

Spektrum

der Wissenschaft

Darwins Erbe

Die Rätsel der Evolution



8,90 € (D/A/L) - 14,- sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



CERES Reise zu einem faszinierenden Zwergplaneten

KI So helfen neuronale Netze, unser Gehirn zu verstehen

SÜSSWASSER Wird unsere Lebensgrundlage knapp?

Unsere Neuerscheinungen

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



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



EDITORIAL DAS WUNDER DER EVOLUTION

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Unser letzter Familienausflug vor dem ersten Corona-Lockdown 2020 ging nach Frankfurt ins Senckenberg-Museum. Dort finden sich eindrucksvolle Exponate wie die Fossilien von *Archaeopteryx*, das Urpferdchen und das Urzeitäffchen *Ida* aus der Grube Messel oder die gigantischen Skelette im Saal der Dinosaurier. Eine Etage höher folgt die Vielfalt der Säugetiere, Reptilien, Amphibien und der Vögel.

Wer das Wunder der Evolution bestaunen möchte, kommt am Senckenberg-Museum nicht vorbei, dieser Sammlung und Forschungseinrichtung von Weltrang. Hier kann man die Entwicklung des Lebens von den ersten Organismen bis zu uns Menschen bequem an einem Tag betrachten. Und wenn die Pandemie eingedämmt ist, werden wir wieder nach Frankfurt fahren und die neuen Räume zur Tiefsee und Meeresforschung besuchen.

Der Stoff für Ausstellungen zum Thema »Evolution« wird ohnehin so schnell nicht ausgehen. Viele Fragen hierzu sind noch offen und harren der Erforschung. Davon zeugt auch unser ausführlicher Themenschwerpunkt in dieser Ausgabe ab S. 12. So schreiben der Paläontologe John Long und der Evolutionsbiologe Richard Cloutier über die Entwicklung unserer Finger anhand eines erst 2020 entdeckten Fossils eines Fleischflossers. Es könnte eine der Verständnislücken vom Übergang der Wasser- zu den Landtieren schließen.

Wie sehr die Evolution unsere eigene Art *Homo sapiens* bis heute beeinflusst, erklärt der Leipziger Paläogenetiker Svante Pääbo im Interview. Covid-19 trifft demnach wohl Menschen härter, die in ihrem Erbgut eine vom Neandertaler stammende Genvariante besitzen. Dem Gesamtüberblick widmet sich der Evolutionsbiologe Diethard Tautz. Denn nicht nur die Entwicklung des Lebens ist im steten Fluss, sondern ebenso die Evolutionstheorie, die laufend erweitert und ergänzt wird. Nun sollen auch epigenetische und entwicklungsbiologische Erkenntnisse besser abgebildet werden. Diese drei Artikel bilden den Auftakt unserer neuen Serie zu »Darwins Erbe«, die mit der Juli-Ausgabe enden wird. Bis dahin sind wir mit den Impfungen gegen Corona sicher schon weiter. Und ich bin nach dieser Lektüre noch besser für meinen Ausflug nach Frankfurt gewappnet.

Sich fortbildend grüßt



AB 24. 4. AM KIOSK!

In **Spektrum GESCHICHTE 2.21** beleuchten wir unter anderem, wie Schmähschriften womöglich die Französische Revolution auf den Weg brachten.

IN DIESER AUSGABE



KARSTEN MORIUS

SVANTE PÄÄBO

Was das Neandertalergenom mit Covid-19 zu tun hat, erklärt der Begründer der Paläogenetik im Gespräch mit »Spektrum« ab S. 30.



ORIANE DELLA-NEGRA, PIERRE-LOÏC SAAÏDI

Das französische Forscherduo beschreibt ab S. 54, wie Mikroben ein gefährliches Umweltgift in der Karibik abbauen.



RALF JAUMANN

Der Planetenforscher von der Freien Universität Berlin war maßgeblich an der Raumsonde Dawn beteiligt, die den Zwergplaneten Ceres besuchte. Ab S. 72 erzählt er, was die Wissenschaftler dort gelernt haben.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

36 FORSCHUNG AKTUELL

Stand Stonehenge vorher woanders?

Möglicherweise kamen Teile des Steinkreises aus Wales.

Rationale Tetraeder

Wie viele dieser geometrischen Figuren gibt es?

In Form gebracht

Wie mechanische Kräfte den Organismus prägen.

Paläoklimarätsel gelöst

Jahreszeitliche Temperaturänderungen liefern Antwort.

47 SPRINGERS EINWÜRFE

Zwischen Laien und Experten

Mit der Dauer der Pandemie geht der Überblick verloren.

63 ZEITREISE

80 SCHLICHTING!

Die blaue Stunde

Im Dämmerlicht färbt die Ozonschicht den Himmel.

87 FREISTETTERS FORMELWELT

Jenseits von Euklid

Parallelen: einfach und zugleich hoch kompliziert.

88 REZENSIONEN

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 BIOLOGIE **EVOLUTIONSTHEORIE AUF DEM PRÜFSTAND**

Neue Erkenntnisse gaben immer wieder Anlass, die Evolutionstheorie zu überarbeiten. Manche Experten halten das jetzt erneut für erforderlich. Zu Recht?

Von Diethard Tautz

20 PALÄONTOLOGIE

DER ÜBERRASCHENDE URSPRUNG DER FINGER

Ein Fischfossil offenbart, wie die Finger unserer Hand entstanden, noch bevor die ersten Wirbeltiere aus dem Wasser an Land kamen.

Von John A. Long und Richard Cloutier

30 PALÄOGENETIK

»JEDER BESITZT ERBGUT VOM NEANDERTALER«

Der Max-Planck-Forscher Svante Pääbo erklärt, warum Neandertalergene das Risiko für einen schweren Verlauf von Covid-19 erhöhen können.

48 INFORMATIK

MIT KI DAS MENSCHLICHE GEHIRN VERSTEHEN

Die Struktur künstlicher neuronaler Netze kann den Hirnarealen von Säugetieren ähneln. Deshalb greifen nun einige Neurowissenschaftler auf die Informatik zurück, um der Funktionsweise unseres Denkgorgan näher zu kommen.

Von Anil Ananthaswamy

54 CHEMIE **ANGRIFF AUF EIN UMWELTGIFT**

Bauern setzten auf den Französischen Antillen bis 1993 Chlordecon ein. Das Pestizid gilt als unverwundlich, wird aber offenbar doch natürlich abgebaut.

Von Oriane Della-Negra und Pierre-Loïc Saaidi

64 HYDROLOGIE **WASSER AUS DEN BERGEN**

In den Hochlagen verändern sich Niederschläge und Schmelzvorgänge – und damit die Lebensgrundlagen von Milliarden Menschen.

Von Walter Immerzeel

72 SONNENSYSTEM **ZWERGPLANET UNTER DER LUPE**

Dreieinhalb Jahre lang umrundete die Raumsonde Dawn den Zwergplaneten Ceres. Die Bilder und Messdaten zeigen eine faszinierende Welt, auf der es trotz eisiger Kälte Wasser und Kryo-Vulkane zu geben scheint.

Von Ralf Jaumann

82 MATHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

RATIONALE ZAHLEN ZÄHLEN

Mengentheoretisch gibt es genauso viele Brüche wie natürliche Zahlen. Beim Abzählen der rationalen Zahlen kommen einige geometrische Überraschungen zu Tage, darunter die Mandelbrot-Menge.

Von Christoph Pöppe

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



12

TITELTHEMA
EVOLUTIONSTHEORIE AUF DEM PRÜFSTAND

EA017 / STOCK.ADOBE.COM



48

INFORMATIK
MIT KI DAS MENSCHLICHE
GEHIRN VERSTEHEN

ME30 / GETTY IMAGES / ISTOCK



54

CHEMIE
ANGRIFF AUF EIN UMWELTGIFT

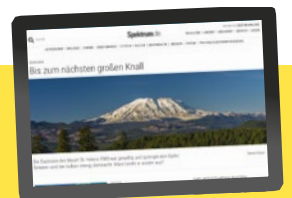
PACSI07 / STOCK.ADOBE.COM



72

SONNENSYSTEM
ZWERGPLANET UNTER
DER LUPE

MASAPU/COURTESY/CALAMPS/DOR/DIA (PAC0519)



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

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

SPEKTROGRAMM

LANDUNG GEGLÜCKT

► Die NASA hat ihren fünften Rover erfolgreich auf dem Mars abgesetzt. Schon kurz nach der Landung am 18. Februar schoss der kleinwagengroße Perseverance (zu Deutsch: Beharrlichkeit) dieses hochauflösende Bild seiner Umgebung. Es ist ein Ausschnitt eines Komposits aus

142 zusammengesetzten Einzelaufnahmen, das im unteren Teil gestreckt werden musste, um das 360-Grad-Panorama in eine Bildebene zu projizieren.

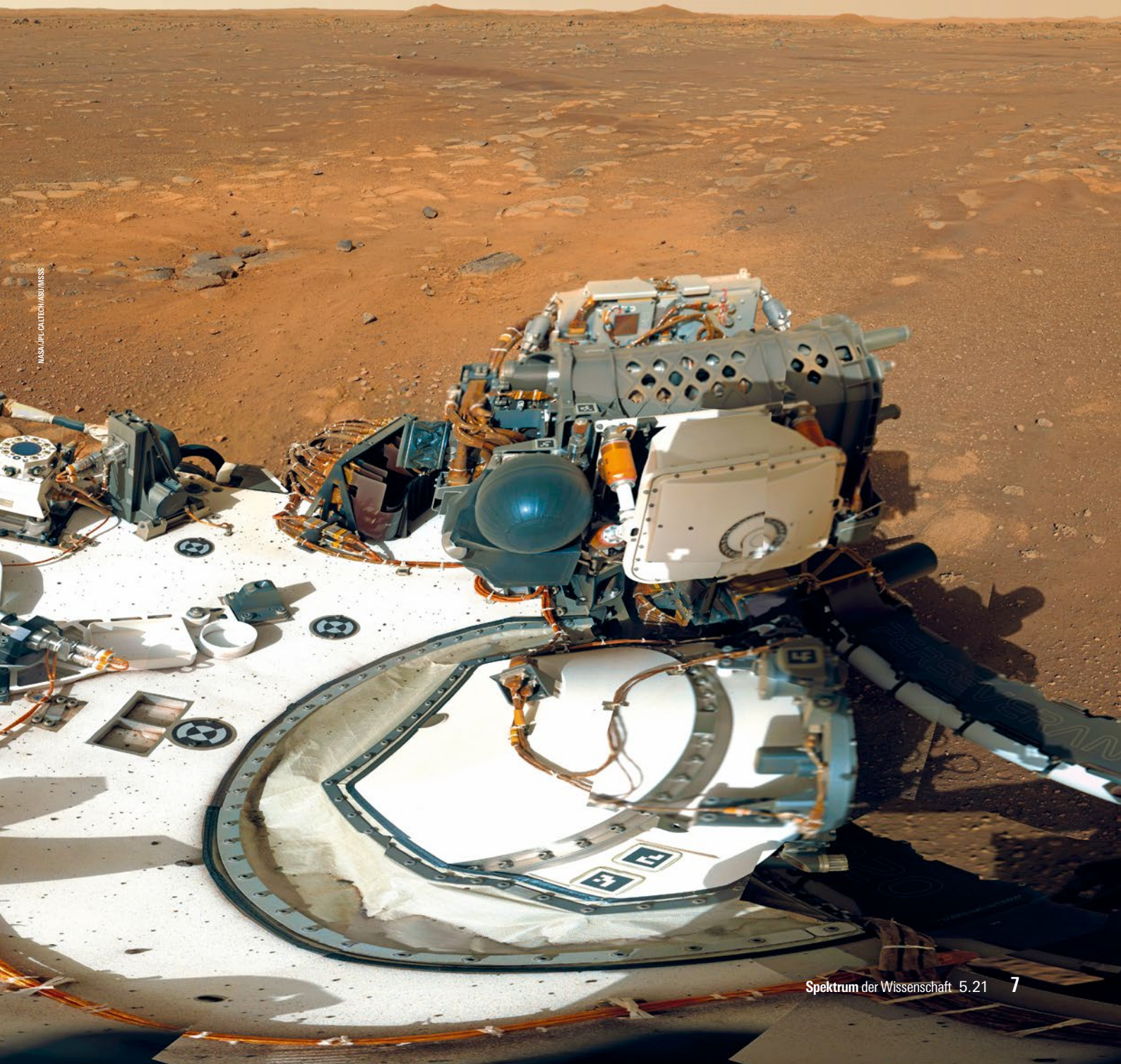
Die Bilder stammen von den beiden Kameras des »Mastcam-Z«-Systems, das in einem zwei Meter hohen Mast über



dem Rover untergebracht ist. Mit ihm nehmen die Forscher auch Videos auf und zoomen an interessante Gelände-merkmale heran. Das soll Perseverance in den nächsten Monaten dabei helfen, den Jezero-Krater zu erkunden. In die 45 Kilometer breite Senke hat sich einst ein Fluss

ergossen. Der Rover soll unter anderem Materialproben der erstarrten Sedimente nehmen; eine spätere Mission könnte dann einige davon zur Erde bringen.

Pressemitteilung der NASA, Februar 2021



NASA/JPL/CALTECH/ASU/MSSS

ASTROPHYSIK NEUTRINO AUS FERNER GALAXIE

► Forscher haben am Südpol ein Neutrino aufgefangen, das ein supermassereiches Schwarzes Loch in einer fernen Galaxie in unsere Richtung katapultiert hat. Zwar ist es seit Längerem nichts Außergewöhnliches mehr, solche schwer fassbaren Teilchen aus dem All auf der Erde nachzuweisen. Diesmal konnte ein internationales Forscherteam um Robert Stein vom Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg jedoch nachvollziehen, wo und warum das sehr energiereiche Geisterteilchen entstanden ist.

Möglich machte das der IceCube-Detektor an der Amundsen-Scott-Südpolstation, dessen in Bohrlöchern versenkte Sensoren Neutrinos aus dem Weltall nachweisen. Nach einem

Zusammenstoß mit einem Atomkern im ewigen Eis können die Wissenschaftler dabei jeweils die Energie und ungefähre Einflugrichtung des Neutrinos rekonstruieren. Doch nur sehr selten lässt sich der Ursprungsort der Partikel auf eine bestimmte Galaxie oder ein Himmelsereignis eingrenzen.

Bei dem Neutrino vom 1. Oktober 2019 ist das gelungen: Es ist im Zentrum einer Galaxie namens 2MASX J20570298+1412165 vor 700 Millionen Jahren entstanden und von dort in einer geraden Linie zur Erde geflogen. Die Galaxie hatte schon im April 2019, ein halbes Jahr vor dem Neutrino-treffer, für Aufsehen gesorgt: Die Kamera des Zwicky Transient Facility am Mount-Palomar-Observatorium in Kalifornien bemerkte damals eine

ungewöhnliche Helligkeitsveränderung. Dieses »tidal disruption event« (TDE) ging vermutlich auf einen Stern zurück, der von dem supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum der fernen Galaxie zerrissen wurde.

Im Umfeld solch einer kosmischen Katastrophe rasen für gewöhnlich Teilchen mit hoher Geschwindigkeit ins All und kollidieren mit umliegender Materie. Dabei entstehen große Mengen Neutrinos, von denen einige auch in Richtung Erde gefeuert werden. 2018 hatte IceCube schon einmal ein Geisterteilchen aus einer vergleichbaren Quelle erfasst, damals trug das aktive Schwarze Loch den Namen TXS 0506+056.

Nature Astronomy 10.5281/zenodo.4308124, 2021

PARTIKELKANONE Supermassereiche Schwarze Löcher sind von einer weit ausgedehnten Akkretions-scheibe umgeben. Immer wieder schleudern die Unge-tümte Materie ins All. Darunter auch die geisterhaften Neutrinos, die anschließend die Erde erreichen können.



INFORMATIK UNGEÖFFNETER BRIEF LESBAR GEMACHT

► Wer vor den 1830er Jahren eine Nachricht verschicken wollte, hatte ein Problem: Briefumschläge gab es noch nicht. Im Prinzip konnte also jeder Postbote den Inhalt eines Briefs lesen. Viele Menschen behielten sich mit einer Technik, die heute als »letter-locking« oder Briefverschluss bekannt ist. Dabei faltete man einen beschriebenen Papierbogen kunstvoll und klebte das Werk an ausgewählten Punkten zusammen. Ein so präparierter Brief ließ sich unterwegs nicht mehr öffnen, ohne dabei das Papier zu beschädigen – was dann der Empfänger der Botschaft mitbekommen hätte.

Für Historiker sind sehr alte Briefe, die nie geöffnet wurden, daher eine Herausforderung: Zu gern würden sie den Inhalt erfahren, riskieren beim Auseinanderschneiden aber, Teile der Nachricht unlesbar zu machen. Abhilfe verspricht nun eine neue Methode, die ein Team um Jana Dambrogio vom Massachusetts Institute of Technology



SOUND AND VISION THE HAGUE, THE NETHERLANDS

entwickelt hat. Dabei durchleuchtet man einen verschlossenen Brief zunächst mittels Röntgentomografie. Das Entfalten findet anschließend rein virtuell am Computer statt: Eine von der Forschungsgruppe entwickelte Software setzt die Schicht für Schicht gewonnenen Röntgendaten so zusammen, dass man die Faltechnik nachvollziehen und letztlich sogar den Inhalt des Briefs lesen kann.

Getestet hat die Gruppe das Verfahren an einem Brief aus der »Brienne Kollektion«. Die 320 Jahre alte Truhe gehörte einst einem niederländischen Postbeamten und enthält neben 2571 geöffneten auch 577 ungeöffnete Briefe, die Menschen nach Den Haag

geschickt hatten. Sie wurden jedoch nie zugestellt, da damals zuweilen der Empfänger das Porto bezahlen musste, was nicht wenige bei unerwarteter Post verweigerten.

Der Brief, den Dambrogios Team durchleuchtet hat, entpuppte sich als Nachricht eines Franzosen namens Jacques Sennacques vom 31. Juli 1697. Er enthält eine Bitte an seinen Cousin Pierre Les Pers, der in Den Haag als Händler arbeitete: Er möge einen zertifizierten Totenschein für »Daniel Le Pers« schicken, mutmaßlich ein enger Verwandter der beiden.

Nature Communication, 10.1038/s41467-021-21326-w, 2021

BRIEFPOST Diese Nachricht aus der mehr als 320 Jahre alten Brienne-Kollektion ist bis heute ungeöffnet. Forscher konnten nun trotzdem den Inhalt des Briefs rekonstruieren.

PALÄONTOLOGIE DINOSAURIER-TEENAGER HIELTEN DIE ARTENVIELFALT KLEIN

► Dinosaurier-Lebensgemeinschaften wiesen ein merkwürdiges Artenspektrum auf: Bei den »schrecklichen Echsen« des Erdmittelalters gab es offenbar mehr große als kleine Spezies – bei heutigen Wirbeltieren ist es umgekehrt. Um diese Besonderheit der Dinosaurier zu ergründen, schauten sich Biologinnen um Katlin Schroeder von der University of New Mexico in Albuquerque (USA) die fossilen Überreste von 43 damaligen Lebensgemeinschaften genauer an. Die Daten überspannen dabei einen Zeitraum von 136 Millionen Jahren und schließen Funde von sieben Kontinenten und 550 Arten ein.

Zur Überraschung des Teams fehlten Fleisch fressende Dinosaurier, die zwischen 100 und 1000 Kilogramm wogen; kleinere und größere Arten

waren dagegen vertreten. Laut Schroeder und ihren Kolleginnen verdrängte der Nachwuchs der großen Fleischfresser die mittelgroße Konkurrenz. Denn so gewaltig die Raubsaurier waren – ihre Jungtiere mussten klein anfangen. Ein frisch geschlüpfter *Tyrannosaurus rex* besaß etwa die Abmessungen eines Haushunds. Binnen 16 bis 19 Jahren entwickelte er sich dann zu einem zwölf Meter langen und zehn Tonnen schweren Koloss, legte im Schnitt also mehr als 500 Kilogramm pro Jahr zu. Heranwachsende Tyrannosaurier überstrichen folglich einen enormen Größenbereich.

Da ein hundsgroßer Fleischfresser völlig andere Beute jagt als ein tonnen-schwerer Gigant, besetzten die heranwachsenden Tiere nach und nach sehr

unterschiedliche ökologische Nischen. Mit steigendem Lebensalter führte dies vermutlich dazu, dass die großen Fleischfresser als Teenager jenen Platz beanspruchten, den sonst mittelgroße Arten eingenommen hätten. Dafür spricht auch, dass die Jungtiere der großen Raubsaurier weitaus zahlreicher auftraten als die fertig entwickelten Exemplare, wie die Paläontologinnen anhand von Wachstums- und Überlebenskurven berechneten.

Komplett ausgewachsen standen Räuber wie *T. rex* wohl an der Spitze der Nahrungskette. Trotzdem blieb ihr Leben offenbar hart und kurz, denn Forscher stießen noch auf kein Exemplar, das älter wurde als 30 Jahre.

Science, 10.1126/science.abd9220, 2021

SPEKTROGRAMM

KLIMAWANDEL LEBENSBEDROHLICHER HITZESTRESS

► Forscher haben einen weiteren Grund gefunden, warum sich Klimaschutz auszahlen könnte: Er dürfte maßgeblich dazu beitragen, dass die meisten Regionen entlang des Äquators dauerhaft bewohnbar bleiben. Bei einer ungebremsten globalen Erwärmung würde die Luft in den Tropen während extremer Hitzewellen hingegen so erdrückend warm, dass es für Menschen lebensgefährlich wird, schreibt ein Forschertrio um Stephan Fueglistaler von der Princeton University. Die Gruppe macht dies an der so genannten Kühlgrenztempera-

tur fest. Sie ist ein Maß für Hitzestress und gibt die tiefste Temperatur an, auf die sich die menschliche Haut in einer bestimmten Umgebung durch Schwitzen herunterkühlen kann. Die Messgröße liegt dabei stets unterhalb der Außentemperatur und hängt von der Luftfeuchte ab.

In den Tropen klettert die Kühlgrenztemperatur regelmäßig auf 26 oder 27 Grad, was die meisten Menschen bereits als drückende Schwüle wahrnehmen. Dauerhaft kommt der menschliche Körper nur mit Werten bis 35 Grad klar; jenseits davon verliert er die Fähigkeit, sich selbst ausreichend zu kühlen.

Diesem Punkt hat sich der Planet in den Tropen punktuell wiederholt angenähert, fast immer blieb die Kühlgrenz-

temperatur dabei jedoch unterhalb von 33 Grad. Unter Experten herrscht Uneinigkeit, in welchem Maß der Klimawandel den zu erwartenden Hitzestress verändern wird. Fueglistaler und seine Kollegen machen sich nun für einen linearen Zusammenhang zwischen steigender Lufttemperatur und Kühlgrenztemperatur stark: Ein Grad globale Erwärmung hebe also auch die bei Hitzewellen erreichte Kühlgrenztemperatur um ein Grad an. Folglich lohne es sich, die globale Erwärmung auf 1,5 bis 2 Grad zu beschränken, da man dann selbst bei heftigen Hitzewellen in den Tropen unter der kritischen Kühlgrenztemperatur von 35 Grad bleibe.

Nature Geoscience 10.1038/s41561-021-00695-3, 2021

ARCHÄOLOGIE VERSCHÜTTETER PRUNKWAGEN

► Als der Vesuv ausbrach, begruben Asche, Geröll und Lava Pompeji und seine Bewohner unter sich. Archäologen sind seit Jahrhunderten dabei, das Drama aus dem Jahr 79 n. Chr. zu rekonstruieren – und stoßen immer wieder auf Bauten oder Gegenstände,

die einen Teil der Geschichte erzählen. Ein besonders spektakulärer Fund ist nun in der einstigen Vorstadtvilla Civita Giuliana gelungen: ein Prunkwagen, der in Italien bisher seinesgleichen sucht. Das Gefährt besaß vier aus Eisen geschmiedete Räder. Seine

1,4 mal 0,9 Meter große Sitzfläche war mit Bronze- und Zinnmedaillons verziert, die zum Teil erotische Szenen zeigen.

Die Bewohner der Villa ließen sich in dem Wagen wohl bei festlichen Anlässen wie Paraden durch die Stadt ziehen. Darauf deuten auch die Skelette von vier Pferden hin, die Wissenschaftler bereits vor einiger Zeit im benachbarten Stall ausgegraben haben. Eines der Tiere trug zum Zeitpunkt seines Todes mit Kupfer verziertes Zaumzeug, das zu den Reliefs des Wagens passt.

Das Gefährt selbst stand einst wohl in einem Säulengang, der einen Innenhof flankierte. Bisher sei in Italien kein vergleichbarer Fund bekannt, schreibt der Archäologische Park Pompeji. Einen ganz ähnlichen Wagen fand man jedoch vor 15 Jahren im Norden Griechenlands. Bei der Grabung in der Villa im Norden der römischen Metropole ist laut den beteiligten Wissenschaftlern Eile geboten: Immer wieder zerstörten oder entwendeten Unbefugte in dem Gebiet Kulturschätze, die der Vesuv unter sich begrub.

HEISSER SCHLITTEN Der in Pompeji geborgene Prunkwagen ist unter anderem mit erotischen Szenen verziert.



ARCHAEOLOGICAL PARK OF POMPEII / PUBLIC PROSECUTOR'S OFFICE OF TORRE ANNUNZIATA

Mitteilung des Archäologischen Parks Pompeji, Februar 2021

SAKYA MITOH, MARIANA WOMEN'S UNIVERSITY



BIOLOGIE NEUER KÖRPER FÜR MEERESSCHNECKE

► Meeresschnecken der Gattung *Elysia* gelten schon lange als Sonderlinge. So bauen sie Chloroplasten aus gefressenen Algen in ihre eigenen Zellen ein und betreiben damit Photosynthese. Per Zufall stieß eine japanische Biologin nun auf ein weiteres Phänomen: Die zu den Schlundsack-schnecken gehörenden Weichtiere können sich selbst enthaupten.

Eines Morgens fand die Doktorandin Sayaka Mitoh eine ihrer im Labor aufgezogenen Schnecken in zwei Teile geteilt vor. Der Kopf bewegte sich weiter und fing bald darauf sogar zu

fressen an. Das Gleiche ließ sich anschließend noch bei weiteren Schnecken im Labor beobachten. Nach einem Tag war die Wunde am Kopf verschlossen, binnen sieben Tagen begann die Regeneration des Herzens, und nach gut 20 Tagen war der Körper vollständig nachgewachsen, berichten Mitoh und ihr Betreuer Yoichi Yusa. Wie die beiden vermuten, liefern die eingelagerten Chloroplasten die Energie, die der Kopf zum Überleben braucht.

Der Trick gelang allerdings nur bei jüngeren Schnecken. Ältere warfen

Die Ergebnisse entsprechen dem, was das newtonsche Gravitationsgesetz vorhersagt: In einem Abstand von 2,5 Millimetern zogen sich die Kugeln mit einer Kraft von knapp 10^{-13} Newton an, was der Gewichtskraft einer nur neun Billionstel Gramm schweren Masse im Schwerfeld der Erde entspricht. Um diesen winzigen Wert sicher nachzuweisen, mussten die Forscher ihr Experiment aufwändig abschirmen. So unterband ein hauchdünner Schutzschirm zwischen den Kugeln elektrostatische Effekte, außerdem befand sich das Torsionspendel im Vakuum, um Luftreibung und Schallübertrag zu minimieren. Auch fanden die Messungen nur zwischen Mitternacht und fünf Uhr morgens statt, wenn störende Vibrationen aus

SELBSTENTHAUPTUNG Meeres-schnecken können ihren eigenen Kopf abtrennen – und schützen sich so offenbar vor Parasiten.

zwar auch ihren Körper ab, bildeten jedoch keinen neuen. Die beiden Wissenschaftler beobachteten das Verhalten bei 5 von 15 im Labor aufgezogenen Schnecken des Artkomplexes *Elysia cf. marginata* sowie auch bei 3 von 82 wild gesammelten Individuen der Spezies *Elysia atroviridis*. Letztere regenerierten ihre Körper sogar schon binnen einer Woche.

Eine Art quer über den Rücken verlaufende Sollbruchstelle erlaubt den Tieren die Trennung von Kopf und Rumpf. Vermutlich wirft die Schnecke ihren Körper ab, um Parasiten loszuwerden.

Auch der Rumpf blieb ohne Kopf noch überraschend lang am Leben: Über Wochen oder gar Monate bewegte er sich und reagierte auf Berührungen, bis er schließlich, geschrumpft und verblasst, abstarb. In keinem der Fälle beobachteten die Forscher, dass ein abgetrennter Körper einen neuen Kopf entwickelte.

Current Biology 10.1016/j.cub.2021.01.014, 2021

PHYSIK KLEINSTE GEMESSENE SCHWERKRAFT

► Mit zwei winzigen Goldkugeln haben Forscher die bislang kleinste Gravitationswechselwirkung gemessen. Die Gruppe um Tobias Westphal vom Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Innsbruck hat dazu ein spezielles Torsionspendel verwendet. Seine Schwingungseigenschaften änderten sich messbar, wenn die Forscher eine 90 Milligramm schwere Kugel an eine am Pendelarm befestigte Schwester annähernten. Daraus ließ sich letztlich die Schwereanziehung zwischen den nur zwei Millimeter großen Körpern ableiten.

dem Straßenverkehr am wenigsten ins Gewicht fallen.

In Zukunft will die Arbeitsgruppe die Genauigkeit der Messungen weiter verbessern. So könnte man überprüfen, ob Newtons Mechanik auch bei extrem kleinen Massen und Abständen noch gilt. Physiker hoffen hier seit Langem auf eine Abweichung von der etablierten Theorie, was ein Hinweis auf neue Naturgesetze sein könnte. Diese könnten unter anderem dabei helfen, das Rätsel der Dunklen Materie zu lösen. Sie ließe sich nach Ansicht mancher Experten restlos aus den Modellen der Astrophysik streichen, wenn der Kosmos in bestimmten Situationen von den Gleichungen Isaac Newtons abweicht.

Nature 10.1038/s41586-021-03250-7, 2021

BIOLOGIE EVOLUTIONSTHEORIE AUF DEM PRÜFSTAND

Neue Erkenntnisse haben immer wieder Anlass gegeben, die theoretischen Grundlagen der Evolutionsbiologie zu überarbeiten. Jetzt fordern manche Forscher, das bewährte Gedankengebäude erneut zu erweitern – zu Recht?



Diethard Tautz ist Direktor am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie. Er befasst sich mit molekularen Mechanismen evolutionärer Anpassung, Populationsgenetik, Artbildung und vergleichender Genomforschung.

» spektrum.de/artikel/1848307

NEUE SERIE

Darwins Erbe

Teil 1: Mai 2021

Evolutionstheorie auf dem Prüfstand
Diethard Tautz

Der überraschende Ursprung der Finger
John A. Long und Richard Cloutier

»Jeder besitzt Erbgut vom Neandertaler«
Svante Pääbo

Teil 2: Juni 2021

Die Evolution Fleisch fressender Pflanzen
Rainer Hedrich und Jörg Schultz

Teil 3: Juli 2021

Nach dem Weltuntergang
Massimo Sandal



FAUZY / STOCKADOBBE.COM

HOTSPOT DES LEBENS
Korallenriffe beherbergen zahlreiche Lebewesen, die diverse ökologische Nischen besetzen. Mit ihrer enormen Artenvielfalt sind sie Brennpunkte der Evolution.

AUF EINEN BLICK EIN FACH IM UMBAU

- 1** Einige Wissenschaftler fordern, die Evolutionstheorie zu erweitern, um epigenetische oder auch entwicklungsbiologische Vorgänge besser abzubilden.
- 2** Die heute gängige Theorie ist selbst vielfach überarbeitet worden, und das wird weiterhin nötig sein.
- 3** Bei einigen Mechanismen, etwa der polygenen Vererbung, weiß man aber noch nicht genau, wie sie das evolutionäre Geschehen beeinflussen.

Charles Darwin (1809–1882) zögerte viele Jahre, bevor er seine Evolutionstheorie veröffentlichte. Ihm war bewusst, dass die Theorie, so einfach ihre Grundprinzipien scheinen, etliche biologische Phänomene nicht ohne Weiteres erklären konnte. Er hätte noch länger gezaudert, hätte er nicht in den 1850er Jahren erfahren, dass der britische Naturforscher Alfred Russel Wallace (1823–1913) ähnliche Ideen entwickelte wie er selbst. Darwin hatte zu jenem Zeitpunkt bereits 20 Jahre an der Theorie gearbeitet und fürchtete, Wallace könne ihm mit einer Publikation zuvorkommen.

Quasi in einer Vorabveröffentlichung ließen beide Naturforscher die Grundzüge ihres Konzepts 1858 vor der Linnean Society of London verlesen, stießen aber zunächst auf wenig Resonanz. Erst mit dem Buch »On the Origin of Species by Means of Natural Selection«, das im Jahr darauf erschien, wurde Darwins Evolutionstheorie einem breiten Publikum bekannt. Im Kern des Werks steht – anders als der Titel vermuten lässt – nicht die Frage, wie sich neue Arten herausbilden, sondern der Mechanismus der natürlichen Selektion. Einleitend fasst Darwin dessen Eckpfeiler in zwei Sätzen zusammen, hier in deutscher Übersetzung wiedergegeben:

»Da viel mehr Individuen jeder Art geboren werden, als möglicherweise überleben können, und da es somit einen häufig wiederkehrenden Kampf ums Dasein gibt, folgt daraus, dass jedes Wesen, wenn es sich auch nur geringfügig in irgendeiner Weise verändert, die unter den komplexen und manchmal wechselnden Bedingungen des Lebens vorteilhaft ist, eine bessere Überlebenschance hat und somit natürlich ausgewählt wird. Auf Grund des starken Prinzips der Vererbung wird jede ausgewählte Sorte dazu neigen, ihre neue und modifizierte Form zu verbreiten.«

Hierin steckt alles, was man über die wesentlichen Prinzipien der natürlichen Selektion wissen muss. Aus der Kombination von Überschuss an Nachkommen, Existenzkampf, Variation, Vererbung und ökologischen Rahmenbedingungen folgt die Anpassung an die Umwelt. Diese

AUFFÄCHERUNG Auf dem Galapagos-Archipel leben mehrere Darwinfinken-Arten. Sie stammen alle von einem gemeinsamen Vorfahren ab.

Zusammenhänge lassen sich experimentell beliebig oft reproduzieren und stellen eine gesicherte Gesetzmäßigkeit dar. Insofern handelt es sich eigentlich nicht mehr um eine Theorie, weshalb wir meist von Evolutionsbiologie statt von Evolutionstheorie sprechen.

Einige Wissenschaftler fordern heute, die theoretischen Grundlagen der Evolutionsbiologie zu überarbeiten, um eine so genannte erweiterte evolutionäre Synthese zu schaffen. Die derzeit gängige Synthetische Evolutionstheorie, so ihr Argument, reiche nicht mehr, um das Evolutionsgeschehen hinreichend abzubilden. Stimmt das? Sind Darwins und Wallaces Ideen obsolet geworden? Hätten die beiden ihr Gedankengebäude so ähnlich formuliert, wenn sie über die heutigen biologischen Erkenntnisse verfügt hätten?

Darwin selbst war sein größter Kritiker. Er erkannte, dass man zunächst verstehen müsse, wie sich Organismen entwickeln und ihre Merkmale vererben, bevor man richtig einschätzen könne, wie Variation und Vererbung das evolutionäre Geschehen prägen. Als um 1900 herum die mendelschen Regeln wiederentdeckt wurden, verwiesen Forscher darauf, diese würden mit den darwinschen Ideen kollidieren, da sie nicht mit der Annahme »geringfügiger Veränderungen« vereinbar seien. Mutationen schienen nur große Effekte auszulösen, nicht aber die kleinen Variationen, die Darwin postuliert hatte. Dies löste einen Schub neuer Evolutionstheorien aus, und Darwin und Wallace gerieten beinahe in Vergessenheit.

Doch dann tauchte mit dem britischen Evolutionstheoretiker Ronald Fisher (1890–1962) ein Wissenschaftler auf, der nicht nur die biologischen Aspekte berücksichtigte, sondern auch die mathematisch-statistischen Konsequenzen eines Vererbungsmechanismus, der gemeinsam wirkende Gene in jeder Generation neu zusammenwürfelt. Fisher zeigte: Mutation, Variation und Selektion sind vereinbar mit den mendelschen Regeln, wenn man sie auf ganze Populationen anwendet und über viele Generationen hinweg betrachtet. In seinem Buch »The Genetical Theory of Natural Selection« (1930) handelte er die statistischen Konsequenzen der mendelschen Genetik derart umfassend ab, dass es bis heute nur wenige gibt, die behaupten können, alles darin verstanden zu haben.

Die Evolutionsbiologen leiteten aus diesen Arbeiten insbesondere die Grundlagen der Populationsgenetik ab und konnten darüber hinaus Darwins Ideen mit neuen biologischen Erkenntnissen vereinen. Es erschienen einflussreiche Bücher von Biologen und Evolutionsforschern, die einem größeren Publikum verständlich waren. Dazu gehörte »Genetics and the Origin of Species« (1937) von Theodosius Dobzhansky, »Systematics and the Origin of Species« (1942) von Ernst Mayr sowie »Evolution: The Modern Synthesis« (1942) von Julian Huxley.

Im Zuge dieser Debatte verfestigte sich der Begriff der »Modernen Synthese« der Evolutionsbiologie. Gemeint war keine neue Evolutionstheorie, sondern eine besser verständliche Formulierung einschlägiger mathematischer Zusammenhänge – quasi das Umschreiben von Gleichungen in Naturgeschichte. Letztlich ist die Moderne Synthese eine Mischung aus Theorien, Beobachtungen und experimentellen Befunden der Genetik, Embryologie, Zoologie,





DAN FOX / BETTY IMAGES / ISTOCK

Botanik, Ökologie, Paläontologie und Molekularbiologie. Sie versöhnt die mendelsche Genetik mit der darwinschen Vorstellung einer graduellen Evolution (welche in vielen Zwischenschritten und nicht sprunghaft abläuft). Ihre wichtigste Erkenntnis lautet, das Auftauchen neuer Arten sei nur mit Hilfe der Populationsgenetik erklärbar. Darwin selbst hatte sich nur zurückhaltend dazu geäußert, wie Spezies entstehen – schon deshalb, weil er nicht über eine brauchbare Definition des Speziesbegriffs verfügte.

Die Schulen lehren Evolutionsbiologie heute gestützt auf die Moderne Synthese. Dabei entsteht oft der Eindruck, der Erkenntnisgewinn sei abgeschlossen und alle evolutionären Phänomene seien erklärbar. Sowohl die Evolutionsbiologie als auch die Genetik, Ökologie, Verhaltensforschung und Entwicklungsbiologie entwickeln sich aber ständig weiter. Forscherinnen und Forscher machen laufend empirische und experimentelle Entdeckungen, genauso wie es ständig theoretische Fortschritte gibt. Somit stellt sich die Frage, ob eine »erweiterte evolutionäre Synthese« notwendig sei. Einige Evolutionsbiologen, etwa Kevin Laland von der University of St Andrews (Großbritannien), fordern sie nach-

LANDGANG Flösselhechte haben kräftige Brustflossen und können sich auf dem Trockenen schlängelnd vorwärtsbewegen. Vermutlich haben die Vorfahren der Landwirbeltiere das so ähnlich getan.

KURIOSUM Bei Schildkröten liegen die Schulterblätter innerhalb der Rippen, was äußerst ungewöhnlich ist. Wie so etwas entstehen kann, erforscht die evolutionäre Entwicklungsbiologie.

drücklich, weil sie nicht sehen, wie sich manche empirischen Beobachtungen in das bestehende Theoriegebäude einfügen lassen. Es geht ihnen aber nicht darum, die gegenwärtigen Erklärungen des evolutionären Geschehens aufzugeben, sondern sie wollen diese erweitern. Wie das konkret erfolgen soll, ist freilich weniger klar. Zudem teilen viele Biologen nicht die Ansicht, dass es einer solchen Überarbeitung bedarf.

Die Moderne Synthese hat bereits mehrere wichtige Weiterentwicklungen durchlaufen, insbesondere im Hinblick darauf, welche Rolle der Existenzkampf spielt, woher die Variation kommt und wie ökologische Faktoren auf die Artbildung einwirken. In neuerer Zeit kamen die Erkenntnisse zur epigenetischen und polygenen Vererbung hinzu. Zudem ist das Fach immer stärker von Computermodellen und Mathematisierung geprägt, um über das »bloße Geschichtenerzählen« hinauszugehen. Aktuell hat das beispielsweise eine große Bedeutung, um Infektionszyklen und die Ausbreitung von Virusmutanten zu beschreiben.

Wer eine »erweiterte evolutionäre Synthese« fordert, sollte sich zunächst darüber klar werden, welche konzeptuellen Fortschritte es schon gegeben hat und wo das Fach jetzt steht.

Gibt es einen Existenzkampf?

Darwin hat den »Struggle for Existence« als einen Faktor der natürlichen Selektion benannt. Viele interpretieren das als »Überleben des Stärkeren« in einem Kampf aller gegen alle. Manche erheben es sogar zum Kern des Darwinismus. Aber schon seit den 1940er Jahren rätseln Evolutionsbiologen, wie eine allgegenwärtige Rivalität damit vereinbar sei, dass wir fast überall kooperierende Individuen beobachten. Wieso arbeiten die diversen Mitglieder eines vielzelligen Organismus zusammen, wenn am Ende nur die Keimzellen in die nächste Generation gehen? Weshalb kooperieren Insekten, obwohl sich nur ihre Königin fortpflanzt? Warum helfen Menschen sich gegenseitig, wenn sie keinen direk-

A. HARTL / BICKWINKEL / PICTURE ALLIANCE



ten Vorteil daraus ziehen? Sogar Bakterien tun sich zusammen, um Nahrungsquellen gemeinsam besser zu nutzen oder sich kollektiv gegen Viren zu verteidigen.

Um dies zu erklären, haben Evolutionsbiologen zunächst vorgeschlagen, nicht Individuen würden selektiert, sondern Gruppen. Das würde Kooperation quasi zu einem zusätzlichen Evolutionsprinzip machen. Doch dieser Ansatz lässt sich nicht aufrechterhalten, da Trittbrettfahrer und Betrüger die Gemeinschaft ausnutzen können, ohne selbst in sie zu investieren. Sie verschaffen sich damit persönliche Vorteile, die zu Lasten der anderen gehen. Gibt es zu viele Betrüger, bricht die Gruppe zusammen, auch wenn Zusammenarbeit langfristig zu besseren Anpassungen und höheren Überlebenschancen führen würde. Ein klassisches Beispiel hierfür ist das Gefangenendilemma (siehe »Spektrum« Dezember 2014, S. 64).

Das Wechselspiel zwischen Kooperation, Konflikt und Interessenausgleich hat sich tatsächlich als eines der komplexesten – und immer noch nicht völlig gelösten – Probleme der Evolutionsbiologie herausgestellt. Es lässt sich intuitiv nur begrenzt erfassen; man braucht eine theoretische Herangehensweise und leistungsfähige mathematische Modelle hierfür.

Der »Kampf ums Dasein« weicht inzwischen der »evolutionär stabilen Strategie« (ESS) – ein Konzept, das der Theoretische Biologe John Maynard Smith und der Populationsgenetiker George Robert Price 1973 eingeführt haben. Die ESS repräsentiert eine Strategie, die eine Population robust gegen Eindringlinge macht. Sofern hinreichend viele Mitglieder einer Gruppe sie anwenden, lässt sie sich durch keine Alternativstrategie verbessern. Ist sie erreicht, haben Betrüger, die gegen sie verstoßen, keine systematischen Vorteile mehr.

Die ESS findet eine Entsprechung in den Wirtschaftswissenschaften: das so genannte Nash-Gleichgewicht. Beide lassen sich mit Methoden der Spieltheorie untersuchen. Das Individuum bleibt zwar generell die Einheit der Selektion, doch es befindet sich nicht in einem kontinuierlichen Existenzkampf, sondern ist Teil eines kooperativen »Spiels«, in dem der Erfolg des eigenen Verhaltens vom Verhalten der Mitspieler abhängt.

Woher kommt die Variation?

Darwin hatte erkannt, dass für die natürliche Selektion ein Vererbungsmechanismus erforderlich ist. Um welche molekulare Maschinerie es sich dabei handelt, wissen wir erst seit der Entschlüsselung der DNA-Struktur durch die Molekularbiologen James Watson und Francis Crick im Jahr 1953; Daten der Biochemikerin Rosalind Franklin hatten diese Entdeckung möglich gemacht. Den Vorreitern der Modernen Synthese war der Mechanismus noch nicht gewärtig; folglich konnten sie ihn nicht in ihrem Theoriegebäude berücksichtigen. Heute ist klar: Genetische Variation entsteht durch Veränderungen in der DNA, meist durch Austausch von Basenpaaren, den »Buchstaben« der Erbinformation. Wenn Organismen ihre DNA vervielfältigen, funktioniert das zwar weitgehend fehlerfrei, aber nicht völlig perfekt. In jeder Generation treten neue Fehler beziehungsweise Mutationen auf, aus denen die von Darwin

postulierten Variationen folgen, an denen dann wiederum die Selektion ansetzt.

Der japanische Genetiker Motoo Kimura stellte in den 1960er Jahren allerdings die These auf, die meisten Mutationen würden sich nicht mittels Selektion, sondern durch neutrale Zufallseffekte durchsetzen. Mit Gleichungen aus der Diffusionstheorie leitete er Gesetzmäßigkeiten ab, wonach beispielsweise die Zeit, bis sich eine solche Mutation durchgesetzt hat, dem Vierfachen der Populationsgröße in Generationen entspricht. Auf derartigen Berechnungen fußt die »neutrale Evolutionstheorie«, die heute einen der wichtigsten Eckpfeiler der Evolutionsbiologie darstellt. Denn sie lässt sich in Formeln fassen, die Vorhersagen erlauben, und ermöglicht es, die Wirkung natürlicher Selektion als statistische Abweichung zu erkennen.

Wir wissen heute, dass Abwandlungen in DNA-Sequenzen mehrheitlich den Gesetzen der neutralen Evolutionstheorie folgen. Darauf basieren genetische Analysen von Abstammungsverhältnissen und so genannte molekulare Uhren, mit denen sich Altersabschätzungen auf Grund von DNA-Sequenzvergleichen vornehmen lassen.

Die japanische Genetikerin Tomoko Ohta erweiterte 1973 die neutrale Evolutionstheorie. In ihre »Nearly Neutral Theory« bezog sie zusätzlich genetische Modifikationen ein, die nicht strikt neutral sind, sondern positive oder negative Effekte auf den Phänotyp haben können. Ohta zeigte: Um bei solchen Varianten zu verstehen, ob und wie sie sich evolutionär durchsetzen, muss man die Größe der Population berücksichtigen, in der sie auftreten. In kleinen Gruppen können selbst deutlich vorteilhafte Mutationen durch Zufallsdrift verloren gehen, während in großen Populationen auch genetische Abwandlungen mit minimalem Effekt zu einer ökologischen Anpassung beitragen.

Das gefallene Dogma

Es war vor allem der deutsch-amerikanische Biologe Ernst Mayr, der das Prinzip der allopatrischen Artbildung bekannt machte – als eine der wichtigsten Erkenntnisse der Modernen Synthese. Es handelt sich hier um die erste echte Theorie der Artbildung (»Speziation«). Sie hatte sich aus theoretischen Überlegungen ergeben und folgte aus den Prinzipien der Populationsgenetik und des Genflusses.

Getrennte Spezies zeichnen sich nach vorherrschendem Verständnis dadurch aus, dass sie untereinander kein Erbmaterial mehr austauschen, bezüglich ihrer Fortpflanzung also voneinander isoliert sind (siehe hierzu auch das Interview S. 30). Die von Ronald Fisher entwickelten Formeln zum Genfluss zeigen aber: Bereits wenige Prozent Austausch pro Generation genügen, damit ein einheitlicher Genpool erhalten bleibt. Daraus ergibt sich eine hohe Hürde für das Entstehen neuer Arten. Dies brachte Mayr dazu, das Dogma der allopatrischen Artbildung aufzustellen, wonach nur die räumliche Trennung von Populationen einen wirksamen Mechanismus darstellt, neue Spezies hervorzubringen. Damit gab Mayr die Sicht auf, eine Anpassung an die Umwelt leiste ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Speziation, wie es noch Darwin und Wallace vermutet hatten.

Dieses Dogma hat die Evolutionsbiologie jahrzehntelang geprägt. Viele Wissenschaftler hielten eine Artbildung ohne



BRUNZU3 (COMBONS) WIKIMEDIA COMMONS/FREI POLYDAKTYLIE DER HANDE (APR 1997) / CC BY-SA 3.0 (RENTGENBILDER UND LICENZIERUNGSPROJEKTE/REACTOR)

VIELFINGRIG Polydaktylie ist die Ausprägung zusätzlicher Finger oder Zehen. Sie folgt aus Mutationen in regulatorischen DNA-Abschnitten – ein Beispiel für sprunghafte Änderungen des Phänotyps.

räumliche Trennung, in der Fachsprache als sympatrische Speziation bezeichnet, nur in Spezialfällen für möglich. Manche gingen so weit, abweichende Forschungsergebnisse aktiv zu unterdrücken.

Es bedurfte letztlich einer neuen Forschergeneration, um das Dogma zu durchbrechen. Eine der wichtigsten theoretischen Überlegungen hierbei lautete, dass es in einer Population, die sich an eine Umwelt optimal angepasst hat, zu Konkurrenz kommt. Die meisten Individuen tragen dann die gleiche Adaptation und konkurrieren somit um dieselben Ressourcen. Das macht die eigentlich vorteilhafte Anpassung wieder zum Nachteil. Man kann das mit Goldgräbern vergleichen, die auf eine neue Ader stoßen. Die ersten haben große Aussicht auf Gewinn, doch wenn viele weitere hinzukommen, überwiegen irgendwann die Kosten der gegenseitigen Rivalität. Es kann dann für Einzelne sinnvoll sein, nicht mehr nach Gold zu suchen, sondern beispielsweise einen Saloon oder ein Geschäft zu eröffnen.

In natürlichen Populationen geschieht Ähnliches. Individuen mit genetischen Abweichungen, die es ihnen erlauben, neue Ressourcen zu nutzen, haben einen Vorteil gegenüber der Masse, die von der Hauptressource abhängt. Allerdings führt dies wegen des ständigen Genflusses nicht sofort zu einer Aufspaltung in getrennte Spezies. Es muss ein weiterer Faktor dazukommen – etwa das bevorzugte Paaren gleich angepasster Individuen (die »assortative Paarung«) oder ein ökologischer Gradient, beispielsweise räumliche Unterschiede in der Umgebungstemperatur, der Feuchte oder der Bodennährstoffe. Solche Faktoren können

eine Trennung von Genpools vorantreiben und damit die so genannte adaptive Artbildung ermöglichen, und zwar viel schneller als der allopatrische Mechanismus. Das erklärt, warum sich zahlreiche Spezies laufend in neue aufspalten, ohne dass eine strenge räumliche Separation vorliegt. Artbildung ist damit nicht nur ein passiv räumliches Phänomen, sondern auch ein aktiv ökologisches – so, wie Darwin und Wallace es sich vorgestellt hatten.

Rückkehr zu Lamarck?

Der französische Naturforscher Jean-Baptiste de Lamarck (1744–1829) erkannte noch vor Darwin als einer der Ersten, dass Arten nicht unveränderlich sind, sondern sich durch Anpassung an die Umwelt weiterentwickeln. Er nahm an, Organismen würden während ihres Lebens Eigenschaften erwerben, die sie dann ihren Nachkommen vererben.

Auch Darwin ging von einem solchen Mechanismus aus und brachte ihn in Zusammenhang mit der Zelltheorie. Er vermutete, jede Körperzelle würde kleine Keime absondern, so genannte Gemmulae, die im Organismus zirkulieren, in die nächste Generation weitergegeben werden und so den Nachwuchs prägen. Dem widersprach die Entdeckung der Keimbahn im späten 19. Jahrhundert durch den deutschen Arzt August Weismann (1834–1914). Demnach sind die Keimzellen (Spermien und Eizellen) als Gründer der nächsten Generation klar von den Körperzellen getrennt. Auch die mendelschen Regeln sowie die Erkenntnis, auf welchem Mechanismus die Vererbung beruht, schienen die Weitergabe individuell angeeigneter Eigenschaften an die Nachkommen zu widerlegen.

Doch dieses Bild hat sich mittlerweile grundlegend gewandelt. Inzwischen kennen wir molekulare Vorgänge, die dafür sorgen, erworbene Merkmale in die nächste Generation zu tragen: die so genannten epigenetischen Prägungen. Sie betreffen nicht die Buchstabenfolge der DNA selbst, also ihre Basensequenz, sondern geschehen durch chemische Abänderungen an der DNA – etwa das Übertragen von Methylgruppen auf DNA-Bausteine. Dies legt gewissermaßen einen Regulationsschalter um, der darüber bestimmt, wie aktiv das betroffene Gen ist (siehe »Spektrum« Juni 2017, S. 36).

Epigenetische Prägungen sorgen unter anderem dafür, dass Blut-, Leber- oder Nervenzellen unterschiedliche Funktionen im Organismus ausüben, obwohl sie alle die gleiche DNA-Sequenz in sich tragen. Wie Oliver Rando von der University of Massachusetts und Rebecca Simmons von der University of Pennsylvania 2015 in einer systematischen Übersichtsarbeit nachgewiesen haben, können epigenetische Prägungen, die durch Umwelteinflüsse entstehen – beispielsweise durch ein verändertes Nahrungsangebot –, in die Keimbahn gelangen. Sie bleiben dann in der nächsten Generation bestehen, selbst wenn ihr Auslöser weggefallen ist.

Wahrscheinlich geschieht dies auf eine Weise, die an Darwins Gemmulae erinnert. Alle Körperzellen sondern kleine Bläschen namens Exosomen ab, die durch den Organismus wandern. Sie enthalten Teile der Zellen, von denen sie stammen – darunter regulatorische RNA-Moleküle, die DNA epigenetisch modifizieren können. Zumindest für



STAUDAMM Biber legen Bauten an, mit denen sie den Wasserstand regulieren. Solch aktives Gestalten der Umwelt (»Nischenkonstruktion«) bestimmt den Selektionsdruck mit, dem Arten ausgesetzt sind.

Spermien ist inzwischen bekannt, dass sie solche Bläschen während ihrer Reifung aufnehmen, womit die Möglichkeit besteht, epigenetische Information auf den Nachwuchs zu übertragen. So haben Forscher um Wei Zhou von der University of Newcastle, Australien, im Jahr 2019 gezeigt, dass Exosomen aus den Nebenhoden der Maus an heranreifende Spermien koppeln und Moleküle an sie übergeben. Ein weiteres Team um Lucia Vojtech von der University of Washington demonstrierte 2014: Menschliches Spermium enthält unzählige Exosomen, die mit RNA-Molekülen vermutlich regulatorischer Funktion beladen sind. Obgleich dies nicht ganz dem Mechanismus entspricht, den Darwin sich vorstellte, macht es doch klar, dass Körper und Keimbahn nicht völlig getrennt sind. In einer systematischen Übersichtsarbeit von 2019 hat die Biologin Upasna Sharma von der University of California, Santa Cruz, mehr als 150 Studien zusammengetragen, die das Konzept einer generationenübergreifenden Weitergabe epigenetischer Informationen stützen.

Im Hinblick auf diese Erkenntnisse fordern die Verfechter einer »erweiterten Synthese«, die Evolutionstheorie grundsätzlich zu überarbeiten. Ihr Argument: Epigenetische Prägungen sollten die Anpassung an neue Umweltbedingungen wesentlich beschleunigen, was es erfordere, Fishers populationsgenetische Formeln anzupassen. Es liegt jedoch im Wesen epigenetischer Veränderungen, dass sie die DNA-Sequenz nicht beeinflussen. Daher lassen sich ihre Effekte meist nur für einige wenige Generationen nachweisen, danach gehen sie wieder verloren, wie etwa ein Team um die Neurobiologin Leah Houry-Zeevi von der Tel Aviv University 2020 gezeigt hat. Langfristige Wirkungen sind damit nicht möglich.

Doch gerade in diesen liegt der Schlüssel, um Evolution zu verstehen. Gegner der Evolutionstheorie haben immer

vorgebracht, etliche Anpassungen seien viel zu wenig wahrscheinlich, um allein durch natürliche Selektion zu Stande zu kommen. Fisher demonstrierte aber bereits 1954: Eine Kombination von Selektion und stabiler Vererbung über viele Generationen hinweg macht selbst die unwahrscheinlichsten Ereignisse möglich. Er verglich dies mit der Aufgabe, ein bestimmtes Proton im gesamten Universum zu finden, für die er eine extrem geringe Erfolgchance von 10^{-79} angab. Die natürliche Selektion einer genetischen Variante, die pro Generation lediglich einen Vorteil von zwei Prozent bringt, kann binnen 10000 Generationen eine derart unwahrscheinliche Anpassung bewirken. Folglich ist Evolution nur mittels kombinierter Selektion und stabiler Vererbung über lange Zeiträume hinweg erklärbar.

Epigenetische Prägung bleibt allenfalls für wenige Generationen erhalten und erfordert somit keine grundlegende Erweiterung der Evolutionstheorie. Doch sie eignet sich möglicherweise, um die so genannte phänotypische Plastizität zu erklären. Gemeint ist der Umstand, dass nicht nur die DNA-Sequenz darüber bestimmt, welches Erscheinungsbild der Organismus ausprägt, sondern ebenso die Umwelt. Ob phänotypische Plastizität aber evolutionäre Anpassung beschleunigt oder verlangsamt, ist nicht klar. Beides scheint denkbar. So könnten sich ganze Populationen dank epigenetischer Veränderungen schneller auf neue Umwelten einstellen. Andererseits reduzieren epigenetische Mechanismen vielleicht den Selektionsdruck, der auf die DNA-Sequenz einwirkt, und machen langfristige Adaptationen so weniger wahrscheinlich.

Die Genotyp-Phänotyp-Beziehung

Ein weiteres Argument der Verfechter einer erweiterten evolutionären Synthese betrifft die Frage, wie evolutionäre Entwicklungssprünge des Phänotyps entstehen. Auch das ist ein altbekanntes Problem, hat aber mit der Entdeckung von Entwicklungskontrollgenen neue Nahrung bekommen. Eine ganze Forschungsrichtung, die evolutionäre Entwicklungsbiologie (evolutionary developmental biology, kurz Evo-Devo) befasst sich damit, welche Rolle die Individualentwicklung im evolutionären Geschehen spielt. Letztlich geht es ihr um die – weitgehend unbeantwortete – Frage,

wie die linear angeordnete, eindimensionale Information der DNA-Sequenz den dreidimensionalen Aufbau des Phänotyps hervorbringt. Fachleute bezeichnen das als Genotyp-Phänotyp-Beziehung.

Evo-Devo-Forscher haben gezeigt: Eine veränderte Aktivität von Entwicklungskontrollgenen kann zu neuen Körperformen, gar zu neuen Körperbauplänen führen – beispielsweise zu Augen statt Antennen bei Fliegen (siehe »Spektrum« Februar 2021, S. 22). Liegt hier der Schlüssel, um die so genannte Makroevolution zu verstehen, das plötzliche Auftauchen neuer Lebensformen, wie manche Fossilienabfolgen es nahelegen scheinen? Folgt die Makroevolution anderen Gesetzen, als wir sie bisher kennen? Der Beweis dafür steht auch nach rund 30 Jahren intensiver Evo-Devo-Forschung aus. Ein mögliches Gegenargument wäre: Mutationen in Entwicklungskontrollgenen führen meist zu so vielen Veränderungen gleichzeitig, dass sie sich fast immer schädlich auf die betroffenen Individuen auswirken. Große Änderungen, die von Vorteil sind, wären folglich eher über viele kleine Schritte erreichbar. Also graduell, wie von Darwin und Wallace postuliert.

Mehr Einsicht in dieses Problem wird es erst geben, wenn die Genotyp-Phänotyp-Beziehung besser verstanden ist. Ein großes Wissenschaftskonsortium um den Bioinformatiker Andrew Wood von University of Exeter ist 2014 zu dem Fazit gekommen: Einzelne Gene mit ihren natürlichen Varianten beeinflussen den Phänotyp kaum. Stattdessen sind es Kombinationen tausender Gene, die das Erscheinungsbild des Organismus bestimmen, etwa die Körpergröße beim Menschen. Weil deren Varianten in jeder Generation zufällig zusammengewürfelt werden, sind Merkmale wie die Körpergröße in Populationen normalverteilt. Dies bezeichnet man als polygene Bestimmung des Phänotyps. Schon Darwins Cousin Francis Galton (1822–1911) hatte sie in seinem Werk »Natural Inheritance« (1889) vorweggenommen, und Fisher entwickelte die mathematischen Grundlagen, um sie zu beschreiben.

Beim Menschen existieren schätzungsweise derart viele Kombinationsmöglichkeiten natürlicher Genvarianten, dass sich eine Körpergröße von sechs Metern erreichen ließe, wenn die entsprechenden Erbanlagen in einem Individuum zusammenkämen, was allerdings nur durch Selektion über tausende Generationen hinweg erreichbar wäre. Neue Mutationen oder epigenetische Prägungen wären dafür nicht nötig. Die natürliche Variation hält zusammen mit den Möglichkeiten der Kombinatorik somit ein riesiges Reservoir für phänotypische Neuerungen bereit, was die Basis der Tier- und Pflanzenzucht darstellt. Auch diese Einsicht hatte schon Darwin, unter anderem infolge seines Interesses an Taubenzucht.

Weil sich Genetiker viele Jahre lang auf die Wirkung einzelner Gene konzentriert haben, fand die polygene Bestimmung des Phänotyps zwischenzeitlich wenig Beachtung. Fishers mathematisches Konzept dazu trat in den Hintergrund; stattdessen bevorzugten viele Forscher ein alternatives Modell von ihm, in dem eine oder einige wenige Erbanlagen den Phänotyp maßgeblich prägen, während die anderen nur kleine Modifikationen beisteuern. Die Genomforschung liefert aber immer mehr Belege dafür,

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FOTOLIA / HLPHOTO

dass die Genotyp-Phänotyp-Beziehung in aller Regel polygen ist und sehr viele natürliche Genvarianten quasi gleichberechtigt zum Erscheinungsbild beitragen.

Manches spricht sogar für einen omnigenen Mechanismus, in dem die Varianten sämtlicher Erbanlagen, die in einem bestimmten Stadium oder einem bestimmten Organ aktiv sind, am Phänotyp mitwirken – so die Erkenntnis eines Teams um den Genetiker Jonathan Pritchard von der Stanford University im Jahr 2017. Wissenschaftler arbeiten daran, die mathematischen Modelle entsprechend anzupassen, was allerdings kompliziert ist. Ob dies eine grundsätzlich neue Theorie erfordern wird, lässt sich derzeit nicht beantworten.

Brauchen wir eine erweiterte Synthese?

Allen Evolutionsbiologen ist klar, dass ihr Fach damals wie heute vor unbewältigten Herausforderungen steht. Zudem gibt es laufend neue biologische Entdeckungen, die nach einer Einordnung verlangen. Eine Erweiterung der Evolutionstheorie hat bereits mehrfach stattgefunden und wird weiterhin erfolgen. Es handelt sich hier aber nicht um klar abgrenzbare Theoriesprünge. Schon die Moderne Synthese war kein einheitlicher konzeptueller Schritt, sondern die Summe aus vielen neuen Einsichten. Daher sehen etliche Forscher keinen zwingenden Grund dafür, jetzt eine »erweiterte evolutionäre Synthese« zu schaffen, die selbst wieder diverse verschiedene Phänomene zu erklären suchte. Die Verfechter einer solchen Synthese weisen allerdings völlig berechtigt auf Punkte hin, die nicht abschließend geklärt sind. In der Rückschau haben sich Darwins Ideen aber als ausgesprochen stabile Grundlage erwiesen. ◀

QUELLEN

Garay, J. R. et al.: When optimal foragers meet in a game theoretical conflict: A model of kleptoparasitism. *Journal of Theoretical Biology* 502, 2020

Laland, K. et al.: Does evolutionary theory need a rethink? *Nature* 514, 2014

Rando, O. J., Simmons, R. A.: I'm eating for two: Parental dietary effects on offspring metabolism. *Cell* 161, 2015

Sharma, U.: Paternal contributions to offspring health: Role of sperm small RNAs in intergenerational transmission of epigenetic information. *Frontiers in Cell and Developmental Biology* 7, 2019

Wood, A. R. et al.: Defining the role of common variation in the genomic and biological architecture of adult human height. *Nature Genetics* 46, 2014

PALÄONTOLOGIE DER ÜBERRASCHENDE URSPRUNG DER FINGER

Ein jüngst entdecktes Fossil zeigt, dass sich die Finger der Vierbeiner teilweise schon entwickelt hatten, bevor Wirbeltiere aus dem Wasser stiegen und das Land besiedelten.



John A. Long (links) ist Professor für Paläontologie an der Flinders University in Südaustralien. **Richard Cloutier** forscht als Professor für Evolutionsbiologie an der Université du Québec à Rimouski (Kanada).

» spektrum.de/artikel/1848310



ERSTE SCHRITTE *Elpistostege watsoni*, ein 375 Millionen Jahre alter Fisch und Vorläufer der Tetrapoden, besaß Fingerknochen in seinen Brustflossen, mit denen er sich aufrichten und auch an Land fortbewegen konnte.

► Fünf Finger, die an der Handfläche ansetzen: Mit dieser Anordnung, die Flexibilität mit Kraft vereint, können wir Klavier spielen, einen Hammer schwingen oder einen Mitmenschen zärtlich berühren. Kein anderer Körperteil ist uns so vertraut – schließlich brauchen wir ihn für die meisten alltäglichen Verrichtungen, vom Ankleiden und Autofahren bis zum Kochen und SMS-Schreiben. Unter den Gesichtspunkten der Evolutionsbiologie birgt die Hand jedoch bis heute noch manches Rätsel, und das gilt besonders für die ersten Stadien ihrer Entstehung. Bei anderen Tieren mit vier Extremitäten – zusammengefasst in der Gruppe der Vierfüßer oder Tetrapoden – sehen die Hände ganz anders aus als unsere und funktionieren auch nicht so. Vögel und Fledermäuse etwa haben daraus raffiniert gebaute Flügel gemacht; bei Elefanten dagegen tragen sie Gliedmaßen mit dem Umfang von Baumstämmen.

Der grundlegende Aufbau der Hände ist aber immer der gleiche. Über die Ähnlichkeiten schrieb schon 1859 Charles Darwin (1809–1882) in »On the Origin of Species«: »Was könnte merkwürdiger sein, als dass die beim Menschen zum Greifen, beim Maulwurf zum Graben geformte Hand, das Bein des Pferdes, die Flosse des Tümmers und der Flügel der Fledermaus alle nach demselben Muster gebaut sind und über ähnliche Knochen an der gleichen relativen Position verfügen?« (Übersetzung von E. Schönfeld: Der Ursprung der Arten; Klett-Cotta 2018, S. 510).

Darwin lieferte eine einleuchtende Erklärung dafür: All die unterschiedlichen Tiere teilen dieses Bauprinzip, weil sie aus einem gemeinsamen Vorfahren hervorgegangen sind, der Gliedmaßen mit Fingern besaß. In den über 160 Jahren seither haben Evolutionsforscher das mit immer neuen Fakten aus der Paläontologie, Genetik und Embryologie belegt. Mit ihren Arbeiten brachten sie Licht in die gemeinsame Abstammung der Landwirbeltiere, die sich aus den Fischen entwickelten. So konnten sie zeigen, dass die Knochen der menschlichen Hand auch bei Fröschen, Vögeln und Walen vorkommen. Außerdem identifizierten sie Gene, welche die Entwicklung von Händen, Flügeln und Flossen gleichermaßen steuern.

Das erste Kapitel der Geschichte allerdings – der Abschnitt, in dem sich Hand und Handgelenk aus Knochen in den Flossen eines urzeitlichen Fisches entwickelten – blieb im Dunkeln. Der Grund: Es fehlte an hinreichend vollständigen Fossilien von Übergangsformen zwischen ausschließlich im Wasser lebenden Fischen und vierbeinigen Landbewohnern.

Doch ein 2020 beschriebenes spektakuläres Fossil ist geeignet, diese Wissenslücke weitgehend zu schließen. Es handelt sich um das vollständige Skelett des 375 Millionen Jahre alten Fisches *Elpistostege watsoni*. In den Flossen des Fossils haben sich Knochen erhalten, die mit unseren Fingerknochen vergleichbar sind, und sie zeigen, dass die Finger sich bereits teilweise entwickelt hatten, bevor die ersten Wirbeltiere das Wasser verließen. Die Entdeckung widerlegt die bisherigen Vermutungen über Zeitpunkt und Art der Evolution der Hände und wirft ein überraschendes Licht auf den Aufstieg der Vierfüßer, der ein neues Kapitel in der Geschichte des Lebens aufschlug.

Undurchsichtige Ursprünge

Es gab zuvor schon Fossilien, die Stadien beim Landgang der Meeresbewohner dokumentierten. Eines davon stammt von einem Fisch namens *Panderichthys rhombolepis* aus der Ostseeregion und wurde auf das mittlere bis späte Devon vor ungefähr 379 bis 384 Millionen Jahren datiert. Mit seinem verlängerten Oberarm- sowie den großen Unterarmknochen (Elle und Speiche), aber auch mit dem Aufbau seinem Schädels, der dem von Vierfüßern ähnelt, lieferte *Panderichthys* die ersten Anhaltspunkte dafür, dass die systematische Gruppe, zu der er gehört, unter allen Fischen am engsten mit den Tetrapoden verwandt ist. Diese Gruppe heißt *Elpistostegalia*, benannt nach dem ältesten bekannten Fundstück von *Elpistostege*, einem schon 1937 im Osten Kanadas entdeckten Schädelfragment.

Im Jahr 2006 meldeten Neil Shubin und sein Team von der University of Chicago den Fund eines weiteren rund 380 Millionen Jahre alten Fischfossils aus der Gruppe der *Elpistostegalia* in der kanadischen Arktis. *Tiktaalik roseae* – so sein Name – besaß eine Brustflosse, die mit ihren gut entwickelten Armknochen und beweglichen Handgelenken fortschrittlicher erschien als bei jedem anderen bis dahin bekannten Fossil. Zudem teilte der Kopf charakteristische Merkmale mit dem der Vierfüßer, darunter eine lange, flache Schnauze und einen spezialisierten Hirnschädel.

Insgesamt legten der neue Fund und die zuvor schon bekannten Fossilien aus der Gruppe der *Elpistostegalia* nahe, dass eine Reihe typischer Kennzeichen von Tetrapoden ihren Ursprung bei deren Fischvorfahren hatte. Das galt vor allem für landtaugliche Armknochen und Gelenke. Eines aber besaßen diese Fische anscheinend nicht: Finger. Bei *Panderichthys* hatten einige Wissenschaftler zwar zunächst bestimmte knochige Strukturen für rudimentäre Fingerglieder gehalten; doch das stellte sich später als falsch heraus. Und bei dem Fossil von *Tiktaalik* war die Spitze der Brustflosse, an der sich gegebenenfalls Fingerknochen hätten befinden können, nicht vollständig erhalten. Auf Grund der vorliegenden Indizien gelangten die Paläontologen daher zu dem Schluss, dass beim Übergang von Flossen zu Gliedmaßen

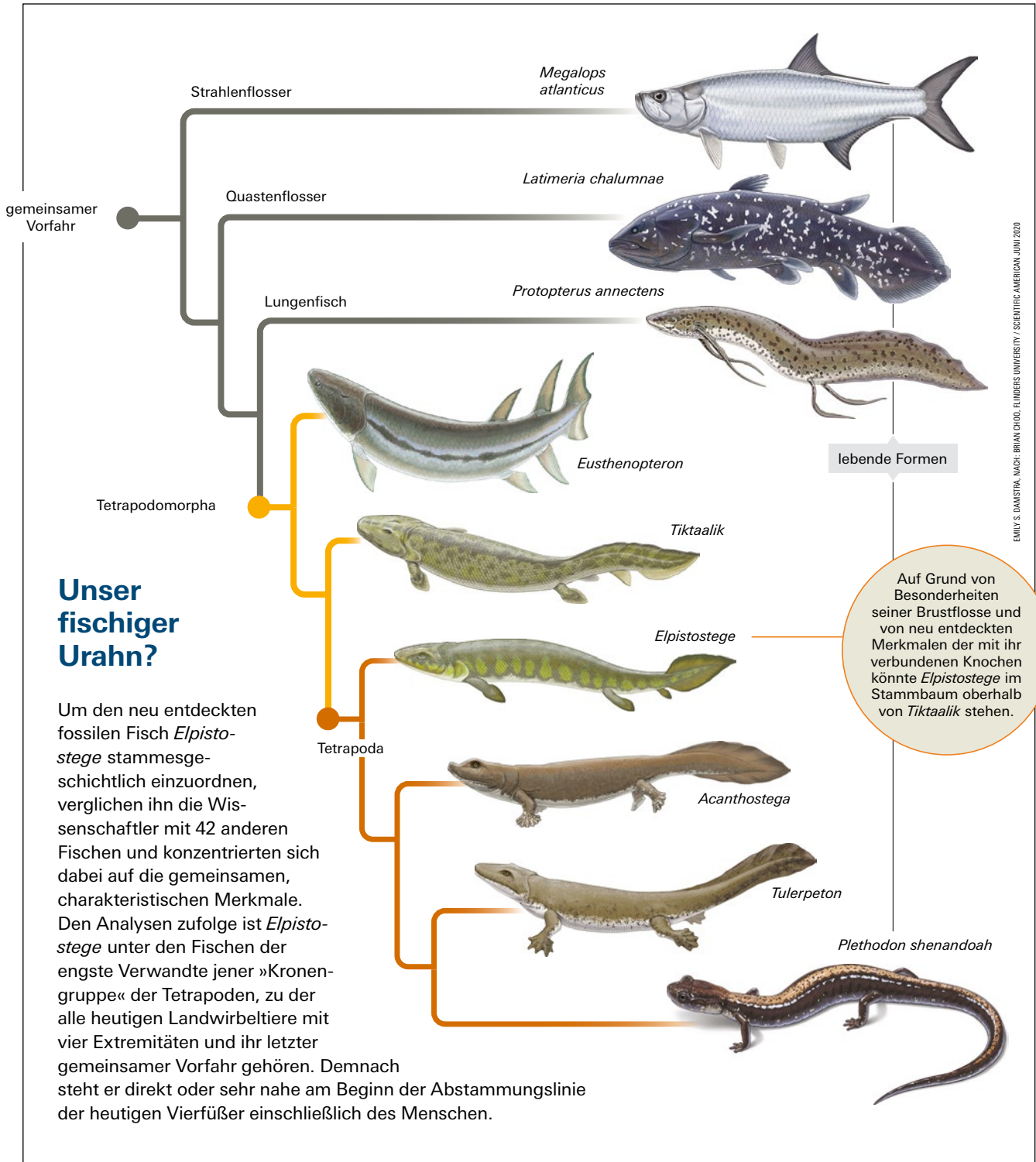
AUF EINEN BLICK EIN AUFSCHLUSSREICHES FOSSIL

- 1 Wie die Hände der Landwirbeltiere aus den Flossen ihrer Fischvorfahren hervorgegangen sind, war lange schwer zu ermitteln, weil es kaum Fossilien gab, die den Übergang dokumentierten.
- 2 Das kürzlich entdeckte vollständige Skelett eines 375 Millionen Jahre alten Fleischflossers hat die Situation schlagartig geändert.
- 3 Insbesondere wurde damit die bisherige Vermutung widerlegt, Finger hätten sich erst nach dem Landgang der Fische entwickelt.

ßen anfangs noch keine Finger vorhanden waren. Diese schienen sich vielmehr erst später entwickelt zu haben, als die Vierfüßer auf dem Festland schon etabliert waren.

Aber in der Wissenschaft ist nichts in Stein gemeißelt, und manchmal erzwingen neue Funde die Abkehr von gewohnten Vorstellungen. Ein solcher Fund ist unser Fossil von *Elpistostege*, das 2010 an der UNESCO-Welterbestätte von Miguasha in der kanadischen Provinz Quebec ans Licht

kam. Mit ihm besitzen wir erstmals ein vollständiges, gut erhaltenes Exemplar eines Mitglieds der Elpistostegalia. Zudem repräsentiert es, wie sich zeigte, nicht etwa nur eine neue Spezies dieser Gruppe, sondern offenbar die Urform, aus der sie hervorging. Für uns war das Fossil der Anlass, eine andere Theorie darüber aufzustellen, wie die Evolution der Finger verlief und wie der wirbeltiertypische Aufbau der Hand entstand, der bei den mehr als 33800 heute lebenden





VERSTEINERTER VORFAHR: Das 375 Millionen Jahre alte, vollständige Skelett des Fisches *Elpistostege watsoni* **1** aus dem Miguasha-Nationalpark in Quebec ist der erste und bisher einzige fossile Fisch aus der Übergangsphase zu den Landwirbeltieren mit vollständig erhaltener Brustflosse **2**. Darin sind Vorläufer der Fingerknochen des Menschen zu erkennen.

RICHARD CLOUTIER

RICHARD CLOUTIER

Tetrapodenarten bis hin zum Menschen erhalten geblieben ist.

Damit Sie die Bedeutung von *Elpistostege* für die neuartige Sichtweise auf die Evolution der Hände besser einschätzen können, möchten wir ein wenig über die Geschichte seiner Entdeckung erzählen. Im Sommer 1937 streiften zwei junge britische Paläontologen über die Klippen der Baie-des-Chaleurs an der Südküste der windumtosten ostkanadischen Halbinsel Gaspésie. Thomas Stanley Westoll und William Graham-Smith suchten nach Fossilien aus der Devonzeit, und die Klippen galten als Eldorado dafür. Sammler aus der Gegend halfen den Forschern und verkauften ihnen manchmal auch Funde. Bei einem davon, den Westoll erwarb, handelte es sich nur um ein kleines Bruchstück eines Schädeldachs, doch dieses Fragment sollte sich als Grundstein für das Verständnis des evolutionären Übergangs von den Fischen zu den Vierfüßern entpuppen.

Damals mutmaßten die Experten bereits, dass die Tetrapoden aus den so genannten Fleischflossern hervorgegangen seien: Tieren mit fleischigen, kräftigen Flossen, zu deren heute noch lebenden Vertretern der Quastenflosser und die Lungenfische gehören. Es fehlten aber Fossilien von Zwischengliedern, die anatomisch in der Mitte zwischen beiden Gruppen standen und so die stammesgeschichtliche Verwandtschaft untermauert hätten. Westolls

Schädeldecke schien ein solches Missing Link zu sein. Angesichts des Musters der Schädelknochen hielt der Forscher es für den lange gesuchten Schädel einer primitiven Amphibie aus dem Devon. Er gab seinem einzigartigen Fund den Namen *Elpistostege watsoni* – nach den griechischen Worten für »erhofft« und »Dach« und zu Ehren des britischen Paläontologen David Watson (1886–1973).

In einem kurzen Artikel, der 1938 in der Fachzeitschrift »Nature« erschien, vertrat Westoll die Ansicht, das neue Fossil stelle »einen perfekten Übergang« zwischen den Fleischflossern und den ersten vierbeinigen Tieren dar. Da er sich nur auf ein Schädelfragment stützen konnte, schlug ihm allerdings viel Skepsis entgegen. Weitere Teile des Tiers mussten her. Aber obwohl Paläontologen aus ganz Europa und Amerika zum Fossilien sammeln an die Klippen der Chaleur-Bucht strömten – die Region heißt heute Parc national de Miguasha –, konnte keiner ein weiteres Exemplar von *Elpistostege* finden.

Doch dann, rund 30 Jahre nach Westolls Veröffentlichung, kam der Zufall den Wissenschaftlern zu Hilfe. Der kanadische Fossilien Sammler Allan Parent entdeckte in den Klippen von Miguasha die Schnauze eines unvollständigen Schädels, behielt den Fund allerdings bis zu seinem tragischen frühen Tod unzugänglich in seiner Privatsammlung. Erst 1983 machte Parents Bruder den Direktor des Miguasha-Parks, Marius Arsenault, auf die Schnauze aufmerksam.



RICHARD CLOUTIER

Der wiederum bat Hans-Peter Schultze von der University of Kansas, einen angesehenen Spezialisten für fossile Fische, den ungewöhnlichen Fund näher zu bestimmen. Schultze erkannte dessen Bedeutung sofort: Anordnung und Form der erhaltenen Schädelknochen in diesem Fossil und in Westolls Schädeldecke ähnelten sich stark, weshalb beide zu derselben Spezies gehören dürften.

Nachdem nun mehr über die Anatomie des Tiers bekannt war, wandelten sich die Vorstellungen von seiner Identität. Die äußerlich sichtbaren Merkmale der neu gefundenen Schnauze sprachen dafür, dass es sich bei *Elpistostege* nicht, wie Westoll dachte, bereits um eine Amphibie handelte, sondern noch um einen – allerdings hoch entwickelten – Fleischflosser. Als Schultze und Arsenault die Schnauze 1985 in einem Fachartikel beschrieben, äußerten sie insbesondere die Vermutung, der Fund sei eng mit dem fossilen Fisch *Panderichthys* aus der Ostseeregion verwandt. Außerdem stellten sie einen Zusammenhang mit einem anderen rätselhaften Fossil her, das einen Abschnitt mit Schuppen und einigen Wirbeln umfasste und das der Chefbiologe Marc Brassard vom Miguasha-Park und einer von uns (Cloutier) einige Jahre zuvor an den kanadischen Klippen entdeckt hatten. Die Oberflächenstruktur der in diesem Fossil erhaltenen Schuppen und der Schnauze ähnelten sich stark, weshalb es sich laut Schultze und Arsenault höchstwahrscheinlich ebenfalls um ein Mitglied der Gattung *Elpistostege* handelte.

Diese Zuordnung war wichtig. Denn das Fossil repräsentierte mit seinen Schuppen und Wirbeln damals nicht nur den einzigen bekannten Fund, der Körperregionen unterhalb des Kopfes enthielt, sondern es besaß noch etwas, was den beiden anderen *Elpistostege*-Fossilien fehlte: eine detaillierte Herkunftsbeschreibung. Zwar war bekannt, dass man das Schädeldach und die Schnauze in den kanadischen Klippen gefunden hatte, doch niemand wusste genau, aus welcher Gesteinsschicht sie stammten. Brassard und Cloutier dagegen hatten den exakten stratigrafischen Fundort ihres Fossils festgehalten: Es lag 90 Meter über den untersten Schichten einer charakteristischen geologischen Einheit, die als Escuminac-Formation bezeichnet wird.

In den folgenden Jahren reisten Cloutier und seine Kollegen immer wieder zu diesem Teil der Klippen und suchten nach weiteren Überresten von *Elpistostege* – vergeblich. Schließlich konnten sie aber mit ihren geologischen Befunden und anhand der Fossilien die Umwelt des Tiers rekonstruieren. Demnach lebte es in einem Wasser-

lauf, der in ein Flussmündungsgebiet führte. Langsam kristallisierte sich ein Bild heraus, in dem *Elpistostege* als der größte Fisch in Gewässern erschien, die er sich mit rund 20 anderen Fischarten teilte. Vermutlich stand er damit an der Spitze der dortigen Nahrungskette.

Diese paläoökologischen Erkenntnisse bildeten jedoch bloß das Vorspiel zu dem kommenden Paukenschlag. Am späten Nachmittag des 4. August 2010 fand der Parkwächter und Naturforscher Benoît Cantin während einer Patrouille im Miguasha-Park ein ungewöhnliches Stück eines fossilen Fischschwanzes. Es war am Strand in den Gesteinsschichten der unteren Escuminac-Formation eingeschlossen und lag nur etwa 250 Meter vom Museum des Parks entfernt. Am nächsten Morgen grub Cantin in Begleitung zweier weiterer naturkundiger Parkführer den Rest des Tiers aus. Es handelte sich um das größte Fossil, das jemals in der Escuminac-Formation gefunden wurde, und zweifellos auch das wichtigste: ein 1,57 Meter langes, vollständiges Skelett von *Elpistostege*.

In den Stein hineinschauen

Wenige Tage nachdem Cantin das Fossil entdeckt hatte, erhielt Cloutier die Einladung, es zu untersuchen. Da das Skelett zum größten Teil noch im Gestein eingeschlossen war, bestand der erste Schritt darin, mittels Computertomografie (CT) einen genaueren Blick darauf zu erhalten. Cloutier zog Isabelle Bécharde hinzu, eine seiner früheren Studentinnen in Paläontologie. Sie sollte ihm helfen, mit einem nichtmedizinischen CT-Gerät des Institut national de la recherche scientifique (INRS) in Quebec Bilder des Funds aufzunehmen. Die Scans bestätigten, dass das Fossil vollständig war – jeder einzelne Knochen hatte sich erhalten –, allerdings reichte die Auflösung nicht aus, den genauen Aufbau der Knochen sichtbar zu machen. Aber gerade den wollten die Forscher herausfinden. Dazu bedurfte es jedoch eines leistungsfähigeren Computertomografen. Also entschloss man sich, *Elpistostege* auf eine 3900 Kilometer lange Reise an die High-Resolution X-ray Computed Tomography Facility der University of Texas in Austin zu schicken. Dort wurde jeder Teil des Fossils dann mit der größten damals technisch möglichen Präzision dargestellt.

Anschließend begannen Cloutier und seine Kollegen mit der peniblen Präparation: Stückchen für Stückchen entfernten sie das umgebende Gestein und legten die darin eingeschlossenen Knochen frei. Sie machten das aber nicht nur mit dem Fossil selbst, sondern zusätzlich mit einem Computermodell, das auf den CT-Aufnahmen beruhte. Nach einigen Monaten hatten sie so sowohl virtuell als auch real Körper und Schädel aus dem Gestein herausgeschält. Es erwies sich insgesamt als ein äußerst imposantes Fossil, die größte Begeisterung lösten allerdings die Brustflossen aus; denn die hatte bei einem Fisch aus der Gruppe der *Elpistostegalia* noch nie jemand vollständig gesehen. In den herauspräparierten Exemplaren ließen sich zahlreiche Skelettelemente erkennen, die von Schuppen und Flossenstrahlen umgeben waren. Auf den ersten Blick sah die Flosse von *Elpistostege* ganz ähnlich aus wie die von *Tiktaalik*, aber sie schien zusätzliche Knochen zu enthalten. Welche waren das?

In den folgenden Jahren stellten Cloutier und Bécharde die vorläufigen Ergebnisse ihrer Analysen des *Elpistostege*-Skeletts bei mehreren Fachtagungen den Kollegen vor. Nach einer solchen Präsentation – sie fand 2014 bei der Gesellschaft für Wirbeltierpaläontologie in Berlin statt – traf Cloutier den anderen von uns (Long), und wir verständigten uns darauf, bei der Erforschung dieses bemerkenswerten Fossils zusammenzuarbeiten.

Long hatte sich schon seit vielen Jahren mit Fischfossilien der Devonzeit aus der Gogo-Formation in Westaustralien beschäftigt. Die Skelette der urzeitlichen Fische sind in allen drei Dimensionen ausgezeichnet erhalten, und bei manchen Exemplaren ist auch das weiche Gewebe außergewöhnlich gut zu erkennen. Zum Studium solcher Fossilien, die sich in Kalksteinknollen finden, legten Long und seine Kollegen sie traditionell in ein Säurebad, um das umgebende Gestein aufzulösen. In jüngerer Zeit waren sie jedoch dazu übergegangen, die Versteinerungen vorher mit CT, Synchrotronscannern und hoch entwickelter Software bildlich darzustellen und so ihre anatomische Feinstruktur aufzuklären. Auf diese Weise lässt sich erhaltenes weiches

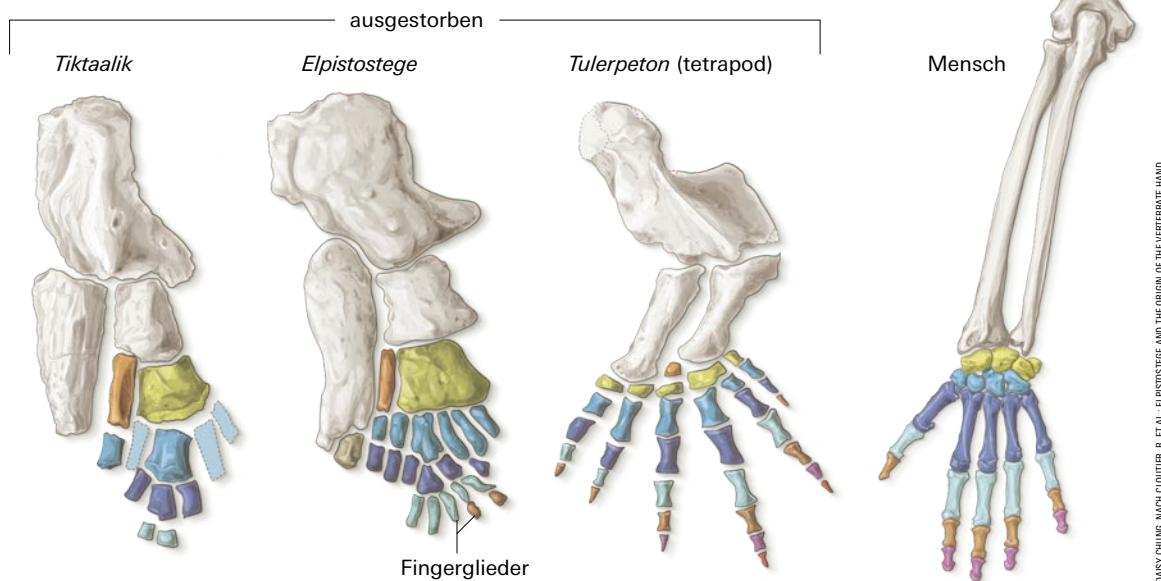
Gewebe sichtbar machen, bevor es von der Säure zerstört wird. Der neue, ausgezeichnet erhaltene *Elpistostege*-Fund schien ein idealer Kandidat für Longs Methode der bildlichen Darstellung und digitalen Präparation zu sein.

Deshalb kam der Australier 2014 zu Besuch in Cloutiers Labor in Quebec und erprobte dort mit seinem Team verschiedene Methoden zur Auswertung der Bilddaten des Fisches. Nach einigem Herumprobieren mit verschiedenen Typen von Daten und Software stießen wir schließlich auf eine viel versprechende Kombination, mit der wir jeden einzelnen Knochen digital isolieren und studieren konnten. Alice Clement von der Flinders University in Adelaide sowie Roxanne Noël und Vincent Roy, die damals als Master-Studierende bei Cloutier arbeiteten, verfolgten das Projekt weiter.

Als Clement schließlich damit begann, die Brustflosse zu segmentieren, waren wir alle aufs Äußerste gespannt. Immerhin handelte es sich um die erste je entdeckte vollständige Brustflosse aus der Gruppe der Elpistostegalia. Deshalb erwarteten wir von ihr entscheidende Hinweise auf den Übergang von den Flossen zu den Gliedmaßen. Und

Von Flossen zu Gliedmaßen

Jahrzehntelang schien es, als hätten sich die Hände erst bei den Vierfüßern als Anpassung an das Leben an Land entwickelt. Tetrapodenähnliche Fische wie *Tiktaalik* hatten nämlich noch keine Handknochen; die fanden sich erst bei frühen Amphibien wie *Tulerpeton*. Ein neu entdecktes Fossil von *Elpistostege*, einem Fisch aus dem späten Devon vor 375 Millionen Jahren, enthält jedoch Knochen in der Brustflosse, die homolog zu den Fingerknochen in den Händen und Füßen der heutigen Landwirbeltiere einschließlich des Menschen sind und mindestens zwei, wenn nicht sogar fünf Fingern entsprechen. Das zeigt, dass die Evolution der Finger schon bei den Fischen einsetzte und den Vierfüßern später für das Leben an Land zugutekam.



DAMY CHUNG, MACHI CLOUTIER, R. ET AL.: ELPISTOSTEGE AND THE ORIGIN OF THE VERTEBRATE HAND. NATURE 579, 2020, FIG. 4A / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2020

wir wurden nicht enttäuscht. Die ersten Ergebnisse bestätigten nicht nur Béchards ursprüngliche CT-Befunde, wonach die Flosse von *Elpistostege* zusätzliche Knochen enthielt, sondern zeigten diese wesentlich detaillierter.

Jetzt konnten wir sehen, dass das Fossil eine unerwartete Reihe vieler kleiner, eng nebeneinanderstehender Knochen enthielt. In der Regel findet man am Rand des Brustflossenskeletts solche kleinen Knochen in Form so genannter Radialia, welche als Stütze für die stabförmigen, hornartigen Flossenstrahlen dienen, die von dort ausgehen. Die Knochen, die sich bei *Elpistostege* in dem betreffenden Teil der Flosse fanden, standen an der richtigen Stelle für Radialia, aber ihre große Zahl und in einigen Fällen auch ihre Anordnung in abgegrenzten Reihen legten die Vermutung nahe, dass sie etwas anderes waren. Wir hatten den starken Verdacht, bei diesen nie zuvor gesehenen, in der Brustflosse des vorzeitlichen Fisches versteckten Knochen handle es sich in Wirklichkeit um Fingerknochen, wie sie in ähnlicher Form bei den Landwirbeltieren vorkommen. Wir identifizierten zwei Finger, die jeweils aus mehreren mit Gelenken versehenen Knochen zusammengesetzt waren, und drei weitere potenzielle Finger aus jeweils einem einzigen Knochen.

Warum sind die Belege für Fingerknochen bei *Elpistostege* überzeugender als die früheren Argumente für solche Knochen in der Brustflosse von *Panderichthys*? Bei Letzterem sind die betreffenden Skeletteile unregelmäßig geformt, und keines von ihnen zeigt jene Gelenkverbindungen untereinander, wie sie für die Fingerknochen der menschlichen Hand typisch sind. Anhand des Vergleichs mit der Flosse von *Elpistostege* vermuten wir daher, dass die fraglichen Knochen von *Panderichthys* in Wahrheit Vorläufer von Handgelenksknochen der Tetrapoden sind.

Fische auf dem Trockenen

Nachdem das Team die gesamte Brustflosse und den Flossengürtel so detailliert dargestellt hatte, dass man jeden Knochen in allen Einzelheiten studieren konnte, begannen wir damit, die inneren Teile von Kopf und Hirnschädel abschnittsweise zu untersuchen. Diese Arbeiten sollten nicht nur unsere Erkenntnisse über die Anatomie von *Elpistostege* erweitern, sondern auch zeigen, inwiefern das Tier mit anderen frühen Fischen und Landwirbeltieren verwandt war.

Um zu klären, wo *Elpistostege* im Stammbaum genau steht, mussten wir ihn mit anderen Arten vergleichen und dabei ihren gemeinsamen, charakteristischen Merkmalen besondere Aufmerksamkeit schenken. In Zusammenarbeit mit Mike Lee von der Flinders University, einem führenden Experten für Methoden zum Bestimmen der Verwandtschaft zwischen biologischen Arten, stellten wir eine phylogenetische Analyse von 202 Merkmalen bei 43 Spezies an. Am Ende zeigte sich zu unserem Erstaunen, dass *Elpistostege* offenbar mit den Tetrapoden aus jener »Kronengruppe«, zu der alle heutigen vierbeinigen Tiere und ihr letzter gemeinsamer Vorfahr gehören, enger verwandt ist – allerdings nicht viel – als der bekannte *Tiktaalik*. Am plausibelsten scheint uns, dass die einzigartigen Merkmale der Brustflosse, die bei *Tiktaalik* nicht vollständig erhalten ist, und

auch einige neu entdeckte Merkmale des Brustgürtel, an dem die Flossen ansetzen, *Elpistostege* im Evolutionsstammbaum eine Stufe über *Tiktaalik* stellen.

Anhand unserer Beobachtungen am Skelett von *Elpistostege* und unserer Erkenntnisse über seine Stellung im Stammbaum können wir nun rekonstruieren, wie der Grundbauplan der Hände von Tetrapoden einschließlich des Menschen entstanden ist. An den Reihen kleiner Knochen, die wir in der Brustflosse von *Elpistostege* als Finger identifiziert haben, lässt sich ablesen, dass diese Anordnung erstmals im späten Devon, also vor mehr als 380 Millionen Jahren, in den Flossen der höher entwickelten Fleischflosser aufgetreten ist. Wahrscheinlich diente sie dazu, sich aufzurichten, denn die vielen kleinen, nebeneinander angeordneten Knochen verliehen dem äußeren Teil der kräftigen Flosse die Flexibilität, die der Fisch brauchte, um sich vom Boden hochzudrücken und kriechend fortzubewegen.

Welchen Nutzen hatte er davon? Einen Anhaltspunkt liefert der Schädel von *Elpistostege*: An seiner Rückseite befinden sich zwei große, als Spiracula bezeichnete Öffnungen. Ähnliche Löcher gibt es bei manchen heutigen Fischen, die Luft atmen. Was ihre Funktion ist, war jedoch lange umstritten, weil diese Fische die Luft eigentlich über den Mund aufnehmen. Außerdem kommen Spiracula auch bei Haien und Rochen vor und dienen dort zum Einsaugen oder Ausstoßen von Wasser.

Im Jahr 2014 gelang es Long zusammen mit einem Team von Fischforschern an der Scripps Institution of Oceanography im kalifornischen La Jolla unter Leitung des inzwischen verstorbenen Jeff Graham, die alte Streitfrage definitiv zu klären. Durch eingehende Analyse der Spiracula des heutigen Flösselhechts *Polypterus* konnten sie nachweisen, dass die Öffnungen tatsächlich für das Luftatmen genutzt werden. Vorausgesetzt, die Löcher erfüllten bei *Elpistostege* die gleiche Funktion, war es vermutlich von Vorteil, wenn sich die Fische in den seichten Flüssen und Flussmündungsgebieten, in denen sie zu Hause waren, mit den Flossen nach oben drücken konnten, um den Kopf aus dem Wasser zu heben und frische Luft zu schnappen.

Elpistostege muss sich aber nicht auf das Wasser als Lebensraum beschränkt haben. Die heutigen Lungenfische und manche Welse können sich für kurze Zeit sogar an Land mit ihren Flossen fortbewegen. Mit seinen weitaus kräftiger gebauten Flossen war *Elpistostege* wahrscheinlich noch viel besser dafür gerüstet, sich auf das trockene Land zu wagen.

Unsere Entdeckung der Handknochen bei *Elpistostege* hilft auch beim Verständnis der Veränderungen im Erbgut und in der Embryonalentwicklung, die hinter der Umwandlung von Flossen zu Landextremitäten stecken. Noch vor einigen Jahrzehnten gab es nur wenige Beispiele für fossile Fische, deren Brustflossen eine Übergangsform zu den Tetrapodengliedmaßen darstellten, und sie zeigten lediglich, dass die Knochen von Unter- und Oberarm sich nach und nach entwickelten. Dagegen sah es so aus, als seien Hand und Handgelenk der Vierfüßer mit einem Schlag aus den früheren Fischflossen hervorgegangen. Doch ist es wirklich vorstellbar, dass ein derart tief greifender Wandel sich so

abrupt vollzog? Oder war die scheinbar plötzliche Entstehung von Hand und Handgelenk bloß eine Täuschung, hervorgerufen durch unvollständige Fossilfunde?

In einem einflussreichen Fachartikel vertrat der mittlerweile verstorbene Entwicklungsbiologe Peter Thorogood 1991 die Ansicht, Hand und Handgelenk könnten sehr wohl ganz plötzlich entstanden sein. Seine Aussage stützte er auf Vergleiche der Embryonalentwicklung von Fischen und Tetrapoden. In einem frühen Stadium bildet die so genannte apikale ektodermale Randleiste (AER) ein Steuerungszentrum für die Entwicklung von Flossen beziehungsweise Landextremitäten. An der Spitze der entstehenden Strukturen gelegen, scheidet sie Substanzen aus, die das Wachstum des darunterliegenden Gewebes anregen. Bei Fischen ist die AER nur kurz aktiv und verwandelt sich dann in ein weiteres Signalzentrum, die apikale ektodermale Falte (AEF), die für die Ausbildung der Flossenstrahlen sorgt.



ISTOCK / SCOTTORR

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Im Embryo von Vierfüßern bleibt die AER dagegen viel länger tätig und hat entsprechend mehr Zeit, die Entwicklung zu steuern. In eine AEF verwandelt sie sich nie, so dass sich auch keine Flossenstrahlen bilden. Stattdessen entstehen die weiteren Extremitätenknochen, aus denen dann die Hand hervorgeht. Thorogood äußerte die Vermutung, das Ausbleiben des Übergangs von der AER zur AEF – nur eine recht kleine Veränderung innerhalb der gesamten Embryonalentwicklung – könne die Ursache dafür sein, dass die Flossenstrahlen und andere Merkmale der Brustflossen verloren gingen und gleichzeitig die Knochen entstanden, die für Handgelenk und Finger gebraucht werden.

Tiktaalik war das erste Fischfossil, das nicht nur Vorläufer von unseren Armknochen und einigen der angrenzenden proximalen Handgelenksknochen aufwies, sondern auch Entsprechungen zu den distalen Handgelenksknochen. Damit spornte es dazu an, die genetischen und entwicklungsbiologischen Hintergründe des Übergangs von Flossen zu Landextremitäten zu ergründen. Dabei ging es um die Frage, welche Knochen der ursprünglichen Fischflossen sich zu Handgelenks- und Handknochen weiterentwickelten und welche Gene diese Transformation veranlassten. Als wahrscheinlich galt, dass Erbfaktoren aus der *Hox*-Familie beteiligt waren, die bekanntermaßen die Entwicklung verschiedener Abschnitte des Embryos zu Kopf, Schwanz und so weiter steuern.

Im Jahr 2007 erforschten Zerina Johanson vom Natural History Museum in London und ihre Kollegen die Aktivität eines derartigen Gens – es heißt *HoxD13* – beim Australischen Lungenfisch, einem der engsten heutigen Verwandten der Landwirbeltiere. In früheren Untersuchungen hatte

sich gezeigt, dass *HoxD13* in den entstehenden Extremitäten der Tetrapoden aktiv ist, wenn sich Handgelenke und Finger bilden. Wie Johansons Team herausfand, ist das gleiche Gen auch angeschaltet, wenn sich in den Flossen der Lungenfische die Radialknochen bilden. Bei der Entwicklung der Vierfüßerextremitäten durchläuft es zwei Aktivitätsphasen – eine frühe im Zusammenhang mit dem Entstehen von Unter- und Oberarm, eine späte bei der Bildung von Handgelenk und Fingern. Lungenfische weisen dagegen offenbar bloß eine Aktivitätsperiode auf, die der zweiten Entwicklungsphase der Vierfüßerextremitäten entspricht. Das lässt darauf schließen, dass die Fingerknochen der Tetrapoden in der Evolution aus den Radialia der Fischflossen hervorgegangen sind.

Doch können Handgelenk und Hand im Widerspruch zu Thorogoods Vermutung nicht als »Paket« entstanden sein; denn Lungenfische und andere heutige sowie fossile Fleischflosser besitzen Radial- oder Handgelenksknochen, aber keine Finger. In der Evolution müssen also mindestens zwei Ereignisse stattgefunden haben, wobei zunächst die Handgelenke und später die Finger entstanden sind.

Noch komplizierter wird die Geschichte durch *Elpistostege*. Der Fund deutet darauf hin, dass die Radialia der Lungenfische und anderer Fleischflosser entgegen Johansons Überlegungen keineswegs allesamt den Fingern entsprechen. Stattdessen sind nur die am weitesten distal gelegenen zu den Fingerknochen homolog, die proximalen dagegen zu den Handgelenksknochen und den langen Knochen der Handfläche. Und damit nicht genug: Da bei *Elpistostege* sowohl die Handgelenksknochen und Finger als auch die Flossenstrahlen erhalten sind, muss der Verlust Letzterer ein zusätzlicher, eigener Schritt in der Evolution der Hand gewesen sein.

Trotz der bedeutenden neuen Erkenntnisse, die wir *Elpistostege* bisher schon verdanken, sind etliche Detailfragen zu den genetischen und entwicklungsbiologischen Mechanismen hinter der Umwandlung von Brustflossen in Hände und Finger immer noch offen. Aber da das im Miguasha-Park entdeckte Exemplar das gesamte Skelett des Fleischflossers bewahrt hat und viele weitere Untersuchungen daran laufen, scheint dieses Fossil als eine Art Stein von Rosetta dazu prädestiniert zu sein, auch die letzten Rätsel darüber lösen zu helfen, wie sich die Tetrapodenextremitäten aus den Flossen entwickelt haben und so die Wirbeltiere das Festland erobern konnten. ◀

QUELLEN

Cloutier, R. et al.: *Elpistostege* and the origin of the vertebrate hand. *Nature* 579, 2020

Johanson, Z. et al.: Fish fingers: Digit homologues in sarcopterygian fish fins. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution* 308B, 2007

LITERATURTIPP

Clack, J.A.: Was Fischen Beine machte. *Spektrum der Wissenschaft* 10/2006, S. 24–32

Zusammenfassender Bericht über den Landgang der Fische im Zuge der Evolution



Bei welchem Händler finde ich meine Lieblingszeitschrift?



1. Zu mykiosk.com gehen
2. Ort eingeben
3. Zeitschrift eingeben
4. Händler finden



mykiosk.com

DER SCHNELLSTE WEG ZU UNSEREN ZEITSCHRIFTEN

PALÄOGENETIK »JEDER BESITZT ERBGUT VOM NEANDERTALER«

Seitdem Svante Pääbo, Paläogenetiker vom Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie, das Erbgut des Neandertalers entziffert hat, wissen wir, dass immer noch Gene dieses Frühmenschen in uns schlummern. Im vergangenen Jahr stieß seine Arbeitsgruppe auf einen überraschenden Zusammenhang: Bestimmte Genvarianten des Neandertalers sollen das Risiko für eine schwer verlaufende Corona-Erkrankung erhöhen. Was steckt dahinter?

» spektrum.de/artikel/1848313

Herr Professor Pääbo, 1997 gelang es Ihnen, mitochondriale DNA eines Neandertalers zu entziffern. 2010 erfolgte die große Überraschung, als Sie im Erbgut der heutigen Menschen Spuren von Neandertalern nachgewiesen haben. Wie viele Genome von Neandertalern sind denn inzwischen bekannt?

Das hängt davon ab, wie man zählt: Wir haben drei Genome sequenziert, deren Qualität die von jetzt lebenden Menschen erreicht. Dann gibt es noch mindestens fünf andere Genome in niedrigerer Qualität sowie eine größere Menge, bei denen uns nur bruchstückhafte Informationen vorliegen. Aber mit den drei erstgenannten kann man wirklich gute Vergleiche anstellen so wie beim Erbgut von heutigen Menschen.

In der Zeitschrift »Nature« berichten Sie, eine Genvariante, die vom Neandertaler stamme, erhöhe das Risiko für einen schweren Verlauf von Covid-19. Wie kann ein altes genetisches Erbe den Krankheitsverlauf bei einer Infektion mit einem neuartigen Erreger beeinflussen?

Die Neandertaler lebten über eine halbe Million Jahre lang getrennt von den afrikanischen Vorfahren des anatomisch modernen Menschen. Dabei haben sie sich an Krankheitserreger genetisch angepasst, also an Viren und Bakterien, die in diesen Hunderttausenden von Jahren in Asien und Europa vorkamen. Wenn solche genetischen Neandertalervarianten bei jetzt lebenden Menschen auftauchen, beeinflussen sie manchmal immer noch die Antwort auf Pathogene. Und in der aktuellen Pandemie tragen nun einige von uns auf Chromosom 3 tragischerweise eine Neandertalervariante, die das Risiko stark erhöht, schwer zu erkranken, wenn man sich mit Sars-CoV-2 ansteckt. Wer eine Kopie dieser Variante entweder von der Mutter oder vom Vater geerbt hat, besitzt ein ungefähr doppelt so hohes Risiko, nach einer Infektion auf der Intensivstation zu landen. Bei zwei Kopien, also je einer von beiden Elternteilen, steigt das Risiko wahrscheinlich noch einmal an.

Wie sind Sie zu dem Ergebnis gekommen?

Wir arbeiten mit einem großen internationalen Konsortium zusammen, das genetische Risikofaktoren für Covid-19 untersucht. Dabei vergleichen wir Individuen, die schwer



NEUE SERIE
Darwins Erbe

Teil 1: Mai 2021

Evolutionstheorie auf dem Prüfstand
Diethard Tautz

Der überraschende Ursprung der Finger
John A. Long und Richard Cloutier

»Jeder besitzt Erbgut vom Neandertaler«
Svante Pääbo

Teil 2: Juni 2021

Die Evolution Fleisch fressender Pflanzen
Rainer Hedrich und Jörg Schultz

Teil 3: Juli 2021

Nach dem Weltuntergang
Massimo Sandal

PRÄZISIONSARBEIT
Max-Planck-Forscher
Matthias Meyer isoliert
im Reinlabor Erbgut vom
Neandertaler.

erkrankten, mit solchen, bei denen nach einer Infektion nur sehr wenige Symptome auftraten. Die ersten Ergebnisse wurden im Juni 2020 veröffentlicht. Und da zeigte sich auf Chromosom 3 eine hohe Auffälligkeit in Bezug auf das Krankheitsrisiko. Wir haben die Region dann mit Neandertalererbgut verglichen und stellten dabei fest, dass Personen mit einem größeren Risiko dort ungefähr 50 000 Basenpaare tragen, die fast identisch sind zu denen von Neandertalern. Danach konnten wir zeigen, dass diese Variante tatsächlich von Neandertalern stammt und nicht von den gemeinsamen Vorfahren, die wir mit ihnen teilen. Weil das DNA-Stück so lang ist, muss es vor erst 50 000 bis 70 000 Jahren in unserem Erbgut aufgetaucht sein.

Wenn sich diese Genversion so lange gehalten hat, sollte sie für den Neandertaler einen Vorteil gehabt haben. Was könnte das sein?

Erst einmal möchte ich behaupten: Nicht alles muss einen Vorteil haben – es darf sich nur nicht zu negativ auswirken. Was die Genversion beim Neandertaler tat, wissen wir nicht. Beim modernen Menschen gab es sicherlich in der Vergangenheit Auswirkungen, weil die weltweite Verteilung äußerst ungewöhnlich ist: In Europa tragen ungefähr 16 Prozent der Bevölkerung eine oder zwei Kopien der Variante, in Südasien sind es 50 bis 60 Prozent. Da kommt sie demnach sehr häufig vor. Das deutet darauf hin, dass sie dort von Vorteil war und daher in der Häufigkeit stark zunahm. Vielleicht hatte das mit irgendeiner anderen ansteckenden Krankheit zu tun. In Ostasien, also in China oder Japan, fehlt diese Genversion völlig. Dort wurde sie wohl herausselektiert. Wie sie sich genau auswirkt, versuchen wir und andere Wissenschaftler jetzt herauszufinden.

»Einige von uns tragen auf Chromosom 3 tragischerweise eine Neandertalervariante, die das Risiko stark erhöht, an Covid-19 schwer zu erkranken«

Sie haben die weltweite Verteilung der Genvariante angesprochen. Inwieweit deckt sich das mit der Verbreitung von schweren Covid-19-Verläufen?

Die Variante kann beeinflussen, wie viele Menschen an Covid-19 schwer erkranken. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um den einzigen Faktor – noch nicht einmal um den wichtigsten. Das männliche Geschlecht ist ein weiterer Risikofaktor, aber das höchste Risiko für einen schweren Covid-19-Verlauf liegt im Alter. Allerdings wird es durch die Neandertalerversion erheblich gesteigert: Wenn ich eine Kopie geerbt habe, ist das Risiko so stark erhöht, wie wenn ich 10 bis 20 Jahre älter wäre. In Afrika gibt es im Vergleich zu anderen Teilen der Welt weniger schwere Verläufe. Da ist die Bevölkerung zwar einerseits viel jünger, aber darüber

hinaus kommt diese Genvariante in Afrika, wo es ja keine Neandertaler gab, fast nicht vor.

Wenn die risikoreiche Variante in Afrika praktisch fehlt, wieso sind in den USA vor allem Afroamerikaner von schweren Verläufen betroffen?

Wie gesagt gibt es hier noch andere Einflüsse; die Variante trägt lediglich zum Risiko bei. Sozioökonomische Faktoren wie etwa der Zugang zur Krankenversorgung sind sicherlich viel wichtiger.

Welche weiteren Genversionen vom Neandertaler schlummern in unserem Erbgut?

Sehr viele. Jeder Mensch, dessen genetische Wurzeln außerhalb Afrikas liegen, besitzt Erbgut vom Neandertaler, aber individuell sehr unterschiedliche Teile. Schaut man sich die Sequenzen von einigen tausend Personen an, findet man insgesamt ungefähr die Hälfte des Neandertaler-genoms; bei jedem einzelnen Individuum sind es jedoch nur ein oder zwei Prozent. So stießen wir 2020 auf eine Neandertalervariante, die das Schmerzempfinden beeinflusst, weil es einen Ionenkanal der entsprechenden Nervenzellen verändert. Wer diese Version trägt, reagiert empfindlicher auf Schmerz. Aber sie kommt nur sehr selten vor. Eine weitere Neandertalervariante, die wir ebenfalls 2020 entdeckten, wirkt sich auf den Rezeptor für das Hormon Progesteron aus. Sie schützt damit vor Fehlgeburten. Statistisch lässt sich sogar nachweisen, dass Personen mit dieser Genversion mehr Kinder haben. Es gibt also Neandertalervarianten, die sich positiv auswirken, während andere eher ungünstig sind. Etliche Versionen beeinflussen zudem unsere Immunabwehr.

Haben bestimmte Neandertalerversionen die geistige Entwicklung des jetzigen Menschen beeinflusst?

Vielleicht werden wir so etwa in Zukunft finden, aber bislang wissen wir nichts darüber.

Gibt es einen übergreifenden Zusammenhang zwischen den Genvarianten, die wir vom Neandertaler geerbt haben?

Nein, das würde ich nicht sagen. Ich glaube, das sind eher zufällige Bruchstücke, die jeder von uns mit Wurzeln außerhalb Afrikas trägt. Es gibt sieben große Bereiche im Genom, bei denen wir statistisch gesehen Beiträge vom Neandertaler erwarten würden, aber nichts finden. Vielleicht sind sie besonders wichtig für den modernen Menschen. Aber warum das so ist, wissen wir nicht.

Was hat umgekehrt der Neandertaler vom jetzigen Menschen übernommen?

Auch das wissen wir nicht genau. Es hat ja nur der moderne Mensch überlebt. Wir können also lediglich in unserem Genom nach Beiträgen des Neandertalers suchen. Die Neandertaler haben sich erst sehr spät in ihrer Geschichte mit modernen Menschen gemischt. Um herauszufinden, welche Anteile in die andere Richtung gingen, bräuchten wir die Überreste eines Neandertalers, der so spät gelebt



Prof. Dr. Svante Pääbo (rechts)

gilt als Begründer der Paläogenetik. Der gebürtige Schwede studierte Ägyptologie, Russisch, Wissenschaftsgeschichte und Medizin an der Universität Uppsala und wurde hier 1986 mit einer Arbeit über molekulare Immunologie promoviert. Bereits als Doktorand untersuchte er DNA von ägyptischen Mumien, die unter anderem aus dem Pergamon-Museum in Ostberlin stammten. Nach seiner Habilitation 1990 folgte er einem Ruf als Professor für Allgemeine Biologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 1997 leitet er als Direktor die Abteilung für Evolutionäre Genetik des neu gegründeten Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig; 1999 folgte die Ernennung zum Honorarprofessor für Genetik und Evolutionsbiologie der Universität Leipzig.

KARSTEN MOEBIUS

hat, dass seine Vorfahren moderne Menschen treffen konnte. In den wenigen solch späten Neandertalern, die wir bis jetzt untersucht haben, sind wir nicht auf einen genetischen Beitrag von modernen Menschen gestoßen. Es gibt zwar Hinweise, dass es vor etwa 200000 Jahren geringe genetische Beiträge des modernen Menschen zum Neandertaler gab. Aber wir haben keine Ahnung, wie sich diese funktionell auswirkten.

Haben sich Neandertaler und moderner Mensch denn mehrmals vermischt?

Ein großer Teil dieser Vermischungen muss früh passiert sein, als der moderne Mensch Afrika verlassen hat, weil alle Menschen außerhalb Afrikas Neandertalererbgut tragen. Bei einem 40000 Jahre alten Fossil eines anatomisch modernen Menschen, das man in Rumänien gefunden hat, konnten wir aber einen Neandertalervorfahren vor vier bis sechs Generationen nachweisen. Vermischungen haben also auch lokal stattgefunden. Inzwischen sind noch andere, zum Teil unveröffentlichte Daten hinzugekommen, die zeigen, dass das öfters passierte.

»Würden Neandertaler heute in einem Zoo leben oder in unseren Vorstädten? Das wissen wir nicht«

Warum ist Ihrer Meinung nach der Neandertaler ausgestorben?

Das ist noch völlig unklar. Allerdings ist es natürlich bemerkenswert zu beobachten, wie sich verschiedene Genomabschnitte in einer Pandemie wie der jetzigen auswirken. So liegt zum Beispiel auf Chromosom 12 ein Bereich, den wir vom Neandertaler geerbt haben, der uns vor einem schweren Covid-19-Verlauf schützt. Aber der Effekt ist bescheiden, er verringert das Risiko lediglich um ungefähr 20 Prozent. Im Gegensatz dazu steigt das Risiko bei der vorhin erwähnten Neandertalervariante auf Chromosom 3 um 100 Prozent, es verdoppelt sich also. Ende 2020 haben wir außerdem noch auf Chromosom 2 einen Neandertalerbeitrag gefunden, der das Risiko ebenfalls zu vergrößern scheint. Insofern könnte man spekulieren: Ein Neandertaler, der zwei Kopien des Risikogens auf Chromosom 3 und auch andere Risikovarianten besaß, hätte wahrscheinlich ein hohes Risiko, schwer an Covid-19 zu erkranken. Das zeigt zumindest, dass Infektionskrankheiten eine Rolle gespielt haben könnten. So war es auch in Amerika, dessen ursprüngliche Bevölkerung 30000 Jahre lang isoliert gelebt hatte und sich an die dort existierenden Krankheitserreger einigermaßen angepasst hatte. Als dann die Europäer kamen, brachten sie neue Keime mit, was sich verheerend auf die dortigen Menschen auswirkte. So etwas Ähnliches könnte passiert sein, als Neandertaler und moderner Mensch aufeinanderstießen.

Wenn wir uns in einem Gedankenexperiment vorstellen, es gäbe heute noch Neandertaler: Welche gesellschaftliche Rolle würden sie spielen?

Es ist tatsächlich interessant, darüber zu spekulieren. Es ist ja nicht so lange her, dass es Neandertaler gab, vielleicht 1200 Generationen. Würden sie heute in einem Zoo leben oder in unseren Vorstädten? Das wissen wir nicht. Vielleicht gäbe es einen noch schlimmeren Rassismus gegen Nean-

dertaler als der, denn wir heute gegen fremde Menschen erleben, weil sie sich ja wirklich von uns in mancherlei Hinsicht unterscheiden. Andererseits könnte eine andere Menschenform, mit der wir etliche Dinge wie etwa Kultur teilen, dazu führen, die absolute Trennung zwischen Tier und Mensch aufzuweichen. Die meisten von uns empfinden einen ganz klaren Unterschied zwischen uns und den Tieren. Wäre der Mensch diverser, wäre das vielleicht anders. Ich finde es manchmal faszinierend, darüber nachzudenken.

Der anatomisch moderne Mensch und der Neandertaler galten lange als zwei verschiedene Arten namens *Homo sapiens* und *Homo neanderthalensis*. Wenn sie aber fruchtbare Nachkommen erzeugen konnten, widerspricht das dem biologischen Artkonzept. Kann man dennoch von der Spezies Neandertaler sprechen?

Ehrlich gesagt vermeide ich lieber diese Frage. Ich empfinde das als eine akademische, sterile Diskussion. Es gibt keine Artdefinition, die für alle Gruppen von Tieren oder Hominiden zutrifft. Eine häufige Definition ist der von Ihnen erwähnte biologische Artbegriff, nach dem es sich um eine Art handelt, wenn zwei Gruppen fruchtbare Nachkommen erzeugen. Demnach wären Neandertaler und moderner Mensch ganz klar dieselbe Art. Aber man kann einwenden: Wie sieht es bei Braunbären und Eisbären aus? Sie können fruchtbare Nachkommen haben, wenn sie sich treffen. Gehören sie deshalb zur selben Art? Das wäre doch etwas seltsam. Schließlich sehen sie anders aus, sie verhalten sich anders, und sie sind an unterschiedliche Umweltfaktoren angepasst. Es ist typisch menschlich, alles in Fächer einordnen zu wollen und Arten von Unterarten zu trennen. Für mich ist viel interessanter: Wie haben sich unsere Vorfahren verhalten? Was hat uns voneinander unterschieden? Wie viel haben wir gemeinsam? Ob dann irgendein Gelehrter das Art oder Unterart nennen möchte, ist mir eigentlich egal.

2010 entdeckten Sie anhand genetischer Spuren eine weitere Form des Menschen: den Denisovaner. Bislang gibt es hierzu noch keine Artbeschreibung. Lässt sich eine biologische Spezies allein auf Grund genetischer Daten begründen?

Anhand der bisher bekannten genetischen Funde können wir abschätzen, dass sich die Denisovaner vor schätzungsweise 400 000 Jahren von den Neandertalern getrennt haben. Handelt es sich dann um eine andere Art? Ich nenne



HEIMAT DER DENISOVANER

In der südsibirischen Denisova-Höhle stießen Forscher auf menschliche Überreste, die zu einer ausgestorbenen Menschenform gehören.

sie lieber wie Sie eine andere Form oder Gruppe des Menschen.

Jetzt möchten wir natürlich gerne wissen, wie der Denisovaner ausgesehen hat? Hierzu gibt es bereits Rekonstruktionsversuche am Computer. Was halten Sie von solchen Ansätzen?

Nicht viel. Wenn Sie zum Beispiel versuchen, mein Äußeres aus meinem Genom zu rekonstruieren, wird das Ergebnis ziemlich danebenliegen. Das wird natürlich noch schwieriger, wenn Sie die Auswirkungen von Variationen innerhalb der Gruppe nicht kennen. Schaut man sich beim jetzt lebenden Menschen die DNA-Beiträge von Neandertalern an, die die Hautfarbe beeinflussen, gibt es Varianten, die sowohl zu dunkler als auch zu heller Haut führen. Das deutet darauf hin, dass der Neandertaler wahrscheinlich genauso wie wir unterschiedliche Hautfarben hatte. Deswegen halte ich wenig von solchen Rekonstruktionen. Wir müssen eher hoffen, dass Paläontologen irgendwann einige gut erhaltene Skelette finden.

Wie viele menschliche Formen gab es noch außer den Denisovanern und den Neandertalern, als der anatomisch moderne Mensch Afrika verließ?

Von Skeletten von der indonesischen Insel Flores wissen wir, dass hier eine kleinwüchsige Gruppe lebte, die manchmal als »Hobbits« bezeichnet werden. Und in Afrika existierten mehrere, unterschiedliche Menschenformen



Mehr Wissen auf
Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema
finden Sie unter
spektrum.de/t/die-genome-der-arten

FLASHMOVIE / STOCK.ADOBE.COM



»Absolut gesehen stimmt die Out-of-Africa-Hypothese nicht mehr«

dass die kulturelle Geschichte für mich als Individuum eigentlich viel wichtiger ist als die genetische. Die Genetik trägt also dazu bei, einige Aspekte unserer Vergangenheit zu verstehen. Insofern ist das eine äußerst fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Genetikern und Archäologen. Auf der anderen Seite können sich manche Kollegen bedroht fühlen, wenn eine neue Methode auftaucht, statt sie als Bereicherung zu sehen. Das kommt immer wieder vor. Das war auch so, als die Kohlenstoffdatierung kam. Einige Wissenschaftler hat es da sehr gestört, dass sich ihre Lieblingstheorien als falsch entpuppten.

wie zum Beispiel die Funde aus der südafrikanischen Höhle Rising Star. Wir kennen also mindestens vier oder fünf andere Gruppen, vielleicht gab es mehr.

Nach der so genannten Out-of-Africa-Hypothese stammt die gesamte heutige Menschheit von Auswanderern des *Homo sapiens* aus Afrika ab. Wenn sich menschliche Formen in Europa und Asien erfolgreich vermischten, ist die Out-of-Africa-Hypothese dann noch haltbar?

Absolut gesehen stimmt die Out-of-Africa-Hypothese nicht mehr. 98 Prozent meines Genoms kommt aus Afrika, aber zwei Prozent habe ich von früheren Formen aus Europa übernommen. Doch im Großen und Ganzen gilt natürlich immer noch, dass der moderne Mensch aus Afrika stammt.

Sie arbeiten als Biologe, haben jedoch auch Ägyptologie studiert. Sie kennen also beide Seiten: Naturwissenschaft und klassische Archäologie. Welche Probleme treten bei der Zusammenarbeit dieser Disziplinen auf?

Insgesamt stellt die Zusammenarbeit eine große Bereicherung dar. Wenn man wie wir die genetische Geschichte und die DNA von alten Überresten untersucht, ist man auf die Funde der Archäologen und Paläontologen angewiesen, die uns ja erst unsere Untersuchungen ermöglichen. Wir können dann die genetische Seite der Geschichte erhellen, die sich anhand von Fossilien und Artefakten nicht klären lässt. Dabei handelt es sich natürlich nur um einen Aspekt der Geschichte der Menschheit – und der ist vielleicht gar nicht der wichtigste. Wenn ich zum Beispiel nach Griechenland fahre, berührt es mich sehr, den Ursprung meiner Kultur und der Demokratie zu sehen, obwohl meine genetischen Vorfahren sicherlich keine Griechen waren. Das zeigt doch,

Zu Beginn Ihrer Karriere haben Sie Erbgut aus ägyptischen Mumien isoliert. Gibt es neue genetische Erkenntnisse über Mumien seit Ihrem damaligen Durchbruch?

Das kommt jetzt langsam wieder in Fahrt. Es ist meist ziemlich schwierig, DNA aus ägyptischen Mumien zu gewinnen, weil das Klima so heiß ist. Johannes Krause, Direktor am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie hier in Leipzig, hat inzwischen einige Mumien untersucht und wird dazu mehrere Daten veröffentlichen. Das wird sicherlich interessante Erkenntnisse zum Beispiel dazu liefern, welche Gruppen die ägyptische Kultur begründet haben.

Woran arbeiten Sie jetzt?

Wir haben uns intensiv mit den coronarelevanten Varianten von Neandertalern beschäftigt. Nun versuchen wir, sie auch funktionell zu verstehen: Was unterscheidet die Neandertalervariante auf Chromosom 3 von der schützenden Version? Wie werden dort die Gene exprimiert? Die Sequenzierung alter Genome überlasse ich inzwischen mehr und mehr meinen Kollegen. Ich habe noch acht Jahre bis zu meiner Emeritierung, und die Zeit will ich nutzen, um mich verstärkt auf solche funktionellen Fragen zu konzentrieren. ◀

Das Gespräch führte »Spektrum«-Redakteur **Andreas Jahn**.

QUELLEN

Zeberg, H., Pääbo, S.: The major genetic risk factor for severe COVID-19 is inherited from Neanderthals. *Nature* 587, 2020

Zeberg, H., Pääbo, S.: A genomic region associated with protection against severe COVID-19 is inherited from Neanderthals. *PNAS* 118, 2021

ARCHÄOLOGIE STAND STONEHENGE VORHER WOANDERS?

In Wales haben Archäologen die Reste eines Steinkreises aufgedeckt. Durchmesser und Baumaterial gleichen dem frühen Stonehenge in England. Waren Migranten vor 5000 Jahren samt den Monolithen umgezogen?

► Vier bläulich schimmernde Steine sind alles, was von Waun Mawn übrig geblieben ist. Wenn Mike Parker Pearson Recht hat, gibt es gute Gründe, warum vom immerhin drittgrößten Steinkreis Großbritanniens nur noch spärliche Reste vorhanden sind. So ist das Team um den Archäologen vom University College London davon überzeugt, dass Waun Mawn im Westen von Wales der ursprüngliche Standort von Stonehenge im Südwesten Englands war.

Die ersten Bauern Britanniens hätten demnach um 3400 v. Chr. damit begonnen, aus rund 50 jeweils gut zwei Tonnen schweren Doleritblöcken, die wegen ihres Farbtons auch Blausteine genannt werden, in Waun Mawn einen Steinkreis zu errichten. Der Durchmesser der Anlage in den Preseli-Bergen betrug 110 Meter. Nach einigen Jahrhunderten bauten sie den Ring ab, transportierten die meisten Steine rund 280 Kilometer Richtung Südosten in die Salisbury

Plain und richteten sie dort wieder auf – als Stonehenge. Mike Parker Pearson ist sich sicher: Die erste Phase des berühmten Steinrunds war eine Kopie von Waun Mawn.

Wer heute vor Stonehenge steht, sieht das Ergebnis einer langen Baugeschichte. Das Markenzeichen der Anlage sind die hoch aufragenden Sandsteinblöcke, die so genannten Sarsen. Sie bildeten einst einen gedeckten Ring, der in seinem Inneren weitere Konstruktionen einfasste: fünf Sarsensteingruppen und ringartige Formationen aus Blausteinen. Die Herkunft der durchschnittlich 20 Tonnen schweren Sarsenmonolithe haben Archäologen im Juli 2020 geklärt. Man hatte sie aus dem 25 Kilometer nördlich von Stonehenge gelegenen West Woods herbeigeschafft.

Der Steinkreis sah allerdings nicht immer so aus. Als Menschen um 3000 v. Chr. die erste Anlage erbauten, hoben sie einen runden Graben aus und legten dahinter einen Erdwall an.

Entlang des Walls gruben sie 56 Löcher und versenkten darin womöglich Blausteine aus den walisischen Preseli-Bergen. Der Graben dieses Stonehenge misst im Durchmesser zirka 110 Meter – genau wie der einstige Steinkreis von Waun Mawn. In den Augen von Parker Pearson stimmen die Monumente nicht zufällig in der Größe überein. Zudem befindet sich bei beiden Anlagen der Zugang im Nordosten. Die Öffnung sei damit exakt auf den Sonnenaufgang zur Sommersonnenwende ausgerichtet gewesen.

War also der einsame Ort in den Preseli-Bergen – nördlich von Pembrokeshire im Westen von Wales – der Vorläufer von Stonehenge? In der Gegend liegen die Blausteine wie aufgehäuft herum. Die ersten Bauern, die sich im Tal des Flusses Nevern niederließen, holten die Blöcke aus den Steinbrüchen und stellten sie in großen Kreisen auf. In Waun Mawn verlief ebenfalls ein Ring über einen sanften Hang. Jahrelang hatte Parker Pearson mit seinem Team

die Region in den Preseli-Bergen gründlich nach Steinkreisen abgesehen. Der Durchbruch kam 2017: Ein Kollege hatte vorgeschlagen, vier bereits länger bekannte Blausteine in Waun Mawn genau anzusehen. Die Forscher begannen zu graben und entdeckten verfüllte Gruben – darin waren einst Blausteine eingelassen und mit Bruchsteinen verkantet worden.

Spuren von Ritualbauten

Entlang eines Kreisbogens deckten die Archäologen sechs weitere Steinpositionen auf. Sie hatten laut Parker Pearson das Zentrum eines Ritualkomplexes gefunden. In der Umgebung stießen die Forscher auf zahlreiche Dolmen, also Steingrabkammern, sowie nördlich und südlich des Steinkreises auf weitere Anlagen, die einst mit Erdwällen und Palisaden umringt waren. Dann kam die Überraschung: Nach nur etwa zwei Jahrhunderten der Nutzung verlieren sich um 3200 v. Chr. die Spuren der damaligen Menschen. »Es scheint, als wären sie einfach verschwunden«, sagt der britische Prähistoriker. »Vielleicht sind

WAUN MAWN Das Luftbild (unten links) zeigt die Ausgrabung beim einstigen Steinkreis. Vier Blausteine fanden sich dort (unten rechts). Einer, der dritte von unten, stand als einziger noch aufrecht. In die Grube (rechts) war vielleicht ein Blaustein eingelassen. Mit den Bruchsteinen neben dem Loch war der Stand des Monolithen gesichert worden.

die meisten ausgewandert und haben ihre Steine – ihre angestammte Identität – mitgenommen.«

Warum, weiß auch Parker Pearson nicht. Doch er meint den Zielort zu kennen: Stonehenge. Dies legten Isotopenanalysen nahe. Am Sarsenrund in der Salisbury Plain waren um 3000 v. Chr. Menschen begraben worden. Zirka 16 Prozent der Toten stammten laut Isotopenuntersuchungen der Überreste aus Westbritannien, sehr wahrscheinlich aus Westwales – also womöglich aus der Gegend der Preseli-Berge. Aus all diesen Indizien formt Parker Pearson nun seine spektakuläre These: Im späten 4. Jahrtausend v. Chr. wanderten Menschen aus Wales Richtung Osten – samt ihren Blausteinen – und ließen sich in der Region um Stonehenge nieder.

Der Archäologe stützt sich noch auf weitere, teils ältere Beobachtungen.

Schon lange ist klar, dass die Blausteine in der Ebene von Salisbury – insgesamt wohl rund 80 Stück, die in Stonehenge und dem nahe gelegenen Steinkreis Bluestonehenge aufgestellt waren – nicht aus der unmittelbaren Umgebung kommen. Bereits 2015 hatte Parker Pearson mit seinem Team nachgewiesen, dass die Monolithen aus zwei 250 Kilometer entfernten Steinbrüchen an der Nordseite der Preseli-Berge stammen. Er hatte damit das seit Generationen ungeklärte Rätsel um die Herkunft der Blausteine von Stonehenge gelöst.

Aus den beiden Steinbrüchen bargen die Forscher Reste von Holzkohle und Nahrungsmitteln. Eine ¹⁴C-Datierung legte nahe, dass sich dort Menschen um 3400 v. Chr. aufgehalten und wahrscheinlich auch Steine gebrochen hatten. Schon damals vermutete Parker Pearson, dass die



MIKE PARKER PEARSON, PARKER PEARSON, M. ET AL.: THE ORIGINAL STONEHENGE? A DISMANTLED STONE CIRCLE IN THE PRESSEL HILLS OF WEST WALES. ANTIQUITY 95, DOI:ORG/10.1017/S000357182002239, 2021, FIG. 5



ADAM STANFORD, PARKER PEARSON, M. ET AL.: THE ORIGINAL STONEHENGE? A DISMANTLED STONE CIRCLE IN THE PRESSEL HILLS OF WEST WALES. ANTIQUITY 95, DOI:ORG/10.1017/S000357182002239, 2021, FIG. 3 (UNMS), FIG. 2 (RECHTS)



jeweils zwei Tonnen schweren Blöcke mehrere Jahrhunderte lang an einem Ort standen, abgebaut und auf dem Landweg nach Stonehenge transportiert wurden – denn ihre Verwendung dort lässt sich nicht früher als dessen erste Phase um 3000 v. Chr. datieren. Nur hatte Parker Pearson den Ort der Erstaufstellung noch nicht entdeckt.

Ein heißer Kandidat ist nun Waun Mawn, das Menschen offenbar zu einer Zeit angelegt haben, als in den Steinbrüchen gearbeitet wurde. Parker Pearson und sein Team nahmen in Waun Mawn Proben aus den Gruben, in denen die Blausteine mutmaßlich aufgerichtet waren. Sie entdeckten nur wenig Holzkohle, die sich für eine Radiokarbondatierung eignete, bargen aber auch Erdreich aus den Verfüllungen der Löcher, um deren Alter mit Hilfe der optisch stimulierten Thermolumineszenz (OSL) zu bestimmen.

Das Ergebnis war jedoch nicht eindeutig. Die ¹⁴C-Datierungen lieferten eine große Schwankungsbreite: Demnach war der Steinkreis von Waun Mawn in den Jahrhunderten zwischen 3600 und 3000 v. Chr. errichtet worden. Die OSL-Daten, welche die Archäologen aus der Bruchsteinpackung der Blausteine gewannen, fielen dagegen in die Zeit um 3530 v. Chr. plus/minus 330 Jahre. Daraus folgt, dass die Steine spätestens um 3200 v. Chr. aufgestellt beziehungsweise frühestens danach entfernt worden waren. Die Erde, die anschließend in die Steinfassungen gelangte, ist laut den OSL-Daten sehr viel jünger: Sie sammelte sich in den Jahrhunderten vor zirka 2100 v. Chr. Der genaue Beginn von Waun Mawn liegt damit im Dunklen. Allerdings lautet der gegenwärtige Forschungsstand, dass kein Steinkreis in Großbritannien früher als 3400 v. Chr. entstanden ist. Daher dürfte auch der walisische Ring in den Preseli-Bergen nicht älter sein.

Parker Pearson ist von einem Detail besonders begeistert, das seiner Einschätzung nach die Verbindung von Waun Mawn zu Stonehenge klar belegt: Blaustein Nummer 62 des Steinkreises in der Salisbury Plain weist einen ungewöhnlichen, fünfeckigen Umriss auf, der mit einem der

sechs frei gelegten Löcher in Waun Mawn übereinstimmt. »Im entsprechenden Steinloch fanden wir sogar einen Splitter aus nicht fleckigem Dolerit, der geologisch zum Stein 62 passt. Das hat mich sehr überrascht«, erklärt Parker Pearson. Die meisten Blausteine in Stonehenge bestehen aus Dolerit, der an der Oberfläche fleckig erscheint, einige wenige sind gleichmäßiger gefärbt.

Ein Proto-Stonehenge von vielen

Der Megalith-Experte Johannes Müller schätzt die Sache zurückhaltender ein: »Dolerite sind oft ähnlich geformt. Hier fehlt eine klare statistische Analyse in natürlichen Vorkommen.« Er stimmt aber zu: Es sei durchaus sensationell, dass die jungsteinzeitlichen Gemeinschaften Blausteine über mehrere hundert Kilometer transportierten. Doch die Verwendung von Blausteinen in unterschiedlichen Monumenten beweise nicht, dass es einst eine Verbindung zwischen Waun Mawn und Stonehenge gab.

Müller, prähistorischer Archäologe an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, kann sich zwar gut vorstellen, dass die Menschen migrierten. »Die ganze Welt war damals unterwegs – Viehtrieb, Heiratsbeziehungen, Expeditionen zu Rohstoffquellen können Gründe dafür gewesen sein«, sagt Müller. Derartige Kontakte jedoch auf bestimmte Menschen und konkrete Blausteine zu beziehen, findet er gewagt. »Der Abbau einiger Blausteine an einem Monument in Wales und deren gezielte Nutzung an einer über 250 Kilometer entfernten Stelle wäre in dieser Dimension etwas Neues.« Sicherlich sei Waun Mawn eine Art Proto-Stonehenge. »Allerdings ist es nur einer von vielen Vorläuferbauten«, ist der Prähistoriker überzeugt. Sowohl was die Dimension betrifft als auch das Bauprinzip, habe es zahlreiche solcher Steinkreise und Konstruktionen auf den Britischen Inseln gegeben.

Ebenso sind die in Waun Mawn erhobenen naturwissenschaftlichen Daten laut Müller schwieriger zu interpretieren, als Parker Pearson vorschlägt. Seine Werte suggerierten Eindeutigkeit, die es bei genauem

Hinsehen nicht gebe, meint der Kieler Forscher. »Als mitteleuropäischer Archäologe muss ich bekennen, dass wir vorsichtiger mit der Interpretation von OSL- und Radiokarbondaten umgehen, als dies offensichtlich durch das britische Forscherteam in Waun Mawn geschehen ist.« Denn ob in Stonehenge schon um 3000 v. Chr. tatsächlich Blausteine standen oder erst um 2500 v. Chr., sei seines Erachtens noch nicht geklärt. Der Archäologe ist der Ansicht, dass das Team um Parker Pearson sich für die Datierungen entschieden habe, »die ins eigene Weltbild passen – es sind aber Zweifel an ihrer Interpretation angebracht«.

Auch der britische Archäologe Vincent Gaffney von der University of Bradford bezweifelt, dass sich mit den Daten detailliert Wanderungen zwischen Waun Mawn und der Salisbury Plain nachweisen lassen. »Die grundsätzlichen Vorschläge von Mike Parker Pearson zur Bewegung von Materialien und sogar Menschen mögen im Großen und Ganzen richtig sein«, sagt Gaffney. »Doch es bleibt ein gewisses Unbehagen über die Art und Weise, wie die Daten interpretiert werden.« Demnach ist die Hypothese, die Menschen seien mit ihren Blausteinen von Waun Mawn nach Stonehenge migriert, plausibel, aber eben längst nicht gesichert. »Weitere Ausgrabungen sind notwendig«, meint denn auch Tim Kinnaird von der University of St Andrews, der die OSL-Daten von Waun Mawn ausgewertet hat. »Ohne die Pandemie wäre unser Team allerdings schon 2020 wieder vor Ort gewesen.« ◀

Der Wissenschaftsjournalist **Hubert Filser** ist Physiker und Autor zahlreicher Sachbücher und Artikel über Archäologie.

QUELLEN

Nash, D. J. et al.: Origins of the sarsen megaliths at Stonehenge. *Science Advances* 6, 2020

Parker Pearson, M. et al.: The original Stonehenge? A dismantled stone circle in the Preseli Hills of West Wales. *Antiquity* 95 (379), 2021

Parker Pearson, M. et al.: Craig Rhos-y-felin: A Welsh bluestone megalith quarry for Stonehenge. *Antiquity* 89 (348), 2015

GEOMETRIE

RATIONALE TETRAEDER

Wie viele Tetraeder gibt es, deren Flächen rationale Winkel einschließen? Nach jahrzehntelanger Suche ist es vier Mathematikern nun gelungen, dieses hartnäckige Rätsel zu lösen.



OLENA SIMAHALO / QUANTA MAGAZINE.
TETRAEDER VON MARTIN H. WEISSMAN, UC SANTA CRUZ. NACH
DATEN VON KEDLAYA, K.S. ET AL. (GTHUB.COM/KEDLAYA/
TETRAHEDRAL). BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

BESONDERE KÖRPER Diese 59 Tetraeder schließen mit ihren Flächen allesamt rationale Winkel ein.

► In der Antike faszinierte das Tetraeder Gelehrte wie Platon und Aristoteles. Auch heute noch birgt die einfache geometrische Figur einige Geheimnisse. In einer im November 2020 veröffentlichten Arbeit konnten Alexander Kolpakov von der Universität de Neuchâtel in der Schweiz, Bjorn Poonen vom Massachusetts Institute of Technology, Michael Rubinstein von der University of Waterloo und Kiran Kedlaya von der University of California San Diego nun alle Tetraeder identifizieren, deren Flächen rationale Winkel einschließen. Damit haben die Forscher nach jahrzehntelanger Suche ein weiteres Rätsel der simplen Figur gelöst.

Ein Tetraeder besteht aus vier dreieckigen Flächen, die eine Pyramide bilden. Die Flächen treffen unter sechs Winkeln aufeinander. Die neue Arbeit klassifiziert alle möglichen Objekte, für die alle sechs Flächenwinkel rational sind, das heißt, jeder lässt sich als eine Bruchzahl mal Pi darstellen. Demnach gibt es 59 verschiedene sowie zwei unendliche Familien von Tetraedern, die diese Bedingung erfüllen.

Bereits in den 1990er Jahren haben Mathematiker diese Auswahl an Figuren mit der Unterstützung von

Computern entdeckt. Allerdings war bis zur kürzlich erschienenen Arbeit nicht klar, ob das wirklich alle rationalen Tetraeder sind oder ob es weitere gibt.

Die Aufgabe mag simpel klingen, doch die Lösung erforderte jahrelang angesammeltes Wissen sowie ein Maß an Rechenleistung, das noch vor einem Jahrzehnt nicht ohne Weiteres verfügbar war. »Das Problem lässt sich nicht einfach mit Stift und Papier lösen. Die Forscher mussten anspruchsvolle Methoden entwickeln«, erklärt Marjorie Senechal vom Smith College in Massachusetts.

Tatsächlich enthält die 30-seitige Arbeit der vier Mathematiker nur wenige Zeichnungen. Stattdessen basiert sie auf der Lösung einer Polynomgleichung, die aus Koeffizienten und potenzierten Variablen besteht, wie $y = 3x^2 + 6$. »Auf den ersten Blick wirkt es wie eine geometrische Aufgabe, aber dahinter verbirgt sich die Zahlentheorie«, so Kedlaya.

Die Verbindung zwischen Geometrie und Zahlentheorie gab den Mathematikern ein Werkzeug an die

Hand, aber sie mussten hart arbeiten, um es nutzen zu können. Denn spezielle Lösungen komplizierter Gleichungen zu finden – und zu beweisen, dass sie vollständig sind –, ist extrem schwierig. Doch die Forscher entwickelten eine neue Methode, um Polynome zu bearbeiten, und haben dadurch die grundlegende Frage zu den einfachen geometrischen Figuren beantwortet. Zudem könnte ihr Ansatz künftig bei anderen Problemen dieser Art hilfreich sein.

Wie stark ähnelt eine geometrische Figur einem Würfel?

Die Suche nach rationalen Tetraedern formulierten die zwei Mathematiker John Conway und Antonia J. Jones erstmals 1976 in einer gemeinsamen Arbeit. Damals interessierten sie sich für Tetraeder, die sich zerschneiden und als Würfel des gleichen Volumens wieder zusammensetzen lassen – man spricht von einer Scherenkongruenz beider Figuren. Die Fragestellung reicht bis ins Jahr 1900 zurück. Damals stellte der renommierte deutsche Wissenschaftler David Hilbert 23 Probleme vor, welche die mathematische Forschung des 20. Jahrhundert

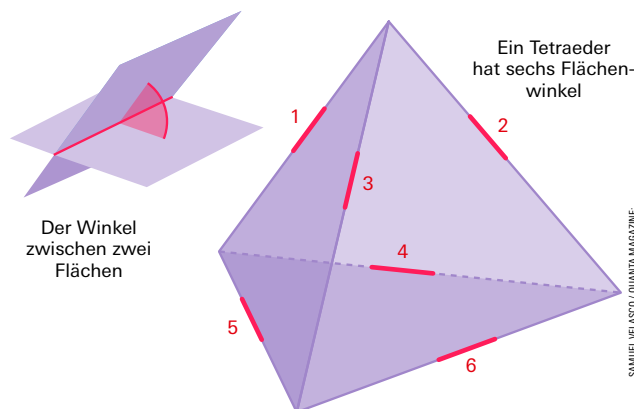
prägten. Einer seiner Punkte drehte sich darum, ob jedes Paar dreidimensionaler Objekte mit gleichem Volumen scherenkongruent ist. Es wurde schnell klar, dass das nicht der Fall ist. Allerdings sind alle rationalen Tetraeder scherenkongruent zum Würfel.

In ihrer Arbeit skizzierten Conway und Jones sogar eine Methode, um solche Objekte zu finden: Dafür müsse man eine bestimmte Polynomgleichung lösen. Diese besteht aus sechs Variablen, die den Flächenwinkeln eines Tetraeders entsprechen, und enthält 105 Terme, welche die komplizierten Beziehungen der Winkel zueinander widerspiegeln.

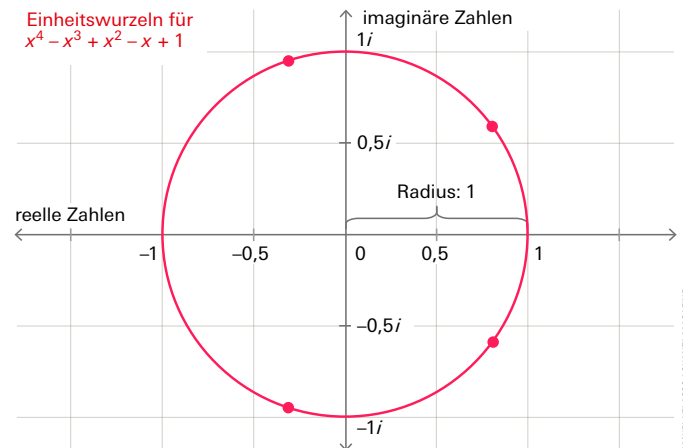
Die Polynomgleichung besitzt unendlich viele Lösungen, die alle möglichen Konfigurationen eines Tetraeders repräsentieren. Um jedoch solche mit rationalen Flächenwinkeln zu finden, müsste man gemäß Conway und Jones eine spezielle Klasse von Lösungen suchen. Wie das gelingen sollte, wussten sie nicht, aber die Forscher waren zuversichtlich: »Es scheint ziemlich wahrscheinlich, dass das allgemeine Tetraeder, dessen Flächenwinkel rational sind, durch unsere Techniken gefunden werden kann«, schrieben sie in ihrer Arbeit.

Mehr als 40 Jahre später bestätigten vier Mathematiker, dass sie Recht hatten. Die Strategie von Conway und Jones ist in ihrem Fach verbreitet: Nur allzu häufig sucht man nach speziellen Arten von Lösungen von Polynomgleichungen. Das können ganzzahlige oder rationale Lösungen sein oder, wie im Fall der neuen Arbeit, so genannte Einheitswurzeln.

RATIONALE FLÄCHENWINKEL Die Flächen von Tetraedern schließen insgesamt sechs Winkel ein. Wenn diese einen rationalen Wert haben, spricht man von rationalen Tetraedern.



ENTLANG DES KREISES Einheitswurzeln sind Zahlen, die mit einer Zahl n potenziert eins ergeben. In der komplexen Ebene, die sowohl reelle als auch imaginäre (Wurzeln aus negativen Zahlen) Werte enthält, befinden sich alle Einheitswurzeln auf einem Kreis mit Radius eins.



Die meisten Einheitswurzeln erscheinen nicht auf dem gewöhnlichen Zahlenstrahl. Stattdessen findet man sie unter den komplexen Zahlen, die imaginäre Werte (Wurzeln aus negativen Zahlen) enthalten. Einheitswurzeln haben die besondere Eigenschaft, dass sie mit einer Zahl n potenziert eins ergeben. Zudem besitzen sie eine anmutige geometrische Darstellung: Sie liegen alle auf dem Einheitskreis der komplexen Ebene.

Lösungen erraten

Um das Conway-Jones-Polynom zu lösen, muss man den sechs Variablen komplexe Werte zuordnen, unter denen die 105 Terme eine wahre Aussage bilden. Die Variablen entsprechen nicht direkt den gesuchten Winkelmaßen, sondern hängen mit dem Kosinus der Winkel zusammen.

Conway und Jones fiel auf, dass rationale Tetraeder zu jenen Lösungen des Polynoms gehören, bei denen alle Variablen Einheitswurzeln sind. Doch

diese Erkenntnis war weniger hilfreich, als sie auf den ersten Blick erscheint. Bestimmte Lösungen zu finden ist eine Sache. Zu beweisen, dass es wirklich alle sind, eine ganz andere. Bereits 1995 beschrieben Poonen und Rubinstein – wie sich später herausstellen sollte – alle Tetraeder mit rationalen Flächenwinkeln. Im Wesentlichen errieten die Forscher die Formen: »Man probiert sechs rationale Zahlen aus und setzt sie in die Gleichung ein«, erklärt Poonen.

In ihrem neuen Beweis haben die vier Mathematiker nun gezeigt, dass die ursprüngliche Liste vollständig ist. Die Zusammenarbeit begann im März 2020, als Poonen einen Vortrag von Kedlaya besuchte, in dem es um Einheitswurzeln eines Polynoms ging. Poonen erkannte sofort die Relevanz für seine frühere, unvollendete Arbeit zu Tetraedern. Er schickte daraufhin eine E-Mail an Kedlaya und beschrieb das Problem.

Kedlaya wandte sich damit an Kolpakov, der ebenfalls an Einheitswurzeln von Polynomen arbeitete. Zur gleichen Zeit kontaktierte Poonen seinen früheren Mitarbeiter Rubinstein. »Wir trafen uns zu viert ein paar Monate lang regelmäßig für vielleicht zwei Stunden pro Woche«, erinnert sich Kedlaya. Als sie mit der Suche nach den Einheitswurzeln für das Conway-Jones-Polynom begannen, hatten sie bereits eine ziemlich genaue Vorstellung davon, wo sie fündig werden würden.

Die Lösungen mussten sich unterhalb einer riesigen Zahl befinden.

Diese obere Schranke war jedoch so groß, dass es keinen Weg gab, alle Möglichkeiten zu untersuchen. Zwei bedeutende Fortschritte brachten sie weiter.

Zunächst senkten die Mathematiker die Grenze: Sie bewiesen, dass sich die komplizierte Polynomgleichung durch zahlreiche einfachere Polynome darstellen lässt. Deren Lösungen liegen unterhalb einer viel kleineren oberen Schranke. Leider war das Intervall aber immer noch zu groß, um es effizient zu durchsuchen.

Der zweite Durchbruch bestand darin, einen cleveren Weg zu finden, mit dem sich die möglichen Einheitswurzeln untersuchen lassen. Dafür nutzten sie deren symmetrische Struktur aus: Wenn sie die Lösung in einem Teil des Intervalls kannten, musste es eine dazugehörige in einem anderen Bereich geben.

Dadurch entwickelten sie neue Algorithmen, die diese Symmetrie berücksichtigten, um effizienter vorzu-

gehen. Zudem implementierten sie die Programme auf leistungsfähigen Computern, von denen Conway und Jones seinerzeit nur träumen konnten.

Die Rechner durchsuchten jede mögliche Kombination von Lösungen innerhalb des kleineren Intervalls. So bewiesen die Autoren schließlich, dass es nur 59 verschiedene Tetraeder mit rationalen Flächenwinkeln gibt – zusätzlich zu zwei unendlichen Familien. Das sind jene Figuren, die Poonen und Rubinstein bereits 25 Jahre zuvor gefunden hatten. Die Tetraeder innerhalb der unendlichen Familien variieren um einen Parameter, der endlose Möglichkeiten bietet, einige der Winkel zu vergrößern und andere zu verkleinern, wobei sie rational bleiben.

Damit konnten die vier Forscher ein offenes Problem nach Jahrzehnten vollständig zu lösen. Für Mathematiker, die Einheitswurzeln von Polynomgleichungen suchen, bietet die Arbeit zudem einen neuen Weg, um diese zu finden. Insbesondere die Methoden,

welche die ursprüngliche Gleichung auf viele einfachere Polynome reduzieren, lassen sich wahrscheinlich auch auf andere Fälle anwenden. ◀

Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist. Er lebt in Columbia (South Carolina).

QUELLEN

Conway, J., Jones, A.: Trigonometric diophantine equations (On vanishing sums of roots of unity). *Acta Arithmetica* 30, 1976

Kedlaya, K.S. et al.: Space vectors forming rational angles. *ArXiv* 2011.14232, 2020

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Tetrahedron Solutions Finally Proved Decades After Computer Search« 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.

 **Quanta** magazine

Spektrum LIVE

Digitaler Landschafts-Astrofotografie-Workshop

Lernen Sie die Ver- und Bearbeitungstechniken von RAW-Milchstraßenaufnahmen über Landschaften kennen und erfahren Sie mehr über die Theorie zur Fotografie und die Erstellung von Zeitraffervideos.

Der dreistündige Workshop wird digital stattfinden und richtet sich an Anfänger in der Astrofotografie.

26. Juni 2021
mit Astrofotograf
Dr. Sebastian Voltmer

Infos und Anmeldung:

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

BIOMECHANIK IN FORM GEBRACHT

Ziehen, quetschen, biegen: Die Gestalt von Organismen hängt von mechanischen Wechselwirkungen ab. Forscher versuchen, das genauer zu verstehen – unter anderem, um Krebs zu bekämpfen.

► Anfangs hat ein Embryo weder Bauch noch Rücken, weder Kopf noch Hinterende. Er ist lediglich eine Kugel aus Zellen. Doch schon bald sammelt sich Flüssigkeit darin, und die Zellen wandern umher, um ihre Positionen im künftigen Körper einzunehmen. Zellschichten falten sich wie ein Origami-Kunstwerk und bringen dabei Herz, Darm, Gehirn und weitere Organe hervor. Nichts von alledem geschähe, würden nicht mechanische Kräfte den entstehenden Organismus quetschen, biegen und ziehen. Auch noch im Erwachsenenalter reagieren die Körperzellen auf Kompression und Zug – gleichgültig, ob diese innerhalb des Gewebes oder von außen einwirken.

Wie die Morphogenese abläuft, wie sich also Körper, Organe und Gewebe während der Individualentwicklung formen, ist immer noch weitgehend unverstanden. Jahrzehntlang haben

DRUCK UND ZUG Öltröpfchen mit magnetischen Partikeln (gelb) erlauben es, die Kräfte in Zebrafisch-Embryonen (blau) zu messen.

sich Biologen auf den morphogenetischen Einfluss von Genen und anderen Biomolekülen fokussiert – großteils einfach deshalb, weil entsprechende Untersuchungsmethoden verfügbar waren und stetig weiterentwickelt wurden. Mechanische Kräfte haben dagegen wenig Aufmerksamkeit erfahren.

Bloß Gene und Biomoleküle zu betrachten, ist allerdings so, »als würde man ein Buch schreiben und dabei nur die Hälfte der Buchstaben des Alphabets benutzen«, sagt Xavier Trepas, ein Biomechaniker am Institute for Bioengineering of Catalonia in Barcelona. Immer mehr Wissenschaftler interessieren sich deshalb dafür, wie mechanische Einflüsse die Entwicklungsvorgänge eines Organismus prägen, wie Zellen Kräfte wahrnehmen und darauf reagieren und wie sie diese selbst erzeugen. Solche Untersuchungen gelingen mit Hilfe ausgeklügelter Werkzeuge, etwa Lasern und Mikropipetten, magnetischer Partikel und spezieller Mikroskope.

Etliche Forscher arbeiten dabei mit Zell- oder Gewebekulturen. Einige wenige analysieren mechanische

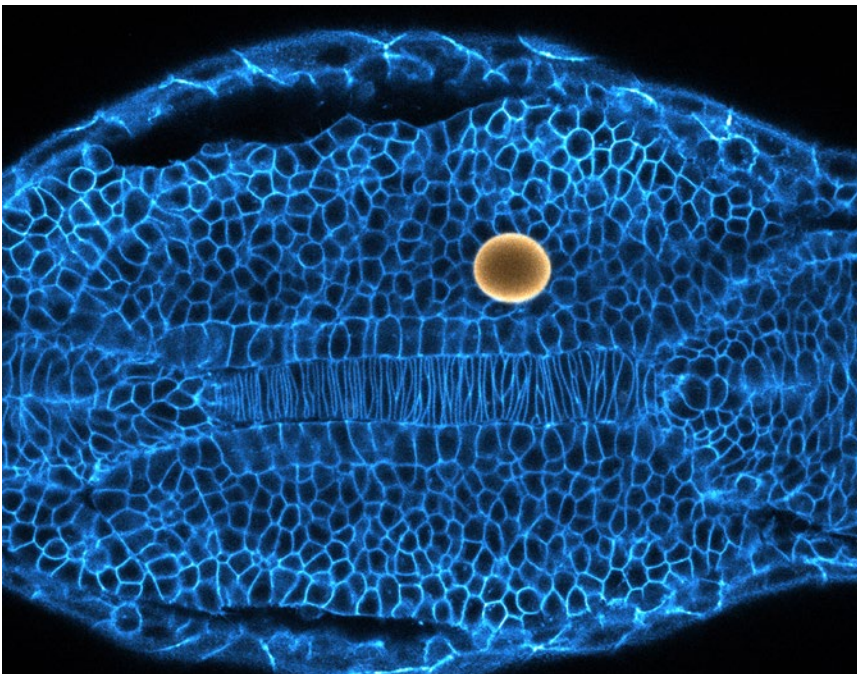
Wirkungen an Tiermodellen. Dabei kommen sie immer wieder Vorgängen auf die Spur, die sich von denen in isolierten Geweben unterscheiden. So hat sich gezeigt: Physikalische Faktoren wie Flüssigkeitsdruck und Zelldichte wirken maßgeblich mit, wenn Embryonen im Zuge der Entwicklung ihre Kugelsymmetrie brechen.

Der Entwicklungsbiologe Jean-Léon Maître vom Institut Curie in Paris und seine Kollegen haben an Mäuseembryonen verfolgt, wie in dem anfangs kugelförmigen Zellhaufen eine große, flüssigkeitsgefüllte Blase entsteht, das Lumen. Während es sich füllt, rücken die Zellen, aus denen der spätere Fötus entsteht, auf einer Seite zusammen. Dieses erste symmetriezerstörende Ereignis legt fest, welche Region zum Rücken und welche zum Bauch wird, und sorgt dafür, dass sich der Embryo korrekt in die Gebärmutterschleimhaut einnistet.

Aufgepumpt mit Wasser

Vorübergehend erscheinen dabei kleine wassergefüllte Hohlräume zwischen den Zellen, wie Maître und sein Team nachwies. Die Flüssigkeit darin stammt aus der Umgebung des Embryos und wandert – entlang des H_2O -Konzentrationsgefälles – in ihn ein. Aus den Zwischenzellräumen sickert sie ins Lumen, wie die Forscher Ende 2020 in einer Preprint-Publikation auf »bioRxiv« berichteten. Die Wissenschaftler beobachteten, dass die Proteinverbindungen zwischen den Zellen abreißen, während sich die Hohlräume bilden. Damit ist erstmals nachgewiesen: Flüssigkeit unter Druck formt den Embryo, indem sie seinen Zellverband aufbricht.

Doch warum läuft dieser Entwicklungsprozess derart rabiab ab, dass unkontrollierbare Schäden drohen? Maîtres Vermutung nach hat sich der

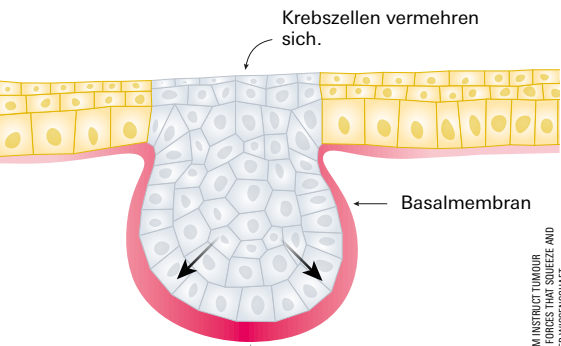


WIE HAUTKREBS ENTSTEHT

Physikalische Kräfte bestimmen darüber mit, ob ein Hauttumor gutartig ist oder ob er Metastasen bildet.

Gutartiger Tumor

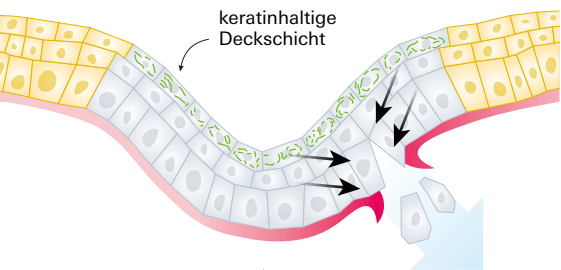
Basalzellkarzinome drücken auf die Basalmembran der Haut, verdicken sie dabei aber und grenzen sich so selbst ein.



Die Tumoren formen knospenartige Geschwülste, die selten in die Blutbahn durchbrechen.

Bösartiger Tumor

Plattenepithelkarzinome haben oft eine dünnere Basalmembran unter sich. Zudem prägen sie häufig einen harten Deckel aus keratinhaltigen Zellen aus, der sie nach unten presst.



Während sich die Tumormasse vermehrt, faltet sie sich nach innen. Das belastet die Basalmembran, bis der Tumor schließlich durchbricht.

räumt der Entwicklungsbiologe Timothy Saunders ein, der an der National University of Singapore arbeitet. Seine Forschungsgruppe hat die Entwicklung des Herzens in Embryonen von *Drosophila*-Taufliegeln untersucht. Es gibt dabei einen kritischen Moment, wenn zwei Gewebestücke zusammenkommen, um eine Röhre zu bilden. Jedes dieser Stücke enthält zwei Arten von Herzmuskelzellen. Damit ein gesundes Organ entsteht, müssen sich die Teile richtig zusammenfügen – Zelle für Zelle, wie ein Reißverschluss. »Wir haben beobachtet, dass die Ausrichtung hierbei zunächst oft nicht stimmt, später aber korrigiert wird«, sagt Saunders. »Wie funktioniert das?«

Wie sich herausstellte, sorgt dafür ein Mechanismus im Innern der Zellen. Ein Protein namens Myosin II – das nah verwandt ist mit dem Eiweiß, das Muskelzellen kontrahieren lässt – ist während der Bildung des Herzens in den beteiligten Zellen aktiv. Saunders' damaliger Doktorand Shaobo Zhang fragte sich deshalb, ob Myosin II eine Kraft erzeugt, die an dem »Reißverschluss« zerrt und fehlgepaarte Zellen voneinander trennt.

Unter Spannung

Um das zu testen, separierte Zhang gepaarte Zellen mit einem Laser. Sie zischten daraufhin auseinander wie ein gespanntes Gummiband, das man mit einer Schere durchschneidet. Führten die Forscher das Experiment jedoch mit Zellen durch, die kein Myosin II enthielten, passierte nichts. Die Wissenschaftler vermuten, Myosin II sorge für eine mechanische Kraft, die an den Zell-Zell-Verknüpfungen zieht – wie ein gedehntes Gummiband, das sich um gespreizte Finger spannt. Passen zwei Zellen nur schlecht zusammen, reißt die Kraft sie auseinander, und sie bekommen eine neue Chance, den korrekten Partner zu finden.

Auch die Vermehrung von Zellen kann Entwicklungsprozesse über mechanische Signale regulieren, wie Wissenschaftler um den Biophysiker Kristian Franze von der University of Cambridge an Embryonen von Krallenfröschen (*Xenopus*) entdeckt haben. Während die Augen und das Gehirn

des Embryos entstehen und neuronale Verbindungen untereinander ausbilden, wachsen die Axone – die dünnen Fortsätze der Nervenzellen – entlang eines Pfads, den die Festigkeit des Hirngewebes vorgibt.

Franze und seine Kollegen entwickelten ein Mikroskop, mit dem sie diesen Prozess am lebenden Tier verfolgen konnten, während sie zugleich die Steifigkeit des Gewebes mit einer winzigen Sonde maßen. Sie beobachteten: Etwa 15 Minuten bevor die vom Auge her auswachsenden Axone eintreffen, kommt es zu lokalen Verhärtungen und Aufweichungen des Zellverbands, die einen Festigkeitsgradienten erzeugen und den Nervenzellfortsätzen so den Weg weisen.

Die steiferen Gewebebereiche in den Froschhirnen schienen – wie bei Zebrafisch-Embryonen – eine höhere Zelldichte zu haben. Als Franze und sein Team die Zellteilung hemmten, entwickelte sich kein Festigkeitsgradient und die Axone fanden ihren Weg nicht. Mit kontrollierter Zellproliferation eine Gasse anzulegen, durch die hindurch sich beispielsweise Organe miteinander verbinden, scheint ein schneller und effektiver Mechanismus zu sein, um Wachstumsprozesse zu steuern.

Die mechanischen Eigenschaften von Körpergeweben spielen zudem eine Rolle bei Krebserkrankungen. So sind solide Tumoren (lokale Gewebewucherungen) fester als normales Körpergewebe. Das liegt einerseits daran, dass Tumoren ein Übermaß an extrazellulärer Matrix produzieren, einer faserigen Zwischenzellsubstanz. Andererseits vermehren sich die entarteten Zellen abnormal häufig und liegen somit in größerer Dichte vor.

Forscher haben mechanische Wechselwirkungen beobachtet, die erklären, warum manche Hauttumoren gut- und andere bösartig sind. Aus Stammzellen der Haut können verschiedene Arten von Tumoren hervorgehen: Basalzellkarzinome (»weißer Hautkrebs«), die nur selten Metastasen absondern, und Plattenepithelkarzinome (»heller Hautkrebs«), die häufiger streuen. Beide drücken auf die unter ihnen liegende Basalmembran, eine Schicht aus

NACH FROBE ET AL.: MECHANICS OF A MULTILAYER EPITHELIUM INSTRUCT TUMOR ARCHITECTURE AND FUNCTION. NATURE 585, 2020. FIG. 1. DANCE. A.: THE SECRET FORCES THAT SQUEEZE AND PULL LIFE INTO SHAPE. NATURE 589, 2021. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ziegelstein an. Der Biophysiker möchte als Nächstes untersuchen, ob dieser Mechanismus noch bei weiteren Entwicklungsprozessen eine Rolle spielt.

Irgendwann beginnt der Embryo, Organe auszubilden. »Wir wissen nur wenig darüber, wie das vor sich geht«,

Strukturproteinen, welche die äußeren Hautschichten vom tiefer liegenden Gewebe trennt. Basalzellkarzinome durchbrechen diese Barriere deutlich seltener als Plattenepithelkarzinome.

Die Stammzellbiologen Elaine Fuchs und Vincent Fiore von der Rockefeller University haben solche Vorgänge an Mäusen untersucht. Dabei erkannten sie: Gutartige Tumoren lassen die Basalmembran dicker werden, so dass sie den Tumor wie ein Handschuh umschließt. Plattenepithelkarzinome aber machen die Membran häufig dünner. Zudem prägen sie oft eine harte Deckschicht aus keratinhaltigen Zellen aus, die die Tumormasse auf die Basalmembran presst und ihr hilft, diese zu durchstoßen.

Als Nächstes wollen Fuchs und Fiore herausfinden, wie die Hautzellen mechanische Kräfte wahrnehmen und wie sie ein solches Signal in ein Genexpressionsprogramm umsetzen, das beispielsweise eine dickere Basalmembran entstehen lässt. Die Frage, wie mechanische Kräfte und Genaktivitäten zusammenhängen, sei von entscheidender Bedeutung. »Es geht um den Dialog zwischen den beiden.« ◀

Amber Dance ist Wissenschaftsautorin in Los Angeles, Kalifornien.

QUELLEN

Fiore, V.F. et al.: Mechanics of a multilayer epithelium instruct tumour architecture and function. *Nature* 585, 2020

Mongera, A. et al.: A fluid-to-solid jamming transition underlies vertebrate body axis elongation. *Nature* 561, 2018

Schliffka, M.F. et al.: Multiscale analysis of single and double maternal-zygotic Myh9 and Myh10 mutants during mouse preimplantation development. *bioRxiv* 10.1101/2020.09.10.291997, 2020

Thompson, A.J. et al.: Rapid changes in tissue mechanics regulate cell behaviour in the developing embryonic brain. *eLife* 8, 2019

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 589, S. 186–188, 2021

PALÄOKLIMA TEMPERATURRÄTSEL GELÖST

Die Klimasimulationen für die letzten 12000 Jahre stimmen nicht mit den Temperaturen überein, die sich aus geologischen Aufzeichnungen ergeben. Eine neue Studie zeigt, dass solche Rekonstruktionen durch jahreszeitliche Schwankungen verfälscht sind.

Das Verständnis vergangener Klimaveränderungen ist entscheidend, um die derzeitige globale Erwärmung richtig einzuordnen. Klimarekonstruktionen auf Grundlage von geologischen Messungen deuten darauf hin, dass im Holozän – das ist die aktuelle Warmzeit, die vor 11700 Jahren begann und bis jetzt andauert – der Höhepunkt der globalen Jahresmitteltemperaturen vor 6000 bis 10000 Jahren erreicht wurde. Anschließend kühlte die Erde ab, ein Trend, der sich erst im letzten Jahrhundert wieder umkehrte. Im Gegensatz dazu zeigen Computersimulationen des Klimas im Holozän eine kontinuierliche Erwärmung. Samantha Bova von der Rutgers University in New Jersey und vier Kollegen haben jetzt herausgefunden, wie sich die Klimarekonstruktionen mit den Computersimulationen in Einklang bringen lassen.

Um vergangenes Klima zu rekonstruieren, sind Wissenschaftler auf so

genannte Klimaproxys angewiesen. Das sind Stellvertreterdaten aus geologischen Materialien, zum Beispiel Eisbohrkernen, Stalagmiten oder Ozeansedimenten, anhand deren Eigenschaften sich bestimmte Klimawerte der Vergangenheit ableiten lassen. Solche proxybasierten Rekonstruktionen eint, dass sie für das frühe Holozän eine Temperaturspitze ergeben – bekannt als das holozäne thermische Maximum. Allerdings konnten Modellrechnungen einen solchen Verlauf nicht reproduzieren. Dieser Widerspruch ist als das »Holozän-Temperaturrätsel« bekannt.

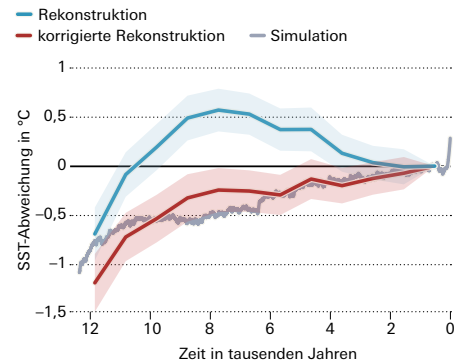
Schon viele Jahre zerbrechen sich Klimaforscher den Kopf über die Unstimmigkeit. Sie vermuteten dahinter neben Mängeln in der Modellierung auch verfälschte Proxy-Rekonstruktionen. Denn die Stellvertreterdaten spiegeln die Entwicklung der Temperaturen in bestimmten Jahreszeiten wider und nicht die mittleren Jahrestemperaturen. Insbesondere

hängen globale Proxy-Erstellungsmethoden von der Meeresoberflächentemperatur (englisch: sea surface temperature, abgekürzt SST) ab, die bekanntermaßen einer solchen saisonalen Verzerrung unterliegt.

Mit ihrer neuen Methode konnten Bova und Kollegen derartige Verfälschungen in den Proxy-Daten identifizieren und aus den jahreszeitlichen die mittleren jährlichen SSTs berechnen. Dazu nutzten sie die Eigenschaften der letzten Warmzeit von vor 128000 bis vor 115000 Jahren, die durch weltweit milde Temperaturen, kleinere Eisschilde und höhere Meeresspiegel als heute gekennzeichnet war. Damals waren die saisonalen Unterschiede der Sonneneinstrahlung wegen einer veränderten Erdoberfläche größer als im Holozän. Andere klimawirksame Faktoren wie Treibhausgase und Eis wirkten sich hingegen schwächer aus. Das erleichterte es, jahreszeitlichen Verfälschungen auf die Spur zu kommen.

Korrektur der saisonalen Verfälschung in Klimarekonstruktionen

Die durchschnittlichen globalen Temperaturen während des Holozäns (der aktuellen Warmzeit, die vor 11700 Jahren begann) lassen sich aus geologischen Aufzeichnungen ableiten. Diese Rekonstruktionen (blaue Kurve) deuten darauf hin, dass die Meeresoberflächentemperaturen (SSTs) vor 6000 bis 10000 Jahren ihren Höhepunkt erreichten. Anschließend sanken sie bis ins 20. Jahrhundert, in dem die Temperaturen dann wieder anstiegen. Computersimulationen der SSTs des Holozäns (graue Kurve) stimmen jedoch nicht mit diesem Verlauf überein, wahrscheinlich weil die geologischen Aufzeichnungen saisonal verzerrt sind: Die Aufzeichnungen spiegeln die Entwicklung der Temperaturen bestimmter Jahreszeiten wider und nicht die mittleren Jahrestemperaturen. Mit einer neuen Methode lässt sich die saisonale Verzerrung in den geologischen Daten bestimmen und korrigieren, um die mittleren jährlichen SST-Werte zu schätzen (rote Kurve). Die SSTs sind als Abweichungen von einem Mittelwert dargestellt und nicht als Absolutwerte. Die schattierten Bereiche markieren die Standardabweichung. Die korrigierten Werte stimmen mit den rechnerischen Simulationen gut überein und lösen damit ein langjähriges Problem der Klimawissenschaften.



HERTZBERG, J.: PALAEOCLIMATE PUZZLE EXPLAINED BY SEASONAL VARIATION. NATURE 589, 2021, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Autoren untersuchten speziell denjenigen Teil der SST-Daten aus jener Ära, in dem die Meeresoberflächentemperaturen stärker mit der saisonalen als mit der mittleren jährlichen Sonneneinstrahlung korrelierten. So konnten sie die Empfindlichkeit des SST-Datensatzes gegenüber der im Jahresverlauf variierenden Sonneneinstrahlung bestimmen und damit die dadurch verursachte Verfälschung herausrechnen.

Bova und ihre Kollegen analysierten dann bereits veröffentlichte SST-Aufzeichnungen, die die letzte Warmzeit und das Holozän umfassen und auf zwei gängigen Proxys basieren: der chemischen Zusammensetzung der fossilen Kalziumkarbonatschalen von an der Oberfläche lebenden einzelligen Meeresorganismen sowie einem organischen Material, das von Meeresalgen produziert wird und sich in den Meeressedimenten absetzt. Die Autoren fanden heraus, dass die Mehrheit der untersuchten SST-Aufzeichnungen tatsächlich saisonal verzerrt ist.

Die korrigierten Werte passen nun zu den Ergebnissen der Computersimulationen; demnach hat sich das Klima seit dem frühen Holozän dauerhaft erwärmt. Es gab also wohl gar kein holozänes thermisches Maximum. Die Autoren vermuten stattdessen,

dass es sich dabei um ein saisonales Merkmal handelt, das durch besonders starke sommerliche Sonneneinstrahlung in der nördlichen Hemisphäre während des frühen Holozäns verursacht wurde. Die Stellvertreterdaten wären demnach geprägt von den warmen Sommermonaten.

Die Wissenschaftler um Bova schließen zudem, dass der Anstieg der globalen Jahresmitteltemperaturen während des frühen Holozäns von vor 12000 bis vor 6500 Jahren eine Reaktion auf zurückgehende Eisschilde war. Der anhaltende Temperaturanstieg in den letzten 6500 Jahren wäre dagegen auf zunächst leicht wachsende Treibhausgaskonzentrationen zurückzuführen, die dann durch den Einfluss des Menschen ab dem letzten Jahrhundert rapide anstiegen. Darüber hinaus waren laut den Analysen der Autoren die mittleren Jahrestemperaturen während der letzten Warmzeit stabiler und höher als die Temperaturen im Holozän. Sie führen dies auf die nahezu konstanten Treibhausgaskonzentrationen und eine geringere Ausdehnung der Eisschilde in der letzten Warmzeit zurück. Gleichwohl übersteigt die aktuelle Jahresmitteltemperatur die der letzten 12000 Jahre und nähert sich wahrscheinlich den Temperaturen der letzten Warmzeit an.

Paläoklimaforscher vermuteten zwar seit Langem, dass Temperaturrekonstruktionen saisonal verzerrt sind, sie hatten aber bislang kein Verfahren, um dieses Problem anzugehen. Ein Nachteil der neuen Methode ist, dass sie auf Breitengrade zwischen 40° N und 40° S beschränkt ist. Proxy-Aufzeichnungen aus höheren Breitengraden klammerten die Autoren aus, weil es für die letzte Warmzeit kaum derartige Aufzeichnungen gibt und weil diese Regionen nahe an Meeresküsten liegen, wo die Ozeandynamik die SST beeinflussen kann. Allerdings spielen Prozesse in den hohen Breiten eine wesentliche Rolle in etlichen klimatischen Rückkopplungsprozessen, weshalb es für eine lückenlose Analyse notwendig wäre, auch diese zu berücksichtigen. ◀

Jennifer Hertzberg ist Laborleiterin am Gulf Coast Repository des International Ocean Discovery Program der Texas A&M University, USA.

QUELLE

Bova, S. et al.: Seasonal origin of the thermal maxima at the Holocene and the last interglacial. *Nature* 589, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 589, S. 521–522, 2021



SPRINGER'S EINWÜRFE ZWISCHEN LAIEN UND EXPERTEN

Im Meinungsstreit um die Corona-Pandemie wird, je länger die Seuche dauert, die Übersicht immer schwieriger.

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

» spektrum.de/artikel/1848331

Nach anderthalb als quälend lang erlebten Jahren, in denen die Menschheit mühsam wieder lernen musste, mit einer Pandemie zu leben, könnte man erwarten, das während dieser Zeit rapide gewachsene Wissen über Covid-19 und optimale Bekämpfungsmaßnahmen ergäbe ein klares, unstrittiges Bild. Doch so sehr das für die unterdessen gewonnenen epidemiologischen Erkenntnisse zutreffen mag, so wenig stimmt es paradoxerweise für die gesellschaftlichen Konsequenzen.

In Deutschland standen sich anfangs zwei separate, aber dennoch zum Dialog bereite Instanzen gegenüber: einerseits die akademische Forschung, paradigmatisch präsent durch den Virologen Christian Drosten, und auf der anderen Seite die Politik, verkörpert durch die Bundeskanzlerin – als Physikerin offenbar naturwissenschaftlichen Argumenten zugänglich. Was für ein Segen das war, machte jeder Blick über den Atlantik zum damaligen US-Präsidenten unmittelbar augenfällig.

Bald trübte sich die Perspektive ein, und der Austausch zwischen Expertise und politischem Handeln wurde konfus. Während die meisten Infektionsforscher für eine Lösung nach dem Vorbild asiatischer Länder wie Taiwan oder Südkorea plädierten und somit für eine strikte »No-Covid«-Strategie mit konsequentem, dafür hoffentlich zeitlich begrenztem Lockdown, hoben viele Politiker die wirtschaftlichen Kosten und sozialen Folgen solcher Maßnahmen hervor. Immer dringender forderten sie ständig wechselnde, nach Ort und Zeit gestaffelte Einschränkungen – und waren bereit, dafür in letzter Konsequenz sogar ein unabsehbar langes Hin und Her zwischen Auf- und Zusperrern in Kauf zu nehmen. Neue Impfstoffe würden den Eiertanz abkürzen – da, wo es sie gab.

Parallel dazu erhob sich ein Stimmengewirr von selbst ernannten Corona-Deutern. Alle möglichen Vorgehensweisen, Zwischenlösungen und Kompro-

misse können sich unterdessen auf einschlägige »Experten« berufen. Die sozialen Medien offerieren ein ganzes Arsenal von Juristen, Ärzten und Professoren, welche die gängige Auffassung vom Ernst der Pandemie je nachdem stützen oder relativieren, in Zweifel ziehen oder glatt bestreiten. Das reicht von Thesen, die das Coronavirus als Abart des Grippeerregers ver-harmlosen, über Verfechter eines Laisser-faire mit vermeintlich von selbst eintretender Herdenimmunität bis hin zu einer extremen Position, die das Virus als chinesische Biowaffe dämonisiert.

Letzteres propagierte im Februar 2021 ein international hoch angesehener Experimentalphysiker an der Universität Hamburg. Roland Wiesendanger hatte im Lauf des Jahres 2020 nebenher zahlreiche Fach- und Zeitungsartikel sowie Internetbeiträge gesammelt, die nach seiner Überzeugung beweisen: »Eine Forschungsgruppe am virologischen Institut der Stadt Wuhan hat über viele Jahre hinweg gentechnische Manipulationen an Coronaviren vorgenommen mit dem Ziel, diese für Menschen ansteckender, gefährlicher und tödlicher zu machen.« So stand es wörtlich in einer Pressemitteilung der Universität. Die Veröffentlichung war offenbar mit dem Unipräsidenten abgesprochen, erntete allerdings schon am nächsten Tag sowohl vom zuständigen Dekanat als auch von der Studierendenvertretung vehementen Protest: Die angebliche Studie sei ohne wissenschaftlichen Wert.

Solche Vorgänge demonstrieren, dass sich die Unterscheidung zwischen Experten und Laien bei einem so hochgradig politisierten Thema wie Covid-19 nicht mehr gar so einfach treffen lässt. Ein renommierter Physiker mag wie im Hamburger Fall ein Fachmann für Rastertunnelmikroskopie und somit für besonders winzige Objekte sein. Das stempelt ihn aber noch lange nicht zur Autorität für das zugegebenermaßen ebenfalls sehr kleine Coronavirus.

INFORMATIK MIT KI DAS MENSCHLICHE GEHIRN VERSTEHEN

Die Struktur künstlicher neuronaler Netze kann manchen Hirnarealen von Säugetieren ähneln. Deshalb nutzen Neurowissenschaftler inzwischen auch die Informatik, um die Funktionsweise unseres Denkorgans besser zu verstehen.



Anil Ananthaswamy ist Wissenschaftsjournalist und Buchautor.

► spektrum.de/artikel/1848316

Im Winter 2011 arbeitete Daniel Yamins am Massachusetts Institute of Technology (MIT) oftmals bis spät in die Nacht an seinem Forschungsprojekt. Er entwarf in mühevoller Kleinarbeit ein System, das Objekte in Bildern erkennen sollte, unabhängig davon, ob man ihre Größe, Position oder andere Eigenschaften verändert – etwas, was Menschen sehr leicht fällt, woran Maschinen aber damals meist scheiterten. Yamins setzte seine Hoffnung in ein künstliches neuronales Netz, einen Algorithmus, der an den Aufbau der Sehrinde des menschlichen Gehirns angelehnt ist. Eines Nachts fand er schließlich ein Programm, das die anspruchsvolle Aufgabe bewältigen konnte.

Aus Sicht der Informatik stellte Yamins' Arbeit eine bemerkenswerte Errungenschaft dar. Der Forscher verfolgt jedoch weiter reichende Ziele. Zusammen mit seinen Kollegen möchte er die Computermodelle nutzen, um die Funktionsweise des Gehirns zu verstehen.

Damit gehören Yamins, der jetzt sein eigenes Labor an der Stanford University leitet, sowie sein Doktorvater James DiCarlo zu einer Gruppe von Neurowissenschaftlern, die mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze den Aufbau des Denkorgans untersuchen. Die Forscher interessieren sich vor allem für dessen Spezialisierungen auf verschiedene Aufgaben. Unter anderem möchten sie herausfinden, warum es ein Areal für das Erkennen von Objekten gibt, ein anderes jedoch für die Gesichtseinordnung zuständig ist.

Computer können aber nicht nur den visuellen Kortex von Säugetieren nachahmen. Laut neuen Ergebnissen ähneln jene neuronalen Netze, die Sprache, Musik und

simulierte Gerüche am besten klassifizieren, in ihrem Aufbau den auditorischen und olfaktorischen Systemen des Gehirns. Das Gleiche gilt für Programme, die aus einer zweidimensionalen Szene die Eigenschaften der darin enthaltenen dreidimensionalen Objekte ableiten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die biologischen – genauso wie die künstlichen – Systeme ihre Aufgaben in vieler Hinsicht auf dem bestmöglichen Weg lösen.

Die Erfolge der letzten Jahre erscheinen umso überraschender, als sich Neurowissenschaftler lange skeptisch gegenüber Vergleichen zwischen Gehirnen und künstlicher Intelligenz zeigten, deren genaue Funktionsweise bisweilen undurchschaubar ist. »Ehrlich gesagt hat bis vor Kurzem niemand in meinem Labor mit maschinellem Lernen gearbeitet«, so die Neurowissenschaftlerin Nancy Kanwisher vom MIT. »Jetzt gehört es zum Standardwerkzeug.«

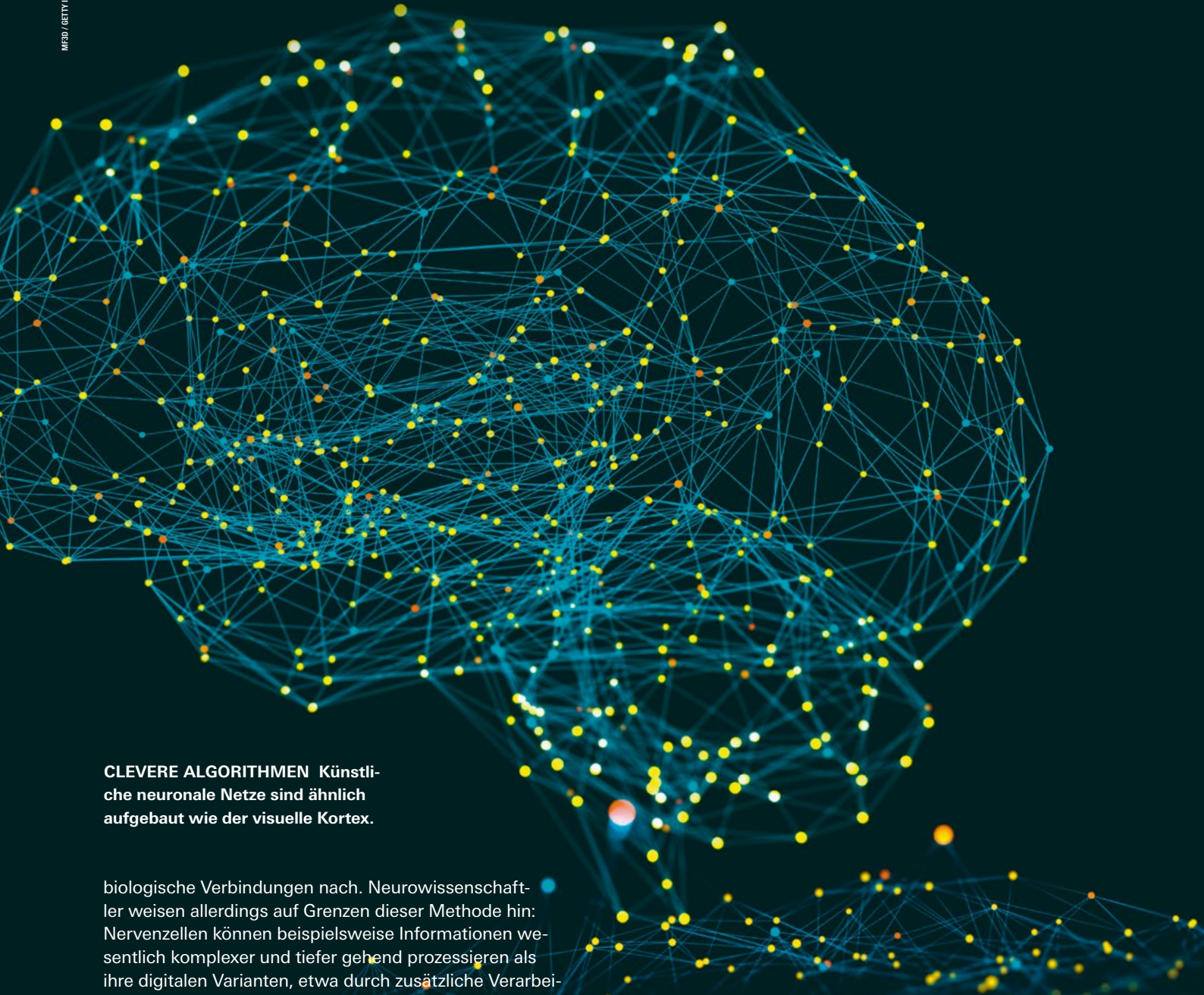
Neuronale Netze bestehen aus miteinander verbundenen Recheneinheiten – künstlichen Neuronen, die vereinfachte digitale Modelle ihrer biologischen Vorbilder darstellen. Solche Programme enthalten mindestens zwei Schichten: eine zur Eingabe von Daten, die andere zur Ausgabe. So genannte tiefe neuronale Netzwerke verfügen darüber hinaus über dazwischenliegende Schichten.

Meister der Mustererkennung

Derartige Algorithmen eignen sich besonders gut, um Muster in Daten zu finden, etwa Katzen oder Hunde in Fotografien. Dafür muss man sie jedoch mit zahlreichen Beispielbildern trainieren. Währenddessen verändert sich die Stärke der Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen nach und nach, und das Netzwerk lernt, eine bestimmte Eingabe (beispielsweise Bildpunkte) mit der richtigen Bezeichnung (Katze oder Hund) zu verknüpfen. Einmal trainiert, ist das Programm in der Lage, auch Daten zu klassifizieren, die es noch nicht kennt.

Im Gehirn spiegelt die Verbindungsstärke zwischen Neuronen gelernte Assoziationen wider. Daher bilden einige Forscher mit künstlichen neuronalen Netzen neuro-





CLEVERE ALGORITHMEN Künstliche neuronale Netze sind ähnlich aufgebaut wie der visuelle Kortex.

biologische Verbindungen nach. Neurowissenschaftler weisen allerdings auf Grenzen dieser Methode hin: Nervenzellen können beispielsweise Informationen wesentlich komplexer und tiefer gehend prozessieren als ihre digitalen Varianten, etwa durch zusätzliche Verarbeitungsschritte in den Dendriten. Zudem nutzen die Algorithmen zur Kommunikation zwischen den Recheneinheiten die so genannte Fehlerrückführung (siehe »Kurz erklärt«), die in biologischen Systemen anscheinend nicht vorkommt. Trotz dieser Einschränkungen sind tiefe neuronale Netze für Wissenschaftler häufig die beste verfügbare Option, um bestimmte Hirnareale zu modellieren.

Die verbreitetsten Algorithmen zur Bilderkennung sind an das visuelle System von Säugetieren angelehnt, insbesondere an den Bereich, der für das Erkennen von Personen, Orten und Dingen verantwortlich ist, den so genannten ventralen Pfad. Beim Menschen beginnt dieser in den Augen und führt zum Corpus geniculatum laterale im Thalamus. Anschließend gelangt die Information zum primären visuellen Kortex (V1) im Hinterkopf und dann über die Areale V2 und V4 zum inferotemporalen Kortex, dem

AUF EINEN BLICK DAS GEHIRN ALS VORBILD

- 1** Inspiriert von der Struktur des Gehirns entwerfen Informatiker Algorithmen für Aufgaben, die Computer sonst überfordern.
- 2** Künstliche neuronale Netze reagieren auf bestimmte Bilder ähnlich wie Nervenzellen im Affenhirn.
- 3** Daher verwenden Neurowissenschaftler nun künstliche Intelligenz, um besser nachzuvollziehen, wie unser Gehirn arbeitet.

unteren Schläfenlappen. Dabei verläuft die visuelle Informationsverarbeitung in mehreren Schritten: Die ersten Bereiche prozessieren grundlegende Merkmale eines Bilds wie Kanten, Konturen, Farben und Formen, während der inferotemporale Kortex daraus komplexe Repräsentationen wie ganze Gesichter erstellt.

Diese Erkenntnis war wegweisend für die Arbeit von Yamins und seinen Kollegen. Ihr Netz besteht aus mehreren Schichten, von denen einige eine »Faltung« (englisch: convolution) durchführen: eine mathematische Operation, die eine Art Filter auf ein Bild anwendet. Jede Faltung erfasst dabei verschiedene Merkmale wie Kanten oder Formen. In den ersten Schichten arbeitet der Algorithmus der Forscher die grundsätzlichen Eigenschaften heraus, später werden die Details untersucht. Wenn man ein solches neuronales Faltungsnetz (englisch: convolutional neural network, CNN) darauf trainiert, Bilder zu klassifizieren, beginnt der Computer typischerweise mit zufälligen Anfangswerten für die Verbindungen und Filter und passt sie so lange an, bis er die Aufgabe meistert.

Maschinen, die mit Menschen mithalten können

So gelang es den Forschern, ein CNN aus vier Schichten zu entwickeln, das acht Objektkategorien (Tiere, Boote, Autos, Stühle, Gesichter, Früchte, Flugzeuge und Tische) erkennen konnte. Dabei unterschieden sich die abgebildeten Objekte stark in räumlicher Stellung und Maßstab. Das Netzwerk erreichte die Leistung von Menschen, die solche Aufgaben besonders gut bewältigen können.

Yamins wusste zu dem Zeitpunkt jedoch nicht, dass sich in der Welt der künstlichen Intelligenz (KI) eine Revolution anbahnte. Kurz nachdem er mit seinen Kollegen das CNN fertig entwickelt hatte, machte 2012 ein anderes Netz, AlexNet, bei einem Bilderkennungswettbewerb von sich reden. Auch dieses Programm besitzt eine hierarchische Verarbeitungsstruktur, die anfangs prinzipielle Merkmale und anschließend immer komplexere Details erfasst. Informatiker hatten es mit 1,2 Millionen beschrifteten Bildern trainiert, die 1000 Objektkategorien enthielten. Im Wettbe-

werb setzte sich AlexNet gegen alle Konkurrenten durch: Seine Fehlerrate lag bei 15,3 Prozent, während das nächstbessere Programm in 26,2 Prozent aller Fälle falschlag. Diese Entwicklungen legten den Grundstein für den Siegeszug von tiefen neuronalen Netzen in der KI.

Yamins und sein Team waren allerdings eher auf neurowissenschaftliche Erkenntnisse aus. Wenn ihr CNN ein visuelles System nachahmt, fragten sie sich, könnte es dann neuronale Antworten auf ein unbekanntes Bild vorher-sagen? Um das herauszufinden, passten sie die Aktivität künstlicher Neurone in ihrem CNN an jene von fast 300 Bereichen im ventralen Pfad von zwei Rhesusaffen an.

Daraufhin prognostizierten sie mit Hilfe ihres Algorithmus, wie gewisse Hirnareale reagieren würden, wenn man den Affen neue Bilder zeigt. »Wir haben nicht nur gute Vorhersagen erhalten, sondern es gibt auch eine Art anatomische Konsistenz«, erklärt Yamins. Die ersten, mittleren und letzten Schichten des CNN sagten jeweils die Reaktionen der entsprechenden biologischen Hirnareale voraus. »Das heißt nicht, dass sich die Recheneinheiten im tiefen Netzwerk individuell wie biophysikalische Neurone verhalten«, sagt Kanwisher. »Nichtsdestotrotz gibt es eine beeindruckende funktionale Übereinstimmung.«

Nach der Veröffentlichung von Yamins' und DiCarlos Arbeit im Jahr 2014 begann eine regelrechte Jagd auf immer bessere Netzwerkmodelle des Gehirns. Einige Forscher konzentrierten sich dabei auf Areale, die weniger gut untersucht sind als das visuelle System von Primaten. Zum Beispiel habe man – vor allem beim Menschen – noch kein wirklich tiefes Verständnis der Hörrinde, betont der Neurowissenschaftler Josh McDermott vom MIT. Könnte Deep Learning dabei helfen zu verstehen, wie das Gehirn Töne verarbeitet?

Das hofft er zumindest. Zusammen mit Kollegen, zu denen auch Yamins gehörte, hat McDermott tiefe Netze entwickelt, um zwei Arten von Klängen zu klassifizieren: Sprache und Musik. Zunächst modellierten die Forscher dafür die Cochlea, das schallverarbeitende Organ im Innen-ohr. Ihre Funktionsweise ist inzwischen sehr genau be-kannt. Damit konnten sie die Töne in verschiedene Frequenzkanäle sortieren, um sie danach einem neuronalen Faltungsnetzwerk zu übergeben. McDermott und sein Team trainierten das CNN darauf, sowohl gesprochene Worte als auch die Stilrichtung von mit Hintergrundgeräuschen vermischten Musikclips zu erkennen.

Dafür mussten die Forscher eine geeignete Netzwerkstruktur finden, welche die beiden unterschiedlichen Aufgaben bewältigen konnte. Es gab prinzipiell drei verschiedene Möglichkeiten: Das Programm könnte aus einer Eingabe-schicht bestehen, die sich anschließend in zwei separate Netzwerke aufteilt, welche sich jeweils einer Aufgabe getrennt widmen. Oder man könnte das gleiche Netzwerk für die gesamte Verarbeitung nutzen, und am Ende über-mitteln zwei Ausgabeschichten das entsprechende Ergebnis. Die dritte Variante entspricht einem Mittelweg, bei dem einige Bereiche gemeinsam genutzt werden und andere separat.

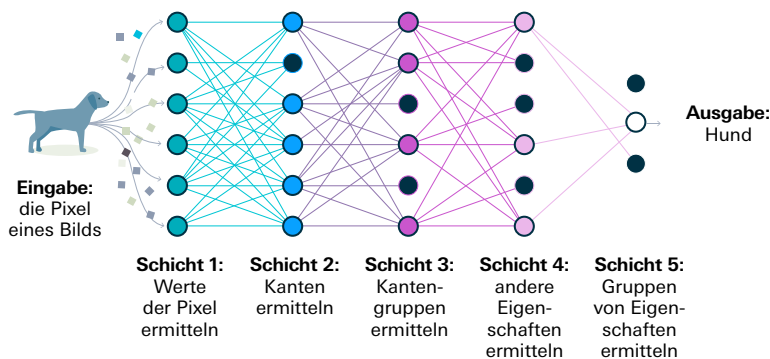
Wenig überraschend schnitten Programme der ersten Art besser ab als solche, in denen alle Wege gleichzeitig

Kurz erklärt: Fehlerrückführung

Die Fehlerrückführung ist ein Verfahren, das man beim Trainieren von neuronalen Netzen einsetzt. Übergibt man dem Programm Beispieldaten, vergleicht man nach der Verarbeitung die Ausgabe mit dem erwarteten Ergebnis. Passen sie nicht zusammen, dann rechnet man die Differenz aus beiden Werten von der Ausgabe- an die Eingabe-schicht zurück. Daraufhin ändern sich die Verbindungen zwischen den künstlichen Neuronen abhängig von ihrem Einfluss auf den Fehler für den nächsten Durchlauf.

Wahrnehmung in neuronalen Netzen

Neuronale Netzwerke schleusen Eingabewerte, etwa die Pixel eines Bilds, durch mehrere Schichten digitaler Neurone. Jede Schicht kann dabei eine so genannte Faltung durchführen, die wie ein Filter funktioniert, der gewisse Eigenschaften eines Bilds herausarbeitet. Je mehr Schichten es zwischen Ein- und Ausgabe gibt, desto tiefer ist das Netzwerk.



Tiefe Netzwerke funktionieren am besten, wenn die ersten Schichten einfache Merkmale identifizieren, während sich die späteren auf komplexere Eigenschaften konzentrieren. Das Gehirn arbeitet auf ähnliche Weise.

LUCY/READING:IKKANIDA UND SAMUEL VIELASO / QUANTA MAGAZINE

genutzt werden. Allerdings lieferte ein Mix aus beiden – mit sieben geteilten Schichten nach der Eingabe und fünf darauf folgenden getrennten Schritten – fast genauso gute Ergebnisse wie das durchgehend aufgeteilte Netzwerk. Weil ein solches hybrides System wesentlich weniger Ressourcen verbraucht, arbeiteten die Forscher damit weiter.

Als sie ihr Programm gegen Menschen antreten ließen, schnitt es genauso gut ab. Zudem entspricht seine Struktur den früheren neurowissenschaftlichen Forschungsergebnissen, wonach die höheren auditorischen Areale Musik und Sprache in unterschiedlichen Regionen verarbeiten. 2018 ging McDermott einen Schritt weiter. Er nutzte sein Modell, um die Hirnaktivität menschlicher Probanden vorauszusagen. Dabei reagierten die mittleren Schichten des Netzwerks wie der primäre auditorische Kortex, während tiefere Schichten sich wie nachgeschaltete Bereiche in der Hörrinde verhielten. Diese Resultate waren wesentlich besser als die von Systemen, die nicht auf Deep Learning basierten.

Gesichter versus Gegenstände

Kanwisher, die sich anfangs skeptisch gegenüber der Anwendung von maschinellem Lernen in den Neurowissenschaften zeigte, ließ sich von McDermotts Arbeit überzeugen und verwendet nun selbst neuronale Netzwerke, um gewisse Eigenschaften des Gehirns zu beleuchten. Die Forscherin erregte Mitte der 1990er Jahre Aufsehen, als sie zeigte, dass eine bestimmte Region des inferotemporalen Kortex, das so genannte fusiforme Gesichtsareal (kurz FFA für fusiform face area), speziell Gesichter erkennt. Es ist aktiver, wenn Probanden Porträts sehen, als wenn sie Gegenstände wie Häuser betrachten. Aber warum verarbeitet das Gehirn Gesichter getrennt von anderen Objekten?

Um das herauszufinden, wandte sich Kanwisher mit ihren Kollegen künstlicher Intelligenz zu. Die Forscher verwendeten einen Nachfolger von AlexNet – ein neuronales Faltungsnetz namens VGG – und trainierten zwei separate Versionen auf je eine Aufgabe: das Erkennen von

Gesichtern beziehungsweise von Gegenständen. Wie das Team feststellte, tat sich das tiefe Netz, das auf Porträts spezialisiert war, schwer damit, Objekte zu klassifizieren. Umgekehrt hatte das andere Programm Schwierigkeiten mit Gesichtern. Anschließend trainierten die Wissenschaftler einen Algorithmus darauf, beide Aufgaben zu bewältigen. Dabei organisierte sich das Netzwerk selbstständig so, dass es Gesichter und Gegenstände in späten Stadien separat verarbeitete. Ähnlich operiert das menschliche Gehirn: Am Anfang des ventralen visuellen Pfads (Corpus geniculatum laterale und Areale V1 und V2) verlaufen alle Informationen parallel; erst später verzweigen sich die Wege.

Andere Neurowissenschaftler nutzen das maschinelle Lernen, um die Wahrnehmung von Gerüchen zu erforschen. 2019 entwickelten Robert Yang und sein Team von der Columbia University in New York ein tiefes neuronales Netz und modellierten damit das olfaktorische System der Taufliege, das bereits sehr gut untersucht ist.

Die erste Verarbeitungsstufe von Gerüchen erfolgt in sensorischen Neuronen, die jeweils immer nur eines von etwa 50 verschiedenen Geruchsrezeptormolekülen tragen. Alle Zellen mit dem gleichen Rezeptortyp (durchschnittlich etwa zehn) sind gemeinsam mit einer Nervenzellgruppe in der nächsten Verarbeitungsschicht verbunden. Da es auch davon etwa 50 Stück gibt, liegt eine Eins-zu-eins-Abbildung zu den Rezeptortypen vor. Die Neuronengruppen schicken dann ungeordnet Signale zu so genannten Kenyon-Zellen, von denen es etwa 2500 gibt. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Kenyon-Zellen für höhere Verarbeitungsstufen von Geruchsinformationen zuständig sind. Zirka 20 dahintergeschaltete Neurone fungieren schließlich als Ausgabe: Sie steuern die geruchsbezogenen Handlungen der Fliege. Bisher ist allerdings unklar, ob sie dabei auch Düfte klassifizieren.

Um diesen Prozess durch ein Computermodell nachzuahmen, brauchten Yang und seine Kollegen zunächst einen Datensatz, der Gerüche repräsentiert. Sie ordneten dazu Daten verschiedenen Düften zu, die sie entsprechend

benannt. In dem Netzwerk werden diese allerdings anders verarbeitet als Bilder: Legt man etwa zwei Fotos von Katzen übereinander und fügt sie Pixel für Pixel zusammen, hat das Ergebnis möglicherweise nicht mehr viel mit den ursprünglichen Tieren gemein. Mischt man dagegen die Gerüche zweier Äpfel, bleibt der Duft klar erkennbar. »Das ist eine entscheidende Erkenntnis, die wir bei der Entwicklung unseres Modells genutzt haben«, sagt Yang.

Die Forscher konstruierten ihr neuronales Netz aus vier Schichten: Drei simulierten die Verarbeitung im Gehirn der Taufleie, die letzte fungiert als Ausgabe. Als die Informatiker ihr Programm trainierten, um modellierte Gerüche zu klassifizieren, entwickelte das Netz ähnliche Verbindungsstrukturen wie das Gehirn des Insekts: eine Eins-zu-eins-Abbildung zwischen den ersten beiden Schichten und dann eine zufälligere Zuordnung von der zweiten zur dritten Schicht.

Dennoch bleibt Yang vorsichtig, was die Ergebnisse angeht. »Vielleicht haben wir einfach nur Glück gehabt«, warnt er. Der nächste Schritt wird sein, ein Programm zu entwickeln, das die Verschaltungen im Geruchssystem eines noch nicht untersuchten Tiers vorhersagt. »Das wird unsere Theorie auf den Prüfstand stellen«, sagt Yang, der im Juli 2021 zum MIT wechseln wird.

So nützlich tiefe neuronale Netze auch sind, haben sie doch entscheidende Schwächen: Wenn die Eingabedaten zu stark vom Trainingssatz abweichen, funktionieren sie nicht zuverlässig. Zudem lassen sich ihre Ergebnisse nicht erklären, denn jedes Programm enthält Millionen oder gar Milliarden von Parametern, von denen die Ausgabe ab-

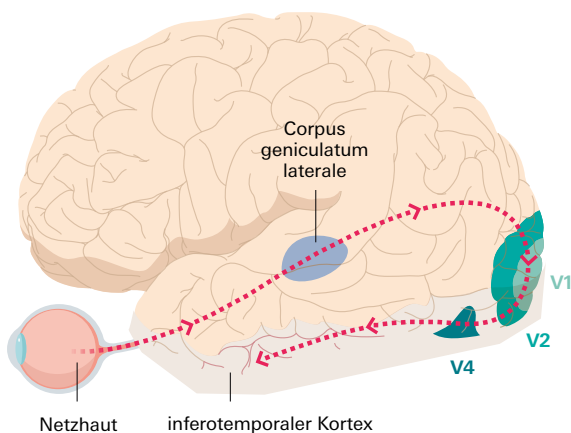
hängt. Ersetzt man durch den computerwissenschaftlichen Ansatz also lediglich eine Blackbox – das Gehirn – durch eine andere? »Nicht ganz«, erklärt Yang. Ein neuronales Netzwerk sei immer noch einfacher zu studieren als das biologische Denkorgan. 2019 untersuchte DiCarlo Team die angeblichen Schwächen von künstlicher Intelligenz genauer. Mit einer Abwandlung von AlexNet modellierten die Forscher den ventralen visuellen Pfad von Makaken. Dabei passten sie das Verhalten der Recheneinheiten an das der Nervenzellen im V4-Areal der Affen an. Gemäß ihrem Computermodell sollten bestimmte Bildmotive unnatürlich hohe Aktivitätswerte in den Hirnarealen der Tiere hervorrufen. Und tatsächlich: Als sie den Primaten solche Bilder vorlegten, erhöhte sich in 68 Prozent der untersuchten Bereiche die neuronale Aktivität über das übliche Maß hinaus. In einem anderen Experiment verursachten manche Motive starke Reaktionen in einem Neuron, während benachbarte Nervenzellen davon unberührt blieben. Auch dieses Ergebnis hatte das Computermodell vorausgesagt.

Den Forschern zufolge können neuronale Netze sehr wohl Prozesse im Gehirn nachbilden und sind nicht völlig unergründlich. »Allerdings liegt noch viel Arbeit vor uns, um definitiv zu zeigen, ob und welchen Mehrwert diese Modelle bieten«, äußern sie vorsichtig.

Künstliche neuronale Netze und das Gehirn stimmen in manchen Punkten zwar in ihrer Struktur und Leistung überein, doch das heißt nicht, dass sie auf die gleiche Weise funktionieren – in einigen Fällen tun sie es nachweislich nicht. Aber sie könnten zumindest denselben allgemeinen Prinzipien folgen.

Der ventrale visuelle Pfad

Menschen können Personen, Orte und Objekte erkennen, weil Signale von den Augen über das Corpus geniculatum laterale sowie die V1-, V2- und V4-Zentren des primären visuellen Kortex zum inferotemporalen Kortex gelangen. Nach jedem Schritt verarbeitet das Gehirn kompliziertere Eigenschaften einer Szene.



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE

Das Gehör verbessern

Dank der Fortschritte in den letzten Jahren hofft McDermott, therapeutische Ansätze mit Hilfe von Computermodellen entwickeln zu können. Wenn Menschen beispielsweise ihr Gehör verlieren, liegt das meist an Veränderungen im Ohr. Das Hörsystem des Gehirns muss mit den verschlechterten Signalen zurechtkommen. »Könnten wir durch die Modelle verstehen, wie der Rest des auditorischen Systems funktioniert, wäre es möglich, Menschen zu helfen, besser zu hören«, so McDermott.

Dennoch ist ihm klar, dass künstliche neuronale Netze ihre Grenzen haben. Das demonstrierten etwa Jenelle Feather und andere Kollegen aus seinem Team anhand so genannter Metamere: Das sind unterschiedliche Signale, die in einem System die gleiche Reaktion hervorrufen. Zwei Audio-Metamere haben zum Beispiel verschiedene Wellenformen, klingen für Menschen aber identisch. Mit Hilfe eines Computermodells erzeugte das Team derartige Signale, die unterschiedliche Schichten des neuronalen Netzwerks auf die gleiche Weise aktivierten wie echte Audioproben. Wenn ihr Programm das menschliche Gehör wirklich imitiert, dann sollten die Metamere genauso klingen.

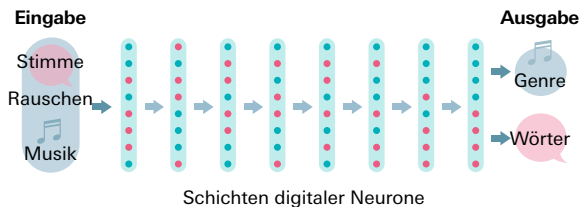
Doch das war nicht der Fall. Probanden konnten zwar solche Metamere erkennen, die in den ersten Schichten des neuronalen Netzwerks zu gleichen Reaktionen wie echte Audiosignale führten. Jene dagegen, die stattdessen in den Tiefen des Programms ähnliche Aktivierungen hervorriefen,

Multitaskingfähige Netzwerke

Welcher Ansatz eignet sich am besten für neuronale Netze, die zwei verschiedene audiorische Aufgaben bewältigen sollen – Wörter heraushören und Musikgenres erkennen?

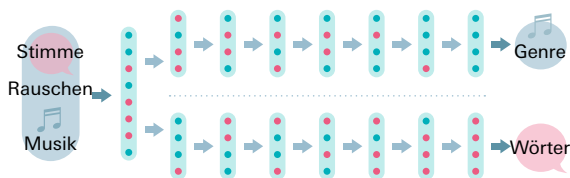
Das gleiche Netzwerk bearbeitet zwei Aufgaben

Im ersten Ansatz verarbeiten die gleichen Schichten beide Signale, lediglich in der Ausgabe werden die Antworten getrennt.



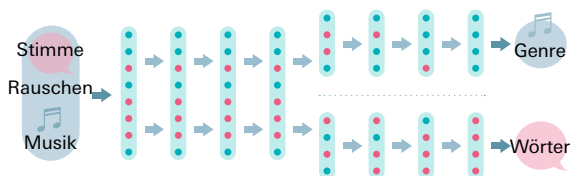
Separate Schichten bearbeiten die Aufgaben

Bessere Ergebnisse erzielt man, wenn sich das Netzwerk nach der Eingabe aufspaltet, damit sich die nachfolgenden Schichten auf ihre jeweilige Aufgabe spezialisieren können.



Die ersten Schichten teilen sich die Aufgaben

Spaltet man das Netzwerk erst in der Mitte auf, damit bloß die detailreichen Aufgaben separat bearbeitet werden, erhält man fast genauso gute Ergebnisse wie beim spezialisierten Design – mit weitaus weniger Aufwand.



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE

klingen wie Rauschen. »Auch wenn die Modelle unter bestimmten Umständen das menschliche Verhalten sehr gut nachbilden, stimmt irgendetwas nicht mit ihnen«, resümiert McDermott.

In Stanford erforscht Yamins weitere Schwächen der Algorithmen. So benötigen neuronale Netze beim Training enorme Mengen an Daten, während unser Gehirn mühelos aus nur einem einzigen Beispiel lernen kann. Schon lange versuchen Informatiker, Programme zu entwickeln, die ebenso effizient funktionieren, bisher jedoch mit mäßigem Erfolg. Außerdem nutzen tiefe Netzwerke das Verfahren der Fehlerrückführung – dieser Prozess kann in biologischem Gewebe höchstwahrscheinlich nicht ablaufen, weil die dazu nötigen Verbindungen fehlen.

Dem Kognitionswissenschaftler Josh Tenenbaum vom MIT zufolge gab es in den letzten Jahren zwar durchaus

»beeindruckende Fortschritte«, aber die Programme würden hauptsächlich Klassifizierungsaufgaben erledigen, das Gehirn mache hingegen viel mehr. Das Gehirn ist beispielsweise in der Lage, die dreidimensionale Struktur einer Szene zu erkennen oder kausale Schlüsse zu ziehen – etwa, dass ein Baum kurzzeitig verschwindet, weil ein Auto ihn beim Vorbeifahren verdeckt.

Um diese Fähigkeiten zu verstehen, hat Ilker Yildirim von der Yale University zusammen mit Tenenbaum und anderen Kollegen ein so genanntes inverses Grafikmodell entwickelt. Man beginnt dabei mit Parametern, die ein Gesicht beschreiben, etwa die Form, Textur, Richtung der Beleuchtung, Kopfhaltung und so weiter. Ein Programm erstellt daraus eine dreidimensionale Szene und produziert anschließend nach verschiedenen Verarbeitungsstufen ein zweidimensionales Bild, das die Szene aus einer bestimmten Perspektive abbildet.

Mit diesen Daten trainierten die Forscher eine modifizierte Version von AlexNet, um die räumlichen Eigenschaften einer Szene aus einem 2-D-Bild vorherzusagen. Sie testeten ihr Programm, indem sie dessen Informationsverarbeitung mit derjenigen im inferotemporalen Kortex von Rhesusaffen verglichen. Dazu präsentierten sie den Makaken 175 Bilder, die 25 Individuen in sieben Posen zeigten, und zeichneten die Reaktion der Hirnareale auf, die auf Gesichtserkennung spezialisiert sind. Die gleichen Motive setzten sie ihrem künstlichen neuronalen Netzwerk vor, dessen erste Schicht das 2-D-Bild repräsentierte und die letzte Schicht die 3-D-Parameter. Hierbei stimmte die Aktivität der letzten drei Schichten des Programms erstaunlich gut mit denen der letzten drei Verarbeitungsstufen im Gehirn der Makaken überein. Wie Tenenbaum einräumt, beweist ihr Modell nicht, dass das Denkorgran auf die gleiche Weise funktioniert. »Aber es eröffnet uns einen Weg, um solche Fragen präziser zu stellen.«

QUELLEN

Feather, J. et al.: Metamers of neural networks reveal divergence from human perceptual systems. 33rd Conference on Neural Information Processing Systems, 2019

Kell, A. J. E., McDermott, J. H.: Deep neural network models of sensory systems: Windows onto the role of task constraints. Current Opinion in Neurobiology 55, 2019

Yamins, D., DiCarlo, J. J.: Using goal-driven deep learning models to understand sensory cortex. Nature Neuroscience 19, 2016

Yang, G. R. et al.: Evolving the olfactory system. Proceedings on the Conference on Cognitive Computational Neuroscience, 2019

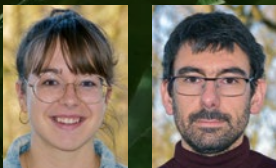
Zhuang, C. et al.: Unsupervised neural network models of the ventral visual stream. PNAS 118, 2020

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Deep Neural Networks Help to Explain Living Brains« 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.



CHEMIE ANGRIFF AUF EIN UMWELTGIFT

Das Pestizid Chlordecon rettete in den 1970er und 1980er Jahren Bananenplantagen auf den Französischen Antillen – und vergiftet seither die Menschen vor Ort. Neue Forschungsergebnisse machen Hoffnung, dass der als unverwüchtlich geltende Stoff offenbar doch auf natürlichem Weg abgebaut wird.



Oriane Della-Negra untersucht die Abbaumechanismen von Chlordecon am Commissariat für Atomenergie und alternative Energien (CEA) in Kooperation mit dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS) und der Université Évry-Val-D'Essonne, Paris.

Pierre-Loïc Saaidi ist Assistenzprofessor in Chemie an der Université d'Evry-Val-D'Essonne und erforscht in der Arbeitsgruppe Metabolische Genomik die Mechanismen des biologischen Abbaus von Pestiziden wie Chlordecon.

» spektrum.de/artikel/1848319

BANANENPLANTAGE AUF MARTINIQUE
Zur Bekämpfung von Rüsselkäfern setzten die Bananenbauern auf den Französischen Antillen bis 1993 Chlordecon ein. Das Pestizid ist sehr beständig und gilt als umweltschädlich sowie wahrscheinlich krebserregend.

Am 2. Dezember 2019 veröffentlichte eine Untersuchungskommission des französischen Parlaments einen Bericht über die wirtschaftlichen, gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen von Chlordecon auf den Französischen Antillen. Die Schlussfolgerung lautete: Die französische Regierung habe eine »Gesundheits- und Umweltkatastrophe« zu verantworten. In den Vereinigten Staaten wurde das chlororganische Pestizid bereits 1978 verboten – in den Bananenplantagen auf Guadeloupe und Martinique kam es jedoch bis zum Jahr 1993 zum Einsatz.

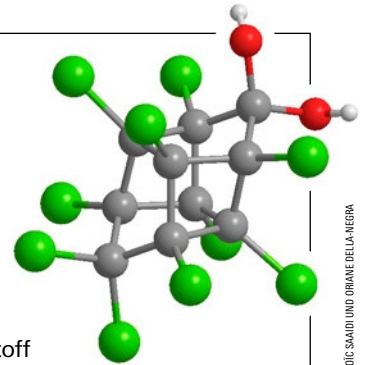
Chlordecon ist ein so genannter endokriner Disruptor, gemeinhin als Umwelthormon bekannt. Gelangt ein derartiger Stoff in den Körper, kann er bereits in geringsten Mengen das Hormonsystem beeinflussen und krank machen. Auch mehr als 25 Jahre nach seinem Verbot findet sich Chlordecon auf den Französischen Antillen in beträchtlichen Mengen und kontaminiert die gesamte Nahrungskette. Die permanente Pestizidbelastung macht sich in der dortigen Bevölkerung durch eine Häufung bestimmter Krankheiten und Auffälligkeiten bemerkbar, darunter kognitive und motorische Entwicklungsstörungen bei Säuglingen, Frühgeburten oder Prostatakrebs.

Die Geschichte von Chlordecon begann 1958, als die Firma Allied Chemical ein Mittel namens Kepone auf den amerikanischen Markt brachte. Kepone besteht zu 94,5 Prozent aus Chlordecon. Die französische Regierung lehnte die Verwendung als Pestizid zunächst ab. Im Jahr 1972 genehmigte es schließlich doch die Verwendung eines kommerziell vertriebenen Insektizids auf Basis von Kepone mit noch fünf Prozent Chlordecon. Die Bauern auf den Französischen Antillen sollten damit den Bananenrüssler bekämpfen – einen schwarzen, knapp anderthalb Zentimeter langen Käfer mit einem namensgebenden Rüssel, der sich durch die Bananenstaude gräbt und Stamm sowie Wurzelstock aushöhlt, bis die Pflanze stirbt.

Im Jahr 1975 ereignete sich dann im Kepone-Werk in den Vereinigten Staaten ein schwerer Chemieunfall, der zu einer der größten Umweltkatastrophen der damaligen Zeit führte. Bei Arbeitern, die einen zu hohen Chlordeconspiegel im

Robustes Käfigmolekül

Chlordecon verdankt seine sehr hohe Stabilität seiner so genannten Bishomocuban-Struktur, einem Käfig mit zehn Kohlenstoffatomen. Der Stoff gilt als kaum biologisch abbaubar; zusätzlich ist er auch thermisch sehr stabil, da sich die Moleküle vor dem Verdampfen bei 350 Grad Celsius nicht zersetzen. Die Chlorierung des Bishomocubankäfigs (Bindung von zehn Chloratomen) führt zu den hydrophoben Eigenschaften des Moleküls und erklärt seine geringe Löslichkeit in Wasser. Pro Liter lösen sich bei Raumtemperatur nur ein bis drei Milligramm Chlordecon.



PIERRE-LOUIS SAADI UND CIRANE DELLA-NEGRA

Blut aufwiesen, kam es im Anschluss zu neurologischen Störungen. Wasser- und Bodenproben zeigten das Ausmaß der Verschmutzung: Nicht nur die direkte Umgebung der Fabrik, sondern auch das Wasser des vorbeifließenden Flusses wies mehr als 100 Kilometer stromabwärts erhöhte Chlordeconwerte auf. Noch im selben Jahr wurde das Werk geschlossen. Nachdem mehrere Studien die lange Haltbarkeit und die Toxizität des Moleküls bestätigten, verbot die US-amerikanische Umweltschutzbehörde 1978 die Produktion, den Verkauf und die Verwendung von Kepone in den Vereinigten Staaten. Das führte zu einem weltweiten Handelsstopp sowohl des Mittels selbst als auch von Produkten, die auf Kepone basieren.

Nicht viel später, Anfang der 1980er Jahre, verwüsteten zwei Wirbelstürme Teile der Französischen Antillen. Auch Bananenplantagen waren betroffen, was zu einem hohen Schädlingsdruck führte. Doch just zu diesem Zeitpunkt ging auf den Inseln der Nachschub an Chlordecon aus. Die Banananbauer waren verzweifelt, was die französischen Behörden dazu veranlasste, 1981 das Mittel Curlone aus Brasilien befristet zuzulassen – ein ähnliches Insektizid, das ebenfalls zu fünf Prozent aus Chlordecon besteht. Mehrere aufeinanderfolgende Ausnahmeregelungen verlängerten die Zulassung von Curlone bis 1993. Insgesamt wurden so schätzungsweise 300 Tonnen der 1800 Tonnen weltweit produzierten Chlordecons von Hand auf karibische Böden aufgebracht, was ein Viertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche kontaminierte.

Im Rahmen des Stockholmer Übereinkommens nahm man Chlordecon 2009 in die Liste der persistenten organischen Schadstoffe auf. Auch heute noch, mehr als zehn Jahre später, ist es in etlichen landwirtschaftlichen Böden der Französischen Antillen zu finden (siehe »Belasteter Karibiktraum«). Die Konzentrationen erreichen bis zu 20 Milligramm pro Kilogramm Boden. Trotz seiner geringen Was-

AUF EINEN BLICK VERSEUCHTES INSELPARADIES

- 1 Bis 1993 bekämpften Bananenbauern auf Guadeloupe und Martinique Insekten auf ihren Stauden mit Chlordecon. Seither kontaminiert das Insektizid Böden, Wasser sowie landwirtschaftliche Produkte.
- 2 Die chemische Verbindung schadet der Gesundheit der Inselbewohner. Da sie äußerst stabil ist, rechnete man mit jahrhundertelangen Problemen.
- 3 Neuere Studien zeigen jedoch, dass der Schädlingsbekämpfer bereits von Mikroorganismen abgebaut wird. Die Auswirkungen der dabei entstehenden Stoffe auf die Umwelt sind allerdings unklar.

serlöslichkeit ist Chlordecon auch in den Wassersystemen von Guadeloupe und Martinique vorhanden, einschließlich einiger Grundwasserreservoirs, die der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung dienen. Die gefundenen Konzentrationen liegen in Flüssen in der Größenordnung von einem Mikrogramm pro Liter und erreichen bis zu 50 Mikrogramm pro Liter im Grundwasser. Insbesondere durch die Flüsse verlagert sich ein Teil der Verschmutzung langsam an die Küste.

Kontaminierte Nahrungsmittel

Das Umweltgift belastet Fauna und Flora der Inseln und wirkt sich auf die gesamte Nahrungskette aus. Pflanzen nehmen den Stoff durch direkten Kontakt an den Wurzeln auf. Die geringe Wasserlöslichkeit von Chlordecon führt allerdings dazu, dass nur ein geringer Anteil in andere Bereiche der Pflanzen gelangt. Daher sind Wurzeln in der Regel deutlich stärker kontaminiert als oberirdische Teile. Wurzelgemüse, das auf verseuchten Böden wächst, reichert Chlordecon in Konzentrationen von mehr als 30 Mikrogramm pro Kilogramm an. Bei Gemüse in Bodennähe, etwa Kürbissen, liegt der Wert zwischen 1 und 30. Obst-


und Gemüsekulturen weisen lediglich Konzentrationen unter einem Mikrogramm pro Kilogramm auf. Der von der französischen Regierung eingeführte Grenzwert für pflanzliche Lebensmittel liegt bei 20 Mikrogramm pro Kilogramm.

Neben Pflanzen sind auch Landtiere von der Kontamination betroffen. Ein Team um Cyril Feidt von der Universität de Lorraine in der französischen Region Lothringen und dem Institut national de la recherche agronomique (INRA) zeigte, dass Nutztiere wie Wiederkäuer, Schweine und Geflügel über kontaminierte Böden, Futtermittel und Trinkwasser Chlordecon aufnehmen. Entsprechend enthalten Fleisch, Milch und vor allem Eier teilweise sogar erhebliche Mengen davon. Seit 2019 gilt der pflanzliche Grenzwert daher auch für alle tierischen Produkte. Die mehrwöchige Unterbringung von Tieren in unbelasteten Gebieten oder oberirdischen Farmen mit gesundem Futter kann die Chlordeconwerte senken und die entsprechenden Lebensmittel damit wieder genusstauglich machen.

Für Trinkwasser gelten strenge Normen, die Chlordecon als Pestizid behandeln. Das Wasser wird in der Regel ausreichend gut aufbereitet, damit es die Grenzwerte nicht überschreitet. Die Verschmutzung macht aber nicht Halt

Belasteter Karibikraum

Die Karte zeigt den Grad der Kontamination mit Chlordecon (Milligramm pro Kilogramm Boden) in den verschiedenen Regionen von Guadeloupe und Martinique. Bei den am stärksten betroffenen Gebieten handelt es sich in der Regel um Bananenplantagen, in denen Bauern das Mittel massiv einsetzen.

- | | |
|--|--|
|  Gehalt unterhalb der Nachweisgrenze |  Gehalt zwischen 0,1 und 1 mg/kg |
|  Gehalt zwischen der Nachweisgrenze und 0,1 mg/kg |  Gehalt größer als 1 mg/kg |
|  nicht analysierte Flächen ohne Bananenanbau über den Zeitraum 1969 bis 1997 mit geringem Risiko von Chlordecon-Kontamination |  nicht getestete Flächen, die jedoch ein Kontaminationsrisiko aufweisen, weil zwischen 1969 und 1997 Bananenplantagen vorhanden waren |



vor Wasserfauna und -flora. In Mangrovegebieten weisen Meeresorganismen eine starke und gleichmäßige Kontamination auf, die mitunter 100 Mikrogramm pro Kilogramm überschreitet. Anderswo nimmt die Konzentration von Chlordecon durch die so genannte Bioakkumulation entlang der Nahrungskette zu. Die höchsten Werte zwischen 100 und 200 Mikrogramm pro Kilogramm weisen dabei Fische auf, die ihrerseits Fische fressen.

Damit sich die Umweltverschmutzung weniger auf die dort lebenden Menschen auswirkt, ergriffen die Behörden in den letzten 15 Jahren zahlreiche Schutzmaßnahmen: bessere Trinkwasseraufbereitung, Überwachung der lokalen Nahrungsketten, Fischereiverbote, Bodenanalysen und Ernährungsempfehlungen. Trotzdem deuten verschiedene Studien, darunter die der französischen Agentur für Lebensmittelsicherheit, Umwelt- und Arbeitsschutz (ANSES) von 2018, darauf hin, dass mehr als 90 Prozent der Bevölkerung der Französischen Antillen nachweisbare Mengen von Chlordecon im Blut haben – das ist ein beunruhigender Befund.

Bereits erste Studien an Tieren in den 1970er Jahren offenbarten die Krebs erregende Wirkung des Stoffs. Entsprechend stufte die International Agency for Research on Cancer 1979 Chlordecon als wahrscheinliches Karzinogen ein. In den letzten zehn Jahren haben nun mehrere epidemiologische Studien gezeigt, dass die dauerhafte Belastung mit der Chemikalie zu einem erhöhten Prostatakrebsrisiko bei den Menschen von Guadeloupe und Martinique führte. Die genauen Wirkungsmechanismen sind allerdings noch nicht bekannt. In Experimenten mit Mäusen konnten Samuel Legeay und seine Kollegen von der französischen Universität Angers demonstrieren, dass Chlordecon Krebszellen anregt, neue Blutgefäße zu bilden. Letztlich fördert das vermutlich die Tumorbildung.

Chlordecon wirkt auf das menschliche Hormonsystem. Dies könnte erklären, weshalb es gesundheitsschädlich ist

Bei Schwangeren erhöhte eine Chlordeconbelastung das Risiko einer Frühgeburt. Darüber hinaus sind Säuglinge, die im Mutterleib dem Stoff ausgesetzt waren, statistisch gesehen anfälliger für körperliche und psychomotorische Störungen. Hier sind insbesondere die männlichen Babys betroffen.

Bereits 1979 demonstrierten Bruce Hammond und seine Kollegen an der University of Illinois die endokrine Disruptivität von Chlordecon – unter anderem wirkt es ähnlich wie das Hormon Östrogen. Im Jahr 2018 kam ein Team um Luc Multigner vom Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM) zum Schluss, dass viele der mit Chlordecon in Verbindung gebrachten krankhaften Veränderungen durch seine Wirkung auf das menschliche Hormonsystem erklärt werden können.

Wissenschaftler, Mediziner und Behörden sind sich auf Grund der stark gesundheitsschädlichen Eigenschaften einig, dass alles darangesetzt werden sollte, Chlordecon aus der Umwelt zu eliminieren. Das ist aber gar nicht so einfach, denn das Molekül gilt als kaum biologisch abbaubar. Zudem heftet es sich wegen seiner stark hydrophoben Eigenschaften gut an organische Substanzen, die in tropischer Erde vermehrt vorkommen. Außerdem sind viele der Böden vulkanischen Ursprungs. Deren Minerale schließen Chlordecon in ihre Mikroporen ein und reduzieren dadurch das Auswaschen und den natürlichen Abbauprozess des Moleküls.

Schier unverwüsthlich

Seine ungewöhnlich hohe Stabilität verdankt Chlordecon einer inneren käfigartigen Struktur aus Kohlenstoffatomen, die von Chloratomen umringt ist (siehe »Robustes Käfigmolekül«). Diese widerstandsfähige Architektur brachte dem Molekül gar das Attribut »nahezu unzerstörbar« ein. Ab den 1970er Jahren untersuchten mehrere US-amerikanische Teams seine biologische Abbaubarkeit in Gegenwart von Bakterien. Sie beobachteten, dass sich Chlordecon durch die Abgabe von ein oder zwei Chloratomen in so genannte Hydrochlordecone umwandeln kann, genannt 8-Monohydrochlordecon (A2) oder 2,8-Dihydrochlordecon (A3). Gibt Chlordecon ein Sauerstoffatom ab, verwandelt es sich in Chlordecol (CLD-OH).

Da die in den 1970er und 1980er Jahren verwendeten Analysemethoden weniger empfindlich und effektiv waren als heute, lässt sich die Korrektheit der damaligen Ergebnisse nur schwer beurteilen. Sowohl A2 als auch CLD-OH kommen als Verunreinigungen in Kepone und Curlone vor. Die Hydrochlordecone A2 und A3 werden zudem durch Photolyse von Chlordecon mit ultravioletter Strahlung oder sogar nach langer Sonneneinstrahlung gebildet.

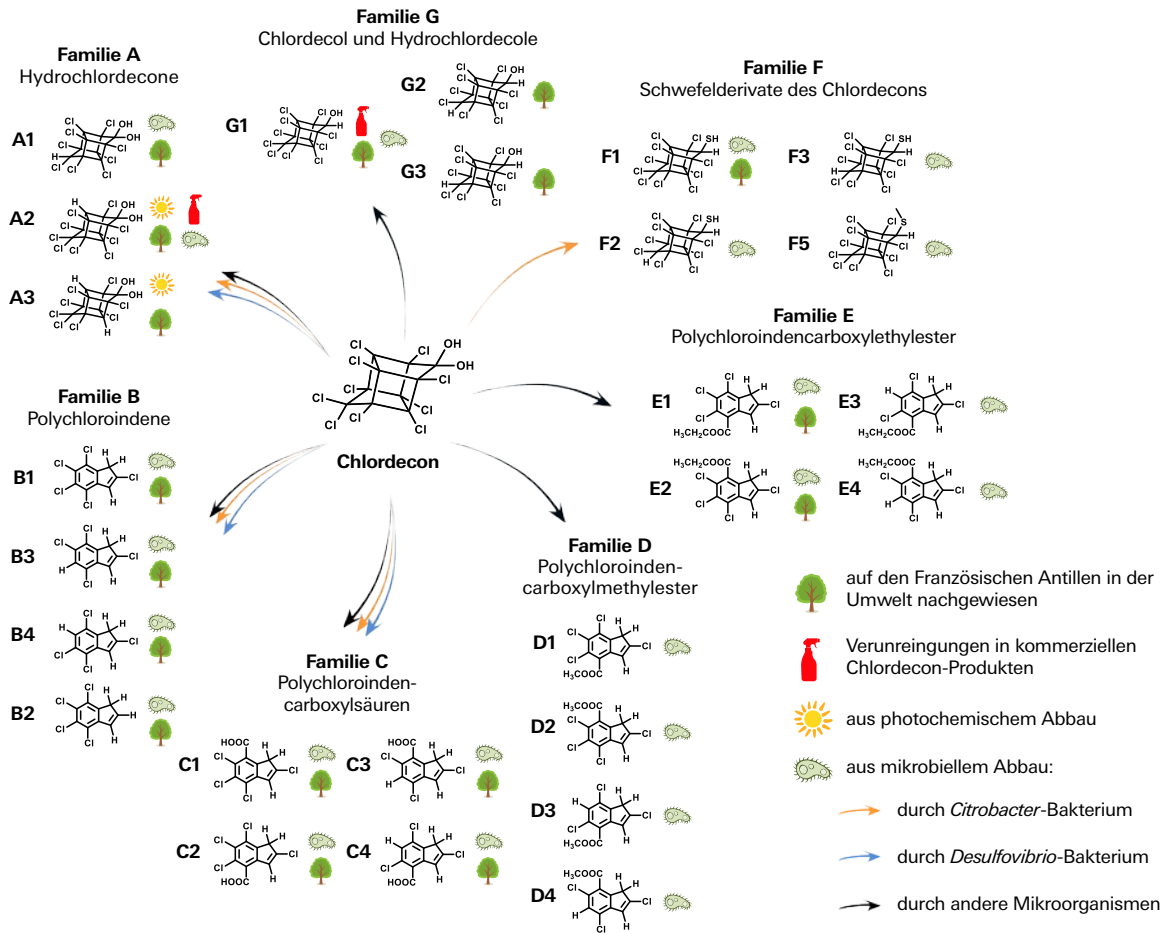
1996 beobachteten Peter Jablonski von der Northern Illinois University in den Vereinigten Staaten und seine Kollegen angeblich, dass ein prokaryotischer zellulärer Mikroorganismus, *Methanosarcina thermophila*, in der Lage ist, Chlordecon effizient abzubauen. Dieses Ergebnis ließ sich im Nachhinein jedoch nicht bestätigen.

Unter relativ harschen chemischen Bedingungen ist es allerdings möglich, Chlordecon aufzuspalten. Vitamin B12 in Kombination mit einem Reduktionsmittel führt etwa dazu, dass sich in einer basischen Umgebung Hydrochlordecone und Polychloroindene bilden. Um diese Moleküle dann vollständig zu zerstören, muss man sie noch auf rund 1000 Grad Celsius erhitzen. Generell sind chemische Dekontaminierungsansätze für die freie Natur also ungeeignet.

Yves-Marie Cabidoche und Kollegen vom INRA und CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) entwickelten 2009 ein Vorhersagemodell für den Grad der Verseuchung. Auf der Grundlage von Aufzeichnungen über die Verwendung des Stoffs und von bestehenden Kontaminationskarten schätzten die Forscher, wie lange Chlordecon braucht, um allein durch natürliche Transferphänomene wie Auswaschen und Infiltration aus den oberen Schichten der Böden zu verschwinden. Das Team kam zu dem Schluss, dass es

Abbau von Chlordecon

Analysen auf Martinique haben gezeigt, dass Chlordecon nicht nur durch Licht aufgespalten, sondern auch durch Mikroorganismen abgebaut wird. Insgesamt wurden 19 Transformationsprodukte in der Natur gefunden, deren Toxizität und Auswirkungen auf die Umwelt noch unbekannt sind. Zwei davon aus der Familie C sind nur sehr selten vertreten und hier nicht gezeigt.



PIERRE-LUC SAADI UND ORIANE DELLA NEGRA, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

offenbar zwischen mehreren Jahrzehnten und sieben Jahrhunderten dauert – je nach Art des Bodens und Grad der anfänglichen Kontamination.

Vor dem Hintergrund dieser Prognose stellten sich zwei zentrale Fragen: Wie kann die örtliche Bevölkerung besser geschützt werden? Und: Gibt es wirklich keine Strategie, um Chlordecon zu beseitigen? Antworten auf die erste Frage suchen Forscher bereits lange mit Hilfe der Behörden, indem sie epidemiologische Studien, Lebensmittelkontrollen, Informationskampagnen oder Bodenanalysen durchführen und entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung der Situation ergreifen – wie zuvor bereits geschildert.

Bei der Suche nach Antworten auf die zweite Frage können die Erfahrungen bei der Bekämpfung industrieller Verschmutzung helfen. Im Fall von Brachland lässt sich diese auf verschiedene Weise durchführen: chemische

Behandlung vor Ort, Aushub des kontaminierten Bodens oder Phytosanierung, bei der Pflanzen die schädlichen Stoffe aus dem Boden aufnehmen.

In der Regel lässt sich jedoch eine dekontaminierte Fläche anschließend nur selten für landwirtschaftliche Zwecke nutzen. Denn dafür gelten hohe Standards. Oftmals bekommt man den Boden aber nicht ausreichend schadstofffrei, und zusätzlich können die ergriffenen Maßnahmen die Bodenqualität auf andere Art und Weise verschlechtern.

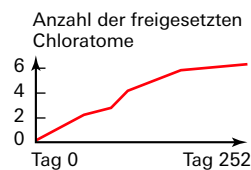
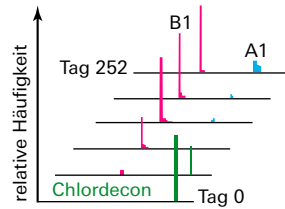
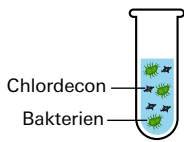
Aus diesen Gründen ist die Situation auf den Französischen Antillen eine ungewöhnlich große Herausforderung. Denn abgesehen von der riesigen kontaminierten Fläche in der Größenordnung von 15000 Hektar und den zu überwindenden technischen Schwierigkeiten – die Bananenplantagen stehen oft auf abschüssigem Land, das für die traditionelle Landwirtschaft schlecht geeignet ist – sollte die

Strukturanalyse der Abbauprodukte

Chlordecon wird entweder chemisch oder mikrobiologisch abgebaut. Durch die Kombination verschiedener Analyse- und Nachweisverfahren konnte das Autorenteam genügend Indizien sammeln, um die Struktur der dabei entstehenden Moleküle aufzuklären, also das kettenförmige Kohlenstoffgerüst und die Positionen der verschiedenen funktionellen Gruppen (darunter -OH und -COOH).

1 Mikrobiologischer Abbau

Bakterien werden in Chlordecon kultiviert und zerlegen die Moleküle über ihren Stoffwechsel.



Flüssig- oder Gaschromatografie und Massenspektrometrie

Die verschiedenen Bestandteile werden separiert, und man erhält Hinweise über ihre chemische Zusammensetzung – etwa ob bestimmte funktionelle chemische Gruppen wie die der Carbonsäure (-COOH) vorliegen.

Ionenchromatografie

Mit dieser Technik kann anhand der Menge der freigesetzten Chloridionen der Abbau von Chlordecon verfolgt werden. Man erhält Auskunft über die Anzahl der Chloratome, die in den Umwandlungsprodukten noch vorhanden sind.

2 Chemischer Abbau

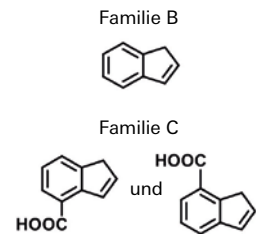
Gezielt werden solche Stoffe synthetisiert, die Chlordecon abbauen können.

Aufbereiten der Abbauprodukte

Nur mittels chemischer Methoden lassen sich in kurzer Zeit mehrere Milligramm des reinen Produkts herstellen.

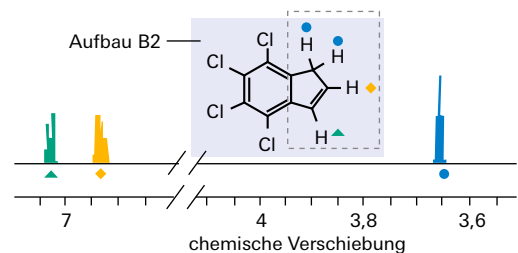
Chemische Modifikation der Abbauprodukte

Damit lässt sich die Struktur des Kohlenstoffgerüsts der Moleküle aus den Familien B und C bestimmen sowie die Position der Carboxygruppe COOH.



Kernspinresonanzspektroskopie

Die Methode nutzt die magnetischen Eigenschaften der Atome, indem sie die Resonanzfrequenz der Kerne von Wasserstoffatomen misst. Die Frequenz variiert entsprechend der Atomkernposition im Molekül (man spricht von chemischer Verschiebung). Mit diesem Wissen lassen sich die Positionen der Wasserstoffatome auf dem Kohlenstoffgerüst bestimmen.



gewählte Sanierungsstrategie den Boden wieder vollständig kultivierbar machen. Da etwa ein Viertel der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche auf den Französischen Antillen durch Chlordecon verseucht ist, hätte es katastrophale Auswirkungen auf die Bevölkerung, würde man ihr die Anbauregionen vollständig entziehen. Weiterhin wachsen auf diesen Flächen Bananen und Zuckerrohr – also Pflanzen, die zunächst einmal kein Kontaminationsrisiko darstellen, da der Schadstoff in erster Linie in den Wurzeln verbleibt.

Im Jahr 2013 führte das französische BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) einen Feldversuch zur chemischen Dekontamination durch. Die Ergebnisse waren zwar für bestimmte Bodentypen recht viel versprechend. Allerdings müssen sie gegen die Kosten der Chemikalien, die Schwierigkeiten in der Anwendung und die Folgen für die landwirtschaftliche Nutzung des Bodens abgewogen werden. Darüber hinaus ist noch unklar, welche Risiken von den neu entstandenen Abbauprodukten, den Hydrochlordeconen, ausgehen. Forschergruppen unter der Leitung von Magalie Lesueur Jannoyer vom CIRAD und François Laurens vom INRA haben in verschiedenen Studien die

Übertragung von Chlordecon vom Boden auf die Pflanzen untersucht. Auf diese Weise wollten sie sowohl die am stärksten von der Verseuchung betroffenen Pflanzen identifizieren als auch nach einheimischen Arten suchen, die das Pestizid wirksam dem Boden entziehen können. Bislang haben die Wissenschaftler jedoch keine Art entdeckt, die für eine solche Phytoextraktion in Frage kommt.

Die Ergebnisse von Thierry Woignier vom Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie Marine et Continen-

tale (IMBE) in Marseille und seinen Kollegen waren hingegen ein wenig vielversprechender: Kompost reduzierte vorübergehend den Transfer von Chlordecon vom Boden in die Pflanzen, und der Zusatz von Holzkohle verringerte die Kontamination exponierter Tiere erheblich. Diese Strategie bleibt aber eine Ausweichlösung, da das Chlordecon weiterhin im Boden verbleibt.

Aus Mangel an brauchbaren Dekontaminationsverfahren starteten wir dann am CEA 2009 unter der Leitung von Jean Weissenbach und Denis Le Paslier ein auf den ersten Blick widersinniges Unterfangen: Wir wollten versuchen, Chlordecon vollständig biologisch abzubauen und in ungiftige anorganische Verbindungen (Chloride, Karbonate oder Kohlenstoffdioxid) oder Nährstoffe für Organismen umzuwandeln, also zum Beispiel Kohlenstoffquellen. Doch nach allem, was bis dahin über den Stoff bekannt war, konnten ihn Mikroorganismen in einem überschaubaren Zeitraum nicht zerlegen.

Suche nach mikrobiellen Abbauprozessen

Zu Beginn stellten wir die Hypothese auf, dass die hohe Anzahl an Chloratomen im Molekül für die sehr geringe Reaktivität des Stoffs verantwortlich ist. Daher suchten wir nach effizienten mikrobiologischen Verfahren, um die Chloratome abzulösen. Meistens werden dabei unter Ausschluss von Sauerstoff die Chloratome durch Wasserstoffatome ausgetauscht. Experten sprechen von »reduktiver Dechlorierung«.

Die Abwesenheit von Luft führt allerdings in der Regel dazu, dass Bakterien ihren Energiestoffwechsel anpassen müssen, wodurch sich ihr Wachstum verlangsamt. Beispielsweise zerlegen manche Mikroorganismen organische Stoffe dann durch eine Art Gären – ein Prozess, der als Fermentation bekannt ist. Andere stellen bei Mangel an Sauerstoff auf alternative Oxidationsmittel um. Daher kann sich die Dauer des mikrobiologischen Abbaus über mehrere Monate oder sogar Jahre erstrecken.

Im Labor kultivierten wir dann in einer Nährlösung Bakterien auf einer Vielzahl von Umweltproben, unter anderem von kontaminierten Böden der Französischen Antillen, von anderen chlororganisch belasteten Standorten sowie Kläranlagenschlamm. Sehr viele Experimente waren zunächst notwendig, um Bakterien zu finden, die überhaupt gegen hohe Konzentrationen von Chlordecon resistent sind. Von diesen Arten gelang es uns schließlich im Jahr 2014 zwei aus der Gattung *Citrobacter* zu isolieren, die Chlordecon tatsächlich in wenigen Monaten komplett verschwinden lassen konnten.

Anschließend wandten wir uns den chemischen Aspekten zu. Wandeln sich die organischen Moleküle vollständig in anorganische Stoffe um? Oder bleiben organische Zwischenprodukte bestehen? Mit unterschiedlichen Analysetechniken – darunter Chromatografiemethoden zum physikalischen Auftrennen in einzelne Komponenten und Massenspektrometrie zur Bestimmung der Bestandteile – konnten wir verschiedene Umwandlungsprodukte nachweisen (siehe »Abbau von Chlordecon« und »Strukturanalyse der Abbauprodukte«). Die Gaschromatografie lieferte ein

Hauptprodukt, die Verbindung B1 ($C_9Cl_5H_3$), mit einer Struktur, die sich sehr von derjenigen von Chlordecon unterscheidet, und zwei Nebenprodukte, das Monohydrochlordecon A1 und die Verbindung B3 ($C_9Cl_4H_4$), die bis auf den Austausch eines Chloratoms durch ein Wasserstoffatom mit B1 identisch ist. Mittels Flüssigchromatografie entdeckten wir zwei Paare von zusätzlichen Umwandlungsprodukten mit jeweils der gleichen Summenformel: C1 und C2 ($C_{10}Cl_4H_4O_2$) sowie C3 und C4 ($C_{10}Cl_3H_5O_2$).

Um die vollständige Struktur aller nachgewiesenen Abbaustoffe zu bestimmen, setzten wir Kernspinresonanzspektroskopie ein, kurz NMR von englisch »nuclear magnetic resonance«. Dazu benötigten wir jedoch größere Mengen der einzelnen Transformationsprodukte, als sie durch den mikrobiologischen Abbau entstanden. Es hätte mehrere Jahre in Anspruch genommen, die erforderlichen Mengen herzustellen. Aus diesem Grund verwendeten wir bestimmte Chemikalien, um Chlordecon schneller abzubauen und so die gewünschten Stoffe zu erhalten. Insgesamt charakterisierten wir mittels NMR drei Familien von Chlordecon-Umwandlungsprodukten, die während der mikrobiellen Zersetzung durch das Bakterium *Citrobacter* auftreten. In den folgenden Jahren isolierten wir außerdem ein weiteres Bakterium namens *Desulfovibrio*, das wie *Citrobacter* eine ringöffnende Dechlorierung von Chlordecon initiiert, was zu den Transformationsprodukten der A-, B- und C-Familien führt. Unter anderen Kulturbedingungen, insbesondere in Gegenwart von Sulfat, erzeugt *Desulfovibrio* jedoch chemische Verbindungen mit einem Schwefelatom (Familie F).

Chlordecon in Deutschland

Große Mengen des in den USA hergestellten Chlordecons wurden in den 1970er Jahren nach Europa geschickt, insbesondere nach Deutschland, wo die Firma Spiess und Sohn (heute Spiess-Urania) in den 1970er Jahren es in das hydrophilere Derivat Kelevan umwandelte. Auch bekannt unter dem Handelsnamen Despirol war dieses in der BRD von 1971 bis 1980 und in der DDR zwischen 1974 und 1981 als Insektizid zugelassen; Landwirte bekämpften damit unter anderem den Kartoffelkäfer. Anfang der 1980er Jahre wurde es in beiden Staaten verboten. In der Umwelt zersetzt sich Kelevan ziemlich schnell, aber ein Teil davon verwandelt sich in Chlordecon. Eine Überwachung der Chlordeconbelastung fand in Deutschland jedoch nie statt. Dementsprechend gibt es keine Informationen über etwaige kontaminierte Gebiete. Das gilt ähnlich für etliche andere Länder, darunter Spanien, Ungarn, Polen und die ehemalige Sowjetunion sowie Regionen in Süd- und Mittelamerika.

Eine Strukturanalyse ergab, dass das Hauptprodukt F1 ein Thiolderivat ist, das offenbar aus einer kaum dokumentierten bakteriellen Umwandlung (keine Zersetzung) resultiert. Gemäß unseren Versuchsergebnissen funktioniert diese neu entdeckte mikrobiologische Reaktion nicht nur mit Chlordecon, sondern auch mit Hydrochlordecon und vielen weiteren Molekülen mit einer Kohlenstoff-Sauerstoff-Doppelbindung, einer so genannten Carbonylgruppe. In Übereinstimmung mit unseren Entdeckungen ließ sich das Thiolderivat in mit Chlordecon kontaminierten Mangrovensedimenten der Insel Martinique nachweisen.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

ISTOCK / CACTUSOUP

Mittels Genomsequenzanalysen wollten wir schließlich herausfinden, welche Enzyme beim Abbau durch *Citrobacter* und *Desulfovibrio* beteiligt sind. Leider fanden wir keine, die bereits bekannten Enzymen ähneln, welche eine Dechlorierung oder den Abbau von Chlorkohlenwasserstoffen bewirken. Durch den Vergleich der Genome der beiden Bakterien identifizierten wir jedoch den so genannten Corrinoid-Biosyntheseweg. Corrinoid sind ringförmige Moleküle mit einem zentralen Kobaltatom. Die bekannteste Variante ist das Vitamin B12, das bereits erfolgreich zum chemischen Abbau von Chlordecon eingesetzt wurde.

Haben Corrinoid eine Schlüsselfunktion?

Wir untersuchten, ob die von den beiden Bakterien produzierten Corrinoid auch am mikrobiologischen Abbau von Chlordecon beteiligt sind. Hierzu konstruierten wir mutierte Stämme des *Citrobacter*-Bakteriums, die keine solchen Verbindungen mehr synthetisieren können. Und tatsächlich waren diese Stämme nicht in der Lage, Chlordecon abzubauen. Daher spielen die Corrinoid wohl eine ausschlaggebende Rolle bei der mikrobiellen Zersetzung. Die vermehrte Anwesenheit solcher Stoffe beschleunigt also eventuell die Dekontamination. Noch ist allerdings das Zusammenspiel mit den Bakterien unklar, da die Corrinoid allein das Chlordecon nicht abbauen, wie Experimente zeigten.

Die viel versprechenden Ergebnisse in künstlicher Nährlösung motivierten uns dazu, Versuche durchzuführen, die die Umweltbedingungen vor Ort im Labor besser simulieren. Dazu arbeiteten wir mit Gwenaël Imfeld und Stéphane Vuilleumier von der Universität de Straßburg zusammen. Bodenproben von den Französischen Antillen, die mit Chlordecon kontaminiert waren, vermischten wir mit einem wässrigen Kulturmedium und lagerten sie mehrere Monate unter Ausschluss von Luft. Hier fanden wir zwei weitere Familien von Abbauprodukten, die wir D und E taufte.

Zusammengenommen deuten unsere Ergebnisse stark darauf hin, dass die einheimischen karibischen Bakterien unter den richtigen Bedingungen in der Lage sind, Chlordecon zu zersetzen. Wird folglich Chlordecon auf den Antillen bereits natürlich abgebaut? Um diese Frage zu beantworten, entnahmen Thierry Woignier und sein Team 2018 Proben aus Böden, Sedimenten und Wasser von Martinique. Wie erwartet kam überall Chlordecon vor. Überraschend hingegen war, dass alle kontaminierten Proben auch das Transformationsprodukt B1 enthielten, in Konzentrationen, die oft in der gleichen Größenordnung lagen wie die des Chlordecons selbst. Sowohl CLD-OH als auch Monohydrochlordecon A1 wurden seltener, aber manchmal in Konzentrationen von über einem Milligramm pro Kilogramm gefunden. Insgesamt wiesen wir in den 14 analysierten Umweltproben 17 Transformationsprodukte zum ersten Mal auf den Französischen Antillen nach.

Dieses Resultat wollten wir bestätigen. Daher führten wir weitere mikrobiologische Experimente durch, in denen wir den Bodenproben Chlordecon zusetzten. Nach einigen Wochen war der Stoff in allen Proben tatsächlich zu Gunsten der erwarteten Umwandlungsprodukte verschwunden. Wir kommen daher zu dem Schluss, dass auf den Französischen Antillen bereits verbreitet ein natürlicher Abbau von Chlordecon stattfindet.

Unsere Ergebnisse widersprechen der bisherigen Vorstellung, dass Chlordecon nicht biologisch zersetzt wird. Sobald die Wirkungsmechanismen der Bakterien vollständig verstanden sind, wäre daher zur Dekontamination eine Strategie des stimulierten Abbaus vorstellbar. Allerdings sollten zukünftig auch die Transformationsprodukte überwacht werden. Die neu entstandenen Verbindungen, die in vielen Fällen eine ganz andere Struktur als das Ausgangsmolekül haben und von denen möglicherweise zusätzlich zu den hier beschriebenen noch weitere existieren, könnten ebenfalls Lebensmittel kontaminieren und der Bevölkerung schaden. Letztlich sind die Ergebnisse also ein Hoffungsschimmer, zugleich jedoch auch eine Quelle erneuter Ungewissheit. ◀

QUELLEN

Barbance, A. et al.: Genetic analysis of *Citrobacter* sp.86 reveals involvement of corrinoids in chlordecone and lindane biotransformations. *Frontiers in Microbiology* 11, 2020

Chaussonnerie, S. et al.: Microbial degradation of a recalcitrant pesticide: Chlordecone. *Frontiers in Microbiology* 7, 2016

Chevallier, M.L. et al.: Natural chlordecone degradation revealed by numerous transformation products characterized in key French West Indies environmental compartments. *Environmental Science Technology* 53, 2019

Della-Negra, O. et al.: Transformation of the recalcitrant pesticide chlordecone by *Desulfovibrio* sp.86 with a switch from ring-opening dechlorination to reductive sulfidation activity. *Scientific Reports* 11, 2020

Lesueur Jannoyer, M. et al. (Hg.): Crisis management of chronic pollution: Contaminated soil and human health. CRC Press, 2016

Wissenschaft vor 100 und vor 50 Jahren – aus Zeitschriften der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums

CHINA KOPIERTE IM GROSSEN STIL SEINE LITERATUR

1921

»Die eigenartigste Büchersammlung der Welt ist die »Tsu Ku Tschuan Shu« (Sammlung der vier Bibliotheken) genannte Riesenauswahl der Blüte der chinesischen Literatur, insgesamt 36275 Bände von zusammen 4561804 Seiten. Das merkwürdigste ist, daß alle Bände mit der Hand geschrieben sind. Die Riesenausgabe wurde in den Jahren 1773 bis 1775 unter Tschü Yun geleistet. Zu diesem Zweck war er gezwungen, in zwölf Jahren mehrere Hunderttausend von Büchern zu lesen. 1500 Kopisten waren in Peking vereint, die in neun Jahren die ausgewählten Werke in sieben handschriftlichen Exemplaren herstellten. Heute sind nicht mehr als drei vollständige Serien vorhanden. Auf das Drängen der Pariser Universität hat sich die chinesische Regierung jetzt dazu entschlossen, 200 Abzüge der Sammlung drucken zu lassen. Davon sollen 60 in Amerika, 60 in Europa und 80 in China zum Preise von etwa 4000 Pfund Sterling verkauft werden.« *Die Umschau 20, S. 274*

EIN GESCHENK FÜR MARIE CURIE

»Ein Gramm Radium haben die amerikanischen Frauen der Entdeckerin dieses Elementes, Mme. Curie, zum Geschenk gemacht. Bei dem Werte dieser Gabe (100000 Dollars, also rund 6 Millionen Mark) ist es verständlich, daß Mme. Curie selbst Mitte Mai nach Amerika fährt, um das winzige Körnchen zu holen. Das Gramm wird auf 12 oder 15 Ampullen verteilt. Jede kommt in eine Platinhülle von 0,8 mm Dicke, diese in eine Bleihülle. Das Ganze wird in eine Bleischachtel verpackt und in einem Kühlraum des Schiffes unter Verschluss genommen. [Denn] man weiß, daß Becquerel das Pech hatte, eine winzige, aber kostbare Menge Radium auf seinen Anzug fallen zu lassen, wo sie spurlos verloren ging.« *Die Umschau 22, S. 305*

DIE WAHRE FARBE SCHWARZER TINTE

»Ueber die Schwärze von Tintenflecken wurde ein interessanter Bericht nach Versuchen im Materialprüfungsamt gegeben. [Ist] ein schwarzer Tintenfleck, der von Eisengalltinte herrührt, wirklich schwarz? Gearbeitet wurde mit dem Spektralmonochromator, der das Verhalten gegen die einwilligen Spektralfarben zu prüfen erlaubt. Es zeigte sich, daß der auf weißem Papier dunkel erscheinende Fleck keineswegs alles auffallende Licht verschluckt. [Es] werden die kurzwelligen Strahlen, die also im Spektrum nach dem violetten Ende hin liegen, im stärkerem Maße reflektiert als die langwelligen nach dem roten Ende hin liegenden. Somit würde eine Mischung von Dunkelblau und Violett überwiegen.« *Die Umschau 19, S. 255*

DIE ERDE UND IHR MOND BEBEN UNTERSCHIEDLICH

1971

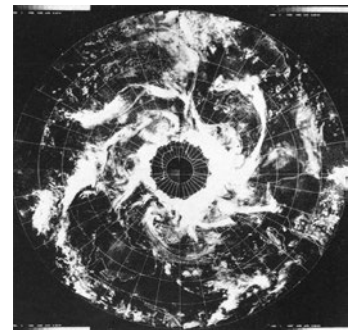
»Im Anschluß an die Landung der Apollo-12 wurden auf dem Mond seismographische Messungen durchgeführt. Die Mondlandefähre war nach der Mission auf die Oberfläche unseres Trabanten gestürzt und löste dort ein Beben aus, das Seismographen registrierten. Dabei zeigte sich, daß die für Erdbeben typischen Phasen fehlten. Die Erschütterungen dauerten fast eine Stunde. Die Seismogramme legten nahe, daß bis zu einer Tiefe von 10 bis 20 Kilometern die Struktur von Erd- und Mondkruste völlig verschieden ist. Damit schwindet die Wahrscheinlichkeit für einen genetischen Zusammenhang der beiden Himmelskörper: Der Mond dürfte eine eigene Geschichte haben.« *Kosmos 5, S. *126*

WIE LÄRM AUF DIE PSYCHE DRÜCKT

»Wissenschaftler untersuchten alle Patienten einer Nervenlinik, die nahe dem von Düsenlärm geplagten [Londonder] Stadtteil Hounslow liegt. Dabei unterteilten sie in Kranke aus der Hauptlärmszone und Patienten aus der ruhigeren Umgebung. Hohe Wohndichte und niedrige soziale Stellung verstärken die psychische Anfälligkeit. Diese Risikofaktoren fanden sich seltener in dem vom Lärm am meisten betroffenen Bereich als in den Außenbezirken. Trotzdem wurden aus dem Lärmzentrum erheblich mehr Patienten eingeliefert. Von 1966 bis 1968 kamen aus dem »Lärmgebiet« 245 Patienten, statistisch hatte man mit rund 213 gerechnet. Aus dem Umkreis stammten 243 Kranke, erwartet waren 275.« *Kosmos 5, S. *125*

AUFNAHMEN AUS DER SATELLITENFABRIK

»Die Astro-Division unter Leitung von C. S. Constantino treibt mit ihrer riesigen Welt-raum-Simulationskammer, mit großen Test- und Empfangsanlagen für Satelliten wohl den ungewöhnlichsten Aufwand unter allen RCA-Fabriken, sie ist eben buchstäblich eine Satelliten-Fabrik. Ihr sind so wichtige Entwicklungen wie der Navigations-Satellit NAVSAT zu verdanken, der überall auf der Erde Ortsbestimmungen mit nicht mehr als 160 m Fehler erlaubt, oder wie der Wettersatellit ITOS-1, dessen Präzisions-Wetterbilder von Computern zusammengesetzt werden können (Bild).« *Elektronik 5, S. 181*



Von Satelliten aufgenommene Wetterkarte der Südhalbkugel.

HYDROLOGIE

WASSER AUS DEN BERGEN

Mit Daten aus Hochlagen rund um den Globus ermitteln Forscher, wie sich dort Niederschläge und Schmelzvorgänge verändern. Denn diese betreffen die Lebensgrundlage von Milliarden Menschen.



Walter Immerzeel lehrt Gebirgshydrologie an der Universität Utrecht in den Niederlanden. Er hat in Nepal gelebt und erforscht im Himalaja seit 2002 die Dynamik von Schnee und Eis.

► spektrum.de/artikel/1848322

LANGTANG-TAL
Hochgebirge speichern
Unmengen Feuchtigkeit in
Form von Schnee und Eis.



AUF EINEN BLICK KALTE RESERVE

- 1** In Gebirgen sammelt sich Niederschlag als Schnee und Gletschereis, die beim Schmelzen Flüsse speisen. Die Höhenlagen sorgen somit für eine verlässliche Wasserversorgung im Tal, selbst während Trockenperioden.
- 2** Darauf sind Industrie und Landwirtschaft in vielen Teilen der Welt angewiesen. Doch trotz ihrer Bedeutung waren die Prozesse lange kaum erforscht, denn die Regionen sind oft schwer zugänglich.
- 3** Inzwischen geben aufwändige Messungen vor Ort zusammen mit Fernerkundungsdaten bessere Einblicke in die komplexen Kreisläufe und die Auswirkungen des Klimawandels.

Die Nächte im Zelt an der Zunge des Yala-Gletschers in Nepal, 5300 Meter über dem Meeresspiegel, sind lang. Das Einschlafen fällt schwer, da die geringe Sauerstoffkonzentration den Herzschlag beschleunigt. So habe ich schon viele wach gelegene Stunden damit verbracht, den fernen Geräuschen von donnernden Lawinen und knackendem Eis zu lauschen. All das, um auf dem Gletscher in 5600 Meter Höhe spezielle Instrumente zu installieren.

Unser Team unternimmt seit 2012 zweimal im Jahr Expeditionen zu diesem Ort im Langtang genannten Tal. Wir haben im Basislager und in höheren Lagen selbsttätige Wetterstationen errichtet, die Parameter wie Niederschlag, Schneehöhe, Sonnenstrahlung, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit messen. Das macht Langtang zu einem der am besten überwachten Einzugsgebiete in Asiens Hochgebirgen. Wir müssen die Stationen alle sechs Monate besuchen, um die Instrumente zu warten und ihre Daten herunterzuladen; es gibt kein Mobilfunknetz, das die Messwerte automatisch übertragen könnte, und die Gipfel sind Satellitensignalen im Weg.

So sammeln wir von Hand die Informationen, die nötig sind, um den Wasserkreislauf in den Höhenlagen zu verstehen. Schnee geht an den Bergen nieder und verwandelt sich allmählich in Gletschereis, das langsam hangabwärts fließt und schmilzt. Das Wasser speist wachsende Flüsse und versorgt zahlreiche Siedlungen, Kraftwerke, Wälder, landwirtschaftliche Felder sowie große Städte tiefer im Tal. Als wir anfangen, waren die Details der Abläufe ein Rätsel. Wir wussten nicht, welche Niederschlagsmengen fallen oder wie viel Wasser in die Schneedecke hinein- und aus ihr herauskommt. Doch ohne solche Fakten können wir nicht beurteilen, wie sich die Verhältnisse in Zukunft möglicherweise ändern.



ISTOCK / KIWISOU

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Das Langtang-Tal entwässert mehrere Berggipfel und Gletscher. Es speist den Fluss Trishuli, eine wichtige Quelle für Kraftwerke auf halber Höhe der Berge und für weiter abwärts gelegene Felder. Gemeinsam mit anderen Nebenflüssen versorgt der Strom letztlich den Ganges, dessen Delta in hunderten Kilometer Entfernung am Golf von Bengalen Lebensgrundlage für 400 Millionen Menschen ist. Es gibt im Himalaja insgesamt Hunderte von Einzugsgebieten ähnlich dem Langtang.

Eine vergleichbare Dynamik spielt sich in vielen weiteren Gebirgszügen auf der Erde ab, etwa in den Alpen oder den Anden. Laut einer Studie, die wir in der Januarausgabe 2020 des Fachjournals »Nature« veröffentlicht haben, liefern 78 solcher hoch gelegenen Regionen, vom Tarim in China bis zur Puna in Peru, den Großteil des Süßwassers für

fast zwei Milliarden Menschen weltweit (siehe doppelseitige Grafik »Gefährdete Ressource«). Computersimulationen zufolge bedroht der Klimawandel diese lebenswichtigen Wasservorräte – durch Veränderungen bei der Temperatur, den Niederschlagsmustern, der Akkumulation und Schmelze von Schnee und der Verteilung von Schwebstoffen in der Luft. Dennoch spielen die Gebirge bei Plänen zur nachhaltigen Ressourcennutzung bislang kaum eine Rolle. Dank der systematischen Untersuchungen zu den wichtigen Beiträgen, die Gebirge rund um die Welt leisten, ändert sich das vielleicht bald.

Hochlagen funktionieren gewissermaßen wie Wassertürme und werden deshalb in der Hydrologie gelegentlich so bezeichnet (auch der Begriff Wasserschloss ist geläufig). Hier regnet und schneit es mehr als im tiefer gelegenen Umland, und ein Großteil des Niederschlags wird als Schnee und Gletschereis zwischengespeichert. Diese Reserven schmelzen langsam und stetig. Sie sorgen so für eine zuverlässige Wasserversorgung und wirken als natürlicher Puffer bei Trockenperioden.

Große Mengen an Schnee sublimieren direkt und landen nicht in Flüssen

Das hoch in den Bergen Nepals gelagerte Wasser ist für die im Tal lebenden Menschen von entscheidender Bedeutung. Die Monsunwinde zwischen Juni und September bringen 70 bis 80 Prozent des jährlichen Niederschlags im Himalaja. Die Daten unserer Wetterstationen zeigen in Verbindung mit Computermodellen das enge Wechselspiel mit der Topologie. Selbst in einem kleinen Einzugsgebiet wie dem von West nach Ost verlaufenden Langtang variieren die Werte auffallend stark. Ein Großteil der warmen, feuchten Luft fällt zwischen dem Eingang des Tals auf etwa 1350 Metern und dem Dorf Lama Hotel auf 2480 Metern herab. Letzterer Ort ist mit rund 250 Zentimetern Niederschlag im Jahr der feuchteste. Das Dorf Kyanjin liegt auf 3900 Metern und nur 15 Kilometer weiter östlich, aber dort messen wir bloß rund 80 Zentimeter.

Die Position und die Form der Berge erzeugen weitere lokale Effekte. Von Kyanjin bis zum Yala-Gletscher auf 5300 Metern erhöht sich der Niederschlag erneut und steigt um durchschnittlich 40 Prozent. Zusammen prägen die Prozesse auf den verschiedenen Skalen die Dynamik in der Region – fällt zum Beispiel mehr Regen in tieferen Lagen, wirkt sich das ganz anders auf die Pegelstände in den Flüssen aus als bei stärkerem Schneefall in der Höhe.

Wir haben das so genannte Wasseräquivalent der Schneedecke in der Umgebung des Yala-Gletschers eingehend untersucht. Es beziffert die gespeicherte Flüssigkeit und hängt davon ab, wie viel Schnee fällt, wie viel schmilzt und wieder gefriert, wie viel sublimiert – das heißt direkt vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht – und wie viel vom Wind davongetragen wird. Unsere Instrumente im 5300 Meter hohen Basislager messen viele solche Variablen unter zuweilen härtesten Voraussetzungen. Extreme Kälte hat bereits Batterien explodieren lassen, Sturmböen haben Sensoren verbogen und Lawinen Gerüste umgeknickt.

Die Sublimation ist besonders knifflig zu erfassen. Der turbulente Prozess findet unter sowohl kalten als auch



USMAR HELEMAN; MIT FROU. GEN. VON WALTER IMMERTZEL



DACH DER WELT Geräte in 5600 Meter Höhe im Himalaja erfassen Veränderungen der Schneedecke. Das Schmelzwasser, das von hier aus in der Langtang-Region bergab fließt, vereinigt sich mit anderen Quellen zu immer größeren Flüssen, die auf dem Weg zum Golf von Bengalen letztlich hunderte Millionen Menschen mit Wasser versorgen.

Volumen und die Geschwindigkeit eines dortigen Erdstoches mit ferngesteuerten Fluggeräten kartografiert hat, erkannten wir, dass uns der gleiche Ansatz Daten zu schwer zugänglichen, mit Schutt bedeckten Gletschern liefern könnte.

2013 setzten wir über Kyanjin erstmals eine Drohne ein. Sie nimmt überlappende Bilder des Terrains auf, aus denen eine Software die Struktur der Oberfläche bestimmt – mit einer beachtlichen Auflösung von zirka zehn Zentimetern. Wir haben die Aufzeichnungen alle sechs Monate wiederholt und bis 2019 festgestellt, dass der Gletscher kaum noch fließt, sondern sich um etwa 40 Meter pro Jahr zurückzieht; er wird dabei jedes Jahr um rund 80 Zentimeter dünner. Bald wird man die kalte Masse kaum noch als Gletscher bezeichnen können; vielmehr wird sie langsam dahinschwenden wie ein Haufen schmutziger Schnee am Rand eines Parkplatzes. Eigentlich sollte mit Geröll bedecktes Eis langsamer zurückgehen als offenes, weil der Schutt isolierend wirkt. Aber wir haben einzelne Punkte mit besonders intensiven Schmelzvorgängen identifiziert, die den Prozess insgesamt verstärken. Auf herkömmlichen Satellitenbildern hätten wir sie nie gefunden, weil deren Auflösung zu grob ist.

Solche Details lassen wir in Modelle eingehen, die uns verraten sollen, wie viel Wasser in Zukunft verfügbar sein wird. Ein letztes großes Puzzlestück ist allerdings die Wassermenge in den Flüssen. Der Pegelstand allein genügt nicht für Aussagen über das hindurchrauschende Volumen. Wir brauchen eine Beziehung zwischen der Höhe und dem Abfluss. Diese Bemessungskurve muss sowohl die während des Monsuns talwärts stürzenden Massen als auch die

sonnigen, windigen und trockenen Bedingungen statt, wie sie im Winter im Himalaja üblich sind. Durch ihn kann sogar bei Temperaturen weit unter null Grad Celsius die Schneedecke schrumpfen. Wir haben festgestellt: An exponierten Standorten sublimieren etwa 21 Prozent des Schneefalls in die Atmosphäre und landen deshalb nie talwärts im Fluss.

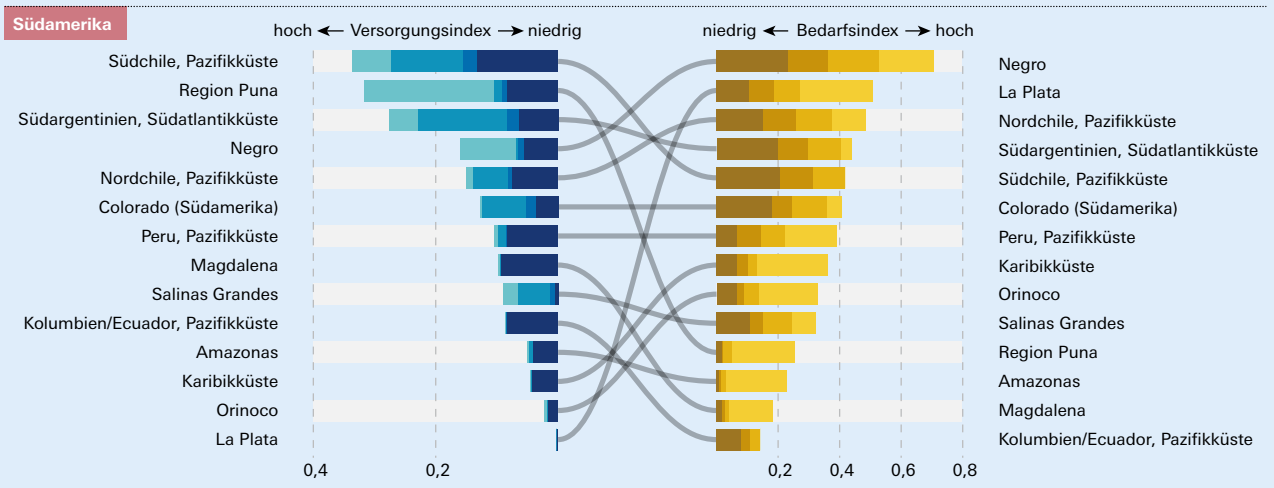
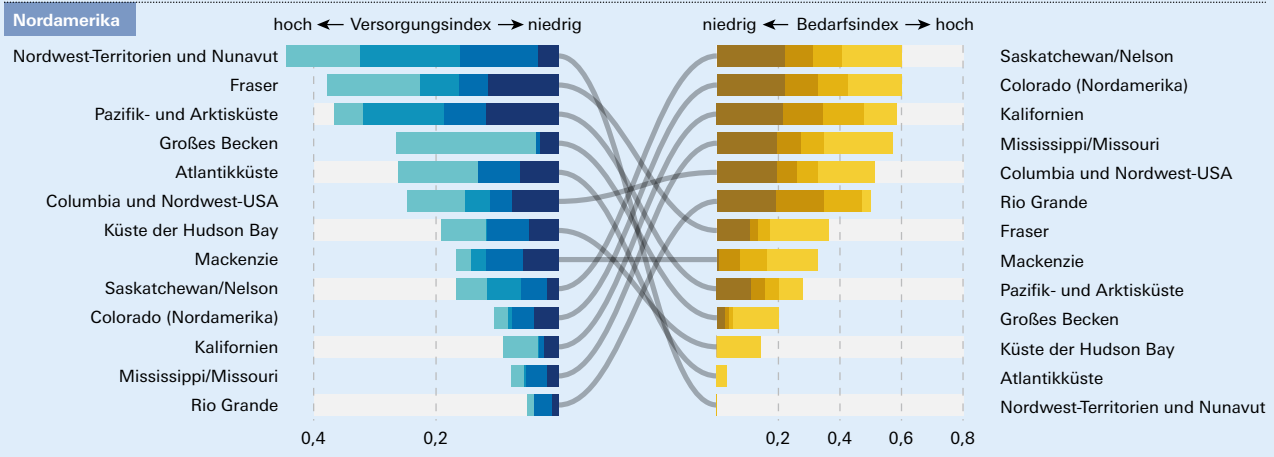
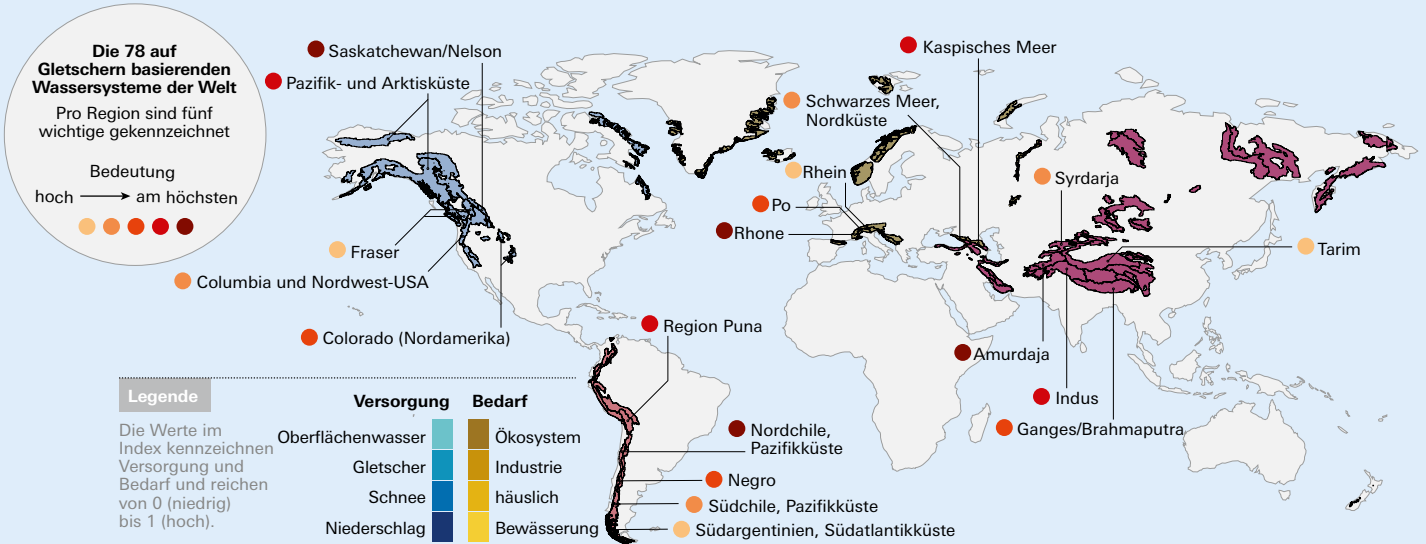
Zum uns eher vertrauten Schmelzen ist selbst dann noch genügend Energie vorhanden, wenn die Lufttemperatur zwei Meter über dem Schnee unter null Grad beträgt. Das liegt am Nettoeffekt des kurzwelligen Lichts von der Sonne, der langwelligen Strahlung von Erdoberfläche und Atmosphäre sowie an turbulenten Wärmeströmen. Im Inneren der Schneedecke gefrieren mindestens 30 Prozent der tagsüber verflüssigten Menge nachts wieder. Zum Abschmelzen wird insgesamt viel mehr Energie benötigt, als man rein von der Masse her erwarten würde.

Ein Instrument oberhalb der Schneesicht hilft uns dabei, das Wasseräquivalent abzuschätzen. Es registriert die Gammastrahlung, die das darunterliegende Gestein natürlicherweise aussendet. Die Abschwächung des Signals hängt damit zusammen, wie viel Wasser tatsächlich gespeichert ist, ohne die eingeschlossene Luft.

Manchmal tun sich ganz neue Wege auf, um an Informationen zu kommen. Nachdem ein Kollege in Tasmanien das

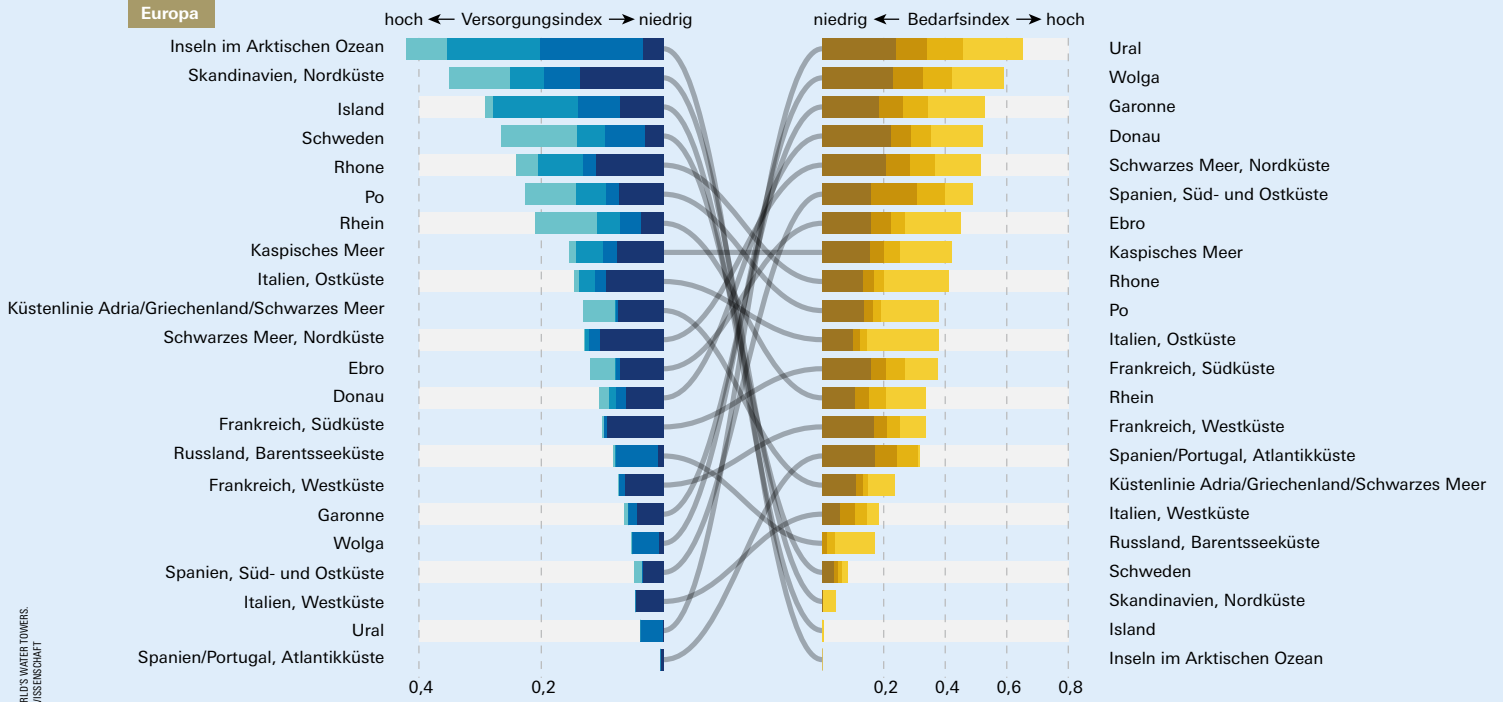
Gefährdete Ressource

78 Gebirgsketten auf der ganzen Welt versorgen durch herabfließende Eis-, Schnee- und Regenmengen zahlreiche Ökosysteme und insgesamt rund zwei Milliarden Menschen mit Wasser. Hydrologen haben untersucht, welche dieser »Wassertürme« auf jedem Kontinent als Lebensgrundlage am bedeutsamsten sind – oft handelt es sich dabei zugleich um diejenigen Kreisläufe, die durch Klimawandel, wachsende Bevölkerung und Nutzung am stärksten bedroht sind.

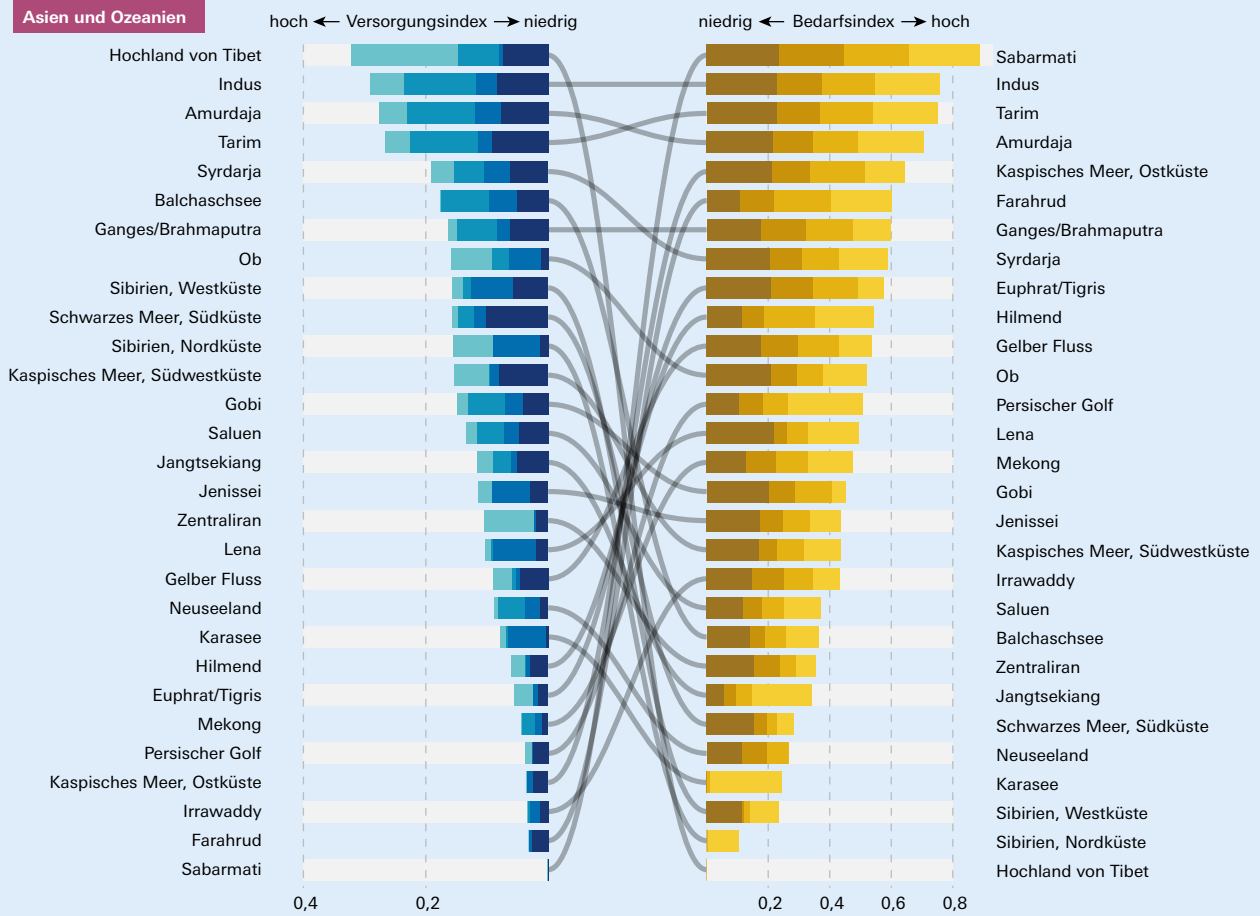


PITCH INTERACTIVE, NACH IMMERZEEL, W.W. ET AL.: IMPORTANCE AND VULNERABILITY OF THE WORLD'S WATER TOWERS. NATURE 577/2020 / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2021: BEARBEITUNG SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Europa



Asien und Ozeanien





dürrtigen Rinnsale im trockenen Winter darstellen. Dazu platzieren wir Drucksonden in Stahlrohren am Grund eines Flusses oder montieren Radarsensoren auf Gestellen ein paar Meter über der Oberfläche. Außerdem geben wir flussaufwärts Salz ins Wasser und messen Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit durch die allmähliche Verdünnung. Obwohl Geräte beispielsweise durch Fluten oft verloren gehen, haben wir nach Jahren der Anstrengung jetzt eine ziemlich genaue Vorstellung vom Strömungsverhalten.

Viele Puzzleteile liefern ein globales Bild

Seit einigen Jahren vereinen wir die Erkenntnisse aus verschiedenen Einzugsgebieten zu einem umfassenden Modell für die Wasserkreisläufe im Himalaja; Ähnliches leisten andere Wissenschaftler in zahlreichen weiteren Bergregionen auf der Erde. Der Klimawandel verkompliziert die Bestrebungen durch diverse Faktoren. So erhitzen sich Berge schneller als tiefer gelegene Bereiche, im Fall des Himalajas bedeutet eine globale Erwärmung von 1,5 Grad Celsius ein lokales Plus von 2,1 Grad. Zudem enthält eine energiereichere Atmosphäre mehr Feuchtigkeit. Der zusätzliche Niederschlag fällt zunehmend als Regen statt in Form von Schnee, landet auf felsigen Oberflächen, die zuvor von Eis bedeckt waren, und läuft schnell in Flüsse. Schmelzende Gletscher werden kurzfristig mehr Wasser liefern, während sie sich bergauf zurückziehen, langfristig jedoch weniger. Laut unseren Hochrechnungen wird die Versorgungsleistung des Langtang um 2060 ihren Höhepunkt erreichen und danach stetig abnehmen.

Ein dichteres Beobachtungsnetz mit mehr Sensoren, besonders in großer Höhe, sowie detailliertere Modelle

werden uns beim Verständnis der Prozesse helfen. Die Satellitenfernerkundung liefert Abschätzungen für die Bereiche, in denen wir keine unmittelbaren Daten erfassen können. Weitere Forschungsteams in anderen Bergregionen machen ähnliche Fortschritte. So sind zum Beispiel für die Alpen und die Anden umfangreiche Datensätze verfügbar.

Mit Hilfe von Simulationen haben wir die weltweite Situation analysiert und in unserer Studie eine globale Rangliste der Wassertürme in den Bergen erstellt. Wir betrachten eine Gebirgsregion als bedeutend, wenn sie reich an Gletschern, Schnee oder Seen ist und die Menschen flussabwärts einen großen Wasserbedarf haben. Dazu gehören in Europa die Alpen, in denen der Rhein und der Po entspringen.

Laut unserer Modellierung sind die Gebirgszüge Asiens die bedeutsamsten der Welt. Sie speisen große Flüsse wie den zentralasiatischen Amudarja und den Indus auf dem indischen Subkontinent. Zugleich gehören sie zu den verwundbarsten. Simulationen prognostizieren dort starke Erwärmungsraten sowie schnell wachsende Einwohnerzahlen und Volkswirtschaften. Die durchschnittliche Wasserverfügbarkeit wird wahrscheinlich bis zur Mitte des Jahrhunderts nicht abnehmen, zum Teil auf Grund ergiebigerer Monsunregen, aber die längerfristige Prognose ist düster. Vermutlich wird etwas mehr als die Hälfte des Eisvolumens bis zum Ende des Jahrhunderts verloren gehen, wenn die Welt ihre Treibhausgasemissionen nicht radikal reduziert.

Doch auch kurzfristig stehen die Menschen, deren Lebensgrundlage von den asiatischen Hochgebirgen abhängt, vor Herausforderungen. Das liegt an Veränderungen im zeitlichen Ablaufverhalten der Flüsse. In einigen Einzugs-



WALTER IMMERZEEL

NATURGEWALTEN Alle sechs Monate brechen Forscher bei Expeditionen vom Basislager (oben) zum Yala-Gletscher auf. Dort errichten und warten sie Instrumente (links, der Autor auf dem Gerüst in blauer Jacke) und rufen gespeicherte Daten ab.

gebieten könnte die Schneeschmelze viele Wochen früher einsetzen als bisher, was die Landwirtschaft verändern wird. Und je weniger Speicherkapazität die schwindende Schneedecke bietet, desto stärker werden die Wasserläufe zu Sturzbächen anschwellen – in Regionen, die bereits heute immer wieder mit Überflutungen zu kämpfen haben. Extreme Regenfälle in den Bergen führen außerdem zu mehr Erdbeben, besonders während des Monsuns. Das verstärkte Abschmelzen füllt die Gletscherseen bis zum Rand und bringt katastrophale Überschwemmungen, wenn die stauenden Felskämme durch den immensen Wasserdruck bersten. In den vergangenen Jahrzehnten haben solche Naturkatastrophen tausende Menschen getötet und wirtschaftliche Schäden in Milliardenhöhe verursacht. In Zukunft werden die Gefahren zunehmen, auch da die wachsende Bevölkerung in immer größere Höhen vorrückt.

Lokale Daten für gezielte Maßnahmen

Trotz der klaren allgemeinen Trends liefern nur detaillierte Untersuchungen zu den einzelnen Gebieten den dort lebenden Menschen nützliche Informationen. Beispielsweise stellt eine zentralasiatische Region, die das östliche Pamir- und das Karakorum-Gebirge mit dem westlichen Kunlun-Gebirge verbindet, eine bemerkenswerte Ausnahme dar. Dort sind die Gletscher stabil oder nehmen sogar an Masse zu, was wir fast nirgends sonst beobachten (siehe »Spektrum« April 2015, S. 72). Neue Erkenntnisse weisen der intensivierten Landwirtschaft im nahe gelegenen Tarim-Becken eine Rolle dabei zu. Flüssigkeit, die unter- und oberirdischen Quellen zur Bewässerung entnommen wird, verdunstet und wird von Pflanzen abgegeben. Die zusätzliche Feuchtigkeit in der Atmosphäre kondensiert über den

Bergen und fällt dort als Schnee. Das zeigt eindrücklich, wie menschliches Handeln natürliche Systeme verändert.

Die Erkenntnisse zu den Wasserkreisläufen in den Höhenlagen verdeutlichen, wie wichtig es ist, ihnen in breiteren Diskussionen über die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen Beachtung zu schenken. Auf lokaler Ebene könnten die Verantwortlichen etwa Nationalparks einrichten, um die Gebirge zu schützen, oder Speicherbecken für Regen- und Schmelzwasser anlegen. Zum Beispiel hat die Gemeinde im Langtang-Tal 2019 zusammen mit einer Nichtregierungsorganisation ein Wasserkraftwerk errichtet, das nun ein zuvor von der Stromversorgung abgeschnittenes, hoch gelegenes Dorf elektrifiziert.

Betroffene Nachbarländer sollten zusammenarbeiten, um die Nutzung zu optimieren und die Konkurrenz um die Wasserentnahme aus den oft grenzüberschreitenden Flüssen vertraglich zu regeln. Ein hoffnungsvoll stimmendes Zeichen der Kooperation setzten Minister aus den acht Ländern der Hindukusch-Himalaja-Region im Oktober 2020. Afghanistan, Bangladesch, Bhutan, China, Indien, Myanmar, Nepal und Pakistan unterzeichneten eine gemeinsame Erklärung, in der sie sich verpflichteten, bei ihren Entscheidungen in solchen Fragen auf die Wissenschaft sowie die Bedürfnisse der sehr unterschiedlichen regionalen Bevölkerungen zu hören und zugleich bei globalen Verhandlungen mit einer Stimme zu sprechen.

Die Hochgebirgsregionen der Welt wandeln sich rasch. Innerhalb der kommenden Jahrzehnte werden sich viele stromabwärts lebende Menschen auf häufigere Extremereignisse und eine veränderte Wasserversorgung einstellen müssen. Wissenschaftler, Ingenieure und politische Entscheidungsträger sollten gemeinsam entschlossen handeln, damit die gewaltigen Ressourcen aus den Bergen auch zukünftigen Generationen erhalten bleiben. ◀

QUELLE

Immerzeel, W. W. et al.: Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature 577, 2020

SONNENSYSTEM ZWERGPLANET UNTER DER LUPE

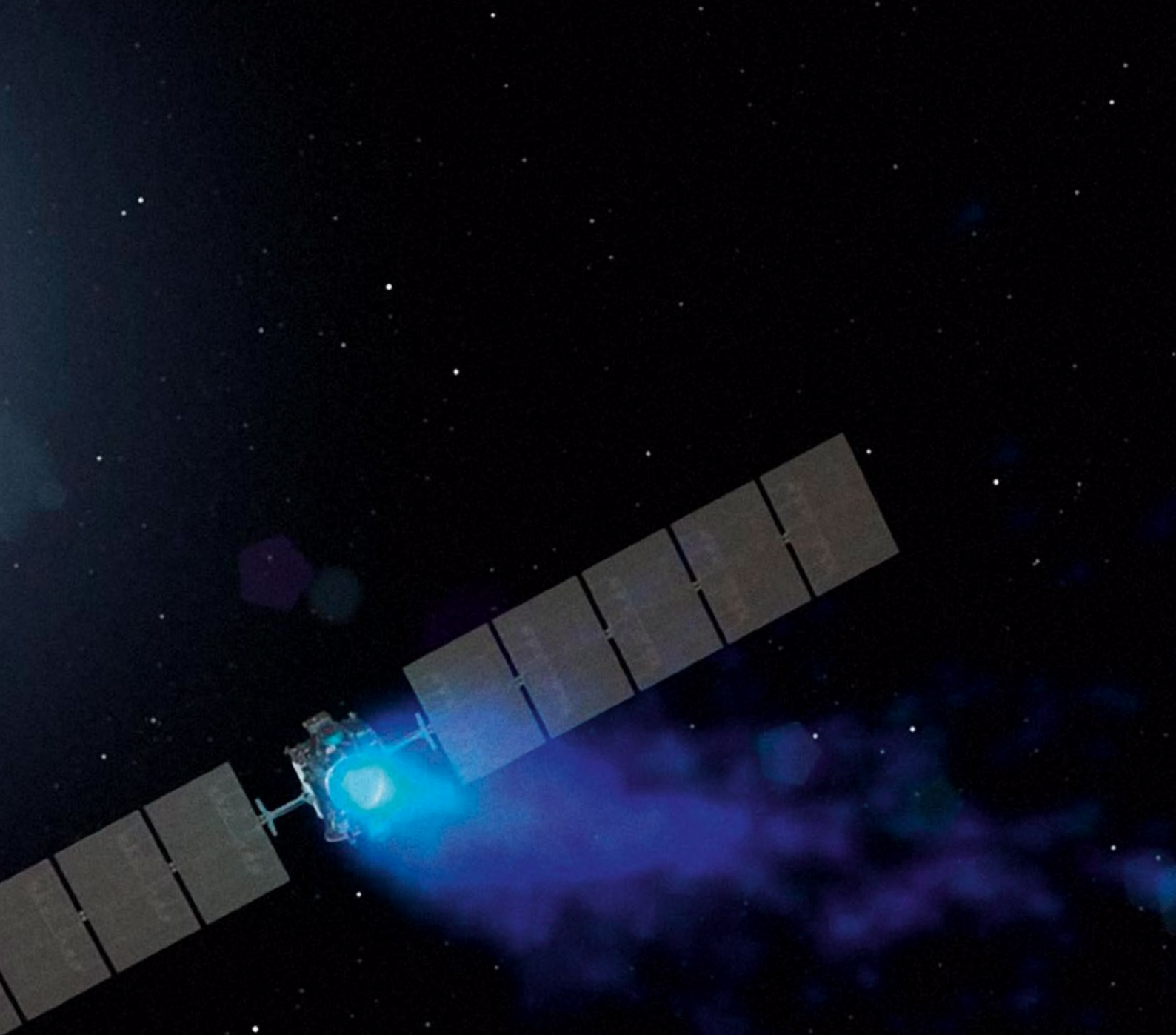
Dreieinhalb Jahre lang umrundete die Raumsonde Dawn den Zwergplaneten Ceres. Die Bilder und Messdaten zeigen eine faszinierende Welt, auf der es trotz eisiger Kälte Wasser und Kryovulkane zu geben scheint.



Ralf Jaumann ist Professor für Planetologie an der Freien Universität Berlin. Von 1984 bis 2020 forschte er am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt zur Geologie von Planeten, Monden, Asteroiden und Kometen. Er ist an zahlreichen Weltraummissionen von NASA und ESA beteiligt, darunter auch die Dawn-Mission.

» [spektrum.de/artikel/1848325](https://www.spektrum.de/artikel/1848325)

DAWN Die Raumsonde, hier als Illustration zu sehen, erforschte zwischen 2011 und 2018 den Asteroidengürtel. Ihr finales Ziel: der Zwergplanet Ceres.



AUF EINEN BLICK CERES' GEHEIMNIS

- 1** Der Zwergplanet Ceres hat einen Durchmesser von 963 Kilometern und ist damit der größte Körper des Asteroidengürtels.
- 2** Die Raumsonde Dawn hat Ceres drei Jahre lang aus der Nähe untersucht und dabei Spuren von Wasser entdeckt, das Teil einer ausgedehnten Schicht aus Salzlauge im Untergrund sein dürfte.
- 3** Vermutlich dringt die flüssige Masse nach Meteoriteneinschlägen an die Oberfläche und hinterlässt dort sichtbare Salzablagerungen.

► In der Neujahrsnacht des Jahres 1801 entdeckte der katholische Priester und Astronom Giuseppe Piazzi (1746–1826) am Himmel etwas Besonderes: ein nur schwach leuchtendes Objekt, das sich Nacht für Nacht ein Stück zu bewegen schien. Piazzi, damals Direktor der Sternwarte in Palermo, gab dem »Wandelstern« einen Namen: Ceres, wie die römische Göttin der Fruchtbarkeit und des Ackerbaus.

Zunächst hielt er Ceres für einen Kometen, andere Astronomen glaubten an einen Planeten. Mitte des 19. Jahrhunderts wurde deutlich, dass keines von beidem stimmte: Der Neuling gehörte zu einer eigenen Klasse von Himmelskörpern, den Asteroiden. Wie wir heute wissen, bewegen sich die allermeisten von ihnen zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter um die Sonne, im Asteroidengürtel.

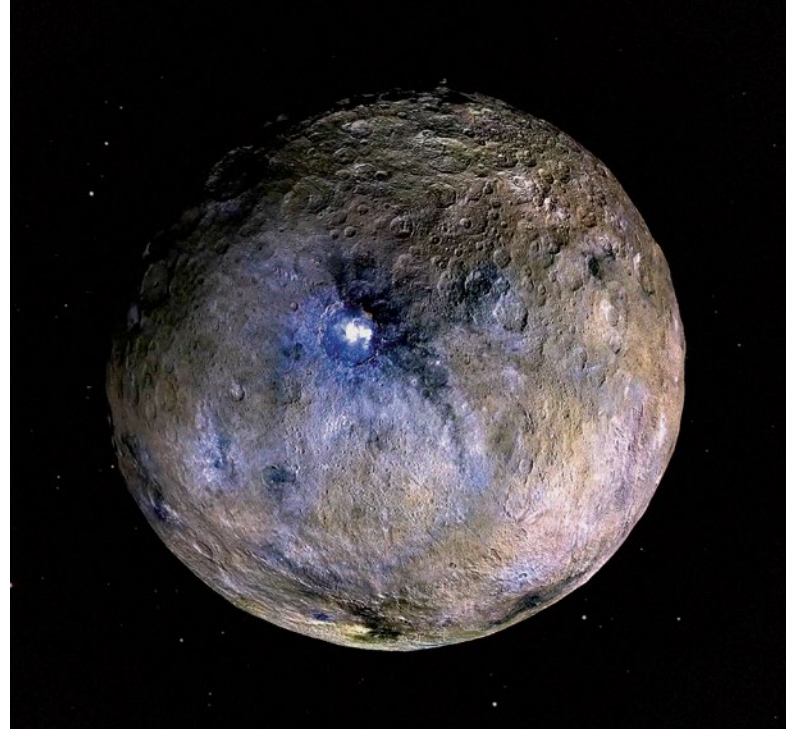
Ceres ist hier mit einem Äquatordurchmesser von 963 Kilometern der bei Weitem größte Himmelskörper und vereint 90 Prozent der Masse aller Asteroiden in sich. Und als einzige Vertreterin bringt Ceres genug Eigengravitation für eine annähernd runde Form auf. Im Jahr 2006 hob die Internationale Astronomische Union (IAU) das Objekt daher in die neu geschaffene Kategorie der Zwergplaneten, zu der auch Pluto gehört.

An Pluto flitzte 2015 die NASA-Sonde New Horizons vorbei und funkte spektakuläre Bilder zur Erde (siehe »Spektrum« März 2018, S. 60). Ceres stand in der öffentlichen Wahrnehmung lange ein wenig im Schatten dieser Reise an den Rand des Sonnensystems. Dabei haben Wissenschaftler von dem Zwergplaneten im Asteroidengürtel nicht nur im Vorbeiflug Bilder geschossen, sondern ihn über einen langen Zeitraum aus der Nähe beobachtet: Die Raumsonde Dawn folgte der grauen Kugel für dreieinhalb Jahre auf ihrem Weg um die Sonne.

Die während der Mission gewonnenen Daten haben uns in vielerlei Hinsicht überrascht; sie machen Ceres zu

Die Schalen des Zwergs

Mit ihrer annähernden Kugelform, einer Masse von 0,014 Prozent der Erde und einer Tageslänge von etwas mehr als neun Stunden ist Ceres ein respektablem Zwergplanet. Als Teil des Asteroidengürtels zwischen Mars und Jupiter ist die Welt durchschnittlich 413,9 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt und bewegt sich knapp jenseits der Frostgrenze des Sonnensystems, ab der Wasser an der Oberfläche nur noch als Eis vorliegt. Mit den Daten der Dawn-Sonde haben Wissenschaftler ein Modell des inneren Aufbaus erstellt (siehe Bild »Innerer Aufbau«). Ceres hat demnach einen 80 bis 360 Kilometer großen Gesteinskern, den ein 70 bis 190 Kilometer starker Mantel umgibt. Über ihm erstreckt sich die rund 40 Kilometer dicke Kruste, deren oberer Teil aus hydratisierten Tonen, Salzen und Eis besteht.



LEUCHTENDES GEHEIMNIS In Falschfarben treten die hellen Flecken auf Ceres' Oberfläche besonders deutlich hervor. Forscher sehen in ihnen einen Hinweis auf Kryo-Vulkanismus.

einem ähnlich faszinierenden Himmelskörper wie Pluto. Denn wider Erwarten handelt es sich bei ihr um eine dynamische Welt, unter deren Oberfläche sich wahrscheinlich große Mengen Wasser verbergen – und von der wir viel über andere Orte im Sonnensystem lernen können, etwa die Eismonde von Jupiter und Saturn.

Dawn (englisch für »Morgendämmerung«) startete am 27. September 2007 vom Weltraumbahnhof Cape Canaveral. Die Mission fand unter Federführung des Jet Propulsion Laboratory der NASA statt. Daneben wirkten Wissenschaftler von 22 Forschungseinrichtungen mit, unter anderem aus Deutschland, Italien und Frankreich. Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen waren gemeinsam mit den Mitgliedern meiner Arbeitsgruppe am Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin für die beiden an Bord befindlichen Kameras verantwortlich.

Zunächst besuchte Dawn den drittgrößten Asteroiden Vesta und umrundete ihn binnen 15 Monaten immer wieder. Im September 2012 zündete die Raumsonde dann erneut ihr Ionentriebwerk und begann die zweieinhalbjährige Weiterreise zu Ceres. Am 6. März 2015 schwenkte Dawn in eine Umlaufbahn um den Himmelskörper ein.

Die Erforschung des Zwergplaneten verlief in mehreren Phasen. Aus einem Abstand von 13500 Kilometern suchten wir die Umgebung zunächst nach Staub und Schutt ab. Auch sichtigten wir Bilder des umliegenden Weltraums, um auszuschließen, dass Ceres kleinere Monde hat, die eine Annäherung gefährlich machen würden. Nachdem wir nichts dergleichen finden konnten, näherte sich Dawn in spiralförmigen Bahnen immer weiter der Oberfläche von Ceres. Erst verbrachte die Sonde einige

Zeit in einem Abstand von 4430 Kilometern, dann in 1450 Kilometern, und schließlich wagten wir uns bis auf 375 Kilometer heran.

Von dort aus entstanden Aufnahmen mit einer Auflösung von 35 Metern pro Bildpunkt, was durchaus respektabel ist – auf der Erde würde man auf solchen Bildern bereits größere Häuser erkennen. Letztlich erstellten wir im Lauf der Mission eine präzise Höhenkarte der gesamten Oberfläche. Zudem analysierten wir für jeden Bildpunkt das Spektrum des reflektierten Lichts – dies erlaubt Rückschlüsse auf die dort vorhandenen chemischen Elemente.

Der erste Eindruck täuscht

Anschließend vergrößerte Dawn den Abstand wieder und folgte Ceres bis zum sonnennächsten Punkt ihrer elliptischen Bahn. Damit sollte die Mission die Frage beantworten, ob der Zwergplanet ähnlich wie ein Komet in Sonnennähe ausgaset. Die Voraussetzung dafür wären gefrorene Gase und Wasser an der Oberfläche, die bei höheren Temperaturen und intensiver Sonneneinstrahlung von der festen in die gasförmige Phase übergehen.

Wer schon einmal ein Bild von Ceres gesehen hat, wird nun vermutlich stutzen: Aus dem All sieht der Zwergplanet ähnlich trocken aus wie unser Erdmond. Doch als sich Ceres im April 2017 ihrem sonnennächsten Punkt näherte, wussten wir längst, dass sie sich in dieser Hinsicht deutlich von unserem Trabanten unterscheidet. Das Innere der Welt könnte bis zu einem Viertel aus Wassereis bestehen, Schätzungen zufolge würde die Gesamtheit der dort versammel-

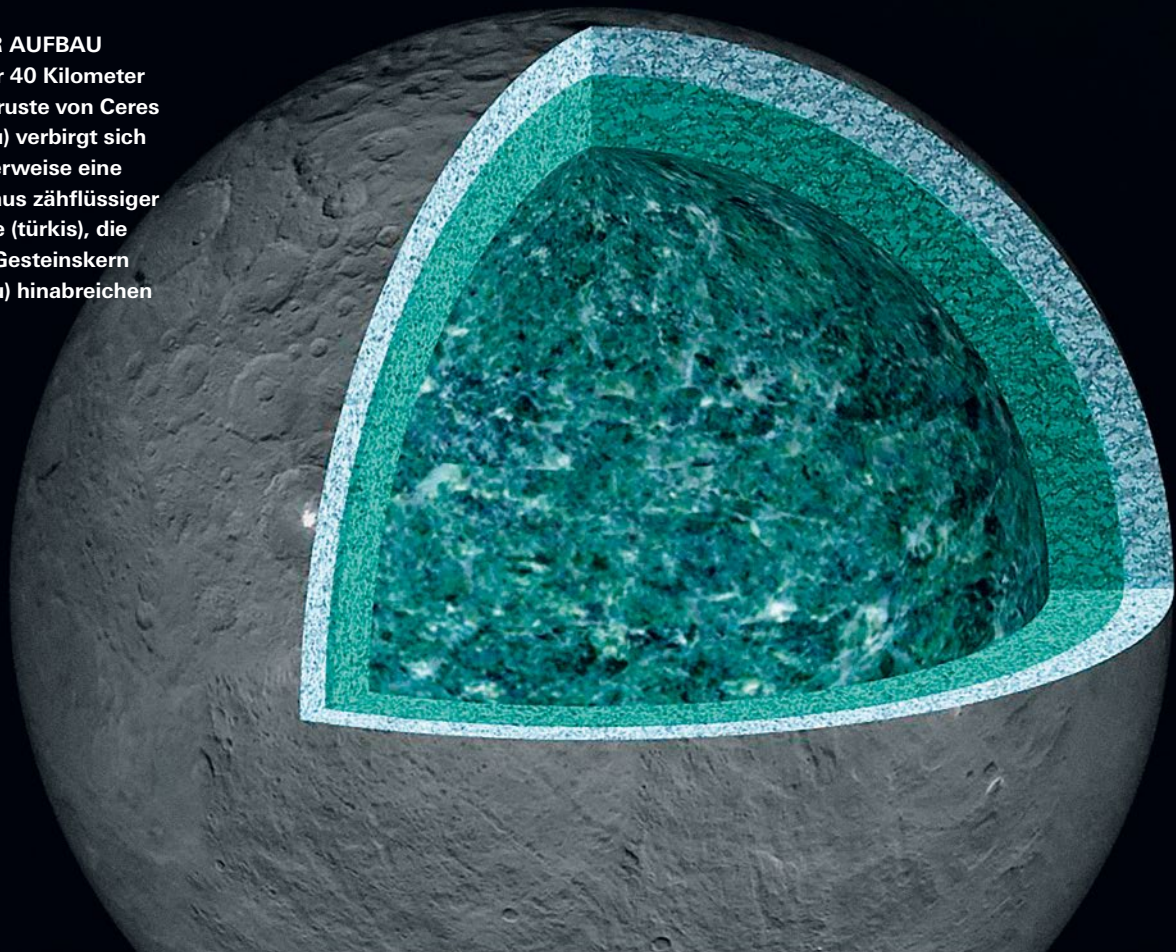
ten H₂O-Moleküle gar das Fünffache aller Süßwasserseen auf der Erde füllen.

Wie kamen wir darauf? Ceres' Oberfläche ist wie beim Erdmond von feinkörnigem Schutt und Staub, dem Regolith, bedeckt und verrät auf den ersten Blick nichts über den Untergrund. Aber gleich mehrere Indizien deuten auf ein feuchtes Inneres hin. Da ist zum einen Ceres' Dichte. Sie ist mit 2,16 Gramm pro Kubikzentimeter recht niedrig, was zeigt, dass der Himmelskörper nicht nur aus Gestein bestehen kann, sondern ebenfalls einen erheblichen Anteil Eis enthalten dürfte. Auch winzige Schwankungen im Schwerfeld, das Dawn minuziös vermessen hat (siehe Bild »Schwerfeld«, S. 78/79), deuten darauf hin: Aus ihnen lässt sich die Dichte der Kruste in verschiedenen Regionen abschätzen.

Einen weiteren Hinweis liefern die Krater auf Ceres' Oberfläche. Wenn man lediglich jene mit einem Durchmesser von über einem Kilometer zählt, gibt es 44.600 von ihnen. 108 sind so markant, dass sie Namen erhalten haben, jeweils angelehnt an einen irdischen Fruchtbarkeitsmythos. Kerwan, mit 280 Kilometer Durchmesser der größte Krater des Zwergplaneten, wurde beispielsweise nach dem Geist des Mais aus der Mythologie der Hopi-Indianer benannt. Er tritt auf vielen Bildern von Ceres als große kreisförmige Struktur in der südlichen Hemisphäre hervor. Doch seit seiner Entstehung scheint sich Kerwan deutlich verformt zu haben: Seine Ränder sind nur noch als feine Linien erkennbar, und in seinem Inneren erstreckt sich eine flache Ebene, die wohl seit dem Einschlag deutlich nach oben gewandert ist.

INNERER AUFBAU

Unter der 40 Kilometer dicken Kruste von Ceres (blaugrau) verbirgt sich möglicherweise eine Schicht aus zähflüssiger Salzlauge (türkis), die bis zum Gesteinskern (grünblau) hinabreichen könnte.



Hier und an vielen anderen Stellen zeigen die Höhenkarten das, was Planetologen eine ausgeglichene Topografie nennen. Gemeint ist damit, dass eine relativ weiche Kruste nach Einschlägen langsam zurückfedert und die eingebulte Oberfläche im Lauf der Zeit wieder ausgleicht. Am besten lässt sich diese Plastizität mit einem hohen Anteil an Eis in der Kruste von Ceres erklären: Wegen der niedrigen Temperaturen von weniger als minus 100 Grad Celsius ist Wasser in den meisten Regionen gefroren. Zusätzlich sind Wassermoleküle auch im Gestein gebunden – beides macht die Krustenschichten formbarer.

Hinzu kommt noch ein anderer Effekt: Wenn man den Untergrund erwärmt, schmilzt ein Teil des Eises. Steht dadurch Gestein längere Zeit mit Wasser in Berührung, verwittert es, und Tonminerale entstehen. Das Wasser bildet dann zusammen mit dem Gestein und eingeschlossenem Gas eine fließfähige, schlammartige Mischung, so genannte Kryo-Lava, die ähnlich wie vulkanisches Magma an die Oberfläche dringt und sich dem Gefälle folgend ausbreiten kann. Da Ceres keine nennenswerte Atmosphäre hat, verdampft das darin enthaltene Wasser jedoch rasch, ähnlich wie beim Gefriertrocknen, und entschwindet anschließend ins Weltall. Übrig bleiben in diesem Fall ausgedehnte Ablagerungen aus trockenem, tonhaltigem Schlamm.

Die ganze Oberfläche von Ceres ist mit diesen Tonmineralen bedeckt. Dass es einen solchen Kryo-Vulkanismus auf Ceres gibt, wird auch im Inneren einiger Einschlagkrater deutlich, wie Haulani (hawaiianische Gottheit der Pflanzen) und Ikapati (philippinische Gottheit der Fruchtbarkeit). Dort

WEISSE FLECKEN Teile des 92 Kilometer großen Kraters Occator sind von kalkhaltigen Salzablagerungen bedeckt. Sie waren einst Teil von Kryo-Magma, das aus der Tiefe an die Oberfläche gestiegen ist.

erinnern Fließstrukturen jeweils an erstarrte Lavaströme auf der Erde. Bei beiden Kratern scheint die einst flüssige Kryo-Lava bis an die Kraterländer gestiegen und zuweilen sogar hinausgeschwappt zu sein.

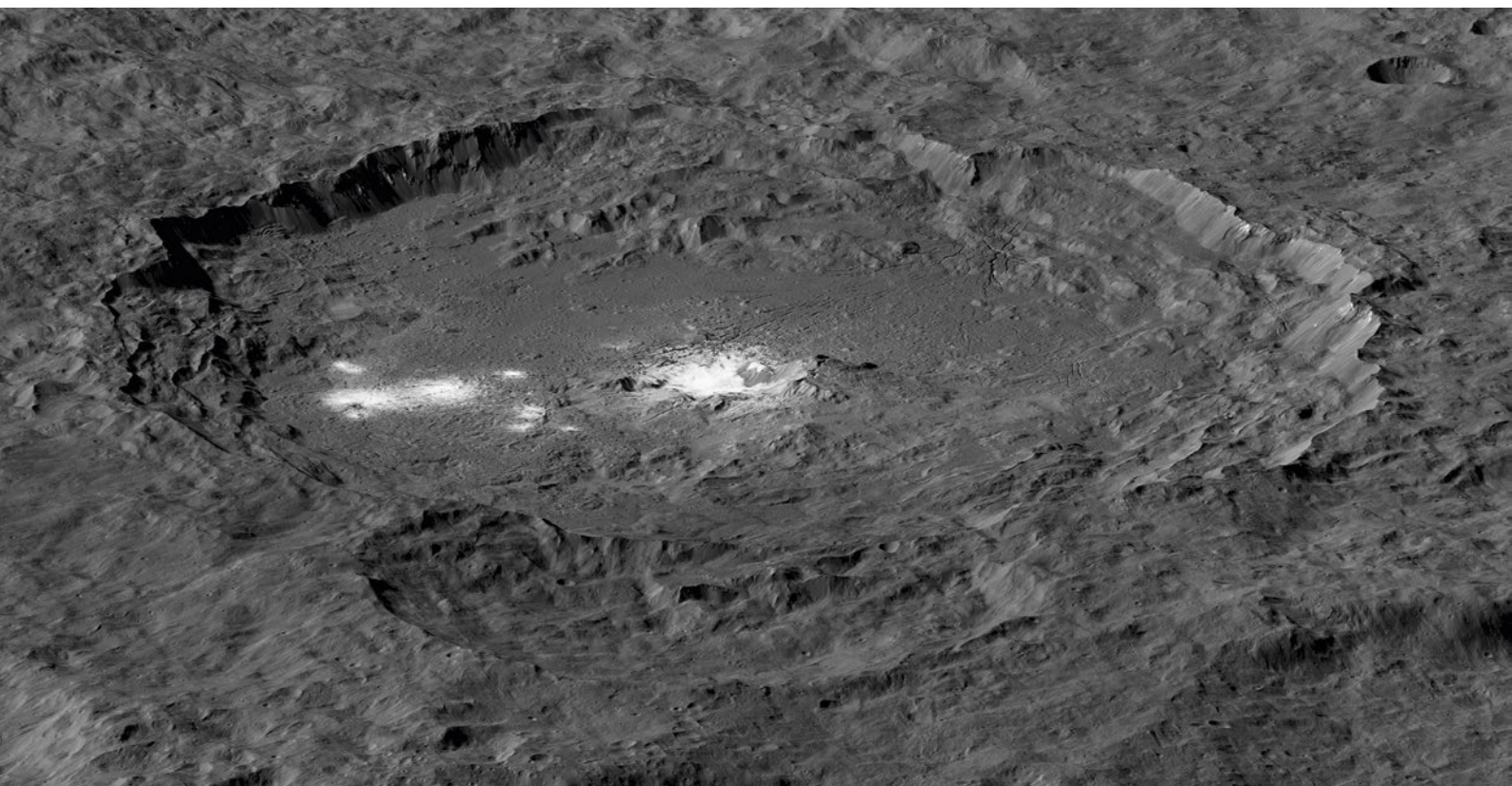
Auch Dawns wohl spektakulärste Entdeckung deutet auf Wasser im Untergrund hin. Bereits 2015 funkte die Sonde Bilder des 92 Kilometer großen Kraters Occator zur Erde, benannt nach dem römischen Gott der aus der Landwirtschaft bekannten Egge (siehe Bild »Weiße Flecken«). Seine Steilwände ragen an manchen Stellen fast 2000 Meter in die Höhe. Doch nicht nur Occators Topografie sorgte für Aufsehen: In der Mitte des Kraters glitzern weiße Flecken, die sich deutlich von der dunkelgrauen Umgebung abheben.

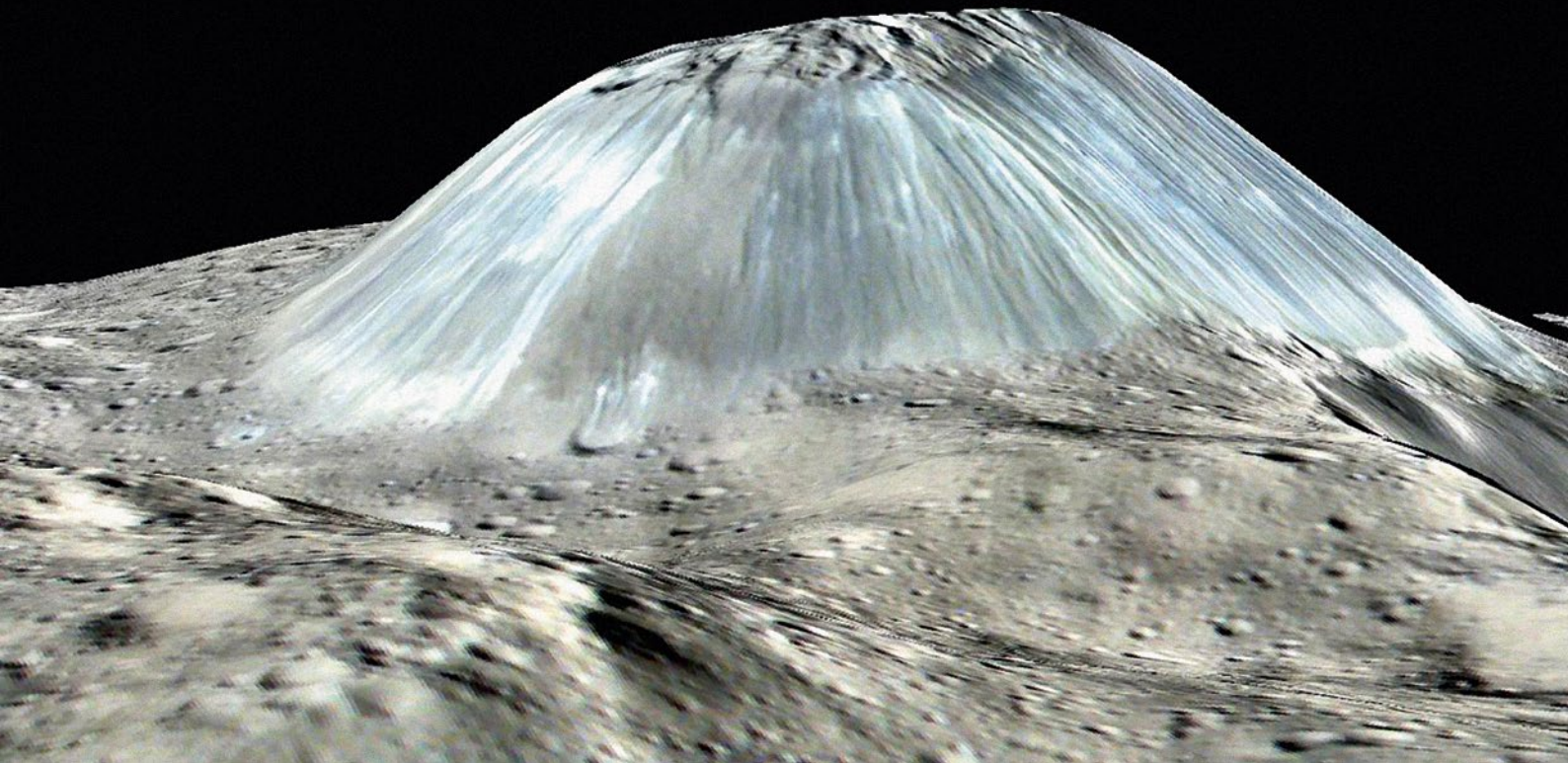
Konzentrierte Salzlauge aus dem Inneren

Das Dawn-Team hat die Verfärbungen Cerealia Facula getauft, nach der Fackel des römischen Ceresfestes. Natürlich warfen die hellen Punkte sofort die Frage auf, woher sie kommen. Wie wir bald erkannten, ist in den hochauflösenden Bildern der Kameras ein wichtiger Hinweis versteckt: Kreisförmige Spalten weisen darauf hin, dass sich die besondere Region in der Mitte einer 1000 Meter tiefen Senke befindet. Das weiße Material im Zentrum wiederum wölbt sich wie ein Dom 300 Meter nach oben – als wäre es aus dem Inneren herausgepresst worden.

Etwas Ähnliches scheint an anderen Orten passiert zu sein. Kleinere helle Flecken gibt es etwa im Nordosten von Occator, weit abseits des zentralen Doms. Im Krater Haulani und am Rand des großen Kraters Dantu sind ebenfalls weiße Kleckse erkennbar, wenn auch nicht so ausgeprägt. Insgesamt gibt es 240 derartig helle Verfärbungen auf Ceres' Oberfläche, von denen die in Occators Mitte die hellsten sind.

Die spektralen Daten dieser Stellen verraten, dass das Material aus Salzen besteht. Neben Natriumkarbonat (besser bekannt als Soda), den bereits erwähnten Tonmineralen, Magnesiumsulfat und Ammoniumkarbonat sind darin Chlor-





MASA/PII-CALTECH/CIAMPS/DLR/IDA (PAZ015)

DER VULKAN Ahuna Mons (hier als auf realen Bilddaten basierendes digitales Modell) ragt fünf Kilometer in die Höhe. Vermutlich geht er auf Kryo-Magma zurück, das die Oberfläche durchstieß.

salze wie Ammoniumchlorid enthalten. Auf der Erde bilden sich solche Ablagerungen, wenn konzentrierte Salzlauge austrocknen. Salzlauge wiederum entsteht, wenn sich Gestein in flüssigem Wasser teilweise auflöst. Dabei werden Natrium, Kalzium, Magnesium und Eisen aus den Kristallgittern entfernt und verbinden sich vor allem mit Kohlendioxid zu Karbonaten und manchmal auch zu Chlorsalzen.

Die Chemie dieser und anderer Prozesse erlaubt es, die Temperatur während der Entstehung der weißen Flecken einzugrenzen: Karbonate fallen bei Temperaturen von etwa 70 bis 150 Grad Celsius aus und zersetzen sich bei rund 400 bis 700 Grad. Das liefert wichtige Randbedingungen für mögliche Herkunftsszenarien der Verfärbungen. Im Wesentlichen diskutieren Geologen hier zwei Möglichkeiten: Entweder sind die Salze und Karbonate auf Ceres im Inneren entstanden, oder aber sie haben sich bei Einschlägen nahe der Oberfläche gebildet.

In beiden Fällen braucht es einen Asteroiden oder Kometen, der Ceres trifft. Gibt es bereits ein salzreiches Reservoir aus Kryo-Magma im Untergrund, wie Szenario eins vorsieht, quillt nach dem Einschlag die salzhaltige Masse entlang von Rissen an die Oberfläche. Dort füllt sie den frisch entstandenen Krater mit Kryo-Lava. Kühlt diese ab, konzentrieren sich Karbonate und andere Salze im Zentrum und steigen dort wegen ihres geringeren Gewichts domartig auf. Damit ließen sich sämtliche Flecken von Occator erklären – sowohl die in der Mitte als auch jene am Rand sowie die in den Kratern Haulani und Dantu.

Im anderen Szenario gibt es keine Konzentration von (salzhaltigem) Kryo-Magma. Dann kann man die hellen Flecken in Occator nur so erklären, dass der Einschlag eine direkt unter dem Krater liegende Schicht aus Eis und hydratisierten Mineralen aufschmilzt. Die Folge wäre ein Schlammsee, der vorübergehend den Krater füllt. Da die Energie im Zentrum bei solch einem Ereignis am größten ist, wäre genügend Zeit, um Minerale auszulaugen und konzentrierte Salzlauge zu bilden. Durch Abkühlung und Druckentlastung kristallisieren die Salze dann aus und steigen in diesem Fall ebenfalls im Zentrum domartig auf. Daneben könnten sie Spalten und Risse nutzen, um sich an die Oberfläche vorzuarbeiten.

Suche nach der Wärmequelle im Inneren

Warum aber hat nur Occator den zentralen Dom aus Karbonaten? Auch hierzu gibt es eine schlüssige Theorie: Möglicherweise lag das Reservoir aus Kryo-Magma in den anderen Kratern zu tief, als dass Salze im Zentrum nach oben steigen konnten. Sie hätten in diesem Fall bloß über Spalten und Risse die Oberfläche erreicht und dort isolierte helle Ablagerungen gebildet. Eine Alternative wäre, dass die Einschlaggeschwindigkeit der Projektile in den Kratern ohne domartige Wölbung größer war. Damit hätte sich der Boden im Zentrum stärker erhitzt. Die Folge: Die Karbonate wären sofort nach der Entstehung gleich wieder zerstört worden. Nur in den kühleren Randbereichen wären sie stabil geblieben und durch Frakturen bis ganz nach oben gestiegen, wie etwa in den Kratern Haulani und Dantu.

Bisher ist nicht abschließend geklärt, ob sich die Salze auf Ceres nur bei Einschlägen bilden oder ob sie auch ohne äußere Hitzezufuhr entstehen können. Letzteres würde eine Wärmequelle im Inneren erfordern, die einen Teil des Eises

im Untergrund schmelzen kann. Tatsächlich gibt es ein Oberflächenmerkmal, das für diese Theorie spricht: Ahuna Mons (siehe Bild »Der Vulkan«) ist der höchste Berg auf Ceres, er ist nach dem indischen Erntefest benannt. Die kegelförmige Erhebung ragt bis zu fünf Kilometer in die Höhe. Sie liegt nicht in einem Krater – und trägt trotzdem helles Material auf ihren Flanken, das an die Flecken in den Einschlagkratern erinnert.

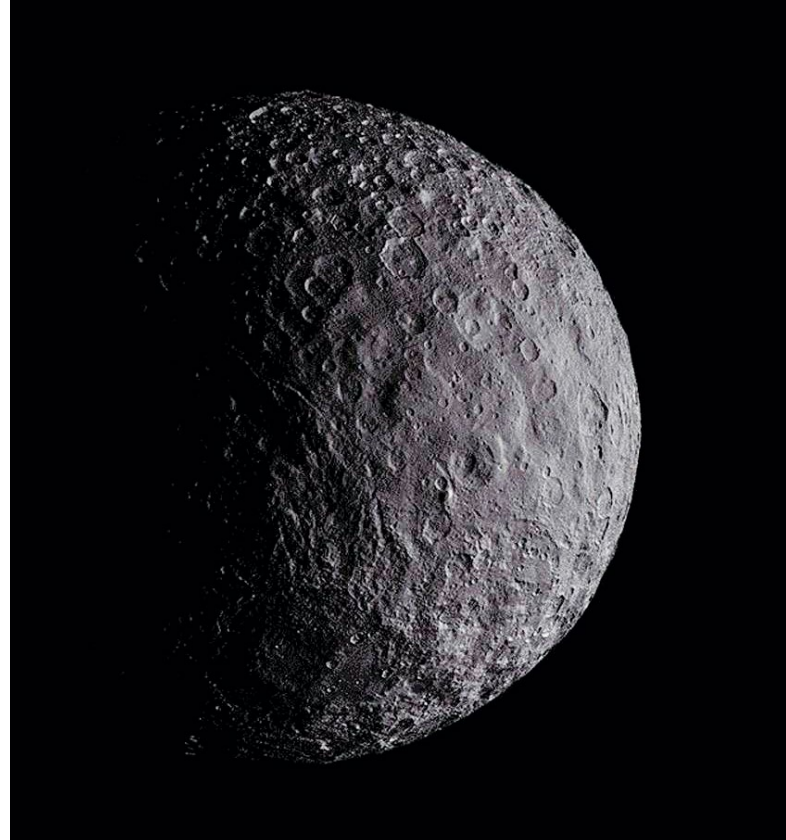
Form und Zusammensetzung von Ahuna Mons sprechen dafür, dass es sich um einen Kryo-Vulkan handelt. Ganz offensichtlich ist hier ein Gemisch aus Eis, hydratisierten Mineralen und Salzen durch die Kruste nach oben gedrungen und hat den Berg aufgebaut. Die steilen Flanken sehen verglichen mit der Umgebung relativ frisch aus. Das Gipfelplateau gleicht in seiner Struktur eher der Umgebung, was dafür spricht, dass Ahuna Mons die Kruste durchbrochen und Teile davon mit nach oben gedrückt hat.

Da der Berg keinen direkten Bezug zu Einschlagkratern hat, stützt er die Theorie, wonach es unter der äußeren Kruste dauerhaft Reservoirs aus flüssigem Kryo-Magma gibt. Laut Modellrechnungen könnte dieses aus dem Inneren durch die Kruste bis in 5000 Meter Höhe aufsteigen. Auch befindet sich unter Ahuna Mons, in etwa 36 Kilometer Tiefe nahe der Kruste-Mantel-Grenze, eine Schwereanomalie, was für ein unterirdisches Reservoir spricht.

Aber was hält die Masse in der Tiefe flüssig? In Frage kommt hier vor allem Restwärme aus der Phase der Planetenentstehung. Damals, als sich Ceres gerade erst aus einem Klumpen aus Gas und Staub gebildet hatte, setzte der Zerfall des Isotops Aluminium-26 viel Hitze frei, von der ein Teil bis heute im Gesteinskern von Ceres gespeichert sein könnte. Der untere Bereich des Mantels sollte daher bis heute flüssig sein: entweder in Form einer global zusammenhängenden Schicht aus Schlamm und Salzlauge oder in isolierten Taschen.

Doch warum ist Material aus dem tiefen Inneren nur bei Ahuna Mons bis an die Oberfläche gestiegen, beziehungsweise warum sieht man bloß dort weiße Flecken auf den Hängen? Eine mögliche Antwort ist, dass solche Salzspuren einst auch an anderen Bergen sichtbar waren, aber mittlerweile wieder verschwunden sind. Für diese Theorie spricht das Alter von Ahuna Mons und vielen anderen Stellen mit hellen Flecken. Sie alle sind vergleichsweise jung, wie die Kraterdichte in den jeweiligen Gegenden zeigt (eine bewährte Methode, um das Alter einer Region auf Himmelskörpern ohne Atmosphäre abzuschätzen).

Während die meisten Partien von Ceres' Oberfläche mindestens eine Milliarde Jahre alt zu sein scheinen, kom-



SCHWEREFELD Über Schwankungen in der Bahn der Dawn-Sonde ließ sich die Masseverteilung unterhalb der Kruste von Ceres rekonstruieren (rechts). Demnach ist die Dichte im Inneren mal etwas größer (rot) und mal etwas geringer (grün).

men Ahuna Mons, Occator, Dantu und Haulani bloß auf einige wenige bis einige Dutzend Millionen Jahre. Sprich: Wahrscheinlich sehen wir nur die Spuren der jüngsten kryovulkanischen Aktivitäten. Ältere Flecken dürften hingegen schlicht wieder verschwunden sein, entweder durch Austrocknen der Tone und Salze, wegen nachfolgender Einschläge oder Verwitterung der Oberfläche durch interplanetaren Staub. Demnach käme es auf Ceres alle paar Dutzend Millionen Jahre zu kryovulkanischen Ausbrüchen – für Menschen ein sehr langer Zeitraum, nach kosmischen Maßstäben aber bloß ein Wimpernschlag.

All das unterstützt die Annahme, dass es im Untergrund eine dauerhaft flüssige Schicht aus Schlamm und Salzlauge gibt. Natürlich fragen wir uns, ob die warme, feuchte Umgebung vielleicht sogar Voraussetzungen für mikrobielles Leben bieten könnte. Bisher wissen wir das nicht. Die Bedingungen in der Tiefe von Ceres wären zweifellos extrem. Andererseits: Auf der Erde haben sich manche Bakterien und Algen in ähnlich salzreichen Umgebungen angesiedelt. Ob dies auch auf Ceres der Fall ist, wird erst eine mögliche Folgemission von Dawn klären können. Dabei könnte man zum Beispiel eine Materialprobe sammeln und zur Erde bringen, wie dies in den nächsten Jahren auf dem Mars geplant ist.

Mit einer Folgemission ließe sich vielleicht auch Näheres über die Herkunft von Ceres klären: Der hohe Anteil an Kohlenstoff, Kohlenwasserstoffen und Ammonium an der Oberfläche spricht dafür, dass der Zwergplanet in einer

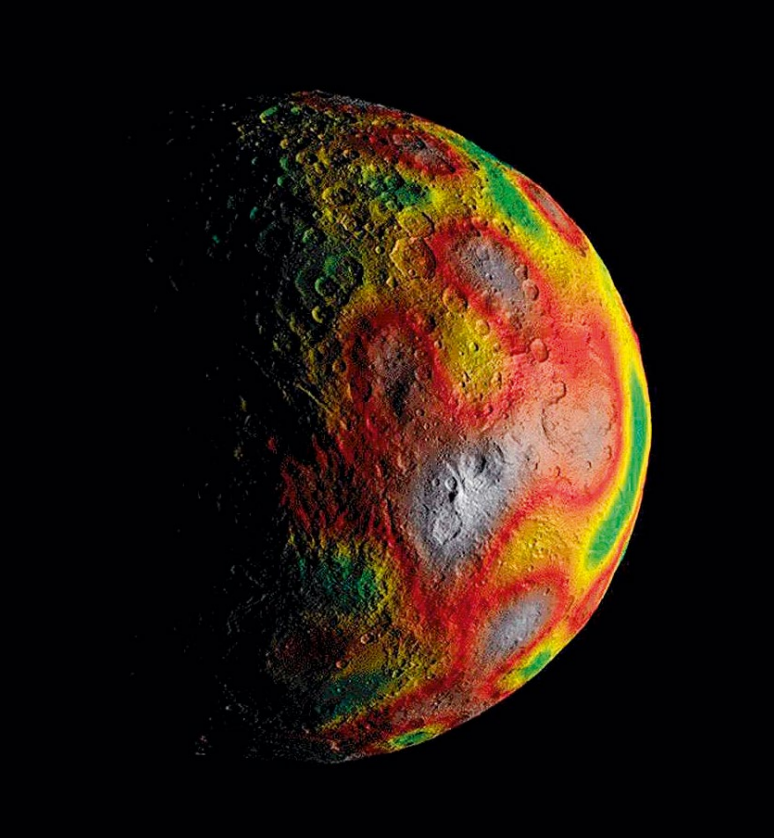


Mehr Wissen auf
Spektrum.de

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

NASA/JPL

NASA/JPL/CAUTEC/UNCLAMPS/DLR/IDA (P1422083)



NASA/JPL-CALTECH/UMCP/SDI/IDA (P/PAZ083)

kälteren Umgebung als seiner gegenwärtigen Umlaufbahn entstanden ist. Womöglich handelte es sich einst um einen so genannten Zentaur, der jenseits der Bahn von Jupiter auf einem instabilen Orbit um die Sonne driftete und irgendwann nach innen wanderte. Es ist aber ebenso denkbar, dass Ceres von Anfang an ein Objekt des Asteroidengürtels war. In diesem Fall würden die hohen Anteile von Kohlenstoff und Ammonium auf Kometeneinschläge zurückgehen.

Von Ceres zu Europa, Ganymed und Enceladus

Schon jetzt hilft Ceres dabei, unser Bild von anderen möglichen Habitaten für außerirdische Mikroben zu schärfen. Auch unter den Eispanzern der Jupitermonde Europa und Ganymed sowie des Saturnmonds Enceladus gibt es vermutlich ausgedehnte Wasseransammlungen. Bei diesen liefert der schwankende Abstand zum Mutterplaneten und den benachbarten Monden die Wärme: Die wechselnde Schwereanziehung knetet das Innere der Monde laufend durch, Planetenforscher sprechen von »Gezeitenreibung«. Sie schmilzt die untere Seite der Eispanzer, die Europa, Ganymed und Enceladus umgeben, und hält sie dauerhaft flüssig.

Bisherige Raumsonden konnten bei den Eismonden lediglich indirekt auf diese Ozeane schließen, etwa durch Geysire an der Oberfläche. Über die Situation in der Tiefe weiß man dagegen sehr wenig. Ceres könnte wichtige Informationen darüber liefern, was man dort erwarten darf, denn ihre Oberfläche ähnelt möglicherweise dem Grund der Ozeane auf den Eismonden.

Wenn Sie nun erneut stutzen, kann ich nur auf eine Binnsweisheit der Planetenforschung verweisen: So gut wie alle Himmelskörper verändern sich und können sich im Lauf von ein paar Milliarden Jahren grundlegend wandeln. So könnte auch Ceres nach ihrer Entstehung über einen ähnlichen Eispanzer verfügt haben wie die erwähnten

Eismonde. Doch wenn dem so war, wohin ist diese Frosthülle dann verschwunden? Ceres erfährt so gut wie keine Gezeitenreibung, da kein massereicher Körper in der Nähe ist. Aber das bereits erwähnte Aluminium-26 dürfte binnen der ersten Million Jahre einen enormen Hitzeschub verursacht haben. Er hat vielleicht den einstigen Eispanzer teilweise abschmelzen lassen. Beim Kontakt der Schmelze mit den darunterliegenden Schichten hätten sich dann Tonminerale und Salze gebildet, und ein Teil des Schmelzwassers wäre in den Untergrund gesickert.

Das Ganze wäre sehr früh in Ceres' Entwicklung passiert. Wahrscheinlich hätte der Zwergplanet einen Teil seines Eispanzers noch länger behalten. Doch auf seiner elliptischen Bahn näherte er sich immer wieder der Sonne an, wobei das verbliebene Eis im Lauf mehrerer Milliarden Jahre vollständig sublimiert sein müsste. Und das Wasser im Untergrund wäre ohne Schutzschicht größtenteils gefroren. Nur dort, wo Salz den Gefrierpunkt herabsetzt, würde es bis heute eine zähflüssige Salzlauge bilden.

Stimmt dieses Szenario, hätte Dawn womöglich mehrere Jahre lang den Boden eines ausgetrockneten Ozeans untersucht. Ein Ozean, wie es ihn an anderen Stellen des Sonnensystems nach wie vor gibt und den wir etwa beim Jupitermond Europa in den nächsten Jahrzehnten näher untersuchen könnten. Damit hat die Mission eine Kernerkennnis der Weltraumforschung untermauert: Am ehesten lässt sich die Vielfalt des Kosmos verstehen, wenn wir die Erkenntnisse verschiedener Missionen zusammenführen. Egal ob sie von Pluto stammen, von Jupiter oder Saturn – oder von einem unscheinbaren Zwergplaneten in der Kälte des Asteroidengürtels.

Zum Ende der Mission hat Dawn sich Ceres übrigens so stark angenähert wie nie zuvor: In den letzten Monaten flog die Sonde auf stark elliptischen Bahnen, die bis zu 35 Kilometer an die Oberfläche heranführten. Hier entstanden einige der eindrucksvollsten Bilder der Mission. Im Oktober 2018 war dann der Treibstoff aufgebraucht, und die NASA parkte die inaktive Sonde in einer stabilen Umlaufbahn um Ceres.

Ein gezielter Absturz, wie ihn etwa die Saturn-Sonde Cassini zum Abschluss unternommen hatte, kam nicht in Frage. Denn womöglich hätten wir Ceres dadurch mit irdischen Mikroben verunreinigt, was eine künftige Suche nach Leben dort womöglich verfälschen würde. ◀

QUELLEN

Russell, C. T. et al.: Dawn arrives at Ceres: Exploration of a small, volatile-rich world. *Science* 353, 2016

Smith, K. T.: Dawn explores the dwarf planet Ceres. *Science* 353, 2016

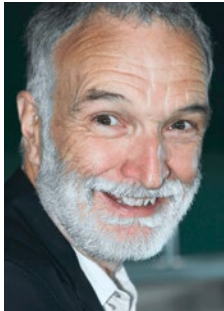
Williams, D. A. et al.: Introduction: The geologic mapping of Ceres. *Icarus* 316, 2018

LITERATURTIPP

Jaumann, R. et al.: Expedition zu fremden Welten. 20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem. Springer, 2018

Ralf Jaumann beschreibt gemeinsam mit vier Kollegen die wichtigsten Himmelskörper des inneren Sonnensystems.

SCHLICHTING! DIE BLAUE STUNDE



Das Licht der tief stehenden Sonne interagiert besonders stark mit der Ozonschicht, die Gelb- und Orangetöne absorbiert und Blau hindurchlässt. Das verpasst der Atmosphäre einen speziellen Farbton.

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/1848334

Es war die Stunde, in der das Licht die Farben noch nicht hervorgeholt hat

Jorge Luis Borges (1899–1986)

▶ Während der Abend- und der Morgendämmerung beherrscht ein kräftiges blaues Licht den Himmel. Dabei ist oft von der blauen Stunde die Rede. Sie verbindet das Dunkel der Nacht mit dem Rot der tief stehenden Sonne. Viele Menschen fühlen sich von dem Phänomen berührt; Schriftsteller und Poeten haben es immer wieder beschrieben und besungen.

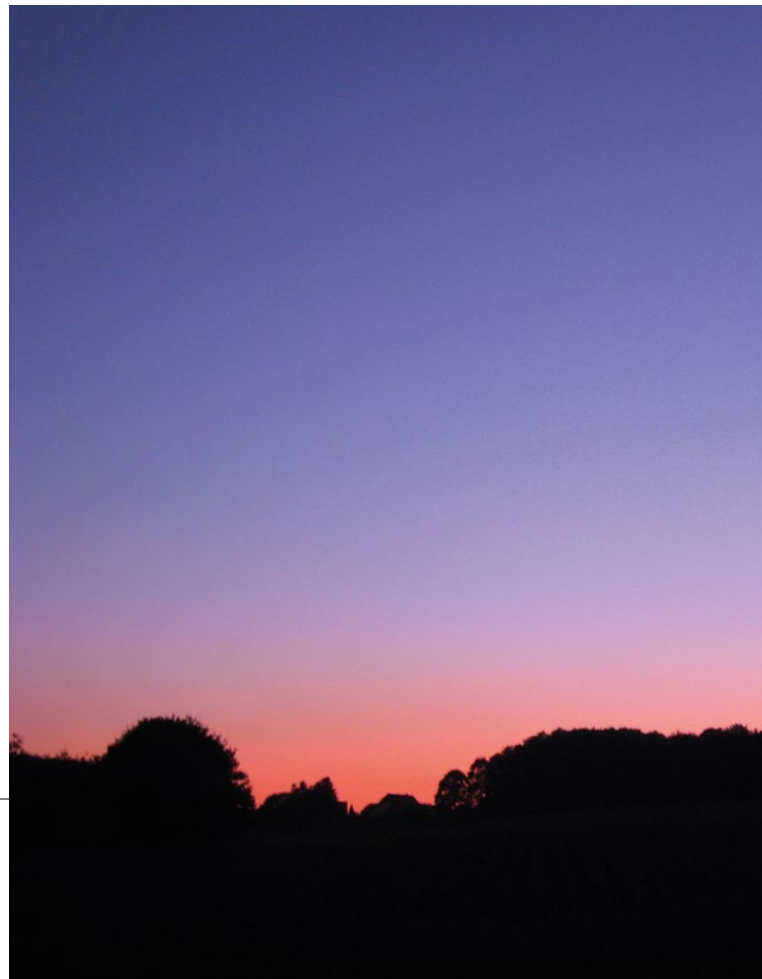
Jenseits aller romantischen Schwärmerei ist die Phase auch physikalisch bemerkenswert. In dieser Zeitspanne, in der sich die Sonne vom Beobachter aus gesehen etwa vier bis acht Grad unter dem Horizont aufhält, ist die spektrale Zusammensetzung des Blaus eine andere als die des Himmelblaus am Tag. Die Töne erscheinen uns zwar ähnlich, aber sie werden von ganz verschiedenen Vorgängen bestimmt.

Wenn die Sonne auf- oder untergeht, wirkt sie bekanntlich gelb bis rot. In besonders farbenprächtigen Fällen sind nicht nur sie selbst und von ihr beleuchtete Wolken in intensive Rottöne getaucht, sondern auch große Teile des sonst blauen Himmels.

Das weiße Sonnenlicht enthält eigentlich alle Spektralfarben. Allerdings zerlegen Wechselwirkungen mit der Materie es unter den passenden Bedingungen in seine einzelnen Anteile. Das bekannteste Ergebnis einer solchen Aufspaltung, bei der sich sämtliche Wellenlängen nach ihrer Größe sortiert beobachten lassen, ist wohl der Regenbogen. Er kommt durch Brechung und Reflexion der Strahlung in Wassertropfen zu Stande. Im sichtbaren Bereich erstreckt sich das Spektrum vom langwelligen Rot

FARBÜBERGANG Die heraufziehende Dämmerung beendet die blaue Stunde des frühen Morgens.

H. JOACHIM SCHLICHTING

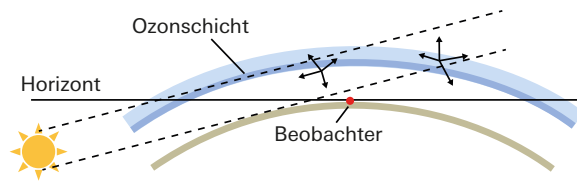


über Gelb und Grün bis hin zum kurzwelligem Blau und Violett.

Sobald das Sonnenlicht auf Luftmoleküle in der Atmosphäre trifft, lenkt die »Rayleigh-Streuung« es in alle Richtungen ab – die kurzwelligen Anteile wesentlich stärker als die langwelligen. Ganz grob kann man sich das mit Wogen auf dem Wasser veranschaulichen. Kleine Hindernisse beeinflussen vergleichbar dimensionierte Kräuselungen stark, wohingegen sich ausgedehnte Wellen davon kaum beeindruckt lassen.

Die Streuung durch die Luft hat eine für das Leben auf der Erde entscheidende Konsequenz: Tagsüber ist es nicht nur in Richtung der Sonne hell, sondern überall. Wir sind von einer Art indirekter dreidimensionaler Beleuchtung umgeben, deren Farbe sich aus der Summe der zahlreichen Streuvorgänge ergibt – das typische Himmelsblau. Es zeigt sich jedoch nur beim Blick durch dickere Schichten, ähnlich wie beim Wasser, das erst mit zunehmender Tiefe nicht mehr transparent, sondern azur erscheint (siehe »Spektrum« März 2020, S. 66).

Befindet sich die Sonne am Horizont, ist der Weg ihrer Strahlung durch die Atmosphäre zum Beobachter etwa 35-mal so lang wie vom Zenit. Deshalb werden bei niedrigem Stand wesentlich mehr kurz- als langwellige Anteile aus dem Licht herausgelenkt. Außerdem erfährt eine wachsende Zahl von Photonen so einen Streuvorgang nicht nur einmal, sondern gleich mehrfach. Insgesamt bleiben schließlich auf direkter Strecke zur Sonne fast nur Gelb und Rot übrig. Größere Partikel (Aerosole) streuen zusätzlich und lassen über die Sonnen-



LUFTFILTER Die Strahlen aus dem oberen Bereich der untergegangenen Sonne legen einen langen Weg durch die Ozonschicht am unteren Rand der Stratosphäre zurück (nicht maßstabsgetreu gezeichnet). Dabei verlieren sie Gelb- und Orangeanteile. Wir sehen daher fast nur noch gestreutes blaues Licht (Pfeile).

scheibe hinaus weite Teile des umgebenden Himmels rot erscheinen.

Steht die Sonne unterhalb des Horizonts, erreichen ihre Strahlen immer noch die hohen Bereiche der Atmosphäre. Im Prinzip wäre jetzt zu erwarten, dass auch der Zenit sein Blau einbüßt. Es tragen zwar die Photonen vom oberen Teil der Sonne mit seitwärts gestreutem Licht zur Farbe des Himmels bei, aber es werden immer weniger. Sie sollten sich zunehmend mit dem Rot zu einem grünlichen oder gelblichen Ton mischen. Doch der Zenit behält sein sattes Kobaltblau.

Schuld an diesem überraschenden Befund sind die in der unteren Stratosphäre vermehrt vorkommenden Ozonmoleküle. Sie absorbieren vor allem Gelb sowie Orange und sind für Blau weitgehend durchlässig. Die Ozonschicht wirkt daher wie ein den ganzen Himmel umspannender blauer Farbfilter. Er hindert die langwelligen Anteile der Dämmerungsstrahlung daran, den Zenit zu erreichen. Darum dominiert dort nach wie vor Blau. Entscheidend für die deutliche Wirkung ist der besonders weite Lichtweg von der tief stehenden Sonne durch das Ozon (siehe Grafik »Luftfilter«). Die Absorption fällt deswegen entsprechend groß aus.

Je weiter die Sonne sinkt, desto höher steigt auf der anderen Seite der Erdschatten als graublauer Bogen. Falls das Dämmerlicht stark genug ist, um auch am gegenüberliegenden Himmel als rötlicher Schein sichtbar zu werden, verschwindet dieser immer mehr im Erdschatten, der schließlich mit dem Nachthimmel verschmilzt.

Die Interaktion zwischen Sonnenlicht und Ozonschicht findet nicht nur morgens und abends statt. Der Blaufilter des Ozons ist am Tag genauso wirksam, allerdings ist dann der Weg der Strahlung durch die Schicht bedeutend kürzer. Die Rayleigh-Streuung ist wesentlich stärker und dominiert darum fast die gesamte Zeit.

Es ist erstaunlich, dass sich das so selbstverständlich erscheinende Blau im Zenit sowohl am Tag als auch am Übergang zur Nacht zwei gänzlich unterschiedlichen physikalischen Vorgängen verdankt. Man könnte fast den Eindruck gewinnen, es käme der Natur darauf an, das Himmelsblau auf jeden Fall zu erhalten.



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN RATIONALE ZAHLEN ZÄHLEN

Mengentheoretisch gesehen gibt es nicht mehr Brüche als natürliche Zahlen – eine der zahlreichen Tatsachen über unendliche Mengen, die der Intuition ins Gesicht schlagen. Wenn man die Abzählung der rationalen Zahlen geschickt gestaltet, kommen interessante geometrische Zusammenhänge zu Tage, auch zur Gestalt der Mandelbrot-Menge.



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

► [spektrum.de/artikel/1848328](https://www.spektrum.de/artikel/1848328)

► Wie häkelt man einen unendlichen Topflappen? Jedenfalls nicht eine Reihe nach der anderen, so wie es üblich ist. Man würde ja schon mit der ersten Reihe nicht fertig, bevor man die zweite überhaupt angefangen hat.

Vielmehr muss man diagonal häkeln. Das heißt, man lässt den Topflappen in Gedanken schräg nach unten hängen, wie sein echtes Vorbild an der Schlaufe, und häkelt dann horizontale Reihen: eine sehr kurze aus einer einzigen Masche, die nächste aus zwei Maschen und so weiter.

Auf die Dauer entsteht ein immer größer werdender dreieckiger Lappen, und seinem Wachstum nach unten sind keine Grenzen gesetzt. Man kann mit einem einzigen – unendlich langen – Faden eine ganze – unendlich große – Fläche mit Maschen bedecken.

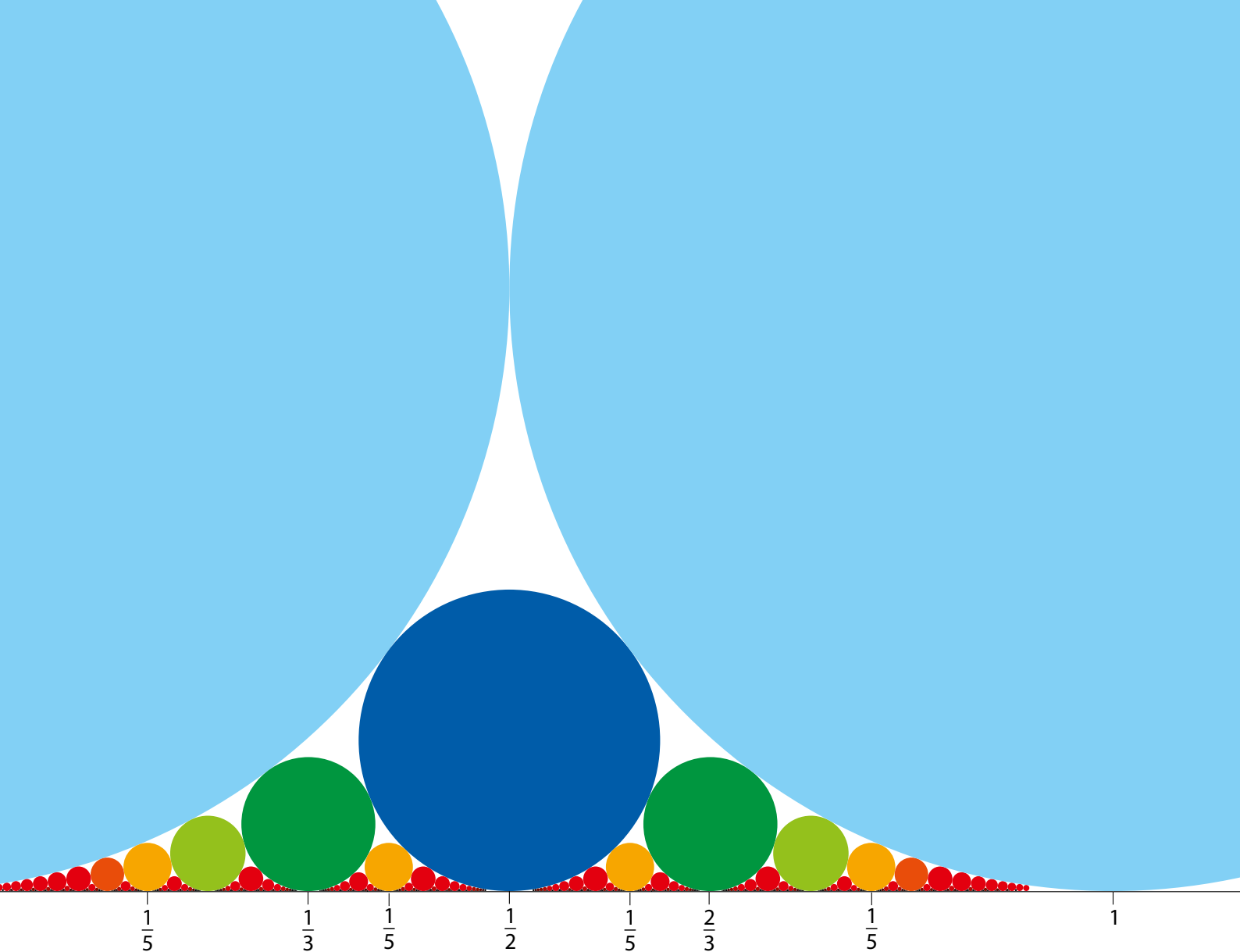
Selbstverständlich steht dahinter nicht das Ziel, einen unendlich großen Kochtopf, was immer das sein mag, verletzungsfrei anzufassen und zu transportieren. Vielmehr ist das Häkelrezept die Beweisidee für einen ehrwürdigen mathematischen Satz: Die Menge der rationalen Zahlen ist abzählbar. Es gibt gewissermaßen genauso viele Brüche mit natürlichen Zahlen im Zähler und im Nenner wie natürliche Zahlen überhaupt.

Ebenso klassisch wie der Satz ist die Verstörung, die er auslöst. Die natürlichen Zahlen liegen in jeweils gebühlichem Abstand zueinander auf der Zahlengeraden. Aber schon in dem Leerraum zwischen 1 und 2 drängeln sich unendlich viele rationale Zahlen, und zwischen beliebigen zwei von ihnen nochmals unendlich viele. So gesehen kommen auf jede natürliche Zahl unendlich viele Brüche. Und trotzdem sollen deren Anzahlen gleich sein?

Allerdings. Zum Beweis kann man alle Brüche in eine Tabelle schreiben, mit unendlich vielen Spalten für die Zähler und ebenfalls unendlich vielen Zeilen für die Nenner (siehe »Tabelle«). Gibt man jedem Bruch eine Nummer, und zwar in der Reihenfolge des Topflappenhäkeln, kommt offensichtlich jeder Bruch beim Nummerieren

0

CHRISTOPH PÖPPE



CHRISTOPH PÖPPE

FORD-KREISE Das Bild zeigt die Ford-Kreise zu den rationalen Zahlen zwischen 0 und 1. Der Kreis zur Zahl $\frac{p}{q}$ sitzt an der Stelle $\frac{p}{q}$ auf der Zahlengeraden und hat den Radius $\frac{1}{q^2}$.

irgendwann an die Reihe. Das heißt: Es gibt eine umkehrbar eindeutige Abbildung zwischen der Menge der natürlichen Zahlen (der Nummern) und derjenigen der Tabelleneinträge, die ihrerseits die Menge der rationalen Zahlen umfasst. In der Sprache der von Georg Cantor (1845–1918) begründeten Mengenlehre sind beide Mengen gleichmächtig. Eine andere Ausdrucksweise desselben Sachverhalts lautet: Die Menge der rationalen Zahlen ist abzählbar – was die harmloseste Form der Unendlichkeit ist.

Cantors Beweis dafür ist ohne Zweifel korrekt, leidet aber doch unter einem Schönheitsfehler. In der Tabelle kommt jeder Bruch mehrfach vor – unendlich oft, um genau zu sein. $\frac{2}{4}$ ist dasselbe wie $\frac{1}{2}$, $\frac{4}{6}$ ist gleich $\frac{2}{3}$ und so weiter. Entsprechend erhält jeder Bruch mehrere Nummern, und die umkehrbare Eindeutigkeit der Nummerierung ist dahin. Also darf man von allen Exemplaren eines

Bruchs bloß das vollständig gekürzte mitzählen und muss alle Tabelleneinträge, in denen Zähler und Nenner nicht teilerfremd sind (rot in »Tabelle«), beim Häkeln aussparen. Da sieht nicht nur der Topflappen ziemlich gerupft aus, es wird auch sehr mühsam, die Abzählungsabbildung anzuwenden. Welche Nummer hat $\frac{39}{63}$? Und welches ist die rationale Zahl mit der Nummer 42? Auf derlei Fragen gibt es zwar eindeutige Antworten, aber um sie zu finden, bleibt einem nichts übrig, als die Tabelle Schritt für Schritt bis zu dem entsprechenden Eintrag durchzugehen.

Es gibt eine Abhilfe: eine Abzählung der rationalen Zahlen, welche die oben angeführten Mehrdeutigkeiten vermeidet und kurze, leicht berechenbare Antworten auf Fragen der genannten Art liefert. Das Verfahren ist so elegant, dass es einen Platz in dem von Paul Erdős erdachten Buch findet, in dem Gott die besten Beweise für jeden mathematischen Sachverhalt notiert hat. Das ist jedenfalls die Auffassung von Martin Aigner und Günter Ziegler, die eine Sammlung buchwürdiger Beweise veröffentlicht und bereits für einen Folgeband Material gesammelt haben.

Für ihre Abzählung haben Neil Calkin von der Clemson University in South Carolina und Herbert S. Wilf von der

University of Pennsylvania ein altherwürdiges Verfahren im Wortsinn auf den Kopf gestellt: den Algorithmus, mit dem bereits Euklid den größten gemeinsamen Teiler zweier Zahlen bestimmte. Der Algorithmus nimmt als Input die natürlichen Zahlen a und b entgegen und lässt sich in moderner Pseudoprogrammiersprache so beschreiben:

- (1) Wenn $a = b$: Ende.
- (2) Wenn $a < b$: Ersetze (a, b) durch $(a, b-a)$.
- (3) Wenn $a > b$: Ersetze (a, b) durch $(a-b, b)$.
- (4) Gehe zu (1).

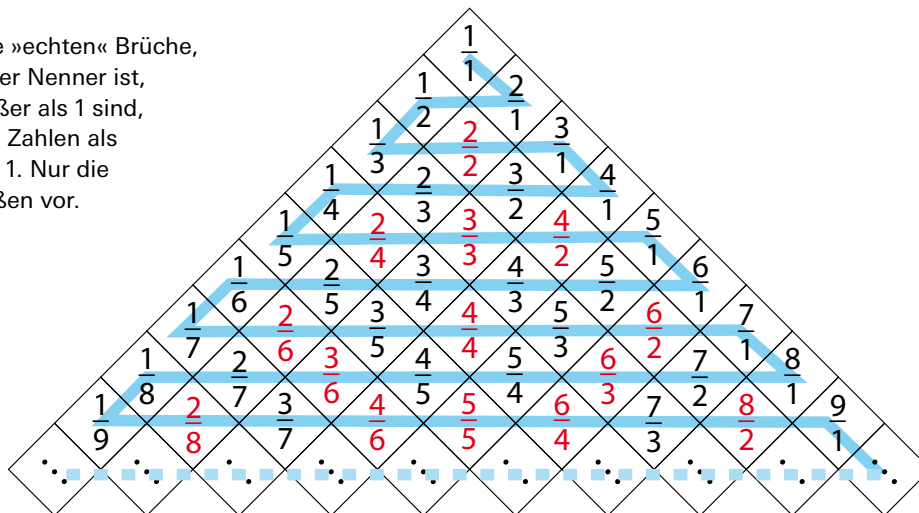
Es wird also stets die kleinere von der größeren der beiden Zahlen subtrahiert, bis beide gleich sind; dieses Endergebnis ist der größte gemeinsame Teiler von a und b . Wenn dabei die Zahl 1 herauskommt, dann sind a und b teilerfremd, und genau dann ist a/b ein vollständig gekürzter Bruch.

Für ihre Abzählung der rationalen Zahlen verwenden Calkin und Wilf genau die Zahlenpaare (a, b) , aufzufassen als die Brüche a/b , für die der euklidische Algorithmus das Endergebnis 1 liefert. Und um diese zu finden, lassen sie den Algorithmus gewissermaßen rückwärts laufen. Wenn der bei dem Zwischenergebnis (x, y) angekommen ist, dann war das unmittelbar vorhergehende Zahlenpaar entweder $(a, b) = (x, x+y)$ (Schritt 2 des Algorithmus) oder $(a, b) = (x+y, y)$ (Schritt 3). Ausgehend von dem Paar $(1, 1)$ entsteht durch die Rückwärtsverfolgung ein Baum mit zunächst den zwei Ästen $(1, 2)$ und $(2, 1)$; aus jedem Ast wachsen wieder zwei Äste heraus, und so weiter bis ins Unendliche (siehe »Baum«).

Dieser Baum enthält jede positive rationale Zahl genau einmal. Den Beweis erbringt der euklidische Algorithmus quasi im Vorübergehen: Ist ein vollständig gekürzter Bruch a/b gegeben, dann endet der Algorithmus, angewendet auf das Paar (a, b) , bei $(1, 1)$; und die Zwischenstationen, rückwärts gelesen, weisen den Weg von der Wurzel $1/1$ des Baums zu dem Platz, an den a/b steht. Der Bruch a/b kann auch nicht an mehreren verschiedenen Stellen im Baum stehen, denn sonst würde der euklidische Algorithmus auf zwei verschiedenen Wegen von a/b nach $1/1$ führen. Da er aber in jedem Schritt ein eindeutiges Ergebnis hat, kann es keine Verzweigung auf dem Weg von a/b nach $1/1$ geben.

Der Baum enthält nicht nur die »echten« Brüche, bei denen der Zähler kleiner als der Nenner ist, sondern auch diejenigen, die größer als 1 sind, und insbesondere die natürlichen Zahlen als spezielle Brüche mit dem Nenner 1. Nur die negativen Zahlen bleiben hier außen vor.

TABELLE Die Tabelle aller rationalen Zahlen ist hier zur Verdeutlichung um 45 Grad nach rechts gekippt dargestellt. Die Abzählung aller rationalen Zahlen folgt dem gedachten Häkelfaden (hellblau).



Aber das tut der Abzählbarkeit keinen Abbruch: Man muss bloß jedem positiven Bruch eine ungerade Nummer geben und seinem Negativen deren geraden Nachfolger.

Und die Abzählung des Baums selbst? Die geht wie beim Topflappenhäkeln: zeilenweise. Bruch Nummer 1 ist $1/1$, dann folgen $1/2, 2/1, 1/3, 3/2, 2/3, 3/1, 1/4 \dots$. Dabei zeigen sich erstaunliche Zusammenhänge. Fasst man den Baum der rationalen Zahlen als Stammbaum mit der Urmutter $1/1$ auf, leuchtet ja noch ein, dass die beiden Töchter einer beliebigen Zahl etwas miteinander zu tun haben. So ist der Zähler der rechten (großen) Tochter stets gleich dem Nenner der linken (kleinen). Aber dieselbe Beziehung gilt zwischen jeder Zahl im Baum und ihrer rechten Nachbarin, selbst wenn es sich um sehr entfernte Verwandte handelt. Zu allem Überfluss gilt die Beziehung auch dann noch, wenn man vom rechten Ende einer Zeile zum linken der Folgezeile springt.

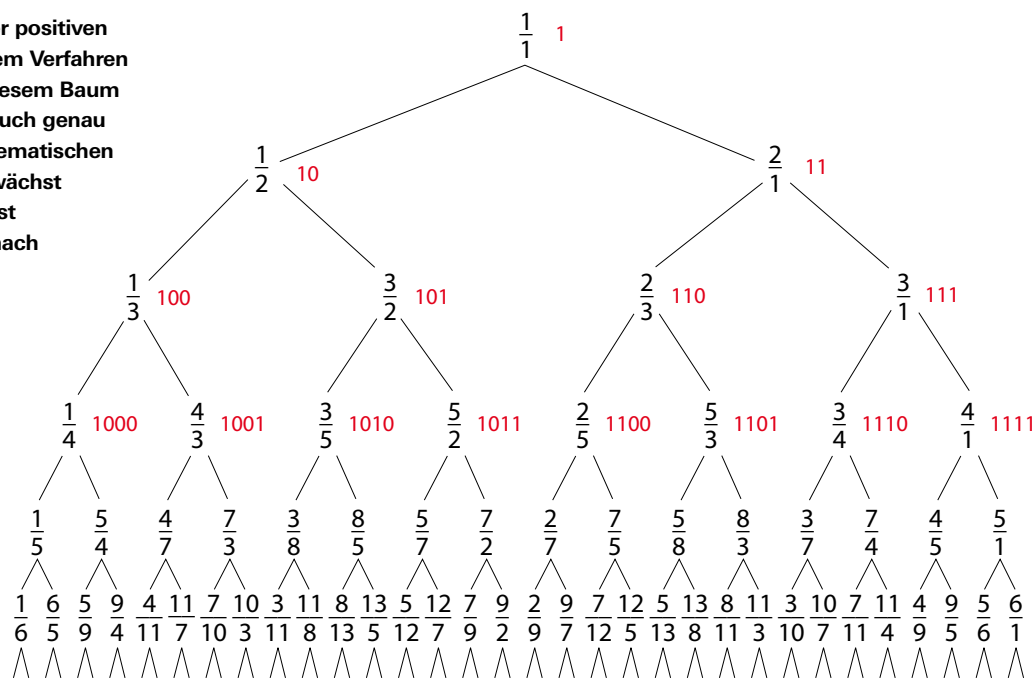
Man kann also den Calkin-Wilf-Baum häkeln, das heißt sich zeilenweise von links nach rechts von Element zu Element vorarbeiten. Im Gegensatz zu Cantors Topflappen hat jede Zeile nicht nur ein Element mehr als die vorige, sondern doppelt so viele, mit der Folge, dass der Topflappen nicht so schön quadratisch, sondern ausladend wie der Schalltrichter einer Trompete gerät. Aber für die Abzählbarkeit macht das keinen Unterschied.

Der Baum ist so regelmäßig gebaut, dass es sogar eine Funktion gibt, die besagt, wie man aus einer Zahl ihre rechte Nachbarin ausrechnet, oder eben die Anfangszahl der neuen Zeile. Sie lautet

$$S(x) = \frac{1}{2[x] - x + 1}$$

Dabei bezeichnet $[x]$ die größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich x ist. Da jede linke Tochter kleiner als 1 ist, gilt für sie $[x] = 0$, und dann ist leicht nachzurechnen, dass ihre rechte Schwester gleich $1/(1-x)$ ist. Wenn dagegen eine Zahl und ihre rechte Nachbarin keine Geschwister sind, muss

BAUM Die Abzählung der positiven rationalen Zahlen nach dem Verfahren von Calkin und Wilf: In diesem Baum taucht jeder (gekürzte) Bruch genau einmal auf. Wie bei mathematischen Baumstrukturen üblich, wächst der Baum von der zuoberst eingezeichneten Wurzel nach unten. In roter Schrift ist neben jedem Bruch seine Nummer im Binärsystem notiert.



CHRISTOPH FÖPPE

man im Baum bis zum kleinsten gemeinsamen Vorfahren aufsteigen. Da die Kinder jeder Zahl durch einfache Formeln bestimmt sind, rechnet man von diesem Vorfahren aus die Abstammungslinien abwärts: einmal die linke Tochter und dann lauter rechte, das andere Mal die rechte Tochter, gefolgt von lauter linken. Am Ende einer etwas längeren Rechnung steht die Bestätigung, dass die Formel für $S(x)$ auch in diesem Fall gilt. Schließlich stellt sich wundersamerweise heraus: Der Übergang von einer Zeile zur nächsten genügt ebenfalls der Formel.

Für die oben angesprochenen Fragen »Welche Nummer hat ein gegebener Bruch?« und »Was ist der Bruch zu einer gegebenen Nummer?« gibt es verblüffend einfache Antworten. Die wesentliche Idee besteht darin, die Nummern in der Abzählung des Calkin-Wilf-Baums im Zahlensystem zur Basis 2 (Binärsystem) zu schreiben (rote Zahlen in »Baum«). Dabei stellt sich heraus, dass mit jeder Zeile die Nummern um eine Binärstelle zulegen. Darüber hinaus dient die Nummer als eine Art Wegbeschreibung: Die erste Eins steht für »Geh zur Wurzel«. Die weiteren Binärziffern sagen dem Wanderer der Reihe nach an, ob er sich an der nächsten Weggabelung nach links (0) oder nach rechts (1) wenden soll. (Vorsicht – »links« und »rechts« sind nicht aus der Perspektive des Wanderers, sondern aus der des externen Betrachters zu verstehen!) Wenn die Ziffernfolge erschöpft ist, hat der Wanderer sein Ziel erreicht.

So findet man den Bruch zur Nummer. Für die umgekehrte Fragestellung genügt es, den Baum bis zur Wurzel hochzusteigen – das heißt den euklidischen Algorithmus auf das Zahlenpaar (Zähler, Nenner) anzuwenden – und nach jedem Schritt zu notieren, ob man den aktuellen Zustand »von links« (0) oder »von rechts« (1) erreicht hat, ob man also die linke Zahl von der rechten subtrahiert hat oder umgekehrt. Die Folge dieser Binärziffern, von

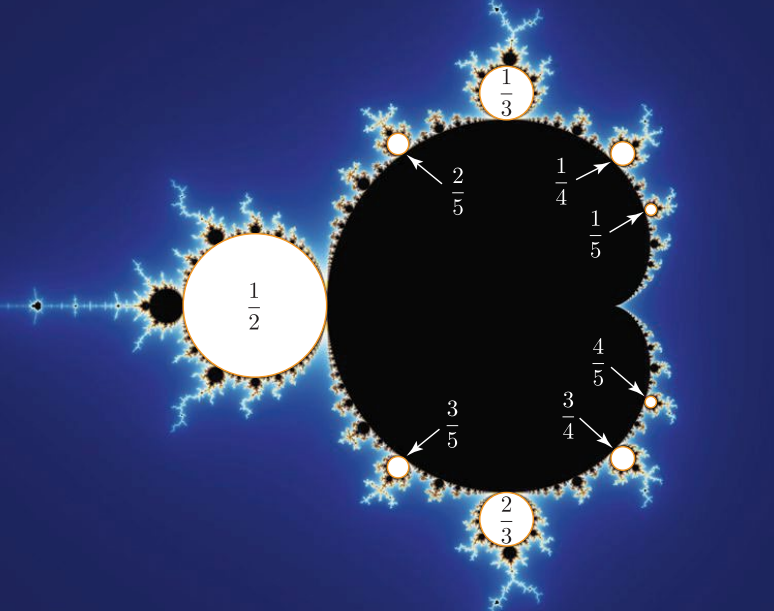
rechts nach links aufgeschrieben, ergibt die Nummer des Bruchs.

Einen Schönheitsfehler hat der Calkin-Wilf-Baum dann doch. In jeder Zeile folgen kleine und große Einträge ziemlich wild aufeinander. Kann man sie der Größe nach sortieren? Ja, und zwar wiederum auf erstaunlich einfache Weise. Dazu kehrt man in allen binär geschriebenen Nummern der Einträge die Ziffernfolge um und sortiert nach diesen »verkehrten« Nummern. Dann sind auch alle Einträge der Größe nach sortiert. Das gilt sogar zeilenübergreifend; man muss nur die Nummern vor dem Umkehren auf gleiche Ziffernzahl bringen, indem man sie bei Bedarf links mit Nullen auffüllt.

Das ist dadurch zu erklären, dass die letzte Verzweigung im Baum den größten Unterschied zwischen linker und rechter Tochter erzeugt, anschließend die vorletzte, und so weiter. Indem man die Ziffernfolge umkehrt, befördert man die Binärziffer, die dem größten Effekt entspricht, von der letzten auf die erste Stelle, die mit dem zweitgrößten Effekt auf die zweite, und so weiter. Also ist von zwei Einträgen der mit der größeren »verkehrten« Binärnummer auch der größere.

Diese Zusammenhänge hatten sich unter den Mathematikern zwar ein bisschen herumgesprochen, waren aber noch nicht geordnet aufgeschrieben worden. Das geschah erst in einer wissenschaftlichen Arbeit, deren Erstautor bemerkenswerterweise ein damals 14-jähriger Schüler ist. Aimeric Malter hörte 2011 auf einer Sommerschule der Bremer Jacobs University für Schüler und Studienanfänger zum ersten Mal von dem Problem und arbeitete die Sache dann zu einer preisgekrönten »Jugend forscht«-Arbeit aus.

Ein unvollendeter Topflappen, das heißt ein endliches Stück vom Calkin-Wilf-Baum, das bis zu einer gewissen Zeile reicht und nicht weiter, enthält dieselben Zahlen wie eine andere berühmte Abzählung der rationalen Zahlen,



TOU, E. R.: THE FAREY SEQUENCE FROM FRACTIONS TO FRACTALS. MATH HORIZONS 24, 2017, FIG. 6. MIT FRIHL. GEN. VON ERIC R. TOU. NUTZUNG GENEHMIGT VON TAYLOR & FRANCIS / CC BY

MANDELBROT-MENGE Auch die Mandelbrot-Menge trägt Ford-Kreise, aber nicht auf einer geraden Linie. Vielmehr verläuft das Intervall $[0, 1]$ entlang des Rands der zentralen Kardioide (Herzkurve).

die unter den Namen ihrer Entdecker Moritz Stern (1807–1894) und Achille Brocot (1817–1878) bekannt ist (siehe »Spektrum« Mai 2015, S. 64). Und wenn man die Elemente des Calkin-Wilf-Baums bis einschließlich Zeile n nach der Größe sortiert, sind sie sogar Stück für Stück identisch mit der n -ten Stern-Brocot-Folge.

Dabei hat das Bildungsgesetz der einen Folge mit dem der anderen auf den ersten Blick kaum etwas gemein. Die nullte Stern-Brocot-Folge ist definiert als $(\frac{0}{1}, \frac{1}{0})$. Dem Einwand, dass der zweite Term unzulässig ist, weil man durch null nicht dividieren darf, geht man elegant aus dem Weg, indem man »offiziell« nicht über den Bruch $\frac{a}{b}$ nachdenkt, sondern über das Zahlenpaar (a, b) . Das funktioniert auch mit dem folgenden Bildungsgesetz: Man verwandelt die n -te Stern-Brocot-Folge in die $(n+1)$ -te, wenn man zwischen je zwei benachbarte Elemente $\frac{a}{b}$ und $\frac{c}{d}$ deren »Medianten« einfügt. Hierbei handelt es sich um den Bruch $\frac{a+c}{b+d}$ – also das, was viele Schulkinder für die Summe von $\frac{a}{b}$ und $\frac{c}{d}$ halten, wenn sie beim Bruchrechnen nicht richtig aufgepasst haben. Und in der Tat macht der Mediant seinem Namen Ehre, denn er liegt größtmäßig zwischen den beiden Brüchen, aus denen er entsteht.

Somit sind die Elemente einer Stern-Brocot-Folge quasi von selbst nach Größe sortiert. Jede Folge enthält fast doppelt so viele Brüche wie ihre Vorgängerin. Damit sie tatsächlich identisch mit dem bei Zeile n abgeschnittenen Calkin-Wilf-Baum ist, muss man die randständigen Elemente $\frac{0}{1}$ und $\frac{1}{0}$ weglassen. Der australische Mathematiker Stephen P. Glasby hat das bewiesen, indem er für beide Folgen Nachfolgerfunktionen nach dem Muster von $S(x)$ fand und miteinander identifizierte.

So wie die Stern-Brocot-Folgen definiert sind, wird allerdings kein Topflappen daraus. Das Ganze fängt als Faden mit zwei Schlaufen an. Dann wird in jedem Schritt zwischen zwei benachbarte Schlaufen eine weitere eingehäkelt – was natürlich nur funktionieren kann, wenn der Faden beliebig dehnbar ist. Im Grenzwert wird er unendlich lang.

Immerhin ist in jedem Schritt dieses unendlichen Häkelns eine »junge«, soeben eingefügte Schlaufe beiderseits von älteren umgeben. Indem man die im nachfolgenden Schritt einzufügenden Schlaufen als die Kinder der jüngsten Schlaufe auffasst und den Beitrag der älteren außer Acht lässt, ergibt sich eine Art Stammbaum, der dem von Calkin und Wilf schon sehr ähnlich sieht: Jede Zahl in dem Baum hat eine linke und eine rechte Tochter. Nur ist in diesem Fall jede Zeile des Baums bereits nach der Größe sortiert.

Für den Medianten zweier Brüche und damit indirekt auch für die Bäume von Calkin/Wilf und Stern/Brocot gibt es eine interessante Visualisierung. Man legt dazu in Gedanken an jede rationale Stelle auf der Zahlengeraden ein Samenkorn und lässt ein kreisförmiges Pflänzchen daraus sprießen, und zwar zuerst die ganzzahligen, anschließend die mit Nenner 2 und so weiter. Je größer der Nenner, desto später keimt das Pflänzchen. Sobald sich zwei von ihnen irgendwo den Platz streitig machen, hören sie auf zu wachsen.

Wie sich herausstellt, ist das genau dann der Fall, wenn der Kreis zu dem Bruch $\frac{p}{q}$ den Radius $\frac{1}{2q^2}$ erreicht hat. Über der Zahlengeraden entsteht so eine dicht bewachsene Blumenwiese mit lauter kreisförmigen Blüten (siehe »Ford-Kreise«). Zwei Kreise zu aufeinanderfolgenden Einträgen einer Stern-Brocot-Folge berühren einander, und in dem Zwickel zwischen ihnen und der Zahlengeraden wächst der Mediant der beiden zu der dann noch erreichbaren Größe heran. Sie heißen Ford-Kreise nach Lester Ford, der sie 1938 ausführlich beschrieb.

Bemerkenswerterweise finden sich die Ford-Kreise an unerwarteter Stelle wieder, nämlich in der berühmten Mandelbrot-Menge (siehe Bild »Mandelbrot-Menge«). Das »Apfelmännchen« besteht aus einem zentralen »Apfel« – der offizielle Name ist »Kardioide« – mit unendlich vielen Auswüchsen, die wiederum aus Kreisen mit Auswüchsen bestehen. Diese Kreise sind so groß und so angeordnet wie die Ford-Kreise.

Man muss sich nur das Intervall von null bis eins aus dem Umfang des Apfels aufgewickelt vorstellen, mit der Null an der Singularität, also der Stelle rechts, wo der Stiel gegessen hat, dann im Gegenuhrzeigersinn rund um den Apfel, bis die Eins wieder in der Singularität landet. Diesen merkwürdigen Zusammenhang und einiges mehr hat der US-amerikanische Mathematiker Robert Devaney von der Boston University ausgearbeitet. ◀

QUELLEN

Aigner, M., Ziegler, G.: Das Buch der Beweise. 5. Auflage, Springer, Berlin 2018

Calkin, N., Wilf, H.S.: Recounting the rationals. The American Mathematical Monthly 107, 2000

Glasby, S.P.: Enumerating the rationals from left to right. The American Mathematical Monthly 118, 2011

Malter, A. et al.: New looks at old number theory. The American Mathematical Monthly 120, 2013

Tou, E.R.: The farey sequence. From fractions to fractals. Math Horizons 24, 2017



FRANZISCHÄDEL, FLORIAN FREISTETTER, DE PRESSE // CC BY SA 4.0, CREATIVE COMMONS, ORG.U/UC/US/ES/BY/SA/4.0/LEGALCODE

FREISTETTERS FORMELWELT JENSEITS VON EUKLID

**Einige mathematische Formeln sind selbst-
erklärend. Andere versteht man selbst
nach Jahrtausenden nicht. Und manchmal
trifft beides gleichzeitig zu.**

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

► spektrum.de/artikel/1848337

Die Formel könnte kaum einfacher sein:



Sie besagt, dass die Linie zwischen A und B parallel zu der zwischen C und D verläuft – das entsprechende mathematische Symbol zeigt grafisch, was gemeint ist. Einleuchtender kann Geometrie kaum sein. Parallelen beschäftigen Wissenschaftler jedoch schon seit mehr als 2000 Jahren. Denn sie haben unerwartete Konsequenzen, die sich von der menschlichen Wahrnehmung der Welt bis hin zu der Frage nach der Form des Universums erstrecken.

Dabei fing die Sache ganz harmlos an. Im 3. Jahrhundert v. Chr. verfasste der griechische Mathematiker Euklid sein berühmtestes Werk, die »Elemente«. Darin sammelte er nicht nur das gesamte damalige Wissen über Arithmetik und Geometrie, sondern leitete es aus wenigen grundlegenden Postulaten ab.

Fünf solcher Axiome benötigte der Gelehrte, darunter die Behauptung, man könne von jedem Punkt zu einem anderen eine Linie ziehen. Diese Annahme wird kaum jemand bestreiten. Euklid hielt sie für so fundamental, dass er sie ohne Beweis voraussetzte. Die Postulate zwei bis vier sind ebenso kurz und eingängig.

Doch das fünfte fällt aus der Reihe. Modern ausgedrückt lässt es sich so formulieren: Zu einer Geraden kann man nicht mehr als eine Parallele ziehen, die durch einen vorgegebenen Punkt verläuft, der außerhalb dieser Parallele liegt.

Beim ersten Lesen ist der Satz nicht sofort verständlich – und Euklids ursprüngliche Formulierung fiel wesentlich komplizierter aus. Vor allem ist nicht ersichtlich, warum das ein Axiom sein soll. Vielmehr

müsste sich die Aussage aus den Postulaten ableiten lassen. Euklid versuchte es, scheiterte aber daran. Deswegen blieb ihm nichts anderes übrig, als ein fünftes Postulat zu definieren.

Im Lauf der Zeit versuchten Mathematiker immer wieder, den Beweis zu führen, der Euklid misslang. Erst im 19. Jahrhundert fand sich eine Lösung, als man versuchsweise das Gegenteil annahm. Was würde passieren, wenn das fünfte Postulat falsch wäre? Überraschenderweise zeigte sich: Auch dann lässt sich eine konsistente Geometrie konstruieren. Sogar zwei verschiedene Versionen, die heute als »elliptische« und »hyperbolische« Geometrie bekannt sind.

Im Gegensatz zur »euklidischen Geometrie«, die flache Räume beschreibt, kommen die beiden anderen in gekrümmten Umgebungen zum Einsatz. Will man beispielsweise auf der Oberfläche der Erde Messungen anstellen, muss man das mit den Formeln der elliptischen Geometrie tun, in der die Winkelsumme eines Dreiecks mehr als 180 Grad betragen kann. Ein hyperbolischer Raum ist hingegen negativ gekrümmt, wie ein Sattel.

Angesichts des Universums ist immer noch unklar, welche Art Geometrie man benutzen soll. Ist der Kosmos flach oder gekrümmt? Die bisherigen Daten deuten auf eine ebene Geometrie hin, sie sind aber bei Weitem nicht genau genug, um die Frage endgültig zu klären.

Auch die menschliche Wahrnehmung des Raums scheint nicht der euklidischen Geometrie zu folgen. Der Psychologe Walter Blumenfeld ordnete 1913 in einem Experiment zwei Reihen von Lampen so an, dass Versuchspersonen sie als parallel empfanden. Dafür musste er die Leuchtmittel allerdings entlang gekrümmter Linien aufstellen. Da ist es nicht verwunderlich, dass Euklid solche Probleme mit Parallelen hatte.

REZENSIONEN




UMWELT KLIMAWANDEL AUF SPITZBERGEN

Kaum einen Ort trifft die Erderwärmung härter als Spitzbergen. Die Journalistin Line Nagell Ylvisåker porträtiert die Veränderungen des Lebens in der Arktis.

► Ziele für 2035 und 2050, Horror-szenarien für 2100: Irgendwie scheint die Klimakrise noch immer weit weg – oder? Nicht so für Line Nagell Ylvisåker. Die norwegische Journalistin lebt seit 15 Jahren auf Spitzbergen, jenem Teil der Welt, der neben einigen anderen Inseln den Klimawandel vielleicht am stärksten spürt: 2016 lag dort die Jahresdurchschnittstemperatur 6,6 Grad über dem langjährigen Mittel, der Niederschlag übertraf den historischen Durchschnitt um mehr als 60 Prozent.

In »Meine Welt schmilzt« trägt die Autorin in lebendigen Szenen die Veränderungen rund um ihre Wahlheimat zusammen, geht deren Ursachen auf den Grund und erläutert verständlich die Klimakrise. Ihr Leitmotiv: »Ich wollte verstehen, was eigentlich vor sich geht, wie die Naturvorgänge zusammenhängen, wie das Klima funktioniert, wie sich das Wetter hier auf der Inselgruppe und im Rest der Welt ändert, falls oder wenn die Arktis schmilzt.« Es kulminiert in der Frage: »Soll ich mit meiner Familie hier bleiben?«

Man merkt schnell, dass die Autorin ihr Handwerkszeug gelernt hat: Mit der dramatischen Nacherzählung eines Lawinenunglücks aus der Perspektive überlebender Verschütteter beginnt das Buch. Mitten in ihrer Heimatstadt Longyearbyen, in einem Stadtteil, der noch nie von einer Lawine getroffen wurde, sterben Menschen in ihren Häusern. »Sie wurde quer durch den Raum geschleudert und knallte mit dem Kopf gegen etwas Hartes. Erst mit dem Hinterkopf, dann mit der Stirn«, heißt es im Einstieg. »Darauf folgt ein leises Sausen, und sie begriff, dass es der Schnee war, der den Raum füllte.«



LONGYEARBYEN Die Stadt ist das Verwaltungszentrum der Inselgruppe Spitzbergen im arktischen Eismeer.



So dramatisch setzt sich das Buch nicht fort, doch das Muster zieht sich durch. Reist Ylvisäker mit Polarforschenden auf einem Schiff durch die Arktis, schildert sie ihr Ringen mit der Seekrankheit. Geht es um die Klimawandelfolgen für die Eisbären, erzählt sie von einer nicht ungefährlichen Urlaubsbegegnung ihrer Familie mit den bedrohten Riesen. Persönliche und überlieferte Erfahrungen sowie solide Recherchen zeichnen eindringlich und spannend ein Bild davon, wie sich das Leben auf Spitzbergen in wenigen Jahrzehnten grundlegend verändert hat und der Wandel in vollem Gang ist.

Die Autorin unterschlägt dabei nicht die Skepsis einzelner Alteingesessener, die sich angesichts der Wetterextreme an frühere Zeiten erinnern, in denen dies oder jenes schon einmal besonders war, und die deshalb den menschlichen Anteil am Klimawandel anzweifeln. Ylvisäker stellt dem jedoch stets die Fakten und Analysen der Wissenschaft entgegen, aus denen schnell klar wird, dass die heutigen Veränderungen in der Arktis etwas Systematischeres, Dramatischeres sind als singuläre Wetterphänomene der Vergangenheit. Dennoch heißt es vereinzelt meist nur: »Gegenwärtig gibt es mehr Fragen als Antworten.« »Meine Welt schmilzt« ist reich an Gesprächen mit besorgten Forschenden aus Meteorologie, Klimawissenschaft, Ozeanologie oder Ökologie. Doch es ist das Extreme ihrer Beobachtungen, das erschüttert.

Im Verlauf des Buchs erfährt man, wie einschneidend sich das Leben auf Spitzbergen bereits gewandelt hat: die

Angst vor Lawinen und Bären, die auf Nahrungssuche immer häufiger in Siedlungen eindringen; der Stress durch den Tourismus, den das ausbleibende Eis in der arktischen See erst ermöglicht hat; die Gefährdung des Saatgutturorsors infolge des tauenden Permafrosts. Die Liste ließe sich fortsetzen. Es ist dieser Zusammenhang zwischen den für alle sichtbaren Veränderungen der Welt um sie herum, den daraus resultierenden Ängsten und Nöten und der eindeutigen Verknüpfung mit dem menschlichen Handeln, die Ylvisäkers Buch so eindringlich machen. Auf Spitzbergen ist die Klimakrise schon heute Realität. Das Werk holt die Folgen für alle, denen die Krise noch weit weg scheint, nah heran und verwandelt abstraktes Wissen in menschliche Schicksale, wie sie zunehmend auch in anderen Teilen der Welt zum Alltag werden.

»Ich wollte verstehen, wie die Naturvorgänge zusammenhängen«

Line Nagell Ylvisäker

Der Journalistin ist es gelungen, in einer Art großem Feature spannende Fakten über Spitzbergen, die Arktis und das Klima ebenso wie die Dringlichkeit des Handelns gegen die Klimakrise zu vermitteln, ohne zu moralisieren. Das zeigt nicht zuletzt ihr persönliches Fazit auf die Frage, ob sie mit ihrer Familie die Insel wieder verlassen werde: »Vielleicht. Aber im Moment ist das hier unser Zuhause. (...) Aber das Spitzbergen, das meine Urenkel bewohnen oder besuchen werden, wird anders aussehen als heute. Vielleicht gibt es die Arktis dann nicht mehr.«

Björn Lohmann ist Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkten in den Lebens- und Umweltwissenschaften.

RELIGION VIEL LÄRM UM NICHTS

Hat Jesus die Kreuzigung überlebt? Mit dieser gewagten These stellt der Historiker Johannes Fried die Überlieferung des Apostels Paulus in Frage.

► Liebhaber von Krimis kennen den Satz, mit dem Gerichtsmediziner die Ermittler zur Weißglut bringen: »Näheres erst nach der Obduktion.« Diese für die Wahrheitsfindung entscheidende Aussage könnte als Lesekriterium für das neue Buch des Historikers Johannes Fried gelten. Denn seine Grundthese beruht auf einer einzigen, gewagten Annahme: Jesus von Nazareth habe die Kreuzigung überlebt.

Demnach lebte er anschließend einige Jahre weiter, möglicherweise in Ägypten oder Nordarabien. Etwas später habe Paulus aus Tarsus nach einer Vision die Idee der Auferstehung Christi von den Toten propagiert. Die echten Anhänger Jesu, die wussten, dass er gar nicht gestorben und nur ein gewöhnlicher Wanderprediger war, habe Paulus durch seine Auferstehungstheologie und massive Verleumdungen bedrängt.

Damit, so der Autor, prägte Paulus die nächsten 2000 Jahre der Geschichte der christlichen Kirchen in seinem Sinn, wodurch das wahre Schicksal von Jesus in Vergessenheit geriet. Aber hatte er wirklich eine Kreuzigung überlebt? Ein medizinisches Gutachten wäre nützlich, um Frieds gewagte These zu bestätigen.

Die Frage nach der Historizität der Geschichte Jesu ist nicht neu. Seit der ersten kritischen Interpretation der biblischen Schriften (die immerhin vor gut 300 Jahren begann) hat man immer wieder darum gerungen, was an den Evangelien und anderen neutestamentlichen Überlieferungen wie den Briefen von Paulus wahr ist.

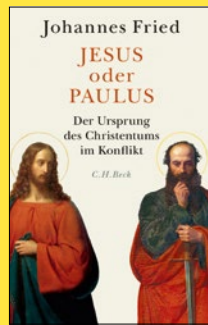
Die Forschung in dem Bereich steht nie still. Immer wieder bewerten Experten anerkannte Thesen neu oder Funde antiker Fragmente entfachen angeregte Debatten. Selbst die Zweiquellentheorie über die Entstehung der Evangelien, die lange als unbestritten

galt, kann von einem Tag auf den anderen Makulatur werden.

In diesem Umfeld bewegt sich Frieds Buch: Nicht das Evangelium nach Markus, das lange als das älteste galt, sondern das vermeintlich jüngste nach Johannes gebe die Geschehnisse um die Kreuzigung Jesu am genauesten wieder. Demnach wurde Jesus rechtzeitig vor dem Exitus von seinem Leid am Kreuz befreit.

Grund für die Annahme ist das Handeln der römischen Infanteristen: Sie stellten fest, Jesus sei schon tot – aber zur Sicherheit habe einer der Soldaten seine Lanze in seinen Körper gestoßen, wodurch Blut und Wasser aus der Wunde austraten. Fried entwickelt daraus die These, der Speerstich habe zu einer unbeabsichtigten Entlastungspunktion bei einem hämorrhagischen Pleuraerguss (einem Erguss im Brustkorb) geführt, den Jesus durch die Folterung erlitten habe. Das Ausströmen von Blut und Wasser beweise, dass er überlebt habe, so Fried.

Johannes Fried
JESUS ODER PAULUS
Der Ursprung des Christentums im Konflikt
C.H.Beck,
München 2021
200 S., € 22,-



Selbst wenn man diese Schilderung ernst nimmt, muss Jesus nicht zwingend weitergelebt haben. Der Ausdruck »Blut und Wasser« lässt sich symbolisch deuten, wie es in religiösen Texten häufig zu erwarten ist. Zudem ist im Bibeltext von der »Seite« die Rede, aber Fried behauptet, der Lanzenstich sei in die rechte Körperseite eingetreten, habe das Rippenfell durchstoßen – ohne das Lungenfell zu beschädigen – und sei in den unteren

Teil der mit Exsudat (Wundflüssigkeit) gefüllten Pleurahöhle gelangt. Zufälligerweise habe der Legionär mit dem Präzisionswerkzeug »Lanze« das medizinisch Richtige getan. Bei einem solchen Speerstich müsste der Soldat Linkshänder gewesen sein. »Pleura« lässt sich allerdings auch mit »Brust« übersetzen, also kann der Stich überall im Brustbereich gelandet sein. Eine gerichtsmedizinische Untersuchung wäre daher wirklich hilfreich.

Die wackelige These nimmt Fried als Ausgangspunkt für einen Rundumschlag gegen das Christentum und insbesondere gegen Paulus, der die christliche Theologie mit seinem Auferstehungsmythos geprägt habe. Die Streitigkeiten unter den ersten Christen seien dafür Beweis genug.

Dabei ist lange bekannt, dass sich die Anhänger Jesu nicht immer einig waren – und zwar nicht erst nach der Kreuzigung, sondern schon zu seinen Lebzeiten. Spuren davon finden sich überall im Neuen Testament. Im Lauf



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

JAHRGANG 2020

— CD-ROM —

Die **Spektrum**-CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bildern) des Jahrgangs 2020 von **Spektrum** der Wissenschaft als PDF-Version. Die Artikel sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken.

Zur besseren Nutzung Ihres Heftarchivs finden Sie auf der CD zusätzlich das Register von 1978 bis 2020 als PDF-Datei.

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

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

der Jahrhunderte setzte sich mal die eine, mal die andere Theologie durch. Unterschiedliche Interpretationen des Glaubens sind die Regel und nicht die Ausnahme. Die vergleichende Religionswissenschaft zeigt, dass im Christentum dieselben Prozesse abliefen, wie sie sich in Glaubensgemeinschaften weltweit beobachten lassen: Religionen leben von der ständigen Selbstreflexion. Selbstverständlich ist die Rückkehr zur »ipsissima vox« (ureigene Stimme) der Religionsstifter immer ein holpriger Weg.

Interessant ist zudem die Rolle, die Fried Paulus zuschreibt: Der Apostel, der Jesus nicht gekannt hat, habe allein aus einer innerpsychischen Erfahrung heraus eine Theologie geformt, die nichts mit der echten Person zu tun habe. Die Auferstehungstheologie sei ein egoistisches Produkt eines machtbesessenen Visionärs. Beispielsweise finde man in Paulus' Briefen kaum Hinweise auf den historischen Jesus.

Abgesehen davon, dass Religion immer aus einer innerpsychischen Erfahrung entspringt, kann man es Paulus nicht vorwerfen, zu wenig auf geschichtliche Fakten eingegangen zu sein. Es handelt sich dabei um religiöse Texte, die eine vollkommen andere Zielrichtung haben, nämlich die theologische Reflexion. Es ist nicht verwunderlich, dass er die Ansprüche eines Historikers des 21. Jahrhunderts nicht erfüllt.

Es ist leider ebenso wenig klar, warum Jesus – wenn er denn die Kreuzigung überlebte – dem Treiben Paulus' kein Ende gesetzt hat. Schließlich hätte er die Möglichkeit und das notwendige Selbstbewusstsein besessen.

Auch das letzte Argument, das Fried gegen die Auferstehung Jesu aufbietet, überzeugt nicht. Die Inschrift im Jerusalemer Felsendom (zirka 690 n. Chr.), die Jesus als nicht gekreuzigten menschlichen Gesandten Gottes bezeugt, ist als Demütigung der oströmischen Christen zu verstehen, die Jerusalem im Jahr 637 den muslimischen Arabern kampflos übergeben mussten. Die Inschrift ist mit Sicherheit nicht der Beginn einer interreligiösen Diskussion.

Aus religionsgeschichtlicher Perspektive überzeugen die Gedankengänge Frieds nicht, da er seine Argumente aus einer einseitigen Interpretation des frühen Christentums entwickelt, die – wie das Vorwort vermuten lässt – aus einem persönlichen Konflikt mit der christlichen Religion zu entstammen scheint. Fried dankt dem Verlag für den Mut, sein Buch zu veröffentlichen. In gewisser Weise hat er damit Recht.

Christian Hellmann ist evangelischer Pfarrer und Journalist in Gelsenkirchen.

PHYSIKGESCHICHTE ANSCHAULICHE ERD- ROTATION

Der Wissenschaftshistoriker Michael Hagner findet Trost in den Schwingungen des berühmten Versuchs.

► Die Erde dreht sich. Das wissen wir, obwohl unsere Wahrnehmung etwas ganz anderes vermittelt. Denkt man nur kurz darüber nach, erscheint es merkwürdig, dass man nichts davon merkt – schließlich sausen wir mit Überschallgeschwindigkeit um den Erdmittelpunkt. Doch das ist nur scheinbar paradox. Erst nach mehr als 350 Metern weicht die Kreisbahn um einen Zentimeter von der Geraden ab. Wir bewegen uns also sehr schnell, aber die Bahn krümmt sich so sanft, dass wir praktisch nichts davon spüren. So kann man verstehen, warum es schwierig ist, die Erdrotation direkt zu messen, geschweige denn ein Experiment zu ersinnen, um sie zu veranschaulichen.

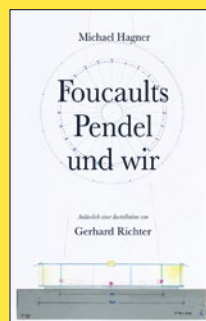
Genau das gelang dem französischen Physiker Léon Foucault mit seinem berühmten Pendel, das er 1851 im Panthéon in Paris der Öffentlichkeit präsentierte. Damals bedurfte es keines Beweises der Erdrotation, sondern es handelte sich um eine Mischung aus Präzisions- und Schauexperiment, dass anlässlich der Wiedereröffnung der zur nationalen Gedächtnisstätte umgewidmeten Kirche die kulturelle Vormachtstellung Frankreichs demonstrieren sollte. Das an einem über 60 Meter langen Draht aufgehängte Pendel drehte seine Schwingungsebene nach fünf Minuten um etwa ein Grad, wodurch sich diese Veränderung an einer Skala auf dem Boden ablesen ließ.

Den Besuchern erklärte man, nicht das Pendel drehe sich, sondern die Betrachter mit der Erde. Mit einem Mal konnte man die sonst nicht wahrnehmbare Bewegung unseres Planeten mit eigenen Augen sehen. Die Wirkung war immens, und das Pendel begann seine Karriere als Star unter den Schauexperimenten.

Der schlichte und gerade dadurch besonders suggestive Aufbau hatte von Anfang an den Charakter einer künstlerischen Installation. Sie diente nicht nur der naturwissenschaftlichen Belehrung, sondern wurde auch genutzt, um politische Botschaften zu vermitteln, zum Beispiel für antikirchliche Propaganda: Man erinnerte damit an die Verurteilung Galileis, denn die nun anschaulich gewordene Rotation der Erde beweist ihre Beweglichkeit. Dass sich unser Planet um die Sonne bewegt, ergebe sich nach dieser Erzählweise zwanglos. Genauso machten es die atheistischen Kommunisten, als sie 1931 die Isaaskathedrale in Sankt Petersburg in ein antireligiöses Museum umwandelten und an die Stelle der Taube des Heiligen Geistes ein mehr als 90 Meter langes Pendel hängten.

Einen versöhnlichen Eindruck vermittelt dagegen eine Installation, welche die Niederlande 1952 den Vereinten Nationen schenkte. Sie befindet sich noch heute in der großen Eingangshalle des UN-Hauptgebäudes in New York: Wenn die Repräsentan-

Michael Hagner
**FOUCAULTS
PENDEL UND WIR**
Anlässlich einer
Installation von
Gerhard Richter
Walther König,
Köln 2021
396 S., € 38,-



Allen Tragödien zum Trotz dreht sich die Erde un-aufhaltsam weiter

ten der Mitgliedsstaaten eintreffen, steigen sie über eine besondere Treppe zum Sitzungsaal hinauf und kommen dabei an einem Foucaultschen Pendel vorbei. Wir alle drehen uns auf derselben Erde, lautet offenbar die Botschaft.

Diese spannende Geschichte des Pendels als kulturhistorisches Objekt von seinen Anfängen bis in die Gegenwart hat Wissenschaftshistoriker Michael Hagner in seinem neuen Buch »Foucaults Pendel und wir« dargestellt. Der Autor ist Professor an der ETH Zürich und untersucht das Verhältnis von Kunst und Wissenschaft. Sein Werk ist mit dem Untertitel

»Anlässlich einer Installation von Gerhard Richter« versehen. Im Juni 2018 hat der genannte Künstler in der Dominikanerkirche im Zentrum von Münster ein Foucault-Pendel – kombiniert mit großen grauen Glastafeln – installiert und der Stadt geschenkt. Man könnte sagen, die Transformation vom Schauexperiment zum Kunstwerk habe hier seinen einstweiligen Abschluss gefunden. Hagners gut lesbares Buch zeigt in eindrucksvoller Weise, wie Wissenschaft, Politik und Kunst miteinander verwoben sind.

Einen weniger guten Eindruck hinterlässt die antikirchliche Haltung des Autors, denn sie verleitet ihn an mancher Stelle zu Ungenauigkeiten und Verkürzungen. Es ist traurige Tatsache, dass Kopernikus' »De revolutionibus orbium coelestium« erst 1835 aus dem »Index librorum prohibitorum« genommen wurde, also von der Liste der Bücher gestrichen, die ein braver Katholik nicht lesen darf. Doch Hagner erweckt den Eindruck, es sei

noch im 19. Jahrhundert nötig gewesen, die Kirchenoberen davon zu überzeugen, dass die Erde sich um die Sonne bewegt. So wundert er sich, dass Bischöfe bereitwillig die bestens geeigneten Kathedralen für Pendelvorfürungen zur Verfügung stellten.

Gelegentlich scheint der Verfasser die tägliche Rotation der Erde und ihre jährliche Bewegung durcheinanderzuwerfen oder zumindest als austauschbar zu betrachten. Dabei beweist das Foucaultsche Pendel streng genommen keineswegs irgendetwas hinsichtlich der Jahresbewegung. Nur weil die Erde rotiert, muss sie noch lange nicht um die Sonne kreisen. Den ersten wirklichen Beweis dafür erbrachte Friedrich Wilhelm Bessel 1838: Schon Kopernikus hatte erkannt, dass die Fixsterne ihre scheinbare Position im Lauf des Jahres ändern müssten. Weil die Sterne aber so weit entfernt sind, ließ sich der winzige Effekt erst mit der Technik des 19. Jahrhunderts nachweisen.

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

- ▶ Verlosungen von Büchern und **Spektrum KOMPAKT**s
- ▶ Eigene Veranstaltungen und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis
 - 27. 4. 2021: Digitaler Redaktionsbesuch **Spektrum.de**
 - 19. 5. 2021: Websession »Wie **Spektrum**-Redakteure arbeiten: Von der Idee bis zum Artikel«
 - 12. 6. 2021: **Spektrum-LIVE**-Veranstaltung – Flug im Space- oder Flugsimulator & Vortrag »Risk Management im Cockpit«, Zürich
 - 26. 6. 2021: **Spektrum-LIVE**-Veranstaltung – Digitaler Workshop »Landschafts-Astrofotografie«
- ▶ Rabatt für den Onlinekurs: **Spektrum** Schreibwerkstatt
- ▶ Preisnachlass auf die Leserreise nach Island im August
- ▶ Kostenlose und ermäßigte digitale Produkte und weitere Vorteile:
 - kostenfreier Download des Monats im März: **Spektrum KOMPAKT** »Gedächtnis«
 - reduzierte Digitalpakete »Alzheimer«, »Infektionskrankheiten« und »Nachhaltigkeit«
 - Englischkurs von Gymglish zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

REZENSIONEN

Das letzte Kapitel ist im Inhaltsverzeichnis kursiv hervorgehoben. Es handelt sich um einen Essay über Gerhard Richters künstlerische Arbeit. Zunächst nähert sich Hagner wie ein Historiker dem Werk und betrachtet dessen Entstehungsgeschichte. Doch dann beginnt er zu assoziieren, bis er schließlich zum Ergebnis kommt, all die menschlichen und von Menschen gemachten Tragödien würden am Ende den Planeten in seinem Lauf nicht aufhalten. Die Erde tue das, »was sie immer schon getan hat, nachdem der Kosmos sich einigermaßen eingewackelt hatte: Sie dreht sich um die Sonne und um die eigene Achse.« Offenbar hat das Foucaultsche Pendel Hagner sehr berührt.

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

LINGUISTIK VERFÄLLT UNSERE SPRACHE?

Der Kommunikationsforscher Gunter Reus erörtert, inwiefern die Medien unsere Sprache prägen und widerspiegeln.

► Das Lamento, mit der Sprache gehe es immer weiter bergab und künftige Generationen würden vermutlich überhaupt nur noch brabbeln, dürfte schon Jahrtausende alt sein. Heutzutage kann man es vorwiegend in der Ausführung »daran sind die Medien schuld!« vernehmen.

Der ehemalige Journalist Gunter Reus, der inzwischen Professor am Institut für Journalistik und Kommunikationsforschung in Hannover ist, erklärt, ein negativer Einfluss auf die Schriftsprache sei nicht zu erkennen. Kritik an der Sprache der Medien pflege aus einer dezidiert antidemokratischen Ecke zu kommen, schließlich habe es Sprachwandel immer schon gegeben und werde von den Medien nicht verursacht, sondern höchstens aufgegriffen und verstärkt.

Bei der Frage, ob und inwieweit Medien für Sprachwandel verantwort-

lich sind, ist Reus leider nicht ganz konsequent. Einerseits stellt er fest, Medien griffen nur bestehende Tendenzen auf, andererseits führt er aus, sie hätten einen wesentlichen Beitrag zur Homogenisierung der deutschen Standardsprache geleistet und trügen dazu bei, sprachliche Innovationen durchzusetzen. Diese aber seien für »Wandel und Erhalt« essenziell, denn nur, was sich wandle, könne bestehen bleiben. An anderer Stelle rechnet er es den Medien jedoch hoch an, dem Konjunktiv der indirekten Rede ein »Refugium« zu bieten; womit er unter der Hand doch wieder einräumt, dass Sprachwandel eine Verarmung an Ausdrucksnuancen bedeuten kann.

In den folgenden Kapiteln fragt Reus, was Sprache in unterschiedlichen Medien – etwa dem Internet, der Werbung und Propaganda – ausmacht. Dabei liegen ihm besonders die Leistungen des Journalismus (wie Verständlichkeit und Demokratisierung) am Herzen. Dieses Kapitel ist das umfangreichste. Hier ist der Autor in seinem Element: Seine Charakterisierung verschiedener Textformen an überzeugend ausgewählten Beispielen schärft den Blick für gute und schlechte Artikel, was man in Zeiten von Fake News und eines Claas Relotius nicht hoch genug einschätzen kann. Speziell sein kurzes Referat über Ergebnisse der Verständlichkeitsforschung ist instruktiv und erhellend: Dass man Leser nicht nur verliert, wenn man sie über-, sondern auch unterfordert, möchte man manch einem Journalisten ins Stammbuch schreiben.

Aus der Reihe fällt das Kapitel »Sprache im Internet« – schon aus



Man muss einem Autor nicht in allen Punkten zustimmen, um sein Buch zu genießen

dem Grund, weil man es auf Facebook, Twitter und dergleichen nicht vorrangig mit Kommunikationsprofis zu tun hat. »Wenn man Lust am Schreiben als Indikator für intakte Kommunikation begreift«, so Reus, gebe es »keinen Anlass zur Sorge«. Das greift aber doch ein bisschen zu kurz. Dass allenthalben hingebungsvoll gepocht, getwittert, gewhatsappt wird, heißt nicht, dass es mit den schriftsprachlichen Kompetenzen – die weit über Dudenkonformität hinausgehen – besonders gut steht.

Selbst wenn man nur auf sprachliche Korrektheit im Rahmen des hochdeutschen Standards achtet, kann man Reus' Optimismus nicht uneingeschränkt teilen. Eines der führenden deutschen Nachrichtenmagazine wusste erst jüngst von einem dramatischen Verfall der Rechtschreibung und Grammatik im Vergleich zu Abiturklausuren der 1980er Jahre zu berichten. Da liegt dann der Verdacht, die Mediennutzung hänge damit zusammen, nicht so ganz fern – vielleicht weniger, weil die Medien ein schlechtes Beispiel gäben, sondern weil die Lektüre komplexerer Texte angesichts unzähliger medialer Unterhaltungsangebote zunehmend in den Hintergrund gerät.

Man muss einem Autor aber nicht in allen Punkten zustimmen, um sein Buch mit Gewinn und Genuss zu lesen. Dass ein gelungener Text nicht nur gut verständlich, sondern auch ästhetisch ansprechend gestaltet sein sollte, sagt Reus nicht nur – er führt selbst vor, wie das geht. Und das ist gewiss keine geringe Leistung.

Vera Binder ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften, Klassische Philologie, der Universität Gießen.

UNKALKULIERBARE RISIKEN

Fachleute blicken besorgt auf mögliche Schlachtfelder der Zukunft: Satelliten könnten zum Ziel werden und sind schwer zu schützen. Autonome Waffen würden Auseinandersetzungen vielleicht unvorhersehbar eskalieren lassen. (»Angriff im Orbit« und Interview »Schlagabtausch in Maschinengeschwindigkeit«, »Spektrum« März 2021, S. 12 und S. 22)

Lutz Muche, Freiberg: Die im Interview besprochenen Themen sind äußerst besorgniserregend. Immer schnellere und perfektere Waffen bieten nicht mehr Sicherheit, sondern im Gegenteil höhere unkalkulierbare Risiken. Wenn sich die Entwicklungstrends der letzten Jahre fortsetzen, wird ein weltweiter Konflikt nahezu unausweichlich. Die Ursache könnte ein Softwarefehler oder ein ähnlich banaler Defekt sein, selbst dann, wenn der Mensch zunächst hier und da noch eingreifen kann. Auch ist jede Software durch gezielt übermittelte falsche Daten manipulierbar.

Den einzigen Ausweg aus dem Dilemma sehe ich im Ringen um weltweite Verträge zu einer drastischen Reduzierung aller Militärausgaben, Verzicht auf Weiterentwicklungen und striktem Exportverbot für militärische Güter.

Jörg Berning, Haukeland (Norwegen): Danke für den informativen Artikel und Ihr Editorial. Ich möchte Ihnen sehr den Roman »Millennium« von Ben Bova empfehlen, der bereits 1976 sachkundig und spannend ein Szenario eines sich anbahnenden Krieges im Erdorbit beschrieben hat.



ÜBERLICHTSCHNELLE SIGNALE SIND MÖGLICH

Laborversuche sollen klären, wie rasch quantenmechanische Objekte Energiebarrieren tatsächlich durchdringen. (»Mit Überlichtgeschwindigkeit durch die Wand«, »Spektrum« März 2021, S. 58)

Günter Nimtz, Köln: Der Aufsatz ist geprägt durch eine einseitige Zitatarmut und er ist an wichtigen Stellen nicht korrekt. So hat Thomas Hartman nicht die Scheitelpunkte der Gaußkurven zur Ermittlung der Tunnelzeit benutzt, sondern wie es in seiner erwähnten Arbeit von 1962 dargestellt ist, hat er diese Tunnelzeiten für bestimmte Frequenzen berechnet. Die Behauptung ist falsch, es gäbe keine schnellere Signalübermittlung als Licht im Vakuum. Es wurden mehrfach solche superluminalen Signale übertragen, so zum Beispiel von Stefano Longhi 2001 digital mit

Leserbriefe sind willkommen!

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

zweifacher Lichtgeschwindigkeit. Bereits 1995 wurde Musik superluminal getunnelt (Aichmann, H. et al.: Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 7, 1995). 2019 wiederholten die Schüler Peter Elsen und Simon Tebek dieses Experiment erfolgreich, sie erhielten für ihre Arbeit bei Jugend forscht von Rheinland-Pfalz den ersten Preis in Physik.

Übrigens benutzen moderne Glasfaser-Telefonnetze seit Ende der 1970er Jahre bereits Signalsplitter und Koppler, die auf dem Tunneleffekt basieren. Nach Shannons Signaltheorie wird die Kausalität durch diese superluminalen Signale nicht verletzt. Im Aprilheft 2021 der »Zeitschrift für Naturforschung A« erscheint eine Zusammenfassung der Literatur (<https://doi.org/10.1515/zna-2020-0299>). Die beobachteten endlichen Übertragungszeiten entstehen am Eingang der Barrieren.

ERRATUM

»Immunabwehr im Chaos«, »Spektrum« März 2021, S. 44

Im Absatz oben auf S. 48/49 heißt es ursprünglich:

»Auf zwei Zelltypen des angeborenen Immunsystems traf das besonders stark zu, nämlich auf Monozyten und Neutrophile. Bei gesunden Personen stellen diese etwa zehn beziehungsweise weniger als ein Prozent der »mononukleären Zellen des peripheren Bluts«, von denen viele eine bedeutsame Rolle im Immungeschehen spielen. Bei Covid-19-Patienten betragen die jeweiligen Anteile mitunter 30 beziehungsweise 10 Prozent.«

Der Abschnitt sollte wie folgt lauten:

»Zwei Zelltypen des angeborenen Immunsystems – Monozyten und Neutrophile – waren besonders zahlreich vertreten. Um ein Beispiel zu nennen: Bei gesunden Spendern machen Monozyten zwischen 10 und 20 Prozent der »mononukleären Zellen des peripheren Bluts« aus, von denen viele eine bedeutsame Rolle im Immungeschehen spielen. Doch bei Covid-Patienten fanden wir oft, dass der Anteil der Monozyten den Normalbereich um das Dreifache oder mehr überstieg.«

Ein schweigsamer Besucher

Kontaktversuche mit einer anderen Lebensform.

Eine Kurzgeschichte von Bo Balder

Einer der Fremdlinge war noch am Leben. Wir hatten beobachtet, wie der Feuerstreif über den Himmel fegte und wie das Ei zerschellte. Sobald sich das Ei ein wenig abgekühlt hatte, versammelten wir uns an der Absturzstelle, um herauszufinden, worum es sich handelte. Unsere Abordnung machte sich gerade bereit, in das zerbrochene Ei einzudringen, als wir eine Bewegung wahrnahmen und vorsichtig darauf warteten, dass die Fremdlinge aus dem Ei herauskröchen. Oder um ihnen Hilfe anzubieten, falls sie dazu nicht in der Lage wären.

Etwas huschte heraus, fast zu schnell, als dass wir es sehen konnten. Eine zweibeinige Lebensform mit einem knolligen, glänzenden Auge obenauf. Während wir das Wesen anstarrten und versuchten, uns einen Reim auf seine Bewegungen zu machen, stolperte es hin und her. Schließlich stand es still und musterte kaum einen Schlundschluck lang den Horizont, bevor es wieder loslief. Das Wesen betrat mehrmals das Ei und kam wieder heraus – anscheinend, um vorsorglich Proviant für eine Reise aufzustapeln. Aus der Entfernung konnten wir nichts Genaueres erkennen.

Er wirkte so ungemein verloren, wie er da eilig vor sich hin stakste

Der Fremdling bedeckte den Haufen aus matschigem Zeug mit Steinen und steckte ein aufrechtes Kreuz aus verbundenen Zweigen hinein. Dann machte er einen Buckel und begann auf seine seltsame, schwankende Weise davonzugehen. Wohin wollte er, fragten wir uns. Welches Ziel konnte der Besucher in unserer Welt verfolgen? Vielleicht würde er unser bescheidenes Dorf besuchen und uns Geschichten aus seiner weit entfernten, exotischen Heimat erzählen. Wir spekulierten über seine Absichten, während wir zugleich debattierten, was wir als Nächstes tun sollten. Schließlich beschlossen wir, dass einige von uns ihm folgen sollten, für den Fall, dass er Hilfe oder Gesellschaft brauchte. Er wirkte so ungemein verloren, wie er da mit seinen dünnen, geknickten Gliedmaßen eilig vor sich hin stakste.

Ein paar von uns zogen los, um einen Blick in das Ei zu werfen, das der Besucher offen gelassen hatte, sowie auf seinen Stapel mit Reiseproviant. Wie sich herausstellte, enthielt der Stapel tote Besucher. Die weiße Außenhaut war ihnen abgezogen worden, und auch das kugelförmige Auge fehlte nun jeweils; der Rest sah eher kümmerlich aus. Wir konnten uns nicht erklären, warum der Fremde die eigene Familie nach ihrem Tod nicht aufgegessen hatte. Musste er noch ein feierliches Ritual vollführen, bevor er die Verwandten ihrem ehrenvollen Zweck zuführen durfte?

Das Ei war stark beschädigt. In seinem gegenwärtigen Zustand konnte es unsere Heimatwelt keinesfalls verlassen. Nachdem unsere Neugier befriedigt war, beeilten wir uns, dem Wesen auf seiner rätselhaften Reise zu folgen.

Wir wünschten uns so sehr, mit dem Besucher zu sprechen, ihn über die Außenwelt und seinen Herkunftsort auszufragen! Wir kamen zu dem Schluss, dass er einigermaßen intelligent sein musste, um ein eiförmiges Reisevehikel zu formen und seine Familie einem derart absonderlichen, offenbar bewusst herbeigeführten Schicksal auszusetzen.

Außerdem malten wir uns aus, wie traurig wir wären, wenn unsere Verwandten ihr Leben verlören und uns ganz allein in einer wildfremden Welt zurückgelassen hätten. Wie sehr würden wir Trost brauchen, wären wir an Stelle des Besuchers!

Es war schon ein fast peinliches Schauspiel. Der Fremde schlängelte sich nicht wie wir grazil und majestätisch langsam durch den Sand zwischen den Steinen voran, sondern schien unsere säuberlich auf dem Plateau angelegten Pfade gar nicht zu bemerken. Er ließ keinen Spalt, keinen Tümpel aus, um darüber zu stolpern oder hineinzufallen.

Er trampelte über unsere Felder aus Moosen und Flechten, tapste blindlings durch die Siedlungen, irrte kreuz und quer umher. Schließlich erreichte er das Meer. Lange sah er zu, wie die Brandung heranrollte und der Schaum sich zurückzog, und seine tiefe Traurigkeit musste jeden anstecken, der über einen schluckenden Schlund verfügte.

Mit der Zeit wurde es langweilig, dem Besucher bloß zuzuschauen, und wir versuchten alles, um mit ihm Kontakt aufzunehmen. Aber er reagierte überhaupt nicht. Als ob er uns nicht sehen könnte! Wir legten uns quer

über den Weg und warteten auf ihn, doch er stieg einfach über uns hinweg. Wir ritzten Zeichen und pressten Formen und legten Essen bereit, alles vergebens. Welch eine arme, blinde, tollpatschige Kreatur ...

Als der Morgen dämmerte, lag der Fremdling zusammengerollt und reglos da. Er war über Nacht gestorben. Eine wunderbare Gelegenheit, ihn näher zu betrachten, bevor er wie seine Verwandten zu einer Art Brei zerfiel. Die stabförmigen Gliedmaßen und die feinen Sensoren an deren Enden faszinierten uns. Tief im Innern des großen gewölbten Auges am oberen Körperende waren rätselhafte Flecken zu erkennen. Einige von uns klopfen auf das Auge, und ein Ton hallte durch den stillen Morgen. Wir krabbelten erschrocken fort, entdeckten aber, dass der Fremde zu neuem Leben erwacht war und blitzschnell davonlief. Wir rannten hinterher und hatten große Lust, Fangen zu spielen, doch wieder mussten wir feststellen: Wir blieben einfach unsichtbar.

Die Enttäuschung war riesig, aber so ging es nicht weiter: Wir mussten unser eigenes Leben führen, Pflichten erledigen, die Brut pflegen. Hin und wieder sahen wir noch, wie der Fremde mit seinen Schritten den Pfad zwischen seinem zerbrochenen Ei und der Küste vertiefte. Bildete ich mir das nur ein, oder wurden seine Bewegungen allmählich langsamer?

Was wollte der Besucher? Wovon träumte er? Wenn wir nur mit ihm kommunizieren könnten! Aus tiefster Seele wünschten wir uns, diesem einsamen Lebewesen zu hel-

fen, das mit keinem anderen Wesen Flechten oder Sprache zu teilen vermochte.

Das Jahr zog sich dahin, und wir hatten ein wenig mehr Schlund übrig, als die Brutpflege erforderte. Wir kopierten die auf dem fremden Ei vorhandenen Markierungen, indem wir sie als schnell wachsende Flechten auf Gestein nachzeichneten. Gegen Ende des Jahres zeigte das Projekt erste Erfolge.

Der Fremdling ruhte bei den blassgrünen Zeichen, und sein kleiner Sensor lag neben der ersten Markierung. Wir warteten sehr lange, aber wir fürchten, dass der Besucher verendet ist. Es ist uns ein großer Trost, dass er in dem Bewusstsein starb, nicht ganz allein zu sein – obwohl wir uns gewünscht hätten, er wäre zu mehr Kommunikation fähig gewesen. Wir hoffen sehr, dass der nächste Fremde, der uns besucht, ein klein wenig mehr Scharfsinn besitzt. ◀

DIE AUTORIN

Bo Balder lebt und arbeitet in der Nähe von Amsterdam. Vor ihr hat noch niemand aus den Niederlanden in »Fantasy & Science Fiction«, »Clarkesworld« und »Analog« publiziert. Ihr Sciencefiction-Roman »The Wan« erschien bei Pink Narcissus Press.

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 572, S. 278, 2019

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Janosch Deeg, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang;
 E-Mail: 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

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

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

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

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 42 vom 1.1.2021.

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: © 2021 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

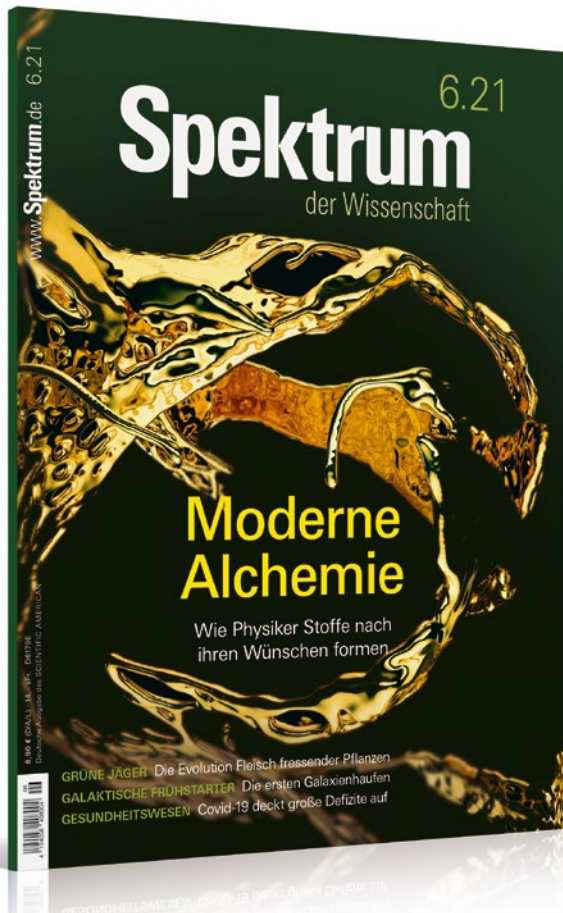
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
 Editor in Chief: Laura Helmut
 Executive Vice President: Michael Florek
 Vice President Magazines: Stephen Pincock



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU



ARBERGA / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

MODERNE ALCHEMIE

Was Dompteuren mit wilden Tieren gelingt, schaffen Quantenphysiker mit den kleinsten Bestandteilen unserer Welt. Dank ausgeklügelter Algorithmen entwickeln sie maßgeschneiderte Laserpulse, durch die sie Moleküle, Atome oder sogar einzelne Lichtteilchen zähmen und nach ihren Wünschen formen können. Dieses aufkeimende Forschungsgebiet der optimalen Quantenkontrolle verspricht erstaunliche technologische Anwendungen, die von hochempfindlichen Sensoren bis hin zu ultraschnellen Lichtpulsen reichen.



CARWYKER / GETTY IMAGES / ISTOCK

GRÜNE JÄGER

Fleisch fressende Pflanzen erscheinen auf den ersten Blick sehr ungewöhnlich. Doch der Evolutionsweg zur Karnivorie ist gar nicht so weit.



ZORANVI / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIE KRISE HINTER COVID-19

Je länger die Pandemie andauert, umso deutlicher werden Defizite im Gesundheitswesen. Es fehlen repräsentative Daten zum Infektionsgeschehen, empirisch fundierte Pandemiepläne und ein leistungsfähiges Monitoring. Was tun?



ESDAK, KORBMESSER (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GALLERY/IMAGES/COSMOS) / CC BY / LUCIFERES (PA/ALU/LEGACODE)

GALAKTISCHE SENKRECHTSTARTER

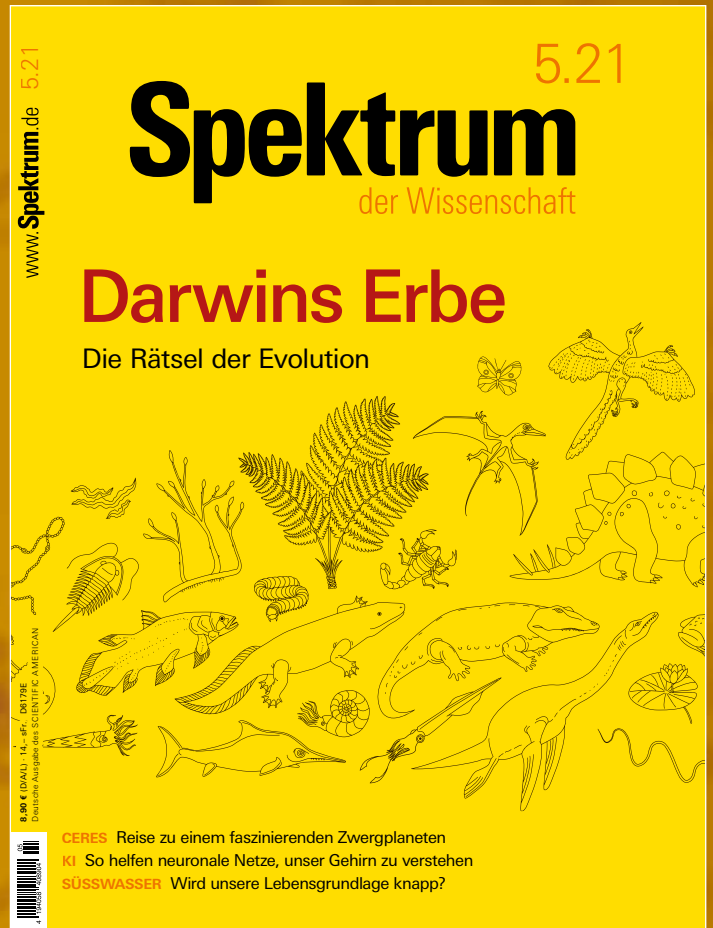
Laut jüngsten Beobachtungen gab es die Vorläufer heutiger Galaxienhaufen bereits überraschend früh in der kosmischen Entwicklung. Die rasche Entstehung lässt sich theoretisch nur mühsam nachvollziehen. Sind die Funde bloß Ausreißer – oder die Modelle lückenhaft?

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

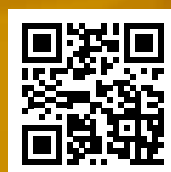
Registrierung unter:
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren
und keine Ausgabe mehr verpassen!



Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten
von **Spektrum PLUS** – wie kostenlosen Downloads,
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

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



10 Jahre
AcademiaNet

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

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.000 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von