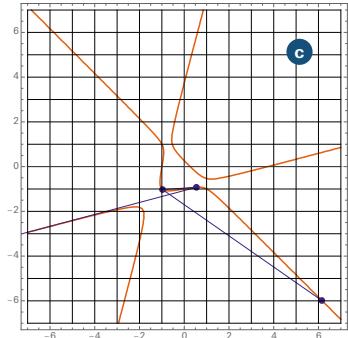
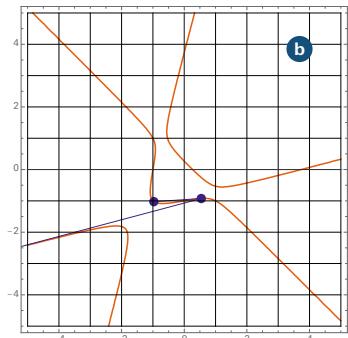
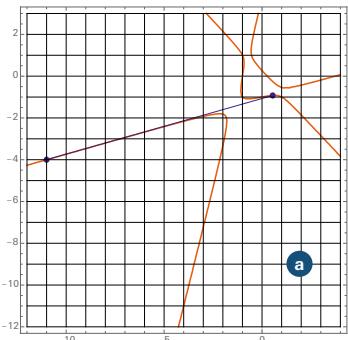


wird. Übrigens konnte man der Gleichung in ihrer Urform die Homogenität bereits ansehen: Dort würde sich die Konstante  $u$  aus allen Brüchen einfach herauskürzen.

Wie bei den pythagoreischen Tripeln schaffen wir uns jetzt eine der drei Unbekannten vom Hals, indem wir die gesamte Gleichung durch  $c^3$  dividieren und die neuen Unbekannten  $x = a/c$  und  $y = b/c$  einführen:

$$x^3 + y^3 + 1 - 3(x^2y + x^2 + xy^2 + y^2 + x + y) - 5xy = 0$$

Wir suchen also die rationalen Nullstellen eines Polynoms in  $x$  und  $y$  – einer Summe aus Potenzen von  $x$  und  $y$  mal einer Konstanten. Unser Polynom ist vom Grad 3, das heißt, die Summe aller Exponenten ist höchstens 3. In diesem Fall nennt man die Menge der Punkte  $(x, y)$ , welche die Gleichung lösen, eine elliptische Kurve, und moderne Computeralgebra-Software liefert ihre Gestalt auf Knopfdruck (siehe »Eine spezielle elliptische Kurve«).



**VIER SCHRITTE** auf dem  
Weg zu einem positiven  
rationalen Punkt.

Elliptische Kurven sind Gegenstand einer reichhaltigen Theorie. Sie waren das entscheidende Werkzeug, mit dem Andrew Wiles Fermats letzten Satz bewies; und in der Kryptografie sind sie geschätzt, weil man mit ihrer Hilfe eine »Addition« definieren kann. Das ist eine mathematische Operation, die alle Rechenregeln für eine herkömmliche Addition erfüllt, gleichzeitig aber so undurchschaubar ist, dass man mit ihrer Hilfe eine praktisch nicht umkehrbare Funktion (siehe »Spektrum« Oktober 2022, S. 62) produzieren kann. Die wiederum ist entscheidender Bestandteil klassischer Verschlüsselungssysteme.

Die Theorie elliptischer Funktionen ist eine der größeren Kanonen aus dem Arsenal der Mathematik. Für unser eher spatzengroßes Problem genügt es, wenn wir uns auf die Sache mit der Addition beschränken. Man addiert zwei Punkte einer elliptischen Kurve, indem man die Gerade durch beide zieht. Deren dritter Schnittpunkt mit der Kurve, an der Symmetrieachse der Kurve gespiegelt, ist die gesuchte Summe.

Diesen Schnittpunkt auszurechnen erfordert eigentlich die Lösung einer kubischen Gleichung, also einer solchen, in der die Unbekannte in der dritten Potenz vorkommt. Dafür gibt es Lösungsformeln nach dem Muster der Mitternachtsformel, nur viel komplizierter, mit Quadratwurzeln unter Kubikwurzeln. Aber die brauchen wir ebenso wenig anzuwenden wie oben die Mitternachtsformel. Von den drei möglichen Lösungen der Gleichung kennen wir bereits zwei, nämlich die Punkte, durch welche die Gerade definiert ist. Unter dieser Voraussetzung ist die dritte durch schlichtes Anwenden der Grundrechenarten zu finden. Dabei hilft eine Verallgemeinerung der vietaschen Wurzelsätze. Algebra-Fachleute drücken denselben Sachverhalt so aus: Ein Polynom dritten Grades, bei dem zwei Nullstellen bekannt sind, kann man durch die entsprechenden Linearfaktoren dividieren und behält eine lineare Gleichung übrig.

Daraus folgt insbesondere, dass auf elliptischen Kurven die Summe zweier rationaler Punkte wieder ein rationaler Punkt ist. Das gilt auch dann, wenn man einen Punkt zu sich selbst addiert. An Stelle der Geraden durch zwei verschiedene Punkte muss man in einem solchen Fall die Tangente an die Kurve in dem einen Punkt verwenden.

Diese geometrisch veranschaulichte Addition kommt uns nun auf der Suche nach der Lösung des ursprünglichen Problems zupass. Es geht ja nicht nur darum, irgend einen rationalen Punkt auf der elliptischen Kurve zu finden, sondern einen im rechten oberen Viertel des Diagramms: Sowohl  $x$  als auch  $y$  müssen positiv sein.

Die Idee, innerhalb des Diagramms nach rationalen Punkten zu suchen, erscheint zunächst absurd, führt aber überraschenderweise zu einem vorläufigen Erfolg. Die Kurve sieht so aus, als verlief sie präzise durch den Punkt  $(-11, -4)$  und durch dessen Spiegelbild  $(-4, -11)$ , und kurzes Nachrechnen bestätigt den Verdacht. Das liefert uns den Ausgangspunkt für eine Tour durchs Diagramm (siehe »Tücken der Addition auf elliptischen Kurven«).

Wir legen in dem Punkt  $(-11, 4)$  die Tangente an die Kurve und finden als weiteren Schnittpunkt eine Stelle auf dem mittleren Zweig, die man immerhin als etwas positiver bezeichnen könnte (siehe links, Bild a). Die Tangente an den neuen Punkt führt uns wieder etwas vom Ziel ab (siehe links, Bild b), in verdächtige Nähe des Punktes  $(-1, -1)$ , der zwar seinerseits Punkt der elliptischen Kurve, aber für unsere Zwecke nicht zu gebrauchen ist. Und durch Wiederholung des Verfahrens geraten wir sogar in tiefere  $y$ -Gefilde (siehe links, Bild c).

Aber dennoch führt uns der nächste Schritt zum Ziel. Wir ziehen die Gerade durch den neuen Punkt und den Spiegelpunkt  $(-4, -11)$ , und deren dritter Schnittpunkt mit der Kurve hat nun endlich positives  $x$  und positives  $y$  (siehe Bild d). Außerdem ist er nach Konstruktion rational. Also haben wir eine Lösung unseres Problems gefunden.

Und wie ist die in  $a$ ,  $b$  und  $c$  oder eben in Äpfeln, Ananas und Bananen auszudrücken? Na ja, etwas länglich (siehe »Sehr viele Äpfel«). Wenn man die Gleichung exakt erfüllen will, braucht man reichlich  $1,5 \cdot 10^{80}$  Äpfel, von den anderen Früchten ganz zu schweigen. Selbst wenn man jedes Atom im sichtbaren Universum in einen Apfel verwandeln könnte, würde es – nach aktuellen Schätzungen über die Anzahl der Atome – immer noch knapp. Und das ist nur die kleinste unter unendlich vielen Lösungen. Von dem Versuch, eine Lösung durch Probieren zu finden, ist abzuraten.

Wie in der Mathematik nicht anders zu erwarten, haben einige Leute über Verallgemeinerungen des Problems nachgedacht. Was passiert, wenn man die Vier auf der rechten Seite der Gleichung durch eine andere natürliche Zahl  $N$  ersetzt? Andrew Bremner von der Arizona State University und Allan Macleod von der University of the West of Scotland haben es durchgerechnet und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass der Fall  $N = 4$  unter allen denkbaren noch der einfachste ist. Für ungerade  $N$  hat das Problem überhaupt keine positiven Lösungen, ebenso wenig für manche geraden  $N$ , wobei ein System nicht erkennbar ist. Unter den Zahlen bis 200 schließt  $N = 178$  den Vogel ab: Die kleinste Lösung des Problems hat 398 605 460 Dezimalstellen. ▲

#### QUELLE

**Bremner, A., Macleod, A.:** An unusual cubic representation problem. In: Annales Mathematicae et Informaticae 43, S. 29–41, 2014

#### WEBLINKS

<https://www.quora.com/How-do-you-find-the-positive-integer-solutions-to-frac-x-y+-+frac-y-z+x+-+frac-z-x+y-4>

$1.5 \times 10^{80}$  a day keeps the doctor away | Elliptic Curves

[https://www.youtube.com/watch?v=Ct3ICfgJV\\_A](https://www.youtube.com/watch?v=Ct3ICfgJV_A)

**Richter-Gebert, J.:** Math and Memes: 95% of people cannot solve this!

<https://www.youtube.com/watch?v=3r0QHRLnORM>

## Sehr viele Äpfel

Die kleinste Lösung des Problems lautet

$$\begin{aligned} a &= 154476802108746166441951315019919837485664325669565431700026634898253202035277999 \\ b &= 36875131794129999827197811565225474825492979968971970996283137471637224634055579 \\ c &= 4373612677928697257861252602371390152816537558161613618621437993378423467772036 \end{aligned}$$



**SEEADLERKNOCHEN** An den Fundstücken aus der Neandertalerstätte Krapina haben Fachleute Schnitt- und Reibspuren entdeckt. Womöglich waren die Zehenglieder und der Fußknochen, so wie im Bild angeordnet, einst zu einer Kette oder Rassel zusammengebunden.

# NEANDERTALER MENSCHEN WIE WIR

**Primitiv und grobschlächtig seien sie gewesen:  
So lautete lange die Lehrmeinung über Neandertaler.  
Inzwischen ist diese These nicht mehr haltbar.  
Vor allem Überreste aus Kroatien zeigen, dass die  
Frühmenschen mehr mit *Homo sapiens* gemeinsam  
hatten als bisher angenommen.**



Die Anthropologen **David W. Frayer**, Emeritus der University of Kansas in Lawrence, und **Davorka Radović**, leitende Kuratorin der Krapina-Neandertaler-Sammlung des Kroatischen Naturkundemuseums in Zagreb, forschen über das Verhalten von Neandertalern und anderen Frühmenschenformen.

► [spektrum.de/artikel/2057463](http://spektrum.de/artikel/2057463)

## AUF EINEN BLICK EBENBÜRTIGE KOGNITION

- 1** Am Fundplatz Krapina in Kroatien wurden hunderte Knochen und Artefakte der Neandertaler freigelegt. Die Stücke sind zirka 130 000 Jahre alt.
- 2** Einige Funde legen nahe, dass die Neandertaler kognitiv ebenso fortgeschritten waren wie anatomisch moderne Menschen, ein ästhetisches Empfinden besaßen und Dinge mit einer symbolischen Bedeutung belegten.
- 3** Auch gibt es anatomische Merkmale, die beide Menschenformen gemeinsam haben. Die Neandertaler dürften wohl ebenfalls über die Fähigkeit zu sprechen verfügt haben.

► Schimpft jemand einen Mitmenschen »Neandertaler«, weiß jeder, was gemeint ist: Der Betreffende sei primitiv, dumm und grobschlächtig. Mag diese Menschenform vor 350 000 bis 30 000 Jahren Eurasien bevölkert und den Unbilden der Kaltzeiten getrotzt haben – dem *Homo sapiens* seien sie dennoch weit unterlegen gewesen. So lautete lange die Lehrmeinung. Längst entlarven zahlreiche Studien solche Thesen als falsch. Wie Fundstellen in Eurasien bezeugen, erfanden auch Neandertaler neue Technologien, nutzten komplexe Strategien zur Wildbeuterei und waren fähig, Objekte mit symbolischen Bedeutungen zu belegen.

Davon sind indes nicht alle Forscher überzeugt. Die Frühmenschen hätten das fortschrittliche Verhalten und neue Technologien nicht selbst entwickelt, sondern von ihren Vetttern, den anatomisch modernen Menschen, übernommen. An den Funden aus Krapina im Nordwesten Kroatiens können wir jedoch zeigen, dass diese Vermutung nicht stimmt. Die Neandertaler haben die genannten Leistungen eigenständig erbracht – zehntausende Jahre bevor der moderne Mensch in diese Region kam.

#### Eine affenähnliche Kreatur, dem Menschen unähnlich?

Ihren schlechten Ruf verdanken die Neandertaler ausgegerechnet ihrem Namensgeber, dem britischen Geologen William King (1809–1886). Er hatte einen 1856 im Neandertal unweit von Düsseldorf entdeckten Schädel untersucht – genauer gesagt eine Abformung desselben – und anhand von Vergleichen erkannt, dass es sich um eine eigenständige Vormenschenart handelte, die er nach dem Fundort *Homo neanderthalensis* benannte. Wenig schmeichelhaft kommentierte er den mit Augenbrauenwülsten und fliehender Stirn ausgestatteten Kopf so: »Die Gedanken und Begierden, die ihm einst innewohnten, gingen nie über die eines Viehs hinaus.«

Der französische Anatom Marcellin Boule (1861–1942) hieb in die gleiche Kerbe, als er ein 1908 in La Chapelle-aux-

Saints entdecktes Skelett eines Neandertalers als affenähnliche Kreatur rekonstruierte, die mit dem modernen Menschen offenbar wenig gemein hatte. Seitdem läuft in der Paläoanthropologie eine Diskussion darüber, wie ähnlich sich die beiden Menschenformen waren. Wie stark entsprachen sich Anatomie und Verhalten?

Lange Zeit fanden Wissenschaftler vor allem Belege, die große Unterschiede bezeugen würden. So hätten die Neandertaler zehntausende Jahre lang dieselben Werkzeugtypen benutzt, während *Homo sapiens* eine Vielzahl von Geräten und Hilfsmitteln erfand, die raffiniert verschiedene Rohstoffe kombinierten und mehrere Arbeitsschritte erforderten. Ferner: Ernährten sich die Neandertaler vor allem durch die Jagd auf Großwild, nutzten moderne Menschen ideenreich, was immer ihnen die Natur an Nahrung bot. Und schließlich hinterließen Letztere sogar grandiose Kunstwerke als Belege höher entwickelter kognitiver Fähigkeiten, von beeindruckenden Höhlenmalereien bis zu Skulpturen aus Knochen und Elfenbein.

In den vergangenen Jahren haben Forschende solche Thesen endgültig als Klischees offenbart. Der Paläoanthropologe Bruce Hardy vom Kenyon College in Gambier in Ohio und seine Kollegen haben 2020 unter dem Abri du Maras in Frankreich Reste eines verdrillten Fadens gefunden. Demnach verstanden die Neandertaler, Bast von Nadelbäumen zu Garn zu verarbeiten. Die Archäologin Marie Soressi und ihre Mitarbeiter an der Universität Leiden berichteten 2013 über vier spezielle Knochenwerkzeuge aus dem Abri Peyrony und aus Pech de l’Azé, zwei vor etwa 50 000 Jahren von Neandertalern aufgesuchten Felsüberhängen in der heutigen Dordogne in Frankreich. Die Werkzeuge gleichen so genannten Lissoirs oder Glättern. Dabei handelt es sich um an einem Ende abgeflachte Rippenstücke, mit denen sich Tierhaut bearbeiten und verdichten ließ. Zudem war die Ernährung der Neandertaler mitnichten bloß von Fleisch geprägt. Der an der Universität Barcelona tätige Paläoanthropologe João Zilhão und sein Team haben

**FUNDSTELLE** Archäologen begannen 1899 unter dem Felsdach von Krapina zu graben. Neandertaler hatten dort vor 130 000 Jahren gelebt.



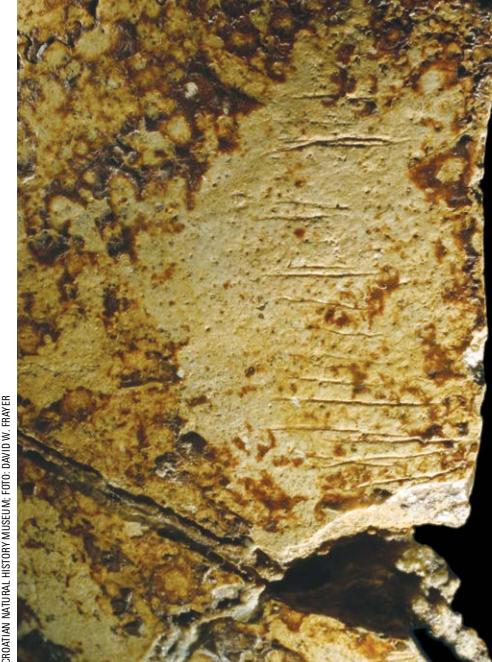


**STRICHMUSTER** Der fragmentierte Schädel, der in der jüngsten Kulturschicht von Krapina zu Tage kam, weist parallele Ritzungen auf der Stirn auf. Vielleicht hatten die regelmäßig angeordneten Linien eine spezielle Bedeutung für die Neandertaler.

2020 nachgewiesen, dass Neandertaler in Figueira Brava in Portugal und an anderen Küstenstandorten Muscheln, Krebse, Haie und Robben aßen. Anderorts in Europa verzehrten sie ebenfalls eine Vielzahl von Pflanzen und Pilzen.

Neandertaler verfügten nicht nur über Technologien und Ernährungsstrategien, die man ihnen bislang nicht zutraute, sondern zeigten auch symbolisches Verhalten. Dieser Fachbegriff beschreibt die Fähigkeit, Symbole zu verwenden oder darauf zu reagieren. Ein Symbol trägt eine Bedeutung, die über einen unmittelbaren Nutzen hinausweist und beispielsweise dazu geeignet ist, die Kommunikation in Gemeinschaften zu organisieren und die Lebenswelt fassbar zu machen. Natürlich lassen sich aus schriftlosen Epochen nur indirekte Hinweise auf symbolisches Verhalten finden. So entdeckte der italienische Prähistoriker Marco Peresani von der Universität Ferrara etwa Schnittspuren auf den Knochen von Vogelflügeln, die aus der Fumane-Höhle in Italien stammen. Er wertete die Kerben als Indiz dafür, dass die Frühmenschen Federn abtrennten und sammelten, womöglich um sie als Körperschmuck zu verwenden. Ein weiteres Beispiel: Im Boden der Gorham-Höhle im Küstengebirge Gibraltars stieß der Paläontologe Clive Finlayson von der dortigen Universität auf eine eingeritzte Zeichnung, die einem Doppelkreuz ähnelt. Und in der Einhornhöhle im Harz fand Prähistoriker Dirk Leder vom Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege 2021 einen rund 51000 Jahre alten Zehenknochen eines Riesenhirsches, in den ein geometrisches Muster geschnitten wurde.

Forschende haben also bereits zahlreiche Beispiele für das kreative Verhalten der Neandertaler dokumentiert. Oft stammen solche Funde aber aus einer Zeit, in der *Homo sapiens* begann, nach Europa einzuwandern. Demnach wären die Stücke nicht zwangsläufig eine Eigenleistung



der Neandertaler gewesen, sondern die Frühmenschen könnten Objekte nachgeahmt, eingetauscht oder erbeutet haben. Mitunter lässt sich nicht ausschließen, dass Artefakte des modernen Menschen und Überreste von Neandertalern vermischt wurden. An Fundplätzen etwa, die in vergleichsweise kurzen Zeitabständen nacheinander von beiden Menschenformen bewohnt wurden, könnten natürliche Störungen wie fließendes Wasser oder grabende Tiere die Abfolge der Bodenschichten durcheinandergebracht haben.

Was bisher also fehlte, waren Belege für das fortschrittliche Denken der Neandertaler lange Zeit, bevor *Homo sapiens* vor rund 45000 Jahren nach Europa gelangt war. Unweit der kroatischen Stadt Krapina untersuchen wir genau solch einen Fundort: einen Abri, der Neandertalern vor zirka 130000 Jahren als Lagerplatz diente.

### Der Schmuck der Neandertaler

Von 1899 bis 1905 leitete der kroatische Paläontologe Dragutin Gorjanović-Kramberger (1856–1936) dort die ersten systematischen Ausgrabungen. Er sammelte etwa 900 Knochen und fast 200 Zähne von Neandertalern, dazu Tausende von Tierknochen und Steinwerkzeugen. Ungewöhnlich für seine Zeit grub er schichtweise aus: Er hob eine Sedimentlage nach der anderen aus und entnahm jeweils die darin liegenden Knochen und Artefakte. Zudem bewahrte er die meisten Fundstücke auf. 1906 veröffentlichte Gorjanović-Kramberger eine umfassende Publikation aller Funde. Bis heute ist Krapina eine der ergiebigsten Fundstellen der Neandertaler in Europa, wie es tausende Publikationen seit 1899 dokumentieren.

Unsere jüngsten Forschungen haben nun neue Einsichten in das Leben der Neandertaler in Krapina vor 130 000 Jahren geliefert. 2013 analysierte eine von uns, Davorka Radovčić, erneut sämtliche Funde. Dabei fielen ihr acht Zehenglieder und ein Fußknochen von Seeadlern (*Haliaëetus albicilla*) auf, deren Bedeutung bislang nicht erkannt wurde. Sie lagen in der obersten Fundschicht – zwischen Knochen von Höhlenbären, Werkzeugen von Neandertalern und dem Stück eines Kinderschädels; es gab zudem mindestens eine Herdstelle in dieser Schicht. Es kamen dort jedoch weder Überreste noch



**SCHÖNER BROCKEN** Neandertaler brachten diesen Stein in ihr Lager in Krapina – vielleicht, weil sie die sternförmigen Einschlüsse ästhetisch ansprechend fanden.

Werkzeuge des modernen Menschen zu Tage. Was auch immer Gorjanović-Kramberger ausgegraben hatte, es war ohne Einfluss des *Homo sapiens* entstanden.

Bei den Zehengliedern der Adler handelt es sich um die Knochenteile, an denen die Krallen ansetzten. Angesichts der Schnittspuren müssen die Neandertaler die Vogelfüße bearbeitet haben. An einem Exemplar haftete noch die Faser einer Sehne, die unter einer mineralischen Kruste erhalten geblieben war – sie dürfte also nicht in jüngerer Zeit an den Zehenknochen gelangt sein. In den Poren der Oberfläche steckten zudem mikroskopisch kleine rote und gelbe Ockerreste; offenbar waren die Krallen bemalt gewesen. Die Ränder der Schnittspuren waren häufig abgerieben, was uns vermuten lässt, dass die Stücke einst zusammengebunden waren. Sehr wahrscheinlich diente dazu die Sehne. Die Kerben – in einer verlief die Sehne – stützen diese Hypothese: Jemand hatte die Krallen zu einer Halskette, einem Armband oder einer Rassel aufgereiht.

#### **Symbolisches Verhalten lange vor *Homo sapiens***

Der anatomischen Lage im Vogelkörper zufolge stammten die Krallen und das Fußglied von mindestens drei verschiedenen Tieren. Nicht anders als heute waren Seeadler in der Altsteinzeit die größten Raubtiere der Lüfte. Und auch damals waren sie sicher ein seltener und erhabener Anblick, aber wohl keine leichte Beute. Ein Zufall ist diese Fundhäufung also kaum, zumal an anderen Neandertaler-Lagerplätzen allenfalls einzelne Krallen auftauchten, wo sie vermutlich ebenso als Anhänger getragen wurden. Es erscheint daher plausibel anzunehmen, dass die Krapina-Neandertaler die Adler gezielt jagten, um deren Krallen zu erbeuten und als eine Art Schmuck zu tragen. Sie belegen symbolisches Verhalten Zehntausende von Jahren vor der Begegnung mit *Homo sapiens*.

Es gibt weitere Zeugnisse dieser Art. Radovčić fiel bei der Inventarisierung der Krapina-Sammlung ein bisher unbeachteter Steinbrocken mit sternförmigen Einschlüssen auf. Es handelt sich um ein Stück aus so genanntem Mudstone, einem Gestein, das in der Mittleren Trias vor etwa 240 Millionen Jahren aus sehr feinkörnigen Ablagerungen von Ton und Schluff entstand. Das Feldsach von Krapina besteht aus Sandstein. Mudstone kommt jedoch in der Nähe des Lagerplatzes vor. Die Neandertaler dürften den Brocken also aufgesammelt und in den Abri gebracht haben. Mit einer Größe von 9,2 mal 6,6 Zentimetern und einer maximalen Dicke von 1,7 Zentimetern passt er gut in eine Hand. Da seine Oberfläche weder Anzeichen einer Bearbeitung noch Gebrauchsspuren aufweist, diente er wohl nicht als Werkzeug.

Auffällig sind die dendritischen, pflanzenähnlichen Strukturen, vor allem wenn das Stück nass ist und sich die schwarzen Linien deutlich vom braunen Untergrund abzeichnen. Dass jemand diesen Stein bei einem Streifzug entdeckte, mitnahm und aufbewahrte, spricht dafür, dass Neandertaler ein Auge für ästhetisch ansprechende Objekte hatten und ihnen Bedeutung beimaßen.

Einen weiteren Beweis für symbolisches Verhalten liefert der Schädelfund Krapina 3. Auf Grund der Größe und der vergleichsweise zierlichen Form dürfte es sich um den Schädel einer Neandertalerin handeln. Auf der Stirn befinden sich 35 parallele Ritzlinien. Da die Schnitte nicht verheilt sind, müssen sie nach dem Tod in den Knochen gekratzt worden sein. In Krapina fanden sich weitere Gebeine, die ebenfalls Schnittspuren aufweisen. Sie wurden wohl entbeint – bisweilen zitieren Forscher sie als Belege für Kannibalismus. Doch im Fall von Krapina 3 ist diese Vermutung ausgeschlossen. Die Ritzlinien sind regelmäßig nebeneinander angeordnet, sie verlaufen nicht kreuz und quer wie an den anderen Fund-

stückchen. Selbst Tiere hinterlassen dergleichen nicht. Könnten es indes Spuren sein, die infolge der Grabungen entstanden? Wenn Anthropologen Knochen mit einer Schieblehre vermessen, hinterlässt das Werkzeug manchmal kleine Kratzer. Aber keine der anthropologischen Standardprozeduren bei Schädeln betreffen diesen Teil der Stirn. Vor allem: Die Vertiefungen sind mit Sediment aus dem Abri gefüllt und mit Konservierungslack bedeckt, den Gelehrte früher auf die Knochen pinselten. Das alles deutet stark darauf hin, dass ein Neandertaler die Kerben zugefügt hatte.

Ähnliche Ritzungen kennen Wissenschaftler von anderen Fundplätzen der Neandertaler. In diesen Fällen waren es jedoch ausschließlich Langknochen von Tieren. Krapina 3 ist somit einzigartig. Vielleicht hatten Neandertaler die Überreste eines geliebten Mitmenschen zeremoniell verzerrt, vielleicht wurde etwas mit Hilfe der Linien abgezählt oder vielleicht ist es einfach Gekritzeln. Was auch immer der Sinn jener Schnittspuren, der Adlerkrallen und des gemusterten Steins gewesen sein mochte, die Neandertaler schrieben diesen Objekten vor 130 000 Jahren eine Bedeutung zu – ungefähr 90 000 Jahre bevor der moderne Mensch den Balkan erreichte.

Ein symbolisches Verhalten, das als Merkmal des modernen Menschen und als Grund seines Erfolgs als Spezies gilt, ist die Sprache. Haben die Neandertaler ebenfalls miteinander gesprochen? Diese Frage beschäftigt Forschende schon lange. Vor allem fossile Überreste liefern dazu aufschlussreiche Hinweise. So auch die Krapina-Funde. Wir untersuchten, ob die Neandertaler für ihre Tätigkeiten vorwiegend eine Hand nutzten. Händigkeit ist ein typisches Merkmal für anatomisch moderne Menschen. Und in jeder Gesellschaft der Gegenwart gibt es bei Weitem mehr Rechts- als Linkshänder – neun von zehn Menschen sind Rechtshänder. Die Händigkeit spiegelt die funktionelle Asymmetrie der Hirnhemisphären wider. Soll heißen, jede Hälfte ist auf unterschiedliche Aufgaben spezialisiert. Die Lateralisation des Gehirns steht zudem mit der Fähigkeit in Verbindung zu sprechen. Bei anderen Primaten gibt es die Lateralisation auch – unterschiedlich stark ausgeprägt –, allerdings ist nur *Homo sapiens* so häufig rechtshändig veranlagt.

Um nun festzustellen, ob bei den Neandertalern von Krapina eine Händigkeit vorlag, suchten wir mit Licht- und Rasterelektronenmikroskopen nach Kratzern im Zahnschmelz von ihren Schneide- und Eckzähnen. Solche Rillen fanden wir an den Außenseiten der Zähne, also an der Seite, die die Lippen berührte. Die winzigen Schäden im Schmelz entstanden, wenn die Neandertaler unabsichtlich mit einem Steinwerkzeug gegen ihr Gebiss schlugen, etwa während sie ein Fell bearbeiteten. Dann nutzten sie ihre Zähne als dritte Hand, um die Tierhaut zu fixieren. Wurde das Werkzeug über das Fell geführt, traf es mitunter einen Zahn und hinterließ einen rechtwinkligen Kratzer. Je nachdem, welche Hand dabei aktiv war, zeigt der Winkel in eine andere Richtung. In Krapina identifizierten wir neun Rechts- und zwei Linkshänder. Als wir unsere Stichprobe um Neandertaler anderer europäischer Fundorte erweiterten, ergab sich das von *Homo sapiens* bekannte Neun-zu-eins-Muster. Das überrascht allerdings nicht, denn diese ausgeprägte

Dominanz der Rechtshändigkeit ließ sich bereits bei früheren, noch in Afrika lebenden Vertretern der Gattung *Homo* nachweisen. Offenbar ist die Lateralisation des Gehirns ein sehr altes Merkmal bei Vor- und Frühmenschen – und damit vielleicht auch die Sprache.

Eine weitere anatomische Besonderheit, welche die Neandertaler von Krapina und moderne Menschen gemeinsam haben, sind zwei Knochenöffnungen an der Innenseite des Unterkiefers, der so genannte Foramen mandibulae. Hierdurch verläuft der Unterkiefernerv, der die Zähne, das Zahnfleisch und das Kinn ansteuert. Bei modernen Menschen ist dieses Foramen im oberen Teil meist wie ein »V« geformt. Bei den meisten bekannten Neandertalerfossilien bedeckt ein knöcherner Steg die Öffnung; man spricht vom horizontal-ovalen Foramen. Doch nicht so in Krapina: Nur vier der neun Unterkiefer, die in diesem Bereich vollständig sind, entsprechen dem Muster, fünf hatten ein V-förmiges Foramen.

### Neandertaler waren wohl auch nur Menschen

Wir entdeckten an den Skeletten von Krapina noch weitere Ähnlichkeiten mit *Homo sapiens*, obgleich die Menschenformen einander dort nie begegnet sind. Zusammen mit Kollegen aus England und Italien haben wir Babyzähne mit Synchrotronstrahlung abgetastet, die unter die Oberfläche eines Zahns blicken lässt. Damit konnten wir die Schmelzbildung und die Wachstumsraten der Zähne ermitteln. Der moderne Mensch ist unter den lebenden Primaten einzigartig, da seine Nachkommen langsam heranwachsen, was dem Gehirn Zeit gibt, sich zu entwickeln. Bei Neandertalerkindern bildete sich der Zahnschmelz offenbar etwas schneller, sie wuchsen womöglich ein wenig rascher. Der Unterschied war gleichwohl gering. Die Wachstumsrate der Neandertaler lag damit im »modernen« Bereich.

Zweifellos besaßen die Vetter des *Homo sapiens* eine ihnen eigene Morphologie, wahrscheinlich gab es jedoch auch viele Variationen, die innerhalb dieser Menschenform weitergegeben wurden und die äußereren Unterschiede nivellierten. Angesichts der wohl nicht mehr bestreitbaren kognitiven Ähnlichkeiten dürften sich *Homo sapiens* und Neandertaler bei zufälligen Begegnungen einfach nur als Menschen gesehen haben. Dass wir in unserem Erbgut Gene des Neandertalers tragen, wissen Molekularbiologen schon seit einigen Jahren. Diese Frühmenschen waren zwar nicht exakt so wie wir. Aber wir haben sehr viel mit ihnen gemeinsam. ▲

### QUELLEN

**Frayer, D. W. et al.:** Krapina and the case for Neandertal symbolic behavior. Current Anthropology 61, 2020

**Leder, D. et al.:** A 51,000-year-old engraved bone reveals Neanderthals. Nature Ecology and Evolution 5, 2021

**Mahoney, P. et al.:** Growth of Neanderthal infants from Krapina (120–130 ka), Croatia. Proceedings of the Royal Society B 288, 2021

**Radovčić, D. et al.:** An interesting rock from Krapina. Comptes Rendus Palevol 15, 2016

**Radovčić, D. et al.:** Surface analysis of an eagle talon from Krapina. Scientific Reports 10, 2020

# REZENSIONEN

## MEERESBIOLOGIE SCHÖNSTE SEEWESEN MEISTERHAFT EINGEFANGEN

Der Fotograf David Liittschwager porträtiert Meerestiere auf einzigartige Art: von Seepferdchenbabys über nachdenkliche Kraken hin zu ästhetischen Quallen.

► An der Ostsee fordern Kinder oft zu Mutproben auf: Wer traut sich mit dem Finger in die wabbelige Masse von angeschwemmten, »ekeligen« Quallen zu piksen? Oder sie gar aufzugebeln, um andere damit zu erschrecken? Was da so leblos am Strand herumliegt und wie gallertartige Fladen aussieht, entpuppt sich unter Wasser als wahre Schönheit.

Seepferdchen als stolze Wunderwesen, sich im Liebesspiel umarmend, nachdenklich erscheinende Kraken in akrobatischen Verrenkungen oder Quallen mit blau-grün leuchtender Biolumineszenz: David Liittschwager erschafft mit seinen Fotografien erstaunliche Meisterwerke, wenn er die Meereswesen auf so atemberaubende Weise ablichtet, dass das Ergebnis in Kunstgalerien hängen könnte.

Wie es dem Fotografen gelingt, die Tiere in so außergewöhnlicher Porträtkunst vor weißem Hintergrund zu präsentieren – dazu verrät Liittschwager nur wenig. Die Objekte studiert er zuerst in Tauchgängen im Meer, die Aufnahmen stammen aber aus Aquarien, die er rund um die Welt besucht. Dabei schleppt er stets seine Ausrüstung von 225 Kilogramm mit sich herum, verpackt in zwölf Koffern. Das scheint sich zu lohnen, denn er fängt damit nicht nur die ungeahnte Schönheit der Tiere ein, sondern auch überraschende Situationen. Einmal drückt er exakt bei der Geburt von Seepferdchenbabys auf den Auslöser: Hunderte von Winzlingen, die aus dem dicken Bauch des Männchens quellen. Quallen werden bei ihm zu hauchzarten, schwebenden Wesen. Kraken erscheinen als Kunstobjekte, wenn sie ohne störendes Skelett ihre Tentakel verwinden oder sie schützend um winzige

Tintenfischeier legen, in denen sich das neue Leben schon erahnen lässt.

Das Buch verändert unseren Blick auf die oft verpönten Meerestiere. Es sind eben keine ekeligen Glibberwesen, keine mit Tentakeln um sich greifenden gefährlichen Kraken. Es sind Tiere, deren Intelligenz sich völlig anders darstellt als beim Menschen. Wie ihre Gehirne, die in den Saugnäpfen sitzen, funktionieren und warum die gängigen Intelligenzkriterien hierbei nichts aussagen, erklären die Texterinnen des Buchs.

Zu jeder der drei Spezies liefern Elizabeth Kolbert, Jennifer Holland oder Olivia Judson etliche Informationen und spannend erzählte Geschichten, die lesenswert geschrieben sind. Sie schildern auch, wie es Quallen



DAVID LIITTSCHWAGER AUS LIITTSCHWAGER, D., KOLBERT, E., HOLLAND, J., JUDSON, O.: DAS GEHEIME LEBEN VON OCTOPUS, SEEPFERDCHEN UND QUALLE. MITPROL. VERL. VON NATIONAL GEOGRAPHIC.

D. Liittschwager,  
E. Kolbert, J. Holland, O. Judson

**DAS GEHEIME  
LEBEN VON  
OKTOPUS, SEE-  
PFERDCHEN UND  
QUALLE**

National Geographic,  
München 2022  
256 S., €36,99



**SCHLAUE ACHT-  
FÜSSER** Tatsächlich  
sind Kraken die intelli-  
gentesten Weichtiere.  
Ihre Intelligenz wird  
mit der von Ratten  
verglichen.

schaffen, nicht zu sterben, oder wie sie ohne Gehirn Sinnesreize verarbeiten können.

Liittschwager beschwört das einzigartige und wundersame Leben im Meer mit Fotos, indem er Wissenschaft und Kunst verbindet – so wie es einst Rachel Carson in ihren Meeresbüchern mit Worten gelang. Sie hat ebenfalls Poesie mit Wissenschaft kombiniert, als sie beschrieb, wie tausende bleiche Mondquallen (*Aurelia*) schlängelnde Linien im Wasser erzeugen oder sich Quallen der Gattung *Cyanea*, die nur Fingerhutgröße haben, im Mittsommer rhythmisch pulsierend bewegen.

Beide Quallenarten finden sich in diesem Buch wieder. Auf einer Infografik ist auch die regenschirmgroße Gelbe Haarquelle zu sehen, die mit ihren Nesselfäden mehr als 36 Meter lang werden kann. Doch damit ist sie nicht die größte. Die rund doppelt so große Nomura-Qualle kommt an der Küste Japans vor, mit einem Gewicht von 200 Kilogramm – fast so viel wie das Reisegepäck von Liittschwager.

Gebratene Kraken, Pulpo-Salat oder getrocknete Seepferdchen gegen Impotenz: Die Tiere stehen schon lange auf unserem Speiseplan. In letzter Zeit tauchen jedoch immer exotischere Rezeptvorschläge auf, etwa Quallen mit Gurkensalat. Mögen die schönen Fotos von Liittschwager doch wenigstens diese Wesen vor unserer Konsumsucht verschonen.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

# REZENSIONEN

## DIGITALISIERUNG EINEN KLAREN KOPF BEHALTEN

**Angesichts der Ausbreitung digitaler Maschinen sagen manche Schwarzseher ein baldiges Ende der Menschheit voraus. Andere erhoffen sich einen Evolutionsprung, der Menschen zu Göttern macht.**

► Als Vorsitzender des Rats der Evangelischen Kirche in Deutschland prägte Bischof Wolfgang Huber jahrelang das Gesicht seiner Religion in der Öffentlichkeit: eher undogmatisch, konziliant und – in einem etwas vagen Sinn – zeikritisch. Mit der vorliegenden Schrift skizziert der Theologe Umrisse einer »Ethik der Digitalisierung«.

Eingangs konstatiert er: »Wir leben in einer Zeitenwende.« Es folgt eine wohlinformierte, kompakte Zusammenschau der vielfältigen Effekte, die Computer, Smartphones und das Internet auf unser Leben ausüben. Huber diagnostiziert eine drohende Spaltung der Gesellschaft in computertechnisch Vermögende und digitale Habenichtse. Er hebt die Paradoxie hervor, dass wir einerseits allergisch auf die staatliche Bedrohung der informationellen Selbstbestimmung reagieren, andererseits persönlichen Daten bereitwillig Tech-Großkonzerne schenken.

Als moralische Richtschnur für die unübersichtliche Zeitenwende zitiert der Autor das »Prinzip Verantwortung«, das der Philosoph Hans Jonas anno 1979 im gleichnamigen Buch formuliert hat: »Handle so, dass die Folgen deines Handelns vereinbar sind mit der Permanenz echten menschli-

chen Lebens auf Erden.« Diese Maxime möchte Huber nicht nur wie sonst üblich auf die aktuelle Umweltkrise angewandt wissen, sondern auch auf das individuelle und politische Agieren angesichts der computertechnischen Umwälzungen.

Was bedeutet digitale Verantwortung für den Erziehungssektor, die Arbeitswelt, den Umgang mit einer unübersichtlichen Vielfalt an fragwürdigen Informationen? Hierzu stellt Huber Forderungen auf, die sehr vernünftig, aber auch wenig überraschend anmuten. Insgesamt vermitteln sie den Eindruck, dass es eine komplizierte Aufgabe ist, die Chancen der neuen Techniken zu nutzen, ohne an ihren Risiken zu scheitern.



Dabei warnt der Autor davor, den Kopf zu verlieren. Man solle Computer nicht ohne Weiteres menschliche oder gar übermenschliche Fähigkeiten zuschreiben. Die künstliche Intelligenz sei zwar ungeheuer flink im Lösen vorgegebener Aufgaben, könne sich aber in puncto Selbstverständnis und Kreativität nicht mit menschlichen Gaben messen.

Er hält insbesondere nichts davon, lernfähigen Maschinen Autonomie zuzugestehen, sondern will diesen Begriff für menschliche Subjekte reserviert wissen. Vermehrt automatische Drohnen oder Fahrzeuge, so Huber, bleiben, selbst wenn sie befähigt werden, ihre Leistung sukzessive zu verbessern, doch bloß Automaten.

In diesem Punkt hat er wohl nur vorläufig Recht. Künstliche neuronale Netze liefern schon heute Problemlösungen, deren Zustandekommen quasi

ihr Geheimnis bleibt. Es ist oft für Menschen gar nicht so einfach, die Vorgänge in einer derartigen Black Box nachzuvozziehen. Wenn wir neuerdings bereit sind, selbst niederen Tieren Leidensfähigkeit und eine Art Innenleben zuzugestehen, ist vielleicht der Tag nicht fern, an dem eine spezielle Verantwortungsethik für selbstständig agierende digitale Sklaven und elektronische Rechenknechte diskutiert werden muss.

Doch so weit will Huber nicht gehen. Er erörtert die digitale Ethik ausschließlich unter dem Aspekt, was der alltägliche Umgang mit komplexen Maschinen für das Menschenbild bedeutet. Die Frage beantwortet er als Christ: Er lehnt Utopien ab, die quasi Gott Konkurrenz machen, indem sie dem Menschen Unsterblichkeit oder andere übermenschliche Fähigkeiten verheißen. Weder die »Singularity« à la Ray Kurzweil – ein angeblich bevorstehender Übergang der Menschheit in einen digitalen Transhumanismus – noch der »Homo deus« aus dem gleichnamigen Buch des Historikers Yuval Noah Harari sind für Huber plausible Optionen.

Man muss kein religiöser Mensch sein, um dem Autor in diesem Punkt zuzustimmen. Mit Recht hält er wenig von Kurzweils abstrusen Ideen, aber auch von Hararis populärer Prognose baldiger gottgleicher Allmacht. Die Auseinandersetzung mit Hararis Thesen, welche in mehreren Bestsellern enorme Breitenwirkung entfaltet haben, ist eine Stärke des Buchs. Huber führt politische, technologische und theologische Argumente ins Treffen, die Harari am Ende nicht viel besser aussehen lassen als Kurzweil.

Inmitten der digitalen Zeitenwende gilt es, einen klaren Kopf zu behalten: Die Computer werden uns Menschen weder komplett ersetzen noch zu Göttern machen; da hat Huber wohl Recht. Eine andere Frage ist, ob er die künftigen Fähigkeiten selbsttätig agierender Maschinen nicht unterschätzt.

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

**Künstliche Intelligenz wird uns weder komplett ersetzen noch zu Göttern machen**

## KULTUR GESCHICHTE DES LESENS

**In »Papyrus« geht es um mehr als nur um Bücher. Das Werk eröffnet ein völlig neues Verständnis von der Bedeutung des Lesens.**

► Das Buch sei eine der schönsten Erfindungen der Menschheit, so der Klappentext von »Papyrus«. Doch im Werk der spanischen Literaturwissenschaftlerin Irene Vallejo geht es um viel mehr als nur um Bücher: Es dreht sich um die Frage, wann der Mensch zu lesen anfing und wie ihn das veränderte. »Papyrus« erzählt deshalb vor allem von Leserinnen und Lesern sowie von Buchliebhabern.

Wegen der Vielzahl an angesprochenen Themen – angefangen von der Entwicklung der Schrift bis hin zur Zerstörung der Nationalbibliothek von Bosnien und Herzegowina im Bosnienkrieg (1992–1995) – ist das Werk inhaltlich schwer zu fassen. Auch der Untertitel, der nahelegt, die Weltgeschichte werde anhand einzelner Bücher nacherzählt, greift zu kurz. Zumal sich die eigentliche Handlung weitgehend auf die Antike, die Zeit der alten Griechen und Römer, beschränkt. Lässt man sich auf diesen ungewöhnlichen Ansatz ein, wird das Buch zu einer Fundgrube an Geschichten, Mythen und Fakten, die Vallejo geschickt zu einer Kulturgeschichte des Lesens verwebt.

Vereinfacht gesagt besteht »Papyrus« aus vier großen Handlungssträngen, die sich kaum voneinander trennen lassen: der Geschichte der Schrift, des Buchs sowie von Bibliotheken und

von Literatur als kultureller Errungenschaft. So werden beispielsweise die Erfindung der Schrift (Keilschrift, Hieroglyphen) und ihre Weiterentwicklung in verschiedenen Hochkulturen (Griechenland, Römisches Reich) nacherzählt. Man erfährt, dass bei den alten Griechen noch ohne Zeichensetzung und Worttrennung geschrieben wurde – Lesen war damals eine anstrengende Tätigkeit, die nur lautmalisch möglich war.

Tatsächlich lasen die Griechen stets für ein Publikum. Erst als das Lesen ein privates Vergnügen wurde, veränderte sich auch die Schrift zu besserer Lesbarkeit. Parallel dazu entwickelte sich das Medium »Buch« von der Tontafel über die Schrifttrolle aus Papyrus und dem gebundenen Kodex aus Tierhäuten (Pergament) zu unserem gedruckten Papierbuch bis hin zum E-Book weiter, das mit Licht funktioniert.

Ein zusätzlicher Handlungsstrang beschäftigt sich mit der Entstehung von Bibliotheken und der Sammelleidenschaft historischer Buchliebhaber, von denen Alexander der Große wohl der berühmteste ist. Dementsprechend steht die legendäre Bibliothek von Alexandria im Fokus und leitet die Geschichte von »Papyrus« auch ein. Gegründet vom antiken Feldherrn mit dem Vorsatz, jedes geschriebene Buch zu enthalten, wurde die Sammlung später unter ungeklärten Umständen zerstört. Vallejo trägt alles zusammen, was aus Quellen darüber ist.

Ein weiteres Augenmerk richtet die Autorin auf die Frage, wer wann und unter welchen Bedingungen lesen lernen durfte – und wer schrieb beziehungsweise veröffentlichte. Mit Bildung Geld zu verdienen, war etwa bei reichen Römern verpönt – Bücher wurden nur im Kreis der Bekannten weitergegeben und bei Bedarf durch einen Sklaven oder in einer Buchhandlung kopiert, sprich abgeschrieben. Ein Urheberrecht in unserem Sinne war unbekannt.

Frauen blieb Bildung in der Antike weitgehend vorenthalten, doch immer wieder traten couragierte Schriftstellerinnen in Erscheinung, von denen sich

bis heute einzelne Verse erhalten haben.

Alle Handlungsstränge sind geschickt miteinander verknüpft und durchsetzt von jeder Menge Querverweisen und Vergleichen mit anderen Epochen, die das Alltagsleben der Menschen in den verschiedenen Kulturen beleuchten. Die Vielzahl der angerissenen Themen macht Wiederholungen unvermeidbar. Dafür belohnt die Lektüre des unwahrscheinlich informativen und dicht geschriebenen Buches mit unerwarteten Erkenntnissen und spannenden Details.

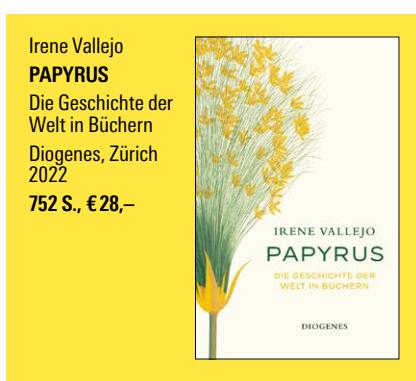
Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

## MATHEMATIK STATISTIK KANN IN DIE IRRE FÜHREN

**Das Buch weist auf häufige Fehler beim Auswerten von Daten hin – mit einer Menge an unterhaltsamen Beispielen.**

► Seit 2012 veröffentlichen die emeritierten Hochschulprofessoren und Bestsellerautoren Gerd Gigerenzer (Universität Potsdam und MPI für Bildungsforschung, Berlin) und Walter Krämer (Universität Dortmund) sowie der Ökonom und RWI-Vizepräsident Thomas Bauer (Universität Bochum) jeden Monat eine »Unstatistik«, eine Stellungnahme zu einer in den Medien publizierten Statistik und deren Interpretation. 2018 trat die Statistikerin Katharina Schüller ebenfalls dem Team bei. Ziel dieser monatlichen »Unstatistiken« ist es, zu einem sachlichen Umgang mit Daten und Fakten beizutragen.

Angefangen hatte es mit Kommentaren zur »Armutgefährdungsquote« in Dortmund, zur Pünktlichkeit der Deutschen Bahn sowie zu der Zeitungsmeldung »Schokolade macht dünn«. Auf diese und zahlreiche andere Meldungen gingen die drei erstgenannten Autoren bereits in ihrem 2016 im Campus-Verlag erschienenen Buch »Warum dick nicht



# REZENSIONEN

doof macht und Genmais nicht tötet« ein. In den zurückliegenden Monaten spielten bei den »Unstatistiken« häufig Texte zu Covid-19 eine Rolle wie »Die Corona-Pandemie lässt Masse und Maße der Deutschen steigen«. Etliche solcher Meldungen und Kommentare haben die Autoren nun in ihrem neuen Buch zusammengestellt.

Auch wenn in der letzten Zeit immer wieder Werke erschienen sind, die sich mit fehlerhaften Statistiken und Falschmeldungen beschäftigten, werden die Leser und Leserinnen in »Grüne fahren SUV und Joggen macht unsterblich« vermutlich bisher unbekannte Beispiele finden.

Das Buch ist insgesamt in drei Kapitel gegliedert; das erste, »Denken in Raten«, beginnt mit einer Liste von fünf Grundprinzipien, die beim Rezipieren von Statistiken erfahrungsgemäß nicht immer beachtet werden:

1. Sicherheit ist eine Illusion. Beispiel: Selbst wenn man vollständig geimpft ist, kann man sich mit Covid-19 infizieren.

2. Ohne genaue Angabe der Referenzklasse sind Aussagen sinnlos.

3. Relative Risiken sind nicht absolute Risiken. Auch wenn medizinische Organisationen weltweit Regeln zur Veröffentlichung von Daten eingeführt haben, halten sich immer noch mehr als die Hälfte der Autoren von Fachliteratur nicht daran.

4. Jeder Test macht zweierlei Fehler: wie sich Sensitivität und Spezifität beim Screening auswirken.

5. Ohne Berücksichtigung der Grundrate sind keine Vergleiche möglich.

In den nachfolgenden Abschnitten gehen die Autoren auf typische Fehler in statistischen Veröffentlichungen ein.

**Es ist erschreckend, wenn man bedenkt, was für ein Unsinn veröffentlicht wurde und welche Konsequenzen das hatte**



Zunächst geht es um die Verweichung von Korrelation und Kausalität mit verschiedenen Beispielen von Schein- und Nonsenskorrelationen; sie erläutern aber auch, wie man Untersuchungen anlegen sollte, um tatsächliche Ursachen nachzuweisen. Hier beschreiben sie als Positivbeispiel, wie sich die Wirkung der Maskenpflicht statistisch belegen lässt.

Ein weiteres gefährliches Pflaster sind Meldungen, die auf unseriösen Hochrechnungen beruhen wie »geschätzte 100 000 durch Windenergieanlagen getötete Amseln« oder die sich auf nicht repräsentative Umfragen stützen, wie die Befragung, durch die sich die »Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung« zur Schlagzeile »Grüne fahren SUV« veranlasst sah.

Am Beispiel der Corona-Inzidenz machen die Autoren auf das Problem aufmerksam, dass die veröffentlichten Daten nicht unbedingt das messen, was sie sollen (beispielsweise lassen sich Infizierte ohne Symptome in der Regel nicht testen).

Natürlich darf in einem Buch über ungenaue statistische Veröffentlichungen nicht eine Sammlung von misslungenen grafischen Darstellungen fehlen. Offenbar lassen sich solche nicht ausrotten, obwohl alle typischen Mängel inzwischen hinlänglich bekannt sein sollten (das Thema gehört mittlerweile sogar zum Standard-Unterrichtsstoff der Mittelstufe).

Das zweite Kapitel des Buchs trägt die Überschrift »Was uns Medien versprechen«. Hier gehen die Autoren in verschiedenen Abschnitten folgenden Fragen nach: »Wie man ewig lebt« (Eine Stunde joggen, sieben Stunden

länger leben), »Wie man früher stirbt« (Warnungen vor einem vorzeitigen Tod), »Was künstliche Intelligenz alles (nicht) kann« (mit Beispielen zu Fehlern im Umgang mit bedingten Wahrscheinlichkeiten) sowie »Warum Prognosen immer falsch sind« (Vorhersagen ohne Angabe der Grundannahmen sind wertlos).

Im dritten und letzten Kapitel »Wie wir uns selbst betrügen« untersuchen die Autoren noch einmal ausführlich einzelne Beispiele, reflektieren den Stand der Statistikbildung im Schulunterricht und im Rahmen der Hochschulausbildung. Das sollte eigentlich Anlass zur Hoffnung geben, dass künftig weniger Menschen von Zahlenblindheit geschlagen sind, als es in der Vergangenheit der Fall war – selbst in bayerischen Schulen kennt man jetzt Vierfeldertafeln mit absoluten Häufigkeiten.

Insgesamt lebt das Buch von der Fülle an aktuellen Beispielen, die verdeutlichen, wie viel noch zu tun ist. Insofern erfüllt es seinen Zweck, nämlich über die typischen Fallen in der Statistik aufzuklären. Am Ende findet man ein ausführliches Quellenverzeichnis dazu.

Da vier Autoren an dem Buch mitgewirkt haben, lassen sich Sprünge und Redundanzen kaum vermeiden. Gleichwohl lässt sich das Werk im Allgemeinen gut und flüssig lesen, es ist anregend und unterhaltsam geschrieben.

Andererseits ist es erschreckend, wenn man bedenkt, was an Unsinn veröffentlicht wurde und welche Konsequenzen das hatte. An einigen Stellen müssen sich die Leser und Leserinnen jedoch Zeit nehmen, um die teilweise komplexen Sachverhalte nachvollziehen zu können.

Wer sein eigenes Verständnis bezüglich der Bedeutung statistischer Daten testen möchte, kann das am Beispiel der ZDF-Talkshow vom 10. November 2021 prüfen:

Dort gab es Daten für die Altersklasse 60 plus: 91 Prozent geimpft, 9 Prozent ungeimpft; Infizierte: 60 Prozent geimpft, 40 Prozent ungeimpft; Verstorbene: 43 Prozent geimpft, 57 Prozent ungeimpft.

Bedeutet das, die Impfung gegen Covid-19 zeigt kaum eine Wirkung? Teilen Sie auch den Kommentar des Moderators Markus Lanz: »Mir geht's kalt den Rücken runter?«?

Heinz Klaus Strick ist Mathematiker und Autor des »Mathematischen Monatskalenders«.

## EVOLUTION FEMINISMUS IM VOGELREICH

**Der Ornithologe Richard O. Prum legt eine interessante These zur Evolution der Schönheit vor, holt dabei aber zu weit aus.**

► Wer die Netflix-Serie »Unser Planet« gesehen hat, der hat vielleicht noch die Szene vor Augen, in der ein blau-rot gefärbter Vogel mit drei Artgenossen penibel einen Balztanz einstudiert. Überzeugt die aus Sprüngen und Ge-

sängen bestehende Choreografie ein Weibchen, darf sich das Alphamännchen mit ihm paaren.

Dem exzentrischen Balzverhalten der Blaubrustpipras widmet sich auch der Ornithologe Richard Prum in seinem 2018 für den Pulitzer-Preis nominierten Buch »Die Evolution der Schönheit – Darwins vergessene Theorie zur Partnerwahl« und nennt es die »stärkste sexuelle Selektion, die je bei Wirbeltieren festgestellt wurde«. Denn die meisten männlichen Blaubrustpipras sind bei den wählerrischen Weibchen chancenlos. Trotzdem müssen sie bei der aufwändigen Show mittanzen, damit sie eines Tages vielleicht zu Alphatieren aufsteigen und sich fortpflanzen können.

Mit solchen und vielen weiteren Beispielen aus dem Leben der Vögel macht Prum sich für eine modern anmutende These stark: Unter zahlreichen Vogelweibchen herrsche sexuelle

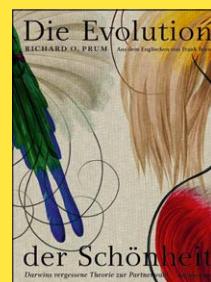
Autonomie bei der Partnerwahl. Diese soll dazu geführt haben, dass sich bestimmte ästhetische Vorlieben wie die Balztänze der Pipra-Männchen evolutionär durchgesetzt haben.

Schönheit als Kriterium für die Selektion? Damit stellt sich Prum gegen die in der Evolutionsbiologie gängige Annahme, dass so genannte sexuelle Ornamente von Vogelmännchen die reproduktive Fitness ausdrücken – gewissermaßen also für »gute

Richard O. Prum  
**DIE EVOLUTION  
DER SCHÖNHEIT**

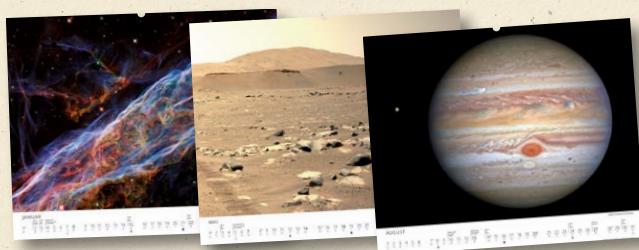
Darwins verges-  
sene Theorie zur  
Partnerwahl

Matthes & Seitz,  
Berlin 2022  
463 S., € 45,-



**Himmel & Erde**  
2023

WEINGARTEN



**STERNE UND  
WELTRAUM**

## DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2023

**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](http://www.spektrum.de/aktion/hue)  
E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)



# REZENSIONEN

Gene« und so gesunde Nachkommen stehen. Die Idee entspricht dem Prinzip der natürlichen Selektion, das bekanntermaßen auf Charles Darwin zurückgeht.

Allerdings hat der Naturforscher auch erkannt, dass Ornamente wie der bunte Schweif eines männlichen Pfaus nicht zu der Annahme passen, dass nur die am besten angepassten Tiere überleben und sich fortpflanzen. Eher machen die auffälligen Merkmale sie zur Zielscheibe von Räubern. Schon Darwin vermutete deshalb, dass das farbenfrohe Aussehen vieler Vogelmännchen mit »Geshmäckern« der Weibchen zu tun hat.

Prum greift nun diese oft vergessene Theorie auf, um den von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern meist als zu subjektiv empfundenen und deshalb gemiedenen Begriff der »Schönheit« in der Forschung Geltung zu verschaffen. Das (nicht nur) ornithologische Wissen, das er dafür anwendet, ist beeindruckend, macht es Fachfremden jedoch an manchen Stellen schwer, seiner Argumentation zu folgen. Nach mehr als 450 Seiten plus zahlreicher Fußnoten stellt sich somit ein gewisser Ermüdungseffekt ein – trotz des verständlichen, mitunter launigen Schreibstils des Autors. Das ist schade, denn im zweiten Teil des Buchs wagt Prum einen interessanten Sprung von der Partnerwahl des Tiers zu der des Menschen.

Inhaltlich hätte Prum etwas weniger über das Verhalten einzelner Vogelarten und dafür mehr über die Ausnahmen von seiner und Darwins Theorie schreiben können. Dazu gehört zum Beispiel der Papageientaucher, bei dem Männchen und Weibchen einander stark ähneln. Auch stellt sich, wie der Biologe Michael Wink in einem Aufsatz angemerkt hat, die Frage, ob bei der Partnerwahl der Vögel nicht vielleicht Schönheit und Fitness eine Rolle spielen. Evolutionsforscherinnen und Biologen, die für Prums Ansatz offen sind, finden darin womöglich ein spannendes Forschungsthema.

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

## VERSCHWÖRUNGS-THEORIEN HISTORISCHEN FÄLSCHUNGEN AUF DER SPUR

**Die Geschichte birgt viele Beispiele für Verleumdungen, Lügen und Verschwörungserzählungen. Der Autor geht einigen auf den Grund.**

► Die Lage war dramatisch: Missernten hatten im vorrevolutionären Frankreich die Brotpreise verteuert, das Volk hungrte. Königin Marie Antoinette soll in dieser Situation den zynischen Rat gegeben haben, statt Brot doch Kuchen zu essen. Diese ihr oft zugeschriebene Aussage schädigt ihrem Image bis heute.

Einer unkritischen Rezeption des Zitats stehen jedoch massive Bedenken gegenüber. Denn Marie Antoinette war als österreichische Prinzessin und Gemahlin Ludwigs XVI. am französischen Hof bereits seit Jahren umstritten. Zusätzlich litt ihr Ruf unter dem Betrugsfall im Jahr 1785/86, der als Halsbandaffäre bezeichnet wird, in den sie nicht einmal persönlich involviert war. Und auch die desaströsen Staatsfinanzen inklusive verschwenderischer Hofhaltung waren der Öffentlichkeit bekannt. Das berüchtigte Zitat ist jedoch älter und lässt sich auf Maria Theresia von Spanien zurückführen, die Ehefrau König Ludwigs XIV. Dass der Ausspruch in dieser für Frankreich folgenreichen Zeit Marie Antoinette zugeschrieben wird, hat nach dem Historiker Bernd Ingmar Gutberlet seine Ursachen in einer Verleumdungskampagne. Die geschichtliche Rezeption übernahm ihn entweder unkritisch oder sogar mit Absicht.

Es sind solche Ereignisse, denen Gutberlet in seinem Buch nachgeht. Damit möchte er der Wahrheit, die er als »Schimäre« bezeichnet, ein Stück näher kommen. Geschichtsschreibung kann sich ihr nur annähern und spiegelt immer die Fragen, Themen, Ängste und Ressentiments der Zeit wider, in der sie entsteht. Gründe für Fehler bis hin zur Instrumentalisierung von Geschichtsklitterung gibt es dagegen

viele: Nach Gutberlet reichen sie von Eitelkeiten unter Historikern über unsauberes Arbeiten bis zur Vorrangstellung politischer Interessen; von Sensationsgier und medialer Aufmerksamkeit bis hin zum dynamischen Eigenleben volkstümlicher Erzählungen. Das Buch bewegt sich auf der Schnittstelle zwischen Unterhaltung und historisch-politischer Aufklärung. Die Leserinnen und Leser möchte er gegen Geschichtsmisbrauch sensibilisieren. Dazu gliedert er sein Buch in drei große Kapitel, die sich in vielen Einzeldarstellungen mit Verleumdungen, Fälschungen und Verschwörungsmythen befassen. Insgesamt behandelt es einen Zeitraum von gut 2000 Jahren: vom Untergang der alexandrinischen Bibliothek, die wahlweise Cäsar, christlichen Fanatikern oder islamischen Eroberern angelastet wird, bis zu angeblichen Verschwörungen um die Terroranschläge des 11. September 2001.

Gutberlet zeigt, wie Verleumdungen Einzelpersonen, Bevölkerungsgruppen und ganze Zeitalter in ein schlechtes Licht rückten. So ist Pontius Pilatus keineswegs der schwache römische Statthalter, wie ihn die Bibel überliefert, als er Jesus zur Kreuzigung verurteilt. Vielmehr kann er angesichts der Niederschlagung von Aufständen in einer unruhigen Provinz als mit harter Hand regierender Vertreter Roms gelten, dessen gefärbte biblische Darstellung nicht dazu passt. Auch die Vorstellung eines angeblich »dunklen« Mittelalters ist heute nicht mehr aufrechtzuerhalten. Stattdessen handelt es sich bei dieser Bewertung um die Diffamierung durch Reforma-

## Verschwörungen vom Untergang der Bibliothek in Alexandria bis zu den Terroranschlägen vom 11. September 2001

Bernd Ingmar Gutberlet  
**»SÖLLEN SIE DOCH KUCHEN ESSEN«**  
 Verleumdungen, Fälschungen und Verschwörungsmythen der Geschichte  
 Europaverlag, München 2022  
 304 S., € 20,-



toren, Humanisten und Aufklärer, die sich aus religiösen und philosophischen Gründen davon abgrenzten. Und anhand des von der sowjetischen Roten Armee im Mai 1940 an polnischen Offizieren verübten Massakers von Katyn beschreibt Gutberlet, wie sich die Diktatoren Hitler und Stalin gegenseitig die Schuld dafür zuwiesen und verleumdeten.

Fälschungen von Dokumenten, Schriftzeugnissen und Stammbäumen dienten der Bestätigung falscher Tatsachen oder der Verschleierung widerrechtlicher Aneignungen. Gutberlet widmet ihnen das zweite Kapitel des Buchs. Es beginnt mit der angeblichen Konstantinischen Schenkung des Kirchenstaats; thematisiert ein gefaktes Pamphlet, dem zufolge sich Hessens Landgraf Friedrich II. 1776 über zu wenige gefallene hessische Söldner im amerikanischen Unabhängigkeitskrieg beschwert habe (da ihm Gefallene mehr Geld einbrachten); beschreibt den Medienskandal der gefälschten Hitler-Tagebücher 1983 und die rumänische Revolution 1989, die laut Gutberlet von alten kommunistischen Seilschaften gekapert und verfälscht wurde.

Im dritten Kapitel widmet sich der Autor historischen Verschwörungserzählungen. Ihren Anhängern dienen

sie unter anderem als vereinfachender Erklärungsansatz in einer komplexen Welt. Wer ihnen glaubt, kann sich gegenüber der unwissenden Umwelt aufgewertet fühlen, da man die angeblichen Machenschaften von Verschwörern durchschaut habe. In seinen Beispielen thematisiert Gutberlet Geheimbünde wie die Freimaurer, die antisemitische Legende einer »jüdischen Weltverschwörung«, den Vorwurf der Mondlandungslüge 1969 und Verschwörungsglauben um den Tod der RAF-Terroristen Andreas Baader, Gudrun Ensslin und Jan Carl Raspe im Hochsicherheitstrakt der JVA Stuttgart-Stammheim 1977.

Alle historischen Darstellungen sind kurz gehalten und ordnen die beschriebenen Fälle in ihren jeweiligen Kontext ein. Damit erreicht Gutberlet auf unterhaltsame und zugleich fundierte Weise seine Leserschaft.

## Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS

Online Veranstaltung  
**»Wie die Spektrum-Redaktion arbeitet:  
 Von der Idee bis zum Artikel«**  
 21. November 2022

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

Allerdings erscheint seine Auswahl unausgewogen: Während das Kapitel über Verleumdungen immerhin 21 Einzeldarstellungen, aber keinen einführenden Text enthält, sind es im Abschnitt zu Fälschungen nur zehn Fallbeispiele, denen zu Kapitelbeginn eine kurze Einführung vorangestellt wurde. Die längste Eröffnung haben zwar die Verschwörungserzählungen, die jedoch nur aus sieben Beispielen bestehen. Zeithistorische Fake News im Kontext der weltweiten Fluchtkatastrophe, der Covid-19-Pandemie oder der US-Präsidentswahlen 2020 werden leider nicht thematisiert.

Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.

## ZEITGESCHEHEN AFGHANISTAN DAMALS UND HEUTE

**Der Journalist Wolfgang Bauer reist Ende 2021 auf der »Ring Road« durch Afghanistan und vergleicht seine Eindrücke mit jenen, die er Jahre zuvor gesammelt hat.**

»3300 Kilometer habe ich nach ihr gesucht. Hoffnung.« Diese Worte am Schluss des eindrucksvollen Werks könnten kaum treffender sein, um die zurückliegenden Passagen zu beschreiben. Der Journalist Wolfgang Bauer begibt sich Ende 2021, als die Taliban wieder das Land regieren, nach Kabul, um von dort aus samt Fahrer und Dolmetscher auf der berücktigen »Ring Road« quer durch Afghanistan zu reisen. Dabei besucht er viele Orte, die er in den letzten zwei

Jahrzehnten durch die journalistische Arbeit kennen gelernt hat.

Der Autor ist ein Meister der Reportagen – das bekommt man Zeile für Zeile zu spüren. Packend schildert er seine Eindrücke eines Landes, das der Westen 20 Jahre lang zu modernisieren versucht hat. Bauer ist auf der Suche nach bekannten Gesichtern, möchte wissen, wie sich das Leben der Menschen weiterentwickelt hat. Dazu baut er immer wieder Passagen aus zurückliegenden Reisen ein, bevor er auf die gegenwärtige Situation zu sprechen kommt. So erhält man einen Eindruck verschiedenster Personen, die der Autor trifft: von einer ehemaligen Bürgermeisterin über Ingenieure eines baufälligen Tunnels in Schwindel erregender Höhe bis hin zu Raubgräbern in abgelegenen Dörfern. Hinter jedem dieser Charaktere stecken eindrucksvolle Schicksale, die Bauer eloquent zu erzählen weiß.

Zum Beispiel die Geschichte von Rafi und Halima, eines Tadschiken und einer Hazara – zwei Volksgruppen, die in Afghanistan verfeindet sind. Als die beiden Jugendlichen gemeinsam durchbrennen wollten, entsteht ein Aufstand, den die Polizei gerade so stoppen kann. Rafi und Halima landen in einem Jugendgefängnis und müssen monatelang dafür kämpfen, heiraten zu dürfen. Das trug sich 2011 zu. Zehn Jahre später gelingt es Bauer, Rafi und Halima, die inzwischen eine Familie gegründet haben, aufzuspüren und zu besuchen.

Beim Lesen hat man fast das Gefühl, dabei zu sitzen und dem Wiedersehen beizuwohnen. Seinen Mitreisenden widmet Bauer ebenfalls Aufmerksamkeit: Immer wieder lockern die Witze seines Fahrers die Abschnitte auf, und mit Spannung verfolgt man die Herausforderungen der jungen Ehe seines Dolmetschers.

Bauer geht während seiner abenteuerlichen Reise aber auch traurigen Angelegenheiten nach. So versucht er herauszufinden, wie ein bekannter Fotograf kurz vor der erneuten Machtergreifung der Taliban im Sommer 2021 ums Leben kam. Bei seinen Ermittlungen redet er mit Kindern, die an jenem schicksalhaften Tag vor Ort

waren, mit dem Leiter einer Leichenhalle sowie mit Taliban. Dabei kommt er auch auf Missstände in der Kriegsberichterstattung zu sprechen: Einige seiner Kollegen unterstützen mit Aufnahmegeräten wie Drohnen Militärs, damit diese sie mit an die Front nehmen. Dadurch werden die Journalisten zu aktiven Teilnehmern am Kriegsgeschehen.

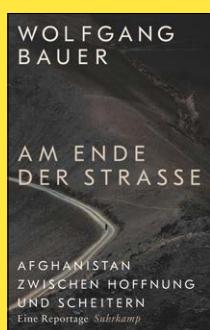
Generell erfährt man beim Lesen des Buchs nicht nur einiges über – eventuell repräsentative – Einzelschicksale. In Bauers Erzählungen fließen auch zahlreiche Informationen über die afghanische Kultur, den 20 Jahre währenden Krieg sowie die damals allgegenwärtige Korruption ein. Mit dem Scheitern des Westens beschäftigt sich das letzte Kapitel des Buchs, das (anders als alle übrigen) keine Reportage ist, sondern typischen Sachbuch-Charakter hat. Darin beschreibt Bauer, was die ausländischen Mächte in Afghanistan vermasst haben und was man hätte besser machen können.

**Wolfgang Bauer  
ist ein Meister der  
Reportagen – das  
bekommt man Zeile  
für Zeile zu spüren**

Nach Hoffnung hat Bauer während seiner Reise gesucht. Bei manchen hat er sie gefunden – doch handelt es sich dabei fast ausschließlich um Männer. »Ich traf nicht so viele Frauen, wie ich es mir wünschte«, schreibt er am Anfang des Buchs. »In den Monaten nach unserer Reise wird es wenig Anlass (für Hoffnung) geben. Die Taliban verbieten Frauen den Besuch weiterführender Schulen, befehlen ihnen, wie früher, sich völlig zu verhüllen.« Allzu hoffnungsvoll ist das Ende also nicht. Dennoch ist das Buch absolut lesenswert.

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

Wolfgang Bauer  
**AM ENDE DER  
STRASSE**  
Afghanistan zwischen Hoffnung und Scheitern. Eine Reportage  
Suhrkamp, Berlin 2022  
399 S., € 24,-



**Spektrum** der Wissenschaft bietet seinen Lesern  
2023 wieder drei besondere Reisen

# Leserreisen

FRÜHJAHR 2023



## Namibia



## Norwegen



## Finnland

### DIE NAMIB UND DER SÜDLICHE STERNENHIMMEL

Neben zahlreichen astronomischen Beobachtungen bietet das Reiseprogramm im Mai viele interessante geografische Exkursionen zum Kennenlernen Namibias. Erleben Sie bei einer siebentägigen Tour die faszinierende Namibwüste, ihre eigenartige Tier- und Pflanzenwelt, ihre tiefen Canyonlandschaften, bizarren Gesteinsformationen und steilen Gebirgspässe. Am Sternenhimmel stehen die vier Highlights des Südhimmels in bester Beobachtungsposition: das Kreuz des Südens, die Große Magellansche Wolke mit dem eindrucksvollen Tarantelnebel, der Eta-Carinae-Nebel als größter Galaktischer Nebel und Omega Centauri als größter Kugelsternhaufen. Auch die Südliche Milchstraße spannt sich im Mai in einem breiten Bogen über das ganze Firmament.

**Reisedatum:** 6.–21.5. 2023, 16-tägig

**Preis DZ/F:** € 3.950,-

**Betreuung:** Prof. Dr. Rainer Glawion

### IM POLARLICHTMEER

Im März 2023 geht es zu den eindrucksvollen Polarlichterscheinungen des hohen Nordens. Ziel ist der 70. Breitengrad im nordnorwegischen Pasviktal bei Kirkenes.

Nach unseren Erfahrungen aus fast 20 Polarlichtreisen können wir hier bei einem neuntägigen Aufenthalt mit durchschnittlich sechs klaren Nächten rechnen. Darunter sind mindestens vier erfolgreiche Polarlichtnächte zu erwarten.

Das Reiseprogramm bietet neben geführten Polarlichtbeobachtungen bei stabilem Festlandklima und interessanten Vorträgen einige Winteraktivitäten wie Wanderungen und Exkursionen zur Auswahl. Die Reise wird von unserem erfahrenen Polarlichtspezialisten Joachim Biefang betreut. Vorträge und laserunterstützte Führungen am Nordhimmel runden das Programm ab; ein handliches Planetarium ist auch im Gepäck dabei.

**Hauptreise:** 10.–19.3. 2023, 10-tägig

**Preis DZ/HP:** € 2.870,-

**Betreuung:** Joachim Biefang

### MAGISCHE HIMMELSLICHTER FOTOGRAFIEREN

Die Beobachtung und Fotografie der Aurora borealis, des geheimnisvollen Nord- oder Polarlichts, ist das primäre Ziel dieser Reise und wurde bereits bei der Standortwahl weit nördlich des Polarkreises berücksichtigt. Hier sind die

Chancen, das Nordlicht zu erleben, besonders hoch. Zudem wohnen Sie dort in einem Hotel weit abseits störender Lichtquellen. Es liegt einsam an einem großen See, dem Menesjärvi, der zu dieser Jahreszeit zugefroren und begehbar ist. Die (astro-)fotografische Betreuung übernimmt Diplombiologe Stefan Seip, der sich international nicht nur mit seinen Astrofotos einen Namen gemacht hat, sondern der auch bekannt ist für seine künstlerische Schwarz-Weiß- und Porträtfotografie. Er wird in Vorträgen über die Natur des Polarlichts, dessen Fotografie und die anschließende Bildbearbeitung genauestens informieren.

**Reisedatum:** 20.–27.2. 2023, 8-tägig

**Preis im DZ/HP:** € 2.780,-

**Betreuung:** Stefan Seip

# ZEITREISE

Wissenschaft vor 100 und vor 50 Jahren – aus Zeitschriften der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums

## ÖL AUS DER SCHIFFFAHRT TÖTET MEERESTIERE

»Man hatte beobachtet, daß das Seepferdchen in den letzten Jahren an den Küsten des Atlantik seltener geworden war. Untersuchungen wiesen darauf hin, daß diese Erscheinung auf eine Abnahme der kleinen Krüster zurückzuführen sei, die seine Hauptnahrung bilden. Der Tod der Krebschen aber wird verursacht durch die Tausende von Gallonen Öl, die sich jährlich von Schiffen mit Oelmotoren in die See ergießen. Da die Krebschen auch die Hauptnahrung der Jungfische, z. B. des Schellfisches, bilden, werden auch diese bedroht, und Schutzmaßnahmen sind nötig.« *Die Umschau* 47, S. 744

## LÄSTIGE STUBENFLIEGEN

»Die Stubenfliege ist Verbreiterin einer ganzen Anzahl von Krankheiten dadurch, daß sie Bakterien, Pilze oder deren Sporen verschleppt. Um den ›Aktionsradius‹ der Fliegen festzustellen, ließ das amerikanische Bureau of Entomology 234 000 Fliegen verschiedner Arten mit Ockerpulver bestäuben und dann frei fliegen. Weit in der Umgegend waren Fliegenfallen aufgestellt. Es ergab sich: Eine Fliege legt in einem Tag 8–10 km zurück. Der weiteste Flug einer Stubenfliege wurde mit 21,14 km gemessen. Für die Praxis ergibt sich aus diesen Versuchen die Wichtigkeit der Vernichtung aller Fliegenbrutplätze.« *Die Umschau* 45, S. 711

## ABGEKNICKTE FICHE WÄCHST WEITER

»Ein merkwürdiges Naturdenkmal befindet sich in der Nähe der Siedlung Baden im Ostenholzer Moor (Lüneburger Heide). Dort ist eine Fichte vom Sturm umgeworfen worden, so daß ihr Stamm jetzt wagrecht über dem Erdboden liegt. Da ein Teil der Wurzeln im Boden stecken blieb, so blieb der Baum am Leben. Dabei haben sich nun die Äste der Oberseite senkrecht aufgerichtet und zu einzelnen baumartigen Gebilden ausgebildet, die ihre Zweige wagrecht nach allen Seiten austrecken, währen sich die in den Boden hineinragenden Äste zu Wurzeln umgewandelt haben.« *Kosmos* 11, S. 308



Die umgeworfene Fichte im Ostenholzer Moor.

1922

## DIE FOLGEN VON STRESS IN DER SCHWANGERSCHAFT

»Ein zweistündiger Stress während einiger Tage führt bei trächtigen Ratten nicht nur zu Totgeburten, sondern er beeinträchtigt auch die Entwicklung der Föten. So zeigten sich Wasserköpfe unter den Jungen. Noch bemerkenswerter ist die zeitliche ›Fernwirkung‹: Bei den weiblichen Jungratten hielt diese über den Beginn der Geschlechtsreife hinaus an. Mit signifikanter Häufigkeit war an ihnen eine Überdehnung der Dauer des Sexualzyklus zu beobachten. Angesichts der bei Frauen in hochindustriellen Gesellschaften häufiger festzustellenden Unregelmäßigkeiten des monatlichen Zyklus sind diese Versuche von besonderem Interesse.« *Die Umschau* 21, S. 674

1972

## SKYTHENGOLD AUS GROSSEM HÜGELGRAB

»Unweit der Stadt Ordžonikidze [heute Pokrow in der Ukraine] im Dneprgebiet konzentrierten sich 1971 [Ausgrabungen] auf einen Grabhügel von knapp 9 m Höhe und 70 m Durchmesser, der mehrere Gräber enthielt: das eines skythischen Fürsten, das einer Fürstin mit ihrem Kind und die ihres Gefolges. Die Skythen sind ein Reiterrövölk, das die Steppen der Ukraine und des nördlichen Kaukasusgebietes im 1. Jahrtausend v. Chr. bewohnte. Die Grabbeigaben [werden] ins 4. Jahrhundert v. Chr. datiert. Aufsehen erregte ein fast 1½ kg schwerer Brustschmuck, der mit 48 plastischen Figuren von Tieren und Menschen geschmückt ist.« *Die Umschau* 21, S. 693/694



## DIE ENDOSKOPIE IST PRAXISREIF

»Erst seit einigen Jahren gibt es eine elegante Methode, den Magen-Darm-Trakt am lebenden Menschen einzusehen: das Endoskop aus Fiberglas. Dank des Fiberglases wurde es möglich, den gesamten Dünndarm Zentimeter für Zentimeter zu untersuchen. Zeigt sich eine verdächtige Stelle, kann eine Probe entnommen werden. Dadurch läßt sich die Schicksalsfrage des Patienten ›Krebs oder nicht Krebs? in kürzester Zeit beantworten. In nicht allzu ferner Zeit [dürfte die Endoskopie für] Vorsorge-Untersuchungen eingesetzt werden.« *Kosmos* 11, S. \*360

# LESERBRIEFE

## PLÄDOYER FÜR DEN TOD

**Eine Reihe von Artikeln ging den Fragen nach, was unsere Lebenserwartung verlängern kann und wie sich der demografische Wandel auf die Gesellschaften auswirkt.** (Serie »Altern«, »Spektrum« Juni, Juli und August 2022)

**Steffen Krüger, Köln:** In Ihrer Artikelserie unterstellen die Autoren implizit, ein möglichst später Tod sei ein unbedingt erstrebenswertes Ziel. Eine kritische soziologische und evolutionäre Einordnung wäre hier angebracht gewesen.

Zunächst ergeben sich aus einem langen Leben Schwierigkeiten für den Einzelnen. Die Lernfähigkeit und Plastizität des Gehirns ist in der Jugend groß, verringert sich dann jedoch. Die Entwicklungsgeschwindigkeit unserer westlichen Gesellschaften ist so hoch, dass sie diejenige des Individuums ab einem bestimmten Alter im Allgemeinen überschreitet. Ein extrem langes Leben würde diese Diskrepanz tendenziell verschärfen.

Weiterhin ist der Mensch gekennzeichnet durch ein eklatantes Missverhältnis zwischen seiner emotionalen Grundausrüstung, die sich in den Kleingruppen der Jäger und Sammler in Steppen ausbildete, und seinen heutigen technischen, insbesondere repressiven und zerstörerischen Möglichkeiten. Die Begrenztheit der Lebensspanne stellt ein bisher unangefochtenes Korrektiv menschlichen Handelns und damit auch menschlichen Irrsinns dar. Man könnte sagen: Es lebe der Tod!

## VERBLÜFFEND GESCHMEIDIGE ZAHNRÄDER

**Tony Freeth, Experte für den Mechanismus von Antikythera, präsentierte neue Erkenntnisse zu dem raffinierten astronomischen Gerät.** (»Wunderwerk der Antike«, »Spektrum« August 2022, S. 12)

**Karl Ulrich Voss, Burscheid:** Mehr noch als das Wunderwerk selbst verblüfft mich die Werkstattausstattung, die den Antikythera-Mechanismus und wohl eine größere Zahl von einfacheren Prototypen und von gegebenenfalls weiteren komplexen Apparaten möglich gemacht hat. Ich stelle mir nur 30 Zahnräder vor, allesamt in ständigem Eingriff und dabei geschmeidig durchlaufend, dies offenbar verschleißarm, bei einem mehrjährigen Gebrauch.

Die Zähne hatten noch die altägyptische, nicht besonders reibungsarm abrollende Geometrie aus gleichschenkligen Dreiecken, müssen darum umso exakter einheitlich geformt gewesen sein. Bei einer Zahnhöhe von unter zwei Millimetern dürften die zulässigen Toleranzen deutlich unter einem zehntel Millimeter gelegen haben. Nochmals höhere Anforderungen werden die kurzen Wellen und Bohrungen der Teilgetriebe auf den Speichen des Hauptzahnradls gestellt haben. Exakte rechte Winkel zwischen Zahnrädern und ihren Wellen sowie reibungsarm polierte Flanken der

### 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](mailto: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 auftreffbar werden.

Räder waren ähnlich anspruchsvolle Voraussetzungen. All das kann ich mir nicht schlüssig denken ohne eine rationell organisierte Umgebung und ohne ein definiert drehendes Werkzeug – möglicherweise eine wassergetriebene Drehbank. Schon in der Antike wird man versucht haben, den Arbeitseinsatz im Rahmen eines so komplizierten Projekts nüchtern zu kalkulieren.

### Antwort des Autors Tony Freeth:

Die Frage, wie die Zahnräder hergestellt wurden, ist sehr interessant und noch nicht abschließend beantwortet. Ich halte es für wahrscheinlicher, dass sie nicht gegossen, sondern vielmehr aus Bronzeblech geschnitten wurden. Dazu hätte man einen runden Rohling präpariert und die Zähne hineingefräst oder -gemeißelt. Tatsächlich wird das gerade in meinem Team am University College London im Rahmen zweier Doktorarbeiten untersucht. In ein paar Jahren gibt es hier vielleicht bessere Antworten.

## ZU EINFACH GESTRICKT?

**Der Wirbeltierpaläontologe Daniel T. Ksepka erläuterte, warum sich die kognitiven Leistungen zwischen verschiedenen Vogelspezies derart stark unterscheiden.** (»Die Evolution des Vogelgehirns«, »Spektrum« September 2022, S. 36)

**Peter Klamser, Egeln:** Die Frage ist doch, was noch zum Hirn zu zählen ist: die Netzhaut mit der Vorverarbeitung optischer Signale, die Gleichgewichtsschnecke, das Rückenmark, die Hautnerven. Sind also Korrelationen zwischen Masse des Körpers und Masse des Gehirns zulässig, weil angeblich aussagekräftig?

Auch hätte betrachtet werden müssen, ob die intellektuellen Anforderungen in verschiedenen Biosphären gleich sind oder sich unterscheiden und welche Strategien es bei der Nahrungssuche gibt. Geht es darum, schnell zu sein und mit der Beute wieder abzuhauen, oder um Planung? Welche Spezies verfolgt welchen Ansatz und wie viel Hirn benötigt sie dafür? Kann es sich ein Vogel leisten, einen Großteil davon nicht zu nutzen, wie das bei Menschen der Fall ist, weil jedes Gramm an Gewicht zählt? Meiner Meinung nach ist der Artikel insofern mit Messungen von Körper- und Hirngewicht und daraus gezogenen Schlussfolgerungen etwas einfach gestrickt.

## Raue Sitten

**So redet man sich um Kopf und Kragen.** Eine Kurzgeschichte von Beth Cato

Medea schritt feierlich über das Mosaik aus Licht und Schatten unter dem Baldachin der Totenschädel. Hoch oben auf Stangen gespießt, hatten die weißen Knochen mit der Zeit verschiedene Tönungen von grau bis grün angenommen. Manche trugen eine dicke Haut aus üppigem Pflanzenwuchs. Das waren die Stammesältesten der Kolonie, die erste Generation auf Rikyu. Alles in allem fast fünfzig Schädel. Ihre leblosen Augenhöhlen starrten hinauf zu den Sternen, von denen sie gekommen waren.

Als Kind hatte Medea sich sehnlich gewünscht, auch ihr Kopf möge einst in den Baldachin aufgenommen werden. Doch sie hatte akzeptieren müssen, dass sie für diese Ehre um einige Generationen zu spät kam – und jetzt gehörte sie überhaupt nicht mehr nach Rikyu.

In den nächsten Stunden sollte ein Shuttle die elf überlebenden Kolonisten zu einem in der Umlaufbahn wartenden Raumschiff befördern. Medea, mit 15 Jahren die Jüngste, konnte es kaum erwarten. Sie hatte keine Lust, hierzubleiben, erst recht nicht, seit Mama im letzten Winter gestorben war. Dennoch war es ihr ein Herzensbedürfnis, dem einzigen Heim, das sie kannte, ihre Verehrung zu erweisen: in Gestalt jener Schädel, zu denen sie seit ihrer Kindheit aufsah.

## Ihre leblosen Augenhöhlen starrten hinauf zu den Sternen

»Gebt mir ein Zeichen«, flüsterte sie ihren Ururgroßeltern da oben zu. Sie hatte sogar zum allerletzten Mal feierlich alle Pelze übergeworfen, damit die Ältesten sie erkannten. »Bitte zeigt mir, wie ich euch ehren kann.«

Zwischen den Farnwedeln raschelten Vogelartige und Schleimgleiter. Knorrige Kletterpflanzen, die den Planeten von einem Pol zum anderen bedeckten, streiften Medeas Wangen. Sie konnte die Namen der Ältesten wie eine Beschwörungsformel hersagen: Kazuo Uematsu, Mary Brown, Jorge Jiménez und so immer weiter. Ein paar Stangen waren leer, ihren Kopf hatte der Wald verschlungen. Mit bloßen, von fester Hornhaut überzogenen Füßen schritt sie die

vertrauten Furchen unter dem Baldachin ab. Etwas Glattes rutschte unter ihren Zehen. Sie blieb stehen und hob einen großen weißen Stein auf. Seltsam, dachte sie, einen derart gerundeten Kiesel so weit entfernt vom Fluss zu finden.

»Neunundvierzig Schädel. Deine hochverehrten Vorfahren. Ein ganzes Jahrhundert auf diesem Felsklumpen, und das sollen die wertvollsten Artefakte sein? Erbärmlich.«

Medea wirbelte herum. Da stand Herr Dale, der Evaluierungsforscher. Er war mit dem Shuttle angekommen und beabsichtigte, dazubleiben und die Überbleibsel der Kolonie zu studieren. Sie runzelte die Stirn, während sie sich Mühe gab, ihn zu verstehen. Beide sprachen Standard, aber die Schiffsbesatzung gebrauchte fremdartige Worte und formte die Zunge auf eigentümliche Art.

»Ja. Neunundvierzig«, bestätigte sie lächelnd, denn sein Interesse an dem Baldachin freute sie.

Er blieb rund drei Meter entfernt stehen. Seine fahle Haut glänzte, als wäre er krank. Aber sie wusste, das kam vom Mangel an natürlichem Licht. Sie fand die Vorstellung, ihre eigene Haut würde im Lauf der langen Heimreise durch den Weltraum auch so blass werden, ein wenig unangenehm.

»Das ist mein Lieblingsort«, erklärte Medea. »Ihn werde ich am meisten vermissen.« Sie verdrückte eine Träne.

Er legte den Kopf schief, während er versuchte, ihren Worten einen Sinn zu verleihen, dann schüttelte er sich.

»Du bist ja nicht einmal die Mühe wert, meinen Übersetzungsautomaten anzuwerfen. Also gut, du kommst jetzt endlich weg von hier, und die glücklichen Mistkerle an Bord werden die zweifelhafte Ehre haben, dir ein bisschen Zivilisation beizubringen.« Er schnaubte durch die Nase. »Immerhin wird es lustig sein, mitanzusehen, wie eure Bande lernt, heiß zu duschen, Fertignahrung zu essen und solche Sachen. Schluss mit Sammeln und Jagen, und kommt ja nicht auf die dumme Idee, einen Kühlschrank mit Steinen zu beschmeißen.« Er zeigte demonstrativ in ihre Richtung und artikulierte, als wäre sie schwerhörig: »Wo ... sind ... deine ... Sachen?«

Die Worte mit dem fremden Akzent purzelten übereinander wie kopulierende Nasenbären, aber der letzte Satz war tatsächlich leichter zu verstehen. »In meinem Haus. Ich musste meine Pelze anlegen, um mich hier zu zeigen und Lebewohl zu sagen.«

Medea mochte, wie angegossen die neuen Kleider passen: weich wie die Haut von Otterartigen; ungewohnt, da sie nahtlos vom Hals bis zu den Knöcheln reichten. Auf die künstlichen Proteinklumpen, die sie künftig essen sollte, freute sie sich weniger.

Sie rieb den glatten Stein in der Handfläche und fragte sich, was die Ältesten von ihr wollten.

»Aha, du kleine Barbarin. Es ist ganz verständlich, dass fremde Rassen so etwas praktizieren, aber sollen Menschen sich erniedrigen und zu längst überwundenen Entwicklungsstufen zurückkehren – mit Fleischverzehr und Tierfellen? Das ist abstoßend.« Er seufzte und ließ eine Hand pietätlos nach oben zum Haupt von Aamina Mukherjee schnellen. »Und keine Ahnung von Geld, keinen Begriff von Werten. Eure Truppe platzt auf einen unerforschten, nicht durch Terrafor-

ming präparierten Sandhaufen, da hättet ihr ja gleich im Mesozoikum landen können.“

Darauf musste Medea nun doch etwas erwidern. »Das ist Aamina! Sie war Botanikerin. Sie kultivierte die Schlingpflanzen, die wir für Dächer und Fallen verwenden, und sie veränderte sie gentechnisch, damit sie keine Allergien auslösen. Ist Aamina nicht schön mit ihrem Blumenschmuck? Sie haben das Glück, sie in voller Blüte zu erleben.«

Ihr wurde fast übel vor Heimweh, dabei hatte sie die Heimat noch gar nicht verlassen. Gewiss, sie freute sich darauf, andere Welten zu sehen – aber trotzdem beneidete sie diesen Mann darum, dass er hierbleiben durfte. Ihr fiel etwas ein, was Herr Dale gesagt hatte: Die Schiffsbesatzung, das seien glückliche Mistkerle. Und diese Glückspilze hatten eine so hohe Meinung von ihm! Sie hatte selbst gehört, wie der Kapitän geäußert hatte, Herr Dale sei ein verlogener Mistkerl, der verdiene, auf einem Planeten wie Rikyu zu bleiben.

»Wie du nur dreinschaust«, lachte Herr Dale. »Du bist so blöd. Wahrscheinlich endest du als Nutte auf Janero. Du hast keinen Schimmer, dass so etwas – dieser Knochen auf einem Stock – sich für eine Million Genny-Streifen verkaufen lässt, allein wegen der tragischen Geschichte dieses gottverlassenen Orts. Ihr wart moderne Pioniere, die in der Wildnis elend zu Grunde gingen. Ich werde ein Vermögen machen. Hier!« Er packte einen kopflosen Stock und grinste.

Hier. Die tiefe Bedeutung dieses einen Worts hallte in Medea wider. Ein Sonnenstrahl fiel durch die Öffnung im Baldachin und erhellt seine kahlen Kopf. Die Vogelartigen verstummten. Medea lächelte die Häupter an. Sie hatte den inbrünstigen Wunsch von Herrn Dale verstanden.

Der Stein flog aus ihrer Hand. Die Stirn brach, das Geräusch hallte durch den Baldachin. Herr Dale stolperte rückwärts, begleitet vom Knistern im Unterholz.

»Herr Dale, Sie sind die erste Generation, ein neuer Gründer! Wie gern würde ich bei den Ältesten bleiben. Jetzt genießen Sie das Glück, hierher zu gehören!«

Ihr kamen Tränen, während sie das Messer aus der Scheide zog. Es blieb gerade noch genügend Zeit, ihn auf die Stange zu spießen. Medea schaute zum Himmel auf, gemeinsam mit den fünfzig Schädeln um sie herum, und beobachtete das Glitzern des Raumschiffs auf der Umlaufbahn. ▶

#### DIE AUTORIN

**Beth Cato** wohnt in Arizona. Sie verfasste die beiden Clockwork-Dagger-Romane und die Trilogie »Blood of Earth«, erschienen bei Harper Voyager. Ihre Website lautet [BethCato.com](http://BethCato.com).

#### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
 Nature 495, S. 134, 7. März 2013

## 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](mailto:redaktion@spektrum.de)

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Claus Schäfer, Oliver Gabriel,  
 Anke Heinzelmann, Natalie Schäfer

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

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

**Redaktionsassistent:** Andrea Roth

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg,  
 Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17,  
 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600,  
 Fax: 06221 9126-751,  
 Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle

**Assistenz Geschäftsleitung:** Stefanie Lacher

**Herstellung:** Natalie Schäfer

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

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

**Übersetzungen:** An diesem Heft wirkten mit:  
 Christine Kemmet, Dr. Sebastian Vogel

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich,  
 Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743,  
 E-Mail: [service@spektrum.de](mailto: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](mailto:spektrum@zenit-presse.de),  
 Vertretungsberechtigter: Uwe Brönn

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

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto:  
 Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 022 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](mailto:anzeigen@spektrum.de),  
 Tel.: 06221 9126-600

**Druckunterlagen an:** Natalie Schäfer,  
 E-Mail: [schaefer@spektrum.de](mailto:schaefer@spektrum.de)

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom  
 1.1.2022.

**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

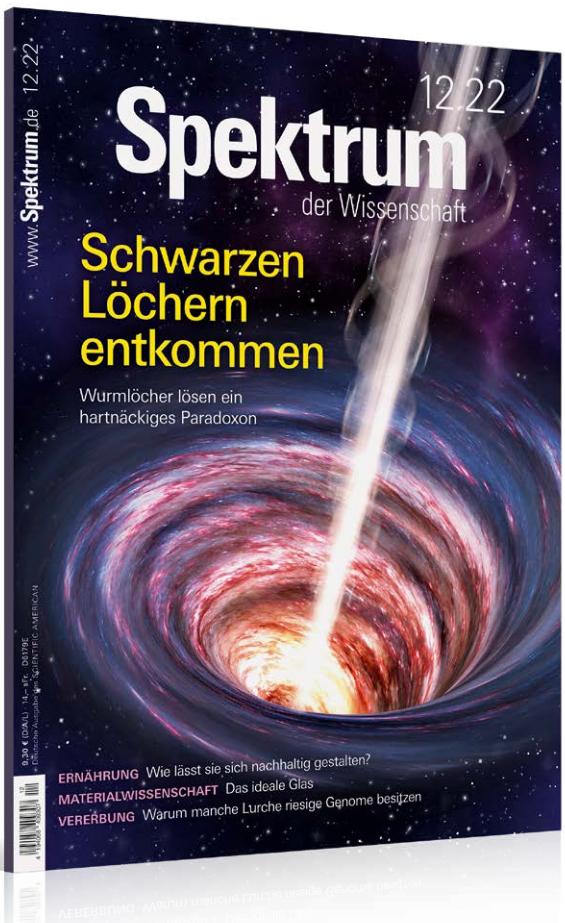
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562  
 Editor in Chief: Laura Helmuth  
 President: Kimberly Lau



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



# VORSCHAU



## ENTKOMMEN AUS DEM SCHWARZEN LOCH

Hat Materie beim Sturz in die Singularität einmal einen bestimmten Punkt überschritten, scheint es kein Entrinnen zu geben. Zusammen mit der Erkenntnis, dass Schwarze Löcher wieder schrumpfen können, führte das zu Widersprüchen mit fundamentalen Annahmen der Quantenmechanik. Damit war das »Informationsparadoxon« geboren und blieb über Jahrzehnte ein hartnäckiges Rätsel. Doch nun zeigt sich: Es lässt sich womöglich lösen, indem Wurmlöcher durch die Raumzeit das Innere von Schwarzen Löchern nach außen kehren.



## NACHHALTIGE ERNÄHRUNG

Die Menschheit wächst und damit der Fleisch-, Milch- und Eierkonsum. Das wirft massive Umwelt- und Gesundheitsprobleme auf und übernutzt die natürlichen Ressourcen. Wie gelingt die Umstellung auf eine Ernährung, die sowohl uns als auch den Planeten erhält?



PETER PARPAVIS / ANNALENAUER / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## GENETISCH AUFGEBLÄHT

Manche Amphibien besitzen ein riesiges Genom, das bis zu 40-mal größer sein kann als das des Menschen. Ursache hierfür sind Transposons: parasitische Erbgutschnipsel, die auf Kosten der Tiere eine Eigen-dynamik entwickelt haben.



RH / GETTY IMAGES / ISTOCK

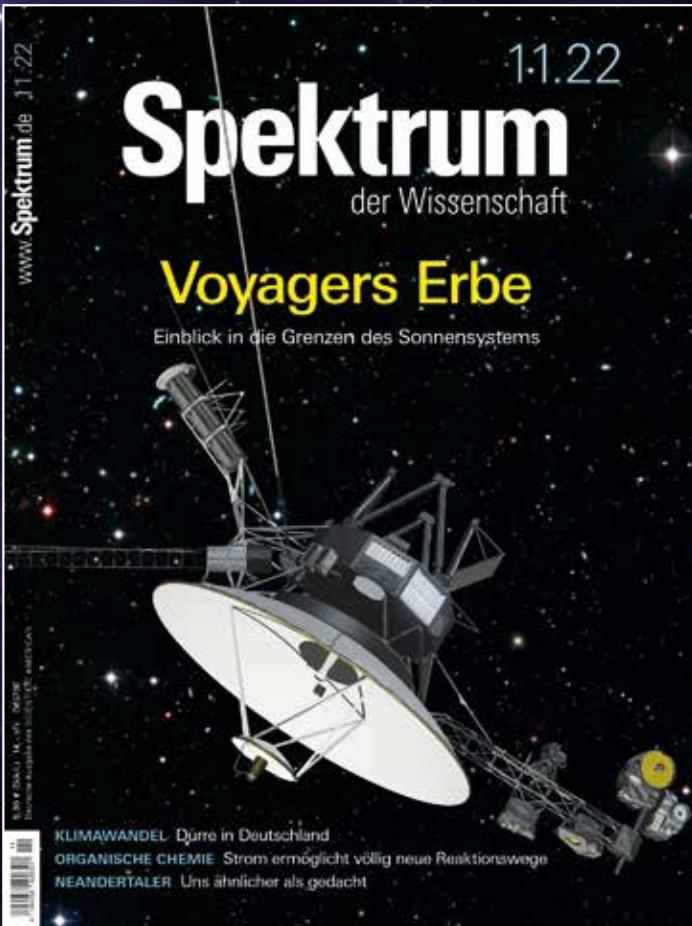
## DER PALLADIUM-FLUCH

Immer wieder versuchen Fachleute, Katalysatoren für die organische Chemie ohne das teure Element Palladium zu entwerfen – und scheitern. Die Geschichte einer kürzlich zurückgezogenen Studie zeigt, warum es so schwierig ist, den Stoff loszuwerden.

## 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](http://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](mailto:service@spektrum.de)

[Spektrum.de/aktion/sdwabo](http://Spektrum.de/aktion/sdwabo)

# DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.

Spektrum  
**DIE WOCHE**

NR. 37  
2022

> Die NASA will noch im September den Mond erreichen  
> Bruder oder Schwester? Egal!  
> Schmetterlinge verschwanden in zwei Wellen

TITELTHEMA: ALPENGLETSCHER

## Das große Schmelzen

Der Sommer 2022 war für die Alpenländer besonders dramatisch. Wärme und fehlender Schnee ließen sie extrem schrumpfen – ein Trend, der sich fortsetzen wird. Das hat erhebliche Folgen für Landschaft und Wasserhaushalt.

SCHULBEGINN  
»Korrekt wäre es, später mit der Schule anzufangen«

TELEFONSEELSORGE  
Erste Hilfe für die Seele

ÖKOLOGIE  
Der tausendfache Tod im Mulchmäher

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)

