

Spektrum

der Wissenschaft

Gefahr aus dem Weltall

Wie wir uns vor Asteroiden schützen können

KORALLENRIFFE Hilfe für die bedrohten Ökosysteme

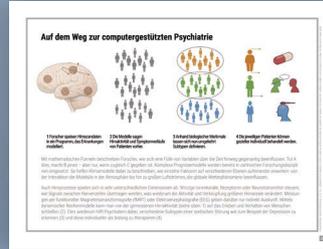
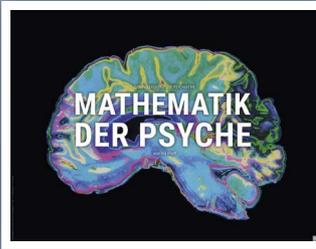
BEWUSSTSEIN Welche Theorie kann es am besten erklären?

VORGESCHICHTE Die erste Eroberung Amerikas

Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung. Wählen Sie unter mehr als 300 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



Ausgewählte **Spektrum** KOMPAKT gibt es auch im Printformat!



Hier bestellen:
E-Mail: service@spektrum.de
[Spektrum.de/aktion/kompakt](https://www.spektrum.de/aktion/kompakt)



EDITORIAL BEDROHTE ERDE

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Asteroiden faszinieren mich – aus ganz verschiedenen Gründen. Als Botschafter aus dem All liefern sie Erkenntnisse etwa zur Entstehung unseres Sonnensystems und dessen Planeten. Schlagen größere Exemplare auf der Erde ein, erzeugen sie neue und seltene Minerale. Und wirklich riesige Brocken lösen manchmal Massensterben aus, die der Evolution neue Wege ermöglichen.

Zu meinen Lebzeiten und den meiner Kinder und Enkel möchte ich einen derartigen Impakt allerdings definitiv nur im Kino erleben. Und deshalb bin ich froh, dass wir nicht nur erdnahe und fernere Asteroiden aufspüren und überwachen, sondern uns auch Gedanken zu ihrer Abwehr machen. Sarah Scoles erzählt ab S. 12, wie die Wissenschaft dabei vorgeht. Inzwischen wurden rund 26000 Objekte identifiziert, deren Bahnen alle möglichst genau bestimmt und berechnet werden sollen. Diese Zahl wird sicher noch steigen, allerdings ist mit dem weltberühmten Arecibo-Teleskop auf Puerto Rico kürzlich eines der wichtigsten Instrumente kaputtgegangen.

Der Bau seines Nachfolgers dürfte dabei weniger schwierig sein, als geeignete Methoden zu entwickeln, mit denen die kosmischen Geschosse zerstört oder wenigstens abgelenkt werden könnten: Von Raumschiffen als »Abschleppwagen« über Laserwaffen auf Raumsonden bis zu Atombomben als Gegenmittel reichen momentan die Ideen. Bei einem kommenden Experiment hierzu soll eine Sonde auf einem Dimorphos genannten Asteroiden einschlagen.

Uns deutlich näher, aber mindestens so bedrohlich, ist die Zerstörung lebenswichtiger Ökosysteme. Korallenriffe sind nicht nur bunt, sondern ebenso die Kinderstube vieler Fische und schützen Küsten vor schwerer Brandung. Aufgeheizte und versauernde Ozeane, Überdüngung, Überfischung und Massentourismus bedrohen diesen fragilen Lebensraum. Unser Schwerpunkt zum Thema beschreibt ab S. 34, was der artenreichen Welt unter Wasser zu schaffen macht – und wie wir sie retten könnten. Denn ohne Lebensräume wie Korallenriffe oder Regenwälder brauchen wir uns auf Dauer keine Gedanken mehr über Gefahren aus dem All machen.

Dennoch optimistisch grüßt



NEU AM KIOSK!

Spektrum SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 3.21 vermittelt Einblicke in die faszinierende Tierwelt des Erdmittelalters – und räumt mit so manchen Vorurteilen auf.

IN DIESER AUSGABE



REINHOLD LEINFELDER

Der Berliner Paläontologe beschreibt ab S. 42, wodurch tropische Korallenriffe bedroht sind und wie man ihnen helfen kann. Als »Anthropozäniker« bloggt er bei Spektrum-SciLogs (scilogs.spektrum.de/der-anthropozaaniker).



JENNIFER RAFF

Die anthropologische Genetikerin Jennifer Raff von der University of Kansas sucht im Erbgut indigener Gruppen Amerikas nach den Ursprüngen der Urbevölkerung. Auf diese Weise möchte sie rekonstruieren, wie die Erstbesiedlung des Kontinents genau ablief (ab S. 74).

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

Das Magnetfeld spüren

Neue Einblicke in einen besonderen Sinn der Vögel.

Blitzschnell und grundverschieden

Woher kommen Ausbrüche kosmischer Radiostrahlung?

Weiteres Puzzlestück der menschlichen Evolution

Ein erstaunlich später »archaischer« Mensch.

Leben in einer CO₂-Welt

Mikroben, die sich von Kohlenstoffdioxid ernähren, lehren uns etwas über die ersten Organismen.

32 SPRINGERS EINWÜRFE

Wo die Neugier sitzt

Ein Hirnareal scheint den Ausschlag zu geben.

55 FREISTETTERS FORMELWELT

Das Pendel und der Komet

Einfaches kann manchmal so schwer sein.

64 SCHLICHTING!

Auf der Spur einer Schnecke

Die Schleimschicht wechselt zwischen flüssig und fest.

84 ZEITREISE

86 REZENSIONEN

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 ASTRONOMIE **EIN PLANET WIRD VERTEIDIGT**

Himmelsdurchmusterungen sollen potenziell bedrohliche Asteroiden erfassen. Wie ließe sich so ein Objekt von seinem Kurs abbringen?

Von Sarah Scoles

Schwerpunkt: Korallenriffe

34 NATURSCHUTZ **HILFE FÜR KORALLENRIFFE**

Können künstlich zugesetzte probiotische Bakterien gestresste Korallen vor dem Untergang bewahren?

Von Elizabeth Svoboda

42 MEERESBIOLOGIE **RIFFE IN SCHWERER SEE**

Umweltverschmutzung, Überfischung und nicht zuletzt die Klimakrise setzen tropischen Korallenriffen arg zu.

Von Reinhold Leinfelder

48 BEWUSSTSEIN **DAS GROSSE EXPERIMENT**

Serie: Bewusstsein (Teil 3) Viele Theorien versuchen, das Bewusstsein zu beschreiben. In einer ungewöhnlichen Kollaboration finden nun weltweit Versuche statt, um zwei führende Ansätze zu prüfen.

Von Manon Bischoff

56 ÖKOLOGIE **ERREGER AUF REISEN**

Serie: Pilze (Teil 3) Per Flugzeug, Schiff und Landfahrzeugen verbreiten sich Schadpilze rund um den Globus. Das führt zu verheerenden ökologischen Schäden.

Von Kerstin Viering

66 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
COMPUTER AUS TREPPENHAUS-LICHTSCHALTERN

Was, wenn die Nachfolger George Booles seine Werke anders interpretiert hätten? Vielleicht würden Computer nach einem ganz unterschiedlichen Prinzip funktionieren – und möglicherweise sogar besser.

Von Christoph Pöppe

74 ARCHÄOGENETIK **ÜBERS EIS NACH AMERIKA**

Die Vorfahren der Uramerikaner saßen erst die Eiszeit aus, dann besiedelten sie den Doppelkontinent. Wie, wann und wo genau, ist umstritten. Forscher favorisieren drei Szenarien.

Von Jennifer Raff

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



12

TITELTHEMA
ASTEROIDENABWEHR

CANADA / GETTY IMAGES / ISTOCK



34

NATURSCHUTZ
KORALLEN-
RIFFE IN NOT

DAMEDIAS / STOCK.ADBE.COM



48

BEWUSSTSEIN
DAS GROSSE
EXPERIMENT

JOHNVREBE / GETTY IMAGES / ISTOCK



56

ÖKOLOGIE
INVASIVE SCHADPILZE

MIT FRIEDRICH VON DRICK SCHWELLER



74

ARCHÄOGENETIK
ERSTBESIEDLUNG
AMERIKAS

WINDINA NELSON / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2021



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

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

SPEKTROGRAMM

ATOME IN REKORDAUFLÖSUNG

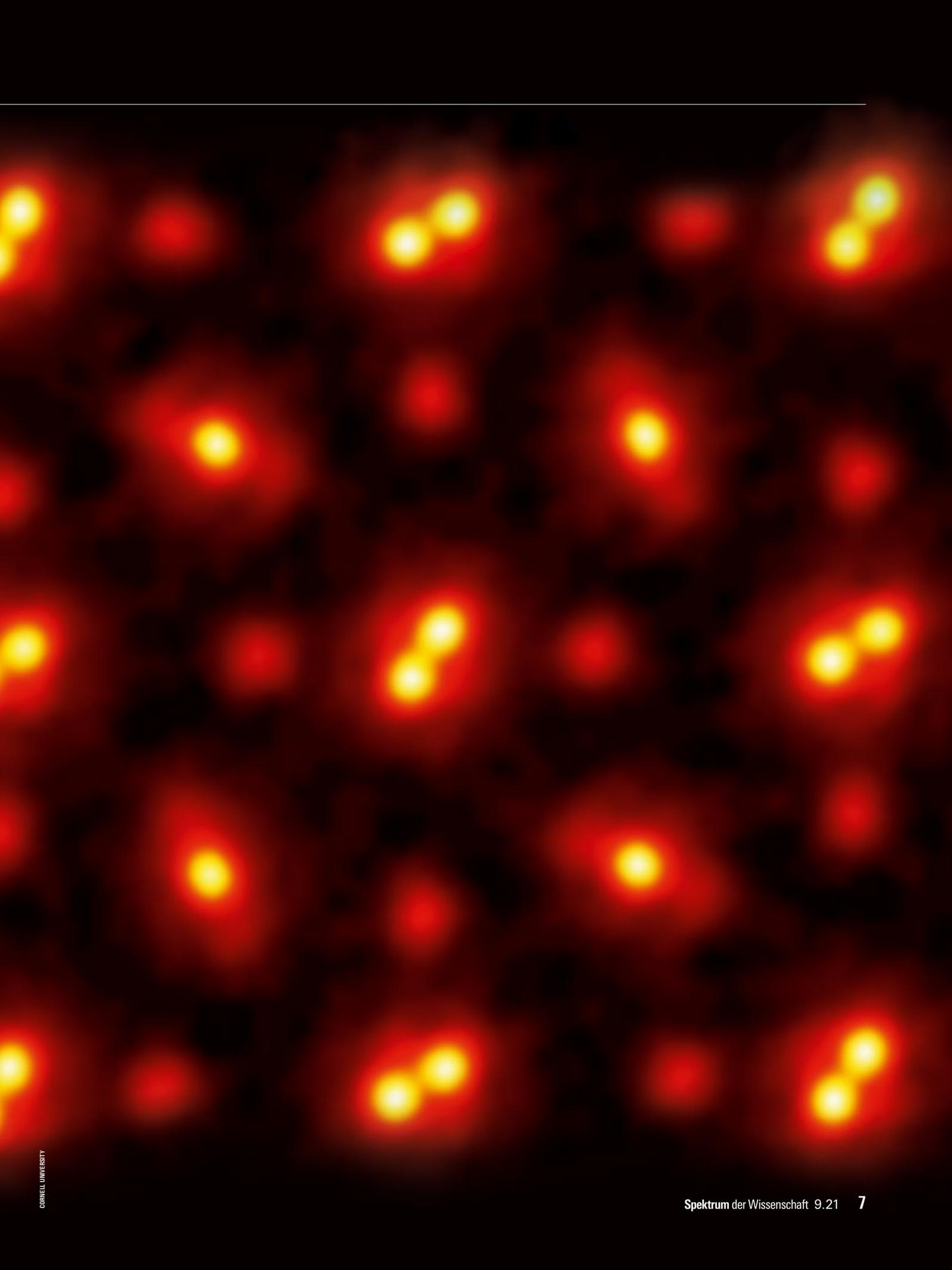
► Einem Team um Zhen Chen von der Cornell University in Ithaca ist es gelungen, Atome in einer bislang noch nie da gewesenen Auflösung von weniger als 20 Pikometer (Billionstel Meter) abzubilden. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben damit ihren eigenen Rekord gebrochen, der ihnen erst 2018 einen Eintrag im »Guinness-Buch der Rekorde« beschert hatte.

Für ihre Aufnahme nutzten Chen und seine Kollegen ein Verfahren namens Elektronen-Ptychografie. Dabei wird die zu untersuchende Probe mit einem Elektronenstrahl gescannt. Atome des Materials streuen die Elektronen, worauf ein Beugungsmuster entsteht, das Detektoren aufzeichnen. Der Strahl verändert seine Position viele Male, und aus den resultierenden Beugungsbildern errechnet ein Algorithmus ein Abbild der Probe. Die Forscher haben damit Atome des kristallinen Stoffs PrScO_3 , der aus den Elementen Praseodym, Scandium und Sauerstoff besteht, 100-millionenfach vergrößert dargestellt. Je zwei Praseodym-Atome liegen im Kristallgefüge dicht beieinander, was sich auf den Bildern in Form von »Doppelkugeln« zeigt.

Wegen der thermischen Bewegung der Atome weist das Bild eine gewisse Unschärfe auf. Laut den Wissenschaftlern ließe sich die Auflösung unter anderem durch Abkühlen der Probe verbessern. Allerdings wäre der Gewinn dadurch voraussichtlich gering.

Bislang wurde die Elektronen-Ptychografie vor allem bei sehr dünnen Proben eingesetzt, die wenige Atomschichten mächtig waren. Denn je dicker ein Material, umso häufiger werden die Elektronen im Inneren gestreut, was die Auswertung der Beugungsmuster erschwert. Chen und seinen Kollegen gelang es nun aber, die Algorithmen so zu verbessern, dass sie auch Proben abbilden können, die einige hundert Atomschichten dick sind.

Science, 10.1126/science.abg2533, 2021



PALÄO BIOLOGIE DINOS LEBTEN GANZJÄHRIG IN DER ARKTIS

► Einige Dinosaurierarten siedelten offenbar dauerhaft in polaren Breiten und brachten dort ihren Nachwuchs zur Welt. Darauf deutet die Entdeckung fossiler Jungtiere im nördlichen Alaska hin. Der Fund belegt, dass zumindest manche Dinosaurier, die in der Arktis lebten, nicht wie heutige Zugvögel saisonal wanderten, um die kalte Jahreszeit zu überstehen.

Forscherinnen und Forscher um Patrick Druckenmiller vom University of Alaska Museum haben in der Prince-Creek-Formation (Alaska) hunderte Zähne und Knochen aus der späten Kreidezeit ausgegraben. Diese ordneten sie insgesamt sieben Dinosaurierspezies zu. Einige Tiere waren kurz nach dem Schlüpfen oder sogar noch im Ei gestorben. Die Region lag

im fraglichen Zeitraum vor rund 70 Millionen Jahren auf etwa 80 Grad nördlicher Breite und somit zehn Breitengrade näher am Nordpol als heute. Um Gebiete südlich des Polarkreises zu erreichen, hätten die Dinosaurier mindestens 3000 Kilometer wandern müssen.

Das Team geht davon aus, dass die entsprechenden Spezies ganzjährig vor Ort blieben – auch während der langen Polarnacht. Die Zeit zwischen Eiablage und Schlüpfen betrug bei diesen Arten schätzungsweise fünf bis sechs Monate. Hätten sie die Eier im Frühjahr gelegt, dann hätten sich die Jungtiere erst im Herbst aus der Schale befreit: viel zu spät, um noch eine große Reise zu beginnen. Zudem ist kaum anzunehmen, dass die frisch zur Welt gekom-

menen Individuen einen tausende Kilometer langen Marsch überlebt hätten. Stattdessen könnten die Dinosaurier im Winter gebrütet haben, so dass der Nachwuchs die Chance hatte, über den Sommer hinweg genügend Reserven für die kalte Jahreszeit zu sammeln. Auch in dem Fall wäre eine jahreszeitliche Wanderung nicht möglich gewesen.

Der Nachweis von Dinosaurier-Überresten in der Prince-Creek-Formation ist der bislang nördlichste Fund dieser Art. Baumfossilien aus jener Zeit lassen vermuten, dass die Bedingungen in der Region damals nicht ganz so eisig waren wie heute. Dennoch mussten die Tiere dort die lange und kalte Polarnacht überstehen.

Current Biology, 10.1016/j.cub.2021.05.041, 2021



POLARBEWOHNER
Nanuqsaurier waren Fleisch fressende Raubtiere und gehörten zu den Tyrannosauridae. Sie lebten während der späten Kreidezeit im Norden des heutigen Alaska. Einen Menschen hätten sie vermutlich knapp überragt.

JAMES HAWKINS

PSYCHOLOGIE MENSCHEN ERINNERN SICH HÄUFIG FALSCH

Im Jahr 1985 wurde der US-Amerikaner Ronald Cotton für ein Verbrechen verurteilt – und zehn Jahre später dank DNA-Analysen wieder freigesprochen. Das Opfer hatte ihn fälschlich als Täter identifiziert. Zudem hatte er sich selbst verdächtig gemacht, indem er ungewollt ein falsches Alibi angab: Er hatte den fraglichen Tag mit dem der Vorwoche verwechselt.

Dieser Fehler trete oft auf und könne, wie im Falle Cottons, drastische Konsequenzen haben, schreiben die Psychologin Elizabeth Laliberte und ihr Team von der University of Melbourne. Stimmt die Angaben eines Verdächtigen nicht mit den Fakten überein, gelte das oft als Indiz für seine Schuld. Er könnte sich aber schlicht geirrt haben, wie eine Feldstudie der Arbeitsgruppe nahelegt.

Das Team bat rund 50 Freiwillige, mittels einer Smartphone-App vier Wochen lang den eigenen Aufenthaltsort zu verfolgen und alle zehn Minuten Umgebungsgeräusche aufzeichnen zu lassen, um möglichst verlässliche

Daten zu bekommen. Um die Privatsphäre zu respektieren, durften die Teilnehmer die App bei Bedarf ausschalten oder die Aufnahmen nachträglich löschen. Eine Woche nach dem Ende der Aufzeichnungen sollten die Versuchspersonen rückblickend angeben, wo sie sich zu 72 ausgewählten Zeitpunkten befunden hatten und wie sicher sie sich dessen waren. Hierfür bekamen sie auf Google Maps vier Orte einschließlich des richtigen angezeigt, von denen sie einen auswählen sollten.

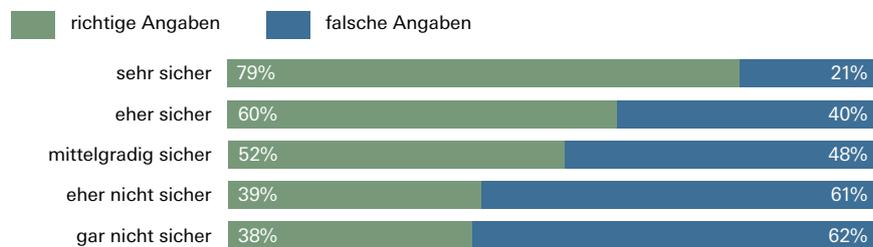
Wie die Rekonstruktion mittels der aufgezeichneten Daten belegte, irrten sich die Befragten bei mehr als jeder dritten Antwort. Je sicherer sie zu sein glaubten, desto eher lagen sie auch

tatsächlich richtig. Doch selbst, wenn sie sich »sehr sicher« wähnten, wählten sie im Schnitt bei jeder fünften Antwort einen falschen Ort.

Die Teilnehmer verwechselten besonders oft Ereignisse, die sich stark ähnelten – etwa Stopps an Tankstelle A mit solchen an Tankstelle B. Außerdem brachten sie Orte durcheinander, die sie zu verschiedenen Tageszeiten aufgesucht hatten. Auch Ronald Cottons Irrtum, sich versehentlich an einen Tag der Vorwoche zu erinnern, gehört zu einer verbreiteten Kategorie: Derartige Verwechslungen waren in der Studie für knapp jeden fünften Fehler verantwortlich.

Psychological Science, 10.1177/0956797620980752, 2021

WO WAREN SIE ZU DIESER ZEIT? Danach gefragt, irrten sich die Versuchsteilnehmer umso öfter, je weniger sicher sie sich ihrer Antwort waren.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH LALIBERTE, E. ET AL.: THE FALLACY OF AN AIRTIGHT ALIBI: UNDERSTANDING HUMAN MEMORY FOR "WHERE" USING EXPERIENCE SAMPLING. PSYCHOLOGICAL SCIENCE 32, 2021

GEOCHEMIE KLIMAWANDEL VER- GRÖßERT ARKTISCHES OZONLOCH

Der Klimawandel sorgt offenbar für einen verstärkten Ozonabbau über dem Nordpol, berichtet ein Team um Peter von der Gathen vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Demnach war bei der Arktisexpedition »Mosaic« im Frühjahr 2020 ein noch nie da gewesener Ozonverlust registriert worden. Der Effekt dürfte sich künftig verstärken – trotz des Verbots ozonschädigender Substanzen. Er könnte sich unter anderem auf Europa auswirken, etwa in Form erhöhter UV-Belastungen im Frühjahr.

Über der Arktis erstreckt sich der arktische Polarwirbel, ein stratosphärisches Tiefdruckgebiet in 15 bis

50 Kilometer Höhe, das jeweils zum Sommer hin schwächer wird. Die Dichte der Ozonschicht dort schwankt im Jahresverlauf und erreicht zu Frühlingsbeginn ein Minimum. Anfang 2020 trat ein Rekordverlust auf: Bis zu 95 Prozent des Ozons waren zerstört.

Zwar haben sich im Rahmen des Montreal-Protokolls zahlreiche Nationen verpflichtet, die Produktion ozonschädigender Chemikalien einzustellen. Doch die Substanzen sind nach wie vor reichlich in der Atmosphäre vorhanden, da sie nur langsam abgebaut werden. Je tiefer die stratosphärischen Temperaturen im Winter und Frühjahr fallen, umso mehr Stratosphärenwolken entstehen, in denen diese Stoffe mit Sonnenlicht reagieren, was schließlich zum Ozonverlust führt.

Im Zuge des Klimawandels sinken die saisonalen stratosphärischen Temperaturen über der Arktis, wie

meteorologische Daten der zurückliegenden sechs Jahrzehnte zeigen. Laut Computermodellen wird sich jene Entwicklung verstärken, wenn die Menschheit weiterhin unvermindert Treibhausgase freisetzt. Denn dieselben klimawirksamen Gase, die an der Erdoberfläche zu einer Erwärmung führen, lassen die höheren Atmosphärenschichten auskühlen. Mit steigender Konzentration absorbieren diese Gase die vom Boden abgegebene Wärmestrahlung immer stärker und halten sie damit zunehmend in der unteren Atmosphäre zurück, weshalb jeweils weniger davon in den oberen Regionen ankommt. Falls die Menschheit ihre Emissionen nicht rasch und umfassend reduziert, könnte das arktische Ozonloch deshalb wachsen, statt wie allgemein erwartet zu schrumpfen.

Nature Communications, 10.1038/s41467-021-24089-6, 2021

ANTHROPOLOGIE EIN KUNSTWERK VON NEANDERTALERN

► In der Einhornhöhle im Harz haben Forscher einen Riesenhirsch-Knochen entdeckt, den Neandertaler verzierten. Der Fund liefert einen weiteren Beleg dafür, dass der ausgestorbene Verwandte des *Homo sapiens* recht ähnliche kognitive Fähigkeiten besaß wie wir. Neandertaler haben bekanntermaßen Werkzeuge und Waffen hergestellt; zudem bestatteten sie ihre Toten wohl nach durchdachten Riten. Eindeutige Schmuckgegenstände, komplexe Höhlenmalereien oder kleine Figuren hat man allerdings in der alten Heimat der Neandertaler nahezu ausschließlich aus jüngerer Zeit entdeckt, als bereits der aus Afrika kommende moderne Mensch nach Europa vorstieß.

Der neue Fund hingegen ist laut Radiokohlenstoffdatierung mindestens 51000 Jahre alt. Es handelt sich um einen fast sechs Zentimeter langen, knapp vier Zentimeter breiten und etwa drei Zentimeter dicken Zehenknochen mit eingeritzten Winkelmustern aus sechs beziehungsweise vier Kerben. Eine Seite des Stücks sei zur Schauseite gemacht worden, sagt der

Archäologe Thomas Terberger von der Universität Göttingen, einer der beteiligten Wissenschaftler. All dies deutet darauf hin, dass schon Neandertaler ein ästhetisches Empfinden hatten und über Symbole kommunizierten.

»Es dürfte kein Zufall sein, dass der Neandertaler den Knochen eines eindrucksvollen Tieres mit riesigen Geweihschaufeln für seine Schnitzerei ausgewählt hat«, betont Antje Schwalb von der Technischen Universität Braunschweig, die ebenfalls an dem Projekt beteiligt ist. Das Geweih des Riesenhirschs hatte eine Spannweite von bis zu vier Metern.

Bislang sind nur wenige als Kunst erkennbare Relikte aus der Zeit des Neandertalers aufgetaucht: Einige Anhänger und Klauen als Schmuck-

objekte in Frankreich sowie einfache abstrakte Motive an Höhlenwänden in Spanien. Der neue Fund aus der Einhornhöhle repräsentiere eine der komplexesten bisher bekannten künstlerischen Ausdrucksformen, kommentiert die Londoner Evolutionsforscherin Silvia Bello.

Die Wissenschaftler haben vergleichende Experimente mit Skelettteilen heutiger Rinder durchgeführt, um den Herstellungsprozess zu untersuchen. Dabei stellte sich heraus, dass der Knochen wohl zunächst gekocht wurde. Anschließend ließ sich das Muster mit Steingeräten in die aufgeweichte Knochenoberfläche schnitzen, was rund eineinhalb Stunden dauerte.

Nature Ecology & Evolution, 10.1038/s41559-021-01487-z, 2021

ASTRONOMIE EIN KUGELSTERNHAUFEN VOLLER SCHWARZER LÖCHER

► Der Kugelsternhaufen Palomar 5 im Sternbild Schlange enthält ungewöhnlich viele Schwarze Löcher und könnte irgendwann nur noch aus ihnen bestehen, wie eine neue Studie belegt. Das gilt vermutlich auch für andere Kugelsternhaufen. Palomar 5 ist rund 80000 Lichtjahre von der Erde entfernt und relativ lichtschwach. Unter den gut 150 bekannten Kugelsternhaufen der Milchstraße gehört er zu den eher massearmen Vertretern mit vergleichsweise wenigen Sonnen und niedriger Sternendichte. Allerdings begleiten ihn zwei lang gestreckte Sternströme: lose Ansammlungen von Sonnen, die einst aus ihm hinaus-

geworfen wurden. Wie Palomar 5 zu ihnen gekommen sein könnte, war bisher unklar.

Ein Team um Mark Gieles von der Universität de Barcelona (Spanien) hat dies jetzt untersucht und dazu in Computersimulationen durchgespielt, wie sich der Kugelsternhaufen seit seiner Entstehung vor rund zehn Milliarden Jahren entwickelt haben könnte. Die derzeitigen Beobachtungen am besten erklären kann ein Szenario, laut dem Palomar 5 zunächst als relativ typischer Kugelsternhaufen begann, dann aber schneller Sterne als Schwarze Löcher verlor. Deren Anteil stieg folglich und liegt den Berechnun-

gen zufolge bei aktuell 20 Prozent. Ihre gravitativen Einflüsse haben fortwährend weitere Sonnen aus dem Haufen hinausgeschleudert, wodurch seine Dichte stetig sank und die Sternströme entstanden.

Laut den Simulationen wird Palomar 5 in rund einer Milliarde Jahren alle Sterne verloren haben und dann nur noch aus einigen Dutzend Schwarzen Löchern bestehen. Wahrscheinlich sind auch andere Kugelsternhaufen mit lang gestreckten Sternströmen durch einen hohen Anteil Schwarzer Löcher erklärbar.

Nature Astronomy, 10.1038/s41550-021-01392-2, 2021



GRAVIERUNG Diesen Zehenknochen haben Neandertaler wohl erst gekocht, um anschließend ein Kerbenmuster einzuritzen.

BOTANIK PFLANZENBESTAND IN WÜSTEN SCHWINDET

► Wüsten sind nicht immer monotone Sand- oder Geröllflächen: Die amerikanische Sonora etwa gehört zu den artenreichsten Ökosystemen der Erde und weist sogar eine relativ dichte Vegetation auf. Doch in den zurückliegenden Jahrzehnten ist der Bewuchs deutlich zurückgegangen, wie eine Studie von Stijn Hantson von der University of California in Irvine und seinem Team zeigt. Im Anza-Borrega Desert State Park in Kalifornien beispielsweise hat sich die Vegetation zwischen 1984 und 2017 um mehr als ein Drittel vermindert.

Stark betroffen sind die tief gelegenen Regionen Südkaliforniens, aber auch in den Hochlagen schrumpfte die Pflanzendecke um 13 Prozent. Das bestätigt Erkenntnisse aus älteren Studien, wonach Pflanzen in den Trockengebieten der USA und Mexikos zunehmend dürrebedingt absterben. Manche Arten sind regional komplett verschwunden, so dass sie dort als

ausgestorben gelten. Besonders zu leiden haben immergrüne Arten wie der Kreosotbusch (*Larrea tridentata*), Kakteen oder auch Mesquiten, die zu den Hülsenfrüchtlern zählen.

Auf 90 Prozent der untersuchten Flächen ließen sich entsprechende Rückgänge beobachten. Wacholder-, Kiefern- und Eichenwälder in den Hochlagen der Sonora zeigen sich dagegen weniger stark beeinträchtigt. Sie profitieren von den hier höheren Niederschlägen: Die Santa-Rosa-Berge etwa erhalten zehnmal mehr Regen oder Schnee als die Umgebung.

Seit 1950 sind die Durchschnittstemperaturen je nach Region um 0,5 bis 2,2 Grad Celsius gestiegen – vor allem in den Wintermonaten. Gleichzeitig nahmen die Niederschläge im Mittel ab und die Länge von Dürreperioden zu. »Die beobachteten Trends passen zur These, dass die Erwärmung vielerorts den Wassermangel verschärft«, schreiben die Wissenschaftler. Dies sei besonders im Tiefland spürbar, wo die Pflanzen zwar eine stark schwankende Wasserversorgung gewohnt seien. Die Bedingungen würden jedoch immer extremer für sie

und überschritten mancherorts die Belastungsgrenze der Vegetation.

Neben Wassermangel und Dürre sorgen weitere Faktoren dafür, dass die Vegetation leidet und sich schlechter oder gar nicht mehr regeneriert. Dazu gehören häufigere Buschbrände, Überweidung durch Vieh oder Zerstörungen durch Offroad-Fahrten.

JGR Biogeosciences, doi.org/10.1029/2020JG005942, 2021



KEINE EINÖDE Die amerikanische Sonora-Wüste ist sehr artenreich.

HIRNFORSCHUNG NERVENSIGNALE VERSCHIEBEN SICH UNERWARTET

► Wenn wir ein Auto wegfahren und kleiner werden sehen, bleibt es in unserer Vorstellung trotzdem gleich groß. Daraus könnte man schließen, dass es feste Neuronengruppen im Gehirn gibt, die für entsprechende Vorstellungen zuständig sind: Sie würden Objekte wie Autos repräsentieren und immer feuern, wenn wir eines sehen – egal, wie weit entfernt und aus welchem Winkel es sich uns darbietet. Ein Team um Carl Schoonover und Andrew Fink von der Columbia University in New York stellt diese Annahme allerdings in Frage.

Die Forscherinnen und Forscher beobachteten einen Monat lang die Aktivität einzelner Neurone im piriformen

Kortex von Mäusen. Jenes Hirnareal erkennt Düfte und unterscheidet sie voneinander. Das Team implantierte Elektroden im Gehirn von sechs verschiedenen Mäusen und setzte den Tieren anschließend regelmäßig stets dieselben Duftproben vor. Dabei passierte etwas Unerwartetes: Auf bestimmte Gerüche sprachen nicht etwa spezifische, sondern über die Zeit hinweg immer wieder andere Zellen an. Mehr als 97 Prozent der untersuchten Neurone änderten solcherart ihr Antwortverhalten. Die Wissenschaftler bezeichnen das als »Repräsentationsdrift«.

Das Phänomen ist rätselhaft, weil der piriforme Kortex konsistente Signale liefert, um die Gerüche für andere Hirnregionen kenntlich zu machen. Wie funktioniert das, wenn sich die feuernden Nervenzellen ständig verändern, obwohl der Reiz derselbe bleibt? Das Team schlägt drei

mögliche Erklärungen vor. Erstens könnte ein Duft von jenen drei Prozent der Neurone repräsentiert werden, deren Antwortverhalten gleich ausfällt. Warum feuern dann aber so viele andere Nervenzellen mit? Zweitens könnte in der Drift ein verborgenes Muster liegen, das Gerüche zu identifizieren erlaubt; die Forscher haben aber keines gefunden. Drittens könnte der piriforme Kortex – entgegen bisherigen Annahmen – nicht für die Dufterkennung verantwortlich sein.

Zwei weitere, bisher nicht begutachtete Studien haben entsprechende Drifts auch in der Sehrinde von Mäusen nachgewiesen. Das ist noch überraschender, denn die dortigen Neurone sind klar strukturiert: Ihre Anordnung spiegelt den Aufbau der Netzhaut. Eine Erklärung für das Phänomen steht aus.

Nature 10.1038/s41586-021-03628-7, 2021

ASTRONOMIE EIN PLANET WIRD VERTEIDIGT



Die Erdgeschichte zeigt: Asteroideneinschläge radieren ganze Landstriche aus, und sie passieren immer wieder. Bis heute ist nur ein Bruchteil der hochhausgroßen Gesteinsbrocken in unserer Umgebung bekannt. Wie lassen sich potenzielle Bedrohungen rechtzeitig entdecken, und wie können wir eine sich anbahnende Katastrophe abwenden?



Sarah Scoles ist Wissenschaftsjournalistin aus Denver im US-Bundesstaat Colorado.

» spektrum.de/artikel/1897507

BEDROHLICHE FELSEN In unserer Umgebung im Sonnensystem befinden sich etliche Klumpen aus Eis und Stein. Sie kreuzen nur selten die Erdbahn wie in dieser Illustration – doch wenn, werden sie unter Umständen zur ernststen Gefahr.

AUF EINEN BLICK APOKALYPSE ABGEWEHRT

- 1** Zwar sind die meisten kilometergroßen Asteroiden und Kometen im Sonnensystem identifiziert; aber selbst kleinere wären bei einem Einschlag verheerend.
- 2** Ausgiebige Beobachtungen mit Teleskopen auf der Erde und im All sollen nach und nach alle gefährlichen Himmelskörper erfassen, die möglicherweise auf Kollisionskurs mit der Erde geraten.
- 3** Mit genügend Vorlaufzeit ließe sich ein Objekt ablenken. Dazu gibt es verschiedene Ideen, vom sanften gravitativen Ziehen bis zum Nuklearschlag. Noch ist keine erprobt, doch eine erste Mission soll das ändern.

Am Morgen des 1. Dezember 2020 wirkte das Arecibo-Observatorium in Puerto Rico noch ruhig. Zwar waren schon im August und November Stahlseile gerissen und hatten die 300 Meter breite Schüssel des Radioteleskops beschädigt. Die Stilllegung des 1963 in Betrieb genommenen Instruments war bereits beschlossene Sache. Aber wenigstens stand es noch.

Das änderte sich kurz vor 8 Uhr morgens. In einem Überwachungsvideo kündete aufgewirbelter Staub an einem Stützpfeiler vom Riss eines weiteren Halteseils. Nun konnte nichts mehr die Last der Geräteplattform über dem Reflektor halten. Die Aufnahmen zeigen, wie noch andere Kabel brachen und die Konstruktion gleich einer Abrissbirne herabschwang. Trümmer schleuderten empor, und als sich der Staub legte, klafften riesige Löcher im Arecibo-Observatorium. Edgard Rivera-Valentín stammt aus Puerto Rico, hat früher am Radioteleskop gearbeitet und konnte das Videomaterial anfangs kaum ertragen: »Es fühlte sich furchtbar an, alles einstürzen zu sehen. Das Geschehen war wirklich eine Tragödie.«

Das nun zerstörte Instrument verdankt seine Bekanntheit einer langen wissenschaftlichen Geschichte rund um diverse Signale aus dem All, von Kartierungen des Wasserstoffgases über Radiowellen von Pulsaren bis hin zur (bisher vergeblichen) Suche nach Außerirdischen. Arecibo verfügte darüber hinaus über das leistungsstärkste aktive Radar zur gezielten Untersuchung der Objekte im Sonnensystem. Es konnte die dichte Atmosphäre der Venus durchdringen, und es half nicht zuletzt dabei, die Erde vor Asteroideneinschlä-

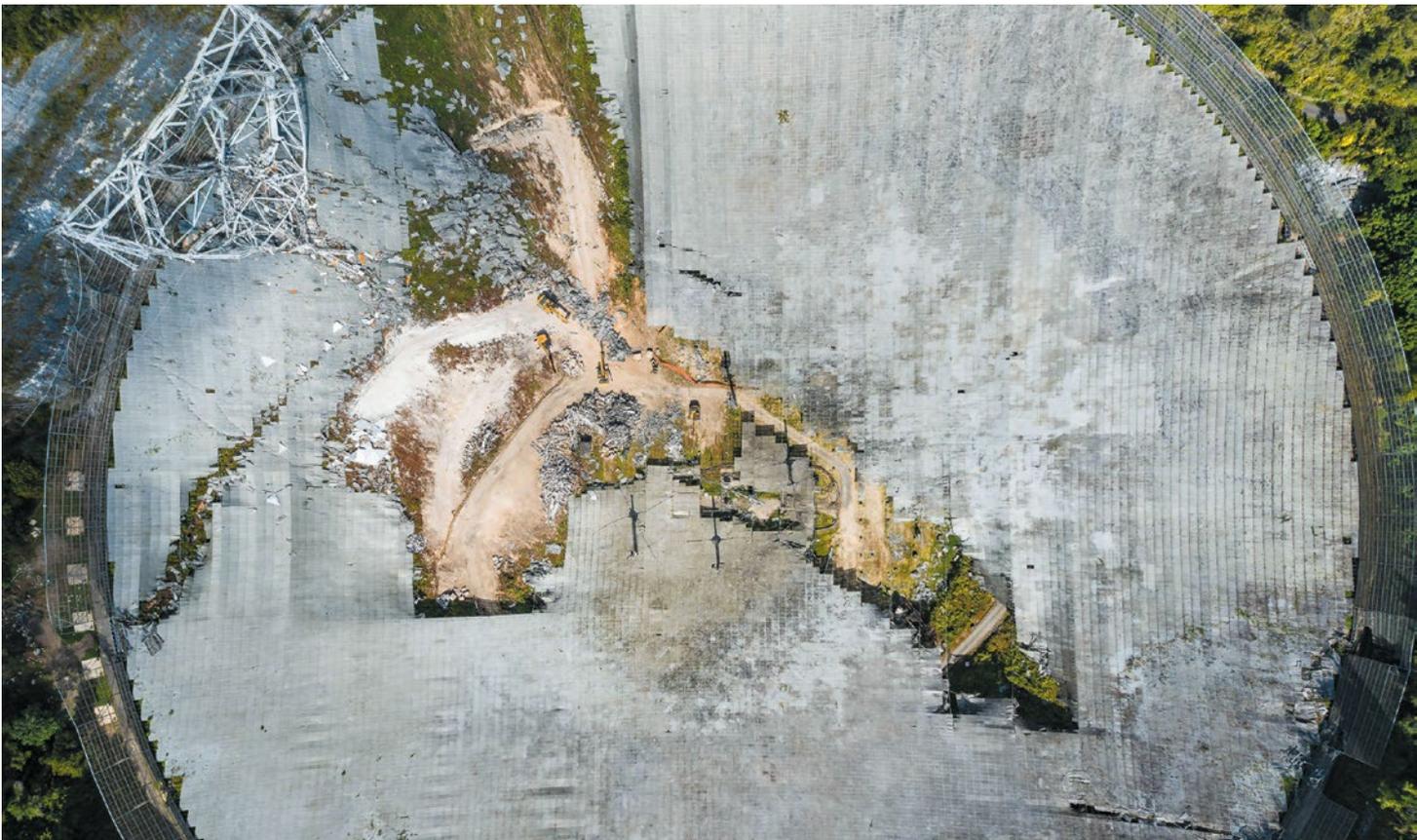
gen zu schützen. Das von den herumfliegenden Gesteinsbrocken reflektierte Echo zeigte deren Oberfläche im Detail. Es lieferte Informationen darüber, ob solche Objekte zu einer Bedrohung werden könnten, und erleichterte Planungen zur Frage, was getan werden müsste, wenn einer der Himmelskörper den Weg der Erde kreuzen würde. »Ein sehr befriedigender Aspekt der Arbeit mit einem Radarteleskop ist, dass man damit zur Verteidigung der ganzen Erde beiträgt«, meint Rivera-Valentín.

Derartige Bestrebungen firmieren inzwischen unter dem Begriff der planetaren Verteidigung: dem Versuch, drohende Zusammenstöße zwischen Asteroiden oder Kometen und der Erde frühzeitig zu erkennen und abzuwenden. Zwar ist an einem beliebigen Tag die Wahrscheinlichkeit für einen verheerenden Einschlag äußerst gering. Aber die Folgen einer solchen Katastrophe wären gravierend, und ein Blick auf die mit Kratern übersäten Himmelskörper im Sonnensystem verdeutlicht eine ernüchternde statistische Wahrheit. Ereignisse, die an einem einzelnen Tag unwahrscheinlich sind, treten ziemlich sicher ein, wenn man nur genügend Tage wartet. Deshalb haben Raumfahrtbehörden ganze Abteilungen, die sich dem Problem widmen, und diverse astronomische Einrichtungen sammeln ständig Bahndaten.

Die Frage ist bloß, ob unser bisheriges Engagement genügt. Mit Arecibos Radar fehlt nun ein Teil des irdischen Verteidigungsarsenals. Und das ist ohnehin dürftig, vielleicht auch wegen des spleenigen Rufs, der dem Feld anhaftet – Asteroidenabwehr verorten die meisten eher in Actionfilmen denn in der seriösen Wissenschaft.

Diese öffentliche Wahrnehmung hat sich aber in den letzten Jahrzehnten geändert. Eine erste Warnung gab es 1994, als der in viele große Teile zerbrochene Komet Shoemaker-Levy geradewegs auf Jupiter zusteuerte und die Welt die Ereignisse gebannt verfolgte. Die Kommunikati-

ZERSTÖRTE RADARSCHÜSSEL Das 300 Meter große Arecibo-Observatorium wird demontiert, nachdem im Dezember 2020 mehrere gerissene Haltekabel schwere Schäden verursacht haben.



onsexpertin Linda Billings, die für die NASA arbeitet, erinnert sich an den Trubel. Am 21. Juli 1994, ein paar Tage nach einer ersten Reihe von Einschlägen, besuchte sie das Naval Observatory in Washington, D.C., vor dessen Gebäude zahlreiche Amateurteleskope auf dem Rasen aufgebaut waren. Alle nahmen den frisch vernarbten Gasplaneten ins Visier. »Wir hatten den Beweis für die reale Gefahr solcher Einschläge eindrücklich vor Augen«, sagt Billings.

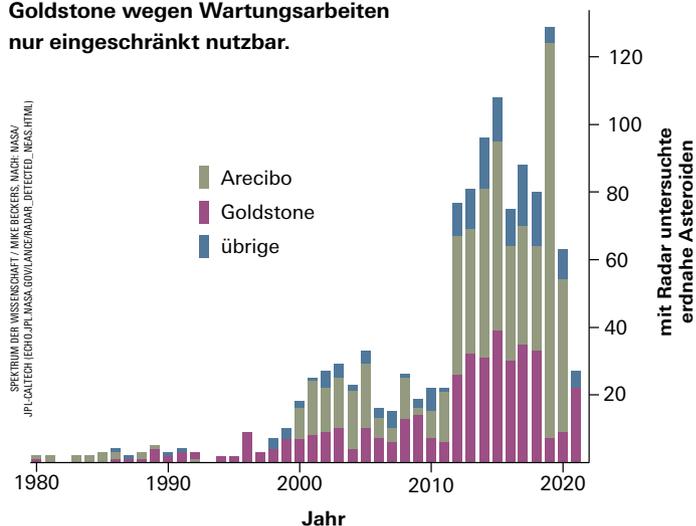
Bald darauf veröffentlichte die US-Luftwaffe zwei Berichte dazu, was das Militär tun sollte, um das Bedrohungspotenzial für die Erde in den kommenden Jahrzehnten zu mindern. Einschläge galten nun als nationales Sicherheitsrisiko. Der erste Bericht namens SpaceCast 2020 prägte den heute in der Forschung gemeinhin verwendeten Begriff der planetaren Verteidigung. Diese Ausarbeitung sowie die zweite namens Air Force 2025 sollten nicht nur klären, wie die USA die Vorherrschaft im Weltraum behalten könnten, sondern beschäftigten sich darüber hinaus mit dem Problem des Erkennens und Ablenkens von Asteroiden. Letzteres wäre möglich, indem man sie zum Beispiel mit einer Raumsonde rammt oder eine Atomwaffe in ihrer Nähe explodieren lässt.

Die damals beteiligten Fachleute waren Angehörige der Luftwaffe. Doch trotz der Warnungen vor einem plötzlichen Ende unserer Zivilisation erhielt das Thema im Verteidigungsministerium nicht so viel Aufmerksamkeit, wie die meisten es sich gewünscht hätten. Besonders nach den Anschlägen vom 11. September 2001 verschoben sich die Prioritäten. Einer der Autoren von SpaceCast 2020, Lindley Johnson, schied 2003 aus dem aktiven Dienst aus. »Die NASA wollte mich zu sich holen und bot mir einen Job an«, erinnert er sich. Eine seiner Aufgaben dort war die Leitung des Beobachtungsprogramms für erdnahe Objekte. Nicht zuletzt dank Johnsons Bemühungen hat sich das Programm zu einer Koordinationsstelle zur planetaren Verteidigung weiterentwickelt, dem Planetary Defense Coordination Office, das Johnson leitet. »Ganz unverblümt gesagt wäre ein unvorhergesehener Asteroideneinschlag die größte Naturkatastrophe, die wir je erlebt haben«, mahnt Johnson. Seine Abteilung will jeden möglichen Einschlag zu einem vermeidbaren machen.

Kosmische Erbsenzählerei

Zu diesem Zweck erfasst die NASA-Abteilung systematisch Daten zu Asteroiden. Dazu tragen beispielsweise Teleskope bei, die große Himmelsbereiche in sichtbaren und infraroten Wellenlängen durchmustern. Vorhandene Observatorien wie die der University of Arizona und der University of Hawaii wurden in Zusammenarbeit mit Johnson zu Überwachungsstationen. Seine Arbeitsgruppe hat außerdem das Weltraumteleskop Wide Area Infrared Survey Explorer (WISE) nach dessen Außerdienststellung 2011 umgewidmet. Es sucht nun als NEOWISE erdnahe Himmelskörper (dafür steht das NEO im neuen Namen: near-earth objects). Auch die US-Streitkräfte tragen zur Suche bei. Ihr in Australien stationiertes Space Surveillance Telescope (SST) gehört zu den weltweit produktivsten Instrumenten für die Asteroidenjagd. Die Entwicklungen sind erfreulich, angesichts der hoch gesteckten Ziele ist aber noch viel zu tun. Immerhin

RADARBEOBSCHTUNGEN Von Asteroiden zurückgeworfene Radarwellen, die von irdischen Observatorien ausgesendet und empfangen werden, liefern wichtige Informationen zur Charakterisierung einzelner Himmelskörper. Seit Ende 2020 ist Arecibo ausgefallen; 2019 und 2020 war Goldstone wegen Wartungsarbeiten nur eingeschränkt nutzbar.



lautet der 2005 vom US-Kongress formulierte offizielle Auftrag an die NASA, 90 Prozent der mindestens 140 Meter großen Objekte zu finden. Derartige Ausmaße würden bei einem Zusammenprall »allerorts für einen ziemlich schlechten Tag sorgen«, wie es Johnson formuliert. Es gibt schätzungsweise 25 000 solcher Brocken. »Wir kommen dem Ziel näher, und bis Ende 2021 dürften wir 10 000 Stück gefunden haben«, hofft er. Das sind 40 Prozent – nach zwei Jahrzehnten Arbeit. Insgesamt haben Astronominen und Astronomen gut 26 000 erdnahe Asteroiden jeglicher Größe entdeckt (siehe »Kleinarbeit«).

Weltweit beteiligen sich mehr als 30 Länder mit engagierten Amateurnetzwerken, nationalen Raumfahrtbehörden und verschiedenen Observatorien am International Asteroid Warning Network (IAWN). Die Gruppe wurde 2013 auf Anregung der Vereinten Nationen gegründet und koordiniert Maßnahmen zur Beobachtung und zur möglichen Reaktion auf kosmische Eindringlinge. Seither wurden hunderte Ereignisse gemeldet, bei denen die Erde Gefahr lief, dass Asteroiden ihr näher als bis auf eine Mondstanz kommen. Das IAWN organisiert zudem Übungsläufe. Hierbei gilt es, mit den verfügbaren Ressourcen ein potenziell bedrohliches Objekt innerhalb einer kurzen Vorwarnzeit genauer zu charakterisieren und darauf zu reagieren.

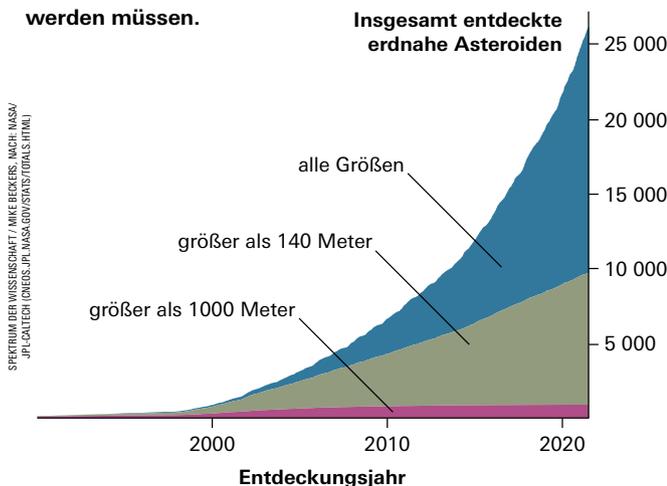
Das ist deswegen sinnvoll, weil die Arbeit ja noch nicht damit getan ist, eine drohende Gefahr lediglich zu entdecken. Dann gehen die Anstrengungen erst richtig los: Von verschiedenen Orten aus erlauben Teleskope Folgebeobachtungen im optischen und im infraroten Wellenlängenbereich. Die immer besser vermessenen Bahnen der aufgespürten Asteroiden müssen möglichst genau in die Zukunft projiziert werden. Das soll klären, wohin sich die kosmischen Geschosse in den kommenden Jahren und Jahrzehnten bewegen und ob sie möglicherweise irgendwann den

Weg der Erde kreuzen. Auch Radarscans wie die von Arecibo spielen eine Rolle dabei, die Form, Zusammensetzung und Flugroute von Asteroiden zu bestimmen.

Sobald Radiostrahlung auf ein Objekt trifft und abprallt, prägt das Hindernis mit seiner Bewegung und seiner Silhouette den zurückgeworfenen Wellen charakteristische Informationen auf. »Wir zeichnen das Echo auf, und wenn es sich in irgendeiner Weise von dem Signal unterscheidet, das wir gesendet haben, muss das auf die Eigenschaften des Ziels zurückzuführen sein, in diesem Fall des Asteroiden«, erklärt Patrick Taylor, der bis 2018 die Radarbeobachtungen am Arecibo-Teleskop geleitet hat. Die Signallaufzeit zurück zur Erde verrät darüber hinaus die exakte Entfernung des Gesteinsbrockens. All das hilft dabei, dessen Umlaufbahn um die Sonne genauer festzulegen und vorherzusagen, ob seine Position und die der Erde in irgendeiner fernen Zukunft in fataler Weise übereinstimmen. Das Radar enthüllt auch Eigenschaften, die spätestens dann wissenschaftlich wertvoll sind, wenn wir den Asteroid vom Kurs abbringen müssen: Ist sein Inneres eher kompakt oder porös, ist sein Umriss rundlich oder erdnussartig?

Eine Radarbeobachtung liefert sozusagen eine Aufnahme des Asteroiden von der Bequemlichkeit unseres irdischen Wohnzimmers aus. »Wir bekommen in gewisser Weise Daten wie von einer vorbeifliegenden Raumsonde, bloß zu einem Bruchteil der Kosten«, kommentiert Ellen Howell von der University of Arizona. Die Planetologin hat mit Arecibo 2018 den Kometen 46P/Wirtanen untersucht, als er sich der Erde bis auf etwa 30-fache Mondstanz genähert hat. »Die Himmelskörper erscheinen uns auf den Bildern als einzelne Felsbrocken statt bloß als Lichtpunkte.«

KLEINARBEIT Insgesamt sind mehr als 26 000 »erdnahe Objekte« identifiziert. Dabei handelt es sich um Himmelskörper, die sich in einem Radius vom 1,3-Fachen der Distanz zwischen Sonne und Erde befinden. Rund 10 000 der bekannten sind größer als 140 Meter, fast 1 000 größer als ein Kilometer. Prinzipiell könnte jeder von ihnen der Erde in Zukunft gefährlich nahe kommen, weshalb alle Bahnen möglichst genau bestimmt und vorausberechnet werden müssen.



Mit dem Verlust von Arecibo, beklagt Howell, »sind unsere diesbezüglichen Fähigkeiten nun stark eingeschränkt.«

Ein geflügeltes Wort in der Szene lautet: Kennt man einen Asteroiden, kennt man einen Asteroiden. Die Eigenschaften jedes Objekts sind einzigartig und nicht verallgemeinerbar. Sie in Erfahrung zu bringen, ihre zukünftige Entwicklung vorherzusagen und möglicherweise zu verändern, könnte für die Menschheit den entscheidenden Unterschied zu all den beklagenswerten Lebensformen aus der Erdgeschichte ausmachen, die hilflos hinnehmen mussten, was ihnen der Weltraum entgeschleuderte. Die Dinosaurier hatten eben kein Raumfahrtprogramm, wie Rivera-Valentín es formuliert.

Wie soll Arecibo 2.0 aussehen?

Arecibo war nicht das einzige prinzipiell dafür geeignete Radar. Nach dem Ende des 300-Meter-Teleskops ist nun das Goldstone-Observatorium in der kalifornischen Wüste das weltweit bedeutsamste. Im Vergleich zu Arecibo lassen sich mit dessen 70-Meter-Schüssel allerdings weniger als halb so viele erdnahe Asteroiden erkennen (siehe »Radarbeobachtungen«). Und obendrein kann eine Anlage immer auch ausfallen. So arbeitete Goldstone kurz vor Arecibos Kollaps wegen Wartungsarbeiten etwa 18 Monate lang nur eingeschränkt. Weitere Radare mit geeigneten Sendeeinheiten stehen zwar beispielsweise auf der Halbinsel Krim oder in Australien, aber sie sind noch weniger leistungsfähig. »Der Verlust von Arecibo wird die Menschheit über einen möglichen nächsten Schritt nachdenken lassen«, meint Taylor. »Wie auch immer der aussehen mag.«

Einige Ideen gibt es bereits. Manche würden gern eine neue Version von Arecibo bauen, bei der am gleichen Ort eine Reihe kleinerer Schüsseln zu einem Radar zusammengeschaltet werden. Unterdessen gab es im November 2020 am Green-Bank-Observatorium in West Virginia, dem größten voll beweglichen Radioteleskop der Welt, in Zusammenarbeit mit dem Militärtechnologiekonzern Raytheon bereits einen ersten erfolgreichen Test: Mit einer von Raytheon entwickelten Sendeeinheit wurde ein Radarsignal in Richtung Mond geschickt, und die über die USA verteilten Antennen des Very Long Baseline Array haben das Echo aufgezeichnet. Das Ergebnis waren Radaraufnahmen des Geländes rund um die Landestelle von Apollo 15. Diese Machbarkeitsanalyse soll den Weg dafür ebnen, die Einrichtung dauerhaft mit einem leistungsfähigen Sender auszustatten, der Asteroiden ins Visier nehmen könnte. »Der Vorschlag einer Aufrüstung von Green Bank klingt großartig«, findet Billings. »Allerdings steht noch keine Finanzierung.«

Selbst, wenn es dazu kommt, bezweifelt Michael Nolan von der University of Arizona, dass Green Bank den gleichen Nutzen bringt wie Arecibo. Es ist technisch aufwändig, von einem Ort aus zu senden und an einem anderen die Signale zu empfangen und umzurechnen. Beides direkt bei Green Bank zu tun, würde wiederum eigene Probleme mit sich bringen. Auch das hypothetische neue Arecibo-Teleskop ist noch nicht finanziert. »Nichts von dem, was mir bisher an Konzepten untergekommen ist, dürfte als neues Arbeitspferd taugen«, meint Nolan.

Und dabei ist es nur der erste Schritt, zu klären, was grundsätzlich zu tun wäre. Der womöglich größere ist die Suche nach einer Antwort auf die Frage: von wem? Einige halten die Aufgabe für zu gewichtig, um sie allein der wissenschaftlichen Gemeinde aufzulasten. Vielleicht sollte sie von einer Organisation getragen werden, die über umfangreiche Erfahrungen mit langfristigen Planungen und, was noch wichtiger ist, über eine solide finanzielle Perspektive verfügt. Mit anderen Worten, dem Verteidigungsministerium.

In den USA ist die zuständige Abteilung des Militärs die 2019 neu geschaffene Space Force. Die Teilstreitkraft befasst sich mit der Überwachung und dem Schutz von Satelliten und behält alle möglichen großen und kleinen Objekte im Bereich zwischen der Erdoberfläche und dem Mond im Blick. Flugkörper von immer mehr Nationen und privaten Unternehmen, kommerzielle Aktivitäten bis hin zu Weltraumtourismus und Fabriken – in Zukunft wird das Treiben im Orbit stark zunehmen. Optische Teleskope und Langstreckenradare helfen dabei, all das zu verfolgen. Dieselben Instrumente könnten quasi nebenher Asteroiden erkennen, wenn diese zufällig im gleichen Abschnitt wie ein anvisierter Satellit (bloß hoffentlich in wesentlich größerer Entfernung) durchs All sausen. Für NASA und Space Force wäre eine Zusammenarbeit von wechselseitigem Vorteil, und in der Tat gibt es bereits Unterhaltungen. Die Verhandlungen sind jedoch nicht abgeschlossen. »Das bisher Besprochene geht schon über ein bloßes Brainstorming hinaus, aber noch haben wir uns auf kein spruchreifes Konzept geeinigt«, kommentiert Johnson. 2020 unterzeichneten die beiden Organisationen eine Absichtserklärung, in der sie sich zur Zusammenarbeit in bestimmten Bereichen wie der Lagebeurteilung und der planetaren Verteidigung bereit erklärten. Bei Nachfragen verwies die Space Force auf die NASA.

Einige wollen die Armee noch stärker in die Pflicht nehmen. Der Weltraumstratege Peter Garretson von der US Air Force würde es befürworten, dem Militär die Leitung der planetaren Verteidigung zu übertragen, insbesondere der Planungen zur Gefahrenabwehr. »Die NASA hat sich als Organisation in erster Linie der Forschung und der Erkun-

dung verschrieben. Meiner Meinung nach reden wir hier aber eindeutig von einer Verteidigungsmission«, erläutert Garretson. »Einen auf uns zukommenden Asteroiden lenkt man doch nicht aus wissenschaftlichem Interesse ab.«

Obwohl in den USA für die Asteroidenabwehr offiziell keine Behörde zuständig ist, beschäftigen sich einige trotzdem mit dem Thema. Besonders intensiv ist das im Energieministerium der Fall, schließlich hat es durch sein Kernwaffenprogramm Erfahrung mit Explosionen. Beispielsweise hat Cathy Plesko vom Los Alamos National Laboratory ursprünglich mit Hilfe von Computerberechnungen untersucht, wie sich Krater auf Planetenoberflächen bilden. Eines Tages kam ein Kollege zu ihr und meinte, ähnliche Algorithmen wie jene, die sie zur Modellierung der Krater benutzte, würden sich vielleicht eignen, um Strategien zur Asteroidenabwehr zu entwickeln. Die Programme könnten nämlich simulieren, wie ein Asteroid, statt irgendwo anders einzuschlagen, selbst von einem Projektil getroffen wird.

Ein Knall über Russland hat die ganze Welt aufgeschreckt

Plesko begann zwar, sich damit näher zu beschäftigen, konnte aber nicht viele Ressourcen dafür aufwenden. Das änderte sich im Februar 2013. Damals stieß ein vermutlich 20 Meter großer Asteroid in die Erdatmosphäre und explodierte 30 Kilometer über dem russischen Tscheljabinsk mit dem Äquivalent von rund 500 Kilotonnen TNT. Etwa 1500 Menschen wurden verletzt, vor allem durch zersplitterte Fensterscheiben. Wie schon bei Shoemaker-Levy schreckte das viele offizielle Stellen auf. Pleskos Team suchte gemeinsam mit der NASA nach der besten Herangehensweise, um vorbereitet zu sein, falls einmal etwas noch Gefährlicheres auftauchen sollte. Die erste physikalische Frage, die sich dann stellt, ist die nach der Zusammensetzung der Asteroiden. Antworten darauf sind überraschend schwierig zu finden, am besten klappt das vom Erdboden aus noch mit Radaruntersuchungen. »Sind es Trümmerhaufen, Matschkugeln oder doch eher Metallbrocken?«, fragt Plesko. »Es gibt da eine unglaubliche Vielfalt.« Das erschwert die Simulationen. Wenn man im

Oberflächenscan

Mehrere am 9. Februar 2018 mit dem Arecibo-Observatorium aufgenommene Bilder zeigen, wie gut sich anhand des Radarechos Rückschlüsse auf Größe und Form ziehen lassen. Dieses Objekt ist etwa 1,5 Kilometer lang und war zu der Zeit mehr als 20-mal so weit von der Erde entfernt wie der Mond. Die Aufnahmen sehen aus wie grobkörnige Fotos, aber eigentlich entspricht bei derlei Radarbildern stets nur die vertikale Achse einer echten räumlichen Dimension (hier 7,5 Meter pro Pixel). Die Horizontale codiert Frequenzunterschiede (in dem Fall 0,04 Hertz pro Pixel), die durch den Dopplereffekt und die Bewegung des Asteroiden entstehen.





NASA/JOHNS HOPKINS AP/STEVE GRIBBIN (DART/JHUAPL EDU/GALLERY)

GESTEINSBILLARD Bei der DART-Mission soll eine Raumsonde, hier eine Illustration, den kleineren Asteroiden eines Doppelsystems rammen. Das dient als Test dafür, wie gut sich die Flugbahn eines solchen Objekts verändern lässt.

Computer ein Flugzeug modelliert, sind dessen Dichte und Form genau bekannt. »Für Asteroiden und Kometen haben wir kein Standardrezept«, sagt sie. »Das müssen wir immer erst herausfinden.«

Plesko untersucht denkbare Strategien, um verschiedene Typen von Himmelskörpern von ihrem Kurs auf die Erde abzubringen. Eine davon nennt sich Gravitationstraktor. Dabei wird eine massereiche Raumsonde so nah wie möglich an den rasenden Felsbrocken herangeführt. »Das bringt den Asteroiden oder den Kometen mit der Zeit von seinem ursprünglichen Kurs ab«, erklärt sie. Aber da der Effekt gering ist, braucht es für nennenswerte Auswirkungen Jahrzehnte. Zudem dürfte erst in einem Jahrhundert die dafür nötige Technologie startbereit sein, schätzt Plesko.

Andere Herangehensweisen setzen auf Laser. Sie sollen von kleinen Raumsonden aus die Oberfläche des Asteroiden erhitzen, woraufhin Material verdampft und weggeschleudert wird. Da nach Newtons Gesetzen jede Kraft eine gleich große und entgegengesetzt orientierte hervorbringt, würde das abgestoßene Gestein den Asteroiden in die andere Richtung schieben. Ebenso steht die deutlich weniger subtile Option in der Diskussion, eine Raumsonde einfach als Geschoss zu verwenden und auf den Asteroiden prallen zu lassen. Man könnte außerdem mit einem Spiegel

die Sonnenstrahlen fokussieren, Triebwerke anbringen oder ihn weiß anmalen, um die Wechselwirkungen mit dem Sonnenlicht und damit die Umlaufbahn zu verändern (siehe »Wie man einen Asteroiden vom Kurs abbringt«). Plesko beschäftigt sich sogar mit der schlagkräftigsten Waffe aus dem Arsenal ihres Arbeitgebers, dem Energieministerium: einer Atombombe. Ihre Detonation neben einem erdnahen Objekt würde reichlich Energie auf dieses übertragen und es besonders nachdrücklich dazu animieren, Material auszustoßen. Allerdings offenbaren Untersuchungen zu Explosionen an oder unter der Oberfläche eines Asteroiden das Risiko, dass die Himmelskörper dabei in mehrere Stücke zerbrechen könnten, die ihrerseits auf unvorhergesehene Weise zum Problem würden. Politische Rahmenbedingungen und globale Abrüstungsbemühungen verkomplizieren die Option zusätzlich. Schließlich könnte ein Land die Asteroidenabwehr als Deckmantel zur Entwicklung von Massenvernichtungswaffen benutzen.

Alle zwei Jahre veranstaltet die internationale Forschungsgemeinschaft eine Konferenz zur planetaren Verteidigung inklusive Planspiel. Dabei proben verschiedene Institute und Behörden ihre Reaktion auf ein fiktives Szenario, in dem ein bedrohlicher Felsbrocken entdeckt wird. Erste Informationen werden im Voraus online veröffentlicht, und mit jedem Konferenztage erfahren alle, die teilnehmen, genauere Daten – so, wie es bei einem realen Himmelskörper der Fall wäre, der im Lauf von Wochen und Monaten eingehend von der Erde aus untersucht wird. 2019 war vor Beginn der Konferenz bereits klar, dass ein fiktiver Felsen mit einem Durchmesser von 100 bis 300 Metern die Erde in acht Jahren mit einer Wahrscheinlichkeit von einem Prozent

ARCEID/NASA/NSF



treffen würde. Am dritten Tag, nach mehreren vergangenen hypothetischen Jahren und einer ersten Erkundungssonde, war mehr bekannt: Er war 220 Meter lang, 140 Meter breit und steuerte genau auf Denver zu. Die Gruppe ersann internationale Missionen zur Ablenkung des Projektils, doch trotz eines Teilerfolgs nahm ein abgebrochenes, 60 Meter großes Stück Kurs auf Manhattan. Angesichts der nunmehr unabwendbaren Katastrophe überlegten die Beteiligten, welche Bereiche sie wie schnell evakuieren könnten, was mit Chemiefabriken und Atomkraftwerken zu tun wäre und wie die wirtschaftlichen Folgen aussehen würden.

2021 kehrten alle an den Spieltisch zurück, dieses Mal pandemiebedingt virtuell. Sie wurden mit einem Asteroiden konfrontiert, der bereits in sechs Monaten eintreffen könnte. Solche Übungen »lassen uns überprüfen, wie lang es realistischerweise wirklich dauert, Maßnahmen zu ergreifen«, erklärt Plesko. Es sei schließlich nicht wie in Holly-

wood, wo kurz nach der Entdeckung eines Asteroiden eine zufällig bereitstehende Rakete starte. In Wirklichkeit kann die Menschheit zwar nicht so schnell reagieren wie im Film, aber wir sind dem Weltall auch nicht schutzlos ausgeliefert. Es gibt durchaus Dinge, die wir tun können.

Beispielsweise wird eine eigens dafür konzipierte Weltraummission unsere Fähigkeiten auf die Probe stellen, im Weltraum Berge zu versetzen. Der Double Asteroid Redirection Test (DART) der NASA soll Ende 2021 oder Anfang 2022 starten und beweisen, dass sich die Bahn eines Asteroiden auch jenseits von Planspielen beeinflussen lässt. Andrew Rivkin von der Johns Hopkins University leitet eines der Missionsteams. Seine Leidenschaft für Asteroiden hat mit grundlegenden Forschungen zu den Ursprüngen des Sonnensystems begonnen. »Egal, welche Frage man zu beantworten versucht, alles lässt sich irgendwie auf Asteroiden zurückführen«, betont er.

DART wird zum Didymos-System reisen, das aus einem großen Asteroiden namens Didymos und seinem kleinen Begleiter Dimorphos besteht. Die Raumsonde soll in den Trabanten einschlagen und dessen Umlaufbahn verändern – und damit die Bewegung des ganzen Gespanns um die Sonne. Die einige hundert Kilogramm schwere Sonde wird Dimorphos mit einer Geschwindigkeit von 6,6 Kilometern pro Sekunde treffen. Das könnte Berechnungen zufolge die Umlaufperiode um etwa zehn Minuten verändern. Dimorphos ist zwar nur der kleinere Partner, aber bereits seine Größe würde genügen, um eine Stadt auszuradiieren. Darum dürfte der Test realitätsnahe Daten dazu liefern, wie gut wir schon mit heutigen Mitteln den Pfad eines potenziell bedrohlichen Objekts ändern können. Insofern ist DART so etwas wie ein Demonstrator für einen Mittelweg zwischen den extremsten verfügbaren Optionen, die Rivkin als »wir schießen eine Atombombe darauf oder wir tun nichts und hoffen auf das Beste« charakterisiert. Die Herangehensweise würde ebenso bei einem Einzelgänger funktionieren, aber es gibt gute Gründe, für den Test ein Doppelsystem zu wählen: Änderungen bei der Umlaufbahn des Trabanten sind sehr einfach zu messen, weil man seine Bewegung immer in Relation zum größeren Partner beobachten kann.

Rendezvous mit einem Getroffenen

Bei der Hera genannten Mission der europäischen Weltraumorganisation ESA soll 2024 eine Raumsonde zu Didymos und Dimorphos aufbrechen – ebenjenem Asteroidensystem, das Ziel der NASA-Mission DART ist. Die hier illustrierte Hera-Sonde soll bei ihrer Ankunft 2027 eingehend den Krater ins Visier nehmen, der 2022 beim Einschlag von DART erzeugt werden soll. Dabei setzt sie auch zwei Miniatursatelliten ab. Einer von ihnen trägt eine Radarantenne für Einblicke in die innere Struktur von Dimorphos, während der andere vor allem spektrometrische Informationen über die chemische Zusammensetzung liefert. Die Daten sollen helfen, die Wirksamkeit des DART-Einschlags zu beurteilen und Computermodelle zu verfeinern, um zukünftige Missionen zur Asteroidenabwehr besser planen zu können.



Kleine und große Gefahren

Die Erde trifft ständig auf Gestein, das zwischen den Planeten umhertreibt. So sammelt unsere Atmosphäre täglich tonnenweise Staub und kleinste Körnchen ein. Sie machen sich beim Verglühen lediglich als Sternschnuppen bemerkbar. Je größer die Brocken sind, desto tiefer können sie unsere schützende Lufthülle durchstoßen; sie kommen aber auch umso seltener vor.

Größenordnung des Asteroiden	1 Meter	10 Meter	100 Meter	1000 Meter
mittlere Zeit zwischen solchen Ereignissen	jedes Jahr	100 Jahre	10000 Jahre	Millionen Jahre
typische Folgen eines Einschlags	Die meisten derartigen Objekte verglühen als Feuerkugeln in der Atmosphäre. Stücke erreichen bisweilen als Meteoriten den Boden.	Je nach Beschaffenheit und Eintrittswinkel brechen die Körper oft noch in der Luft explosionsartig auseinander. Die Detonation kann Siedlungen beschädigen (Tscheljabinsk, 2013) oder Bäume entwurzeln (Tunguska, 1908). Kompakte Objekte, etwa Eisenmeteoriten, können auch einschlagen und erzeugen dann mächtige Krater.	Die Atmosphäre bremst kaum noch; der Impakt sorgt für regionale Zerstörungen. Ein Krater hat grob den zehnfachen Durchmesser des verursachenden Asteroiden. Alles im Umkreis vieler Kilometer wird ausgelöscht, weit darüber hinaus reichen Feuerball und Druckwelle.	Es gibt katastrophale Verwüstungen mit globalen Auswirkungen. In Deutschland entstand das kreisrunde, 20 Kilometer durchmessende Nördlinger Ries vor etwa 15 Millionen Jahren bei einem Einschlag eines 1,5-Kilometer-Meteoriten. Weite Teile Europas waren betroffen. Beim global verheerenden Chicxulub-Impakt vor 66 Millionen Jahren waren Objekt und Krater zehnmal mächtiger.
grobe Anzahl im Umfeld der Erde	Milliarden	Millionen	einige Zehntausend, davon rund ein Drittel identifiziert	etwa 1000, von denen die meisten bekannt sind

Das DART-Team wird etwa einen Monat vor dem Zusammenstoß im Jahr 2022 einen ersten Blick auf das System in Form eines einzelnen Pixels erhalten. »Dieser eine Pixel ist das, worauf wir zusteuern«, sagt Rivkins Kollegin Elena Adams, die Systemingenieurin der Mission. Eine Stunde vor der Ankunft wird in ähnlicher Weise der Trabant auf den Bildern erscheinen, und der Zielflug beginnt. »Wenn alles gut läuft, reißt die Funkverbindung zur Sonde plötzlich ab«, erläutert sie. Dann hat die Kollision geklappt. Adams findet den Gedanken befremdlich: »Es ist unser Auftrag, 250 Millionen Dollar teure Technik zu zerstören!«

Ursprünglich sollte parallel eine europäische Raumsonde zum Didymos-System aufbrechen, die Objekte vorbereitend untersuchen und den Ablauf des Einschlags aus der Nähe betrachten. Wegen Finanzierungsproblemen wurde die Mission 2016 verschoben, woraufhin die NASA allein weiterplante. »Hera« wird nun ein paar Jahre später starten und die Folgen des Treffers auf Dimorphos nachträglich dokumentieren (siehe »Rendezvous mit einem Getroffenen«). Die begleitende Überwachung des DART-Missionsverlaufs muss darum vor allem von der Erde sowie von Weltraumteleskopen aus stattfinden; zudem soll vor dem Aufprall ein autonom navigierender Minisatellit mit Kamera abgesetzt werden und das Spektakel überstehen. Was irdische Beobachtungen angeht, setzt das Team unter anderem auf das Goldstone-Radar. »Wir hatten auch auf

Arecibo gehofft«, bedauert Rivkin. Die gesammelten Daten werden in Modelle wie jene von Plesko einfließen und bessere Entscheidungen ermöglichen, wenn die Weltgemeinschaft eines Tages tatsächlich auf eine konkrete Bedrohungslage reagieren muss. »Raumfahrtprogramme wie DART sind so etwas wie eine Versicherung«, meint Rivkin. Menschen zahlen schließlich auch für Policen gegen Feuer und Hochwasser. »Wir erwarten zwar, dass unser Haus nie in Brand gerät oder überflutet wird, aber wir erfüllen sozusagen unsere Sorgfaltspflicht für den unwahrscheinlichen Fall, dass es doch so kommt.«

Rivkin freut sich einerseits über den allmählich besseren Stand der planetaren Verteidigung, andererseits warnt er vor überzogener Angst: »Wenn die Leute nachts von Gedanken an Asteroiden wach gehalten werden, dann hoffentlich nur wegen all der aufregenden Wissenschaft.« Letztlich ist es die Erforschung der steinernen Vagabunden, vom Aufspüren bis zum genauen Charakterisieren, auf der die gesamte Asteroidenabwehr basiert. Und diese wiederum ermächtigt uns, dem Kosmos ein wenig Kontrolle zu entreißen. »Zum ersten Mal hat unsere Spezies die Möglichkeit, eine Naturkatastrophe abzuwenden«, bekräftigt Plesko. »Wir können weder einen Hurrikan stoppen noch ein Erdbeben verhindern.« Aber wenn es darum ginge, einen Asteroiden aufzuhalten, »dann bin ich davon überzeugt, dass wir das könnten, wenn wir wirklich müssten.« ◀

BIOPHYSIK EIN BOTENSTOFF FÜR DEN MAGNETSINN

Wie Tiere das Magnetfeld der Erde wahrnehmen, ist ein großes Rätsel. Das Protein ErCRY4 scheint dabei eine zentrale Rolle zu spielen.



► Eines der größten Rätsel der Sinnesbiologie ist der Magnetsinn: die Fähigkeit vieler Tiere, das irdische Magnetfeld wahrzunehmen und als Kompass zu nutzen. Vögel, Meeresschildkröten, Fische, Krebstiere und Insekten navigieren mit seiner Hilfe über kurze oder weite Distanzen. Unklar ist bisher jedoch, auf welchem physikalischen Mechanismus die Feldwahrnehmung beruht.

Zugvögel besitzen in der Netzhaut ihrer Augen magnetisch empfindliche Proteine, so genannte Cryptochrome, die als eine entscheidende Komponente des Magnetsinns gelten. Allerdings fehlte bisher der Nachweis, dass ihre Funktionsweise und ihre Sensitivität es erlauben, das extrem schwache Magnetfeld der Erde zu spüren. Ein Team um Jingjing Xu von der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg hat den Beweis nun in Laborversuchen geliefert und uns damit einer Lösung des Rätsels näher gebracht.

Derzeit gibt es zwei Haupthypothesen, wie Tiere das Erdmagnetfeld wahrnehmen. Die eine besagt: Ändert ein Organismus seine Ausrichtung im Feld, üben Magnetitkristalle (Fe_3O_4) in seinem Innern eine Rotationskraft auf Sinneszellen aus, die mechanische Kräfte registrieren. Fliegt ein Zugvogel beispielsweise eine Kurve, drehen sich die Kristalle mit ihm im äußeren Feld. Da sie das Bestreben haben, sich entlang der Feldlinien auszurichten, erfahren sie eine Kraftwirkung, die sie als Drehmoment auf Sinneszellen übertragen könnten. Das wiederum könnte Ionenkanäle öffnen oder schließen, die in der Membran der Zellen sitzen, und somit eine Sinneswahrnehmung ermöglichen.

Laut der anderen Hypothese bilden Cryptochrom-Proteine, die Lichtphotonen absorbieren und dadurch energetisch angeregt werden, magnetisch empfindliche chemische Zwischenprodukte, so genannte Radikalpaare.

AM FELD ORIENTIERT Rotkehlchen gehören zu den Tieren, die einen inneren Magnetkompass haben. Man versteht jetzt immer besser, wie dieser funktioniert.

Diese sind nicht stabil, sondern bringen nach Sekundenbruchteilen eines von mehreren möglichen Reaktionsprodukten hervor. Unter anderem entsteht ein Komplex aus Cryptochrom und dem Radikalmolekül FADH^\bullet . Dessen Ausbeute könnte schwanken, wenn sich das Tier im Erdmagnetfeld anders ausrichtet – und ihm somit erlauben, die Veränderung der Feldrichtung zu spüren.

Die zwei Thesen müssen sich nicht gegenseitig ausschließen; Zugvögel könnten beide Mechanismen nutzen. Vielleicht verwenden sie Magnetite zur Kartierung, um Orten bestimmte magnetische Eigenschaften zuzuordnen – und Cryptochrome für ihren Magnetkompass, der es ihnen erlaubt, ihre Ausrichtung relativ zum magnetischen Nordpol zu bestimmen.

Von blauem Licht angeregt

Cryptochrome kommen sowohl in Tieren als auch in Pflanzen vor und gehören zur Gruppe der Flavoproteine. Sie arbeiten eng zusammen mit dem Molekül Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD), das im vollständig oxidierten Zustand Photonen blauen Lichts absorbiert. Dies hebt das Molekül auf ein höheres Energieniveau und regt es damit energetisch an. Bei Tieren sind die Cryptochrom-Proteine CRY1 und CRY2 daran beteiligt, zirkadiane Rhythmen zu steuern, also Körperfunktionen, die im Tagesverlauf periodisch variieren. Die Menge an CRY1 und CRY2, die der Organismus produziert, schwankt typischerweise im 24-Stunden-Takt.

Im Gegensatz dazu gibt es beim Cryptochrom CRY4 keine Anzeichen für einen zirkadianen Zyklus. Das deutet darauf hin, dass diese Substanz eine andere biologische Funktion erfüllt. CRY4 tritt nur bei Vögeln, Fischen und Amphibien auf, die nachweislich Magnetfelder wahrnehmen. Das Protein gilt daher schon lange als heißer Kandidat für ein Molekül, das es Wirbeltieren ermöglicht, sich an Magnetfeldern zu orientieren.

Frühere Studien mit Hühnern (*Gallus gallus*) und Rotkehlchen (*Eri-thacus rubecula*) haben gezeigt, dass CRY4 in zwei Fotorezeptor-Typen

der Netzhaut vorkommt: in so genannten Doppelzapfen und in langwellenempfindlichen Einzelzapfen. Dort sitzt das Protein an einem idealen Ort, um Licht zu empfangen, was die Cryptochrom-FAD-Komplexe energetisch anregen kann. Zudem fährt die Produktion von CRY4 in der Rotkehlchen-Netzhaut hoch, wenn die Zugzeit naht – ein weiterer Hinweis darauf, dass CRY4 für den Magnetsinn wichtig ist. Bei Hühnern hingegen, die permanent an einem Ort leben, bleibt sie dauerhaft niedrig.

Xu und ihr Team haben nachgewiesen, dass die CRY4-Variante im Rotkehlchen, die sie ErCRY4 nennen (das »Er« steht für den Artnamen), eine für den Magnetsinn wichtige Eigenschaft besitzt: die Fähigkeit, Radikalpaare zu bilden, die eine hohe magnetische Empfindlichkeit aufweisen. Radikale besitzen ungepaarte Valenzelektronen, was sie enorm reaktionsfreudig macht. Bei Lichteinfall wird FAD, das an ErCRY4 gebunden ist, chemisch reduziert, nimmt also ein Elektron auf und wird zum Radikal. Das Elektron stammt von einem Tryptophan-Aminosäurerest in ErCRY4, der sich durch Abgabe dieses geladenen Teilchens ebenfalls »radikalisiert«. Das entstehende Radikalpaar ist magnetisch, weil sich ungepaarte Elektronen wie mikroskopisch kleine Magnete verhalten – mit einer Eigenschaft, die Physiker Spin nennen (meist symbolisiert durch einen Pfeil).

Sind die Spins der ungepaarten Elektronen des Radikalpaars antiparallel orientiert ($\uparrow\downarrow$), dann befindet sich dieses im so genannten Singulett-Zustand. Bei paralleler Ausrichtung hingegen ($\uparrow\uparrow$) nimmt das Radikalpaar den Triplett-Zustand ein. Wird ErCRY4-FAD durch Lichteinstrahlung energetisch angeregt, bildet es stets Radikalpaare im Singulett-Zustand, doch der bleibt nicht lange bestehen. Auf Grund einer Eigenart der Quantenmechanik wechselt das Paar rasch in den Triplett-Zustand und wieder zurück – und das Millionen Mal pro Sekunde. Jeder der beiden Zustände kann das Reaktionsprodukt ErCRY4-FADH $^\bullet$ hervorbringen: ein Cryptochrom-Molekül ErCRY4, welches das Radikal FADH $^\bullet$

enthält. Diese Verbindung ist es vermutlich, die dem Tier die Magnetfeld-Wahrnehmung ermöglicht.

Im Gegensatz zum Triplett- kann der Singulett-Zustand außerdem in seinen oxidierten, nicht angeregten Grundzustand zurückkehren (siehe »Ein Modell des Magnetsinns«), wodurch er weniger Reaktionsprodukt erzeugt. Falls das Radikalpaar einen der beiden Zustände bevorzugt und ihn im zeitlichen Durchschnitt länger annimmt als den anderen, verändert sich somit die

Ausbeute des Reaktionsprodukts. Verbringt es etwa im Schnitt mehr Zeit im Triplett-Zustand, erhöht sich die Menge an ErCRY4-FADH[•].

Und hierin liegt der zentrale Mechanismus des postulierten cryptochrombasierten Magnetsinns: Der zeitliche Anteil, den das Radikalpaar im Singulett- beziehungsweise Triplett-Zustand verbringt, und damit die Ausbeute des Reaktionsprodukts, hängen direkt von der Einfallrichtung des Erdmagnetfelds ab. Die Wechselwirkung zwi-

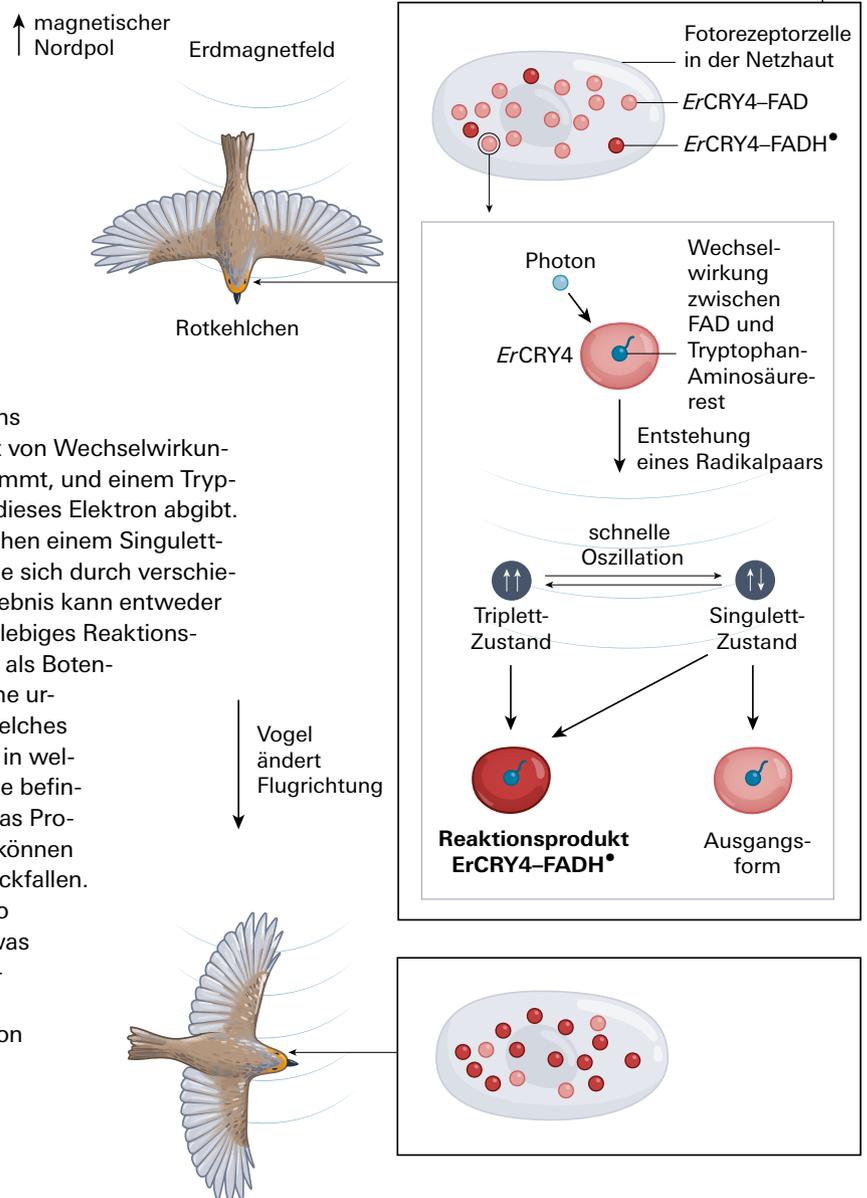
schen einem einzelnen ErCRY4-Molekül und dem Feld ist für sich genommen zwar mindestens eine Million Mal zu schwach, um die Radikale zu erzeugen und die Stabilität ihrer Spin-Zustände zu beeinflussen. Aber das Photon, das von FAD absorbiert wird, liefert die hierfür nötige Energie. Damit der Mechanismus funktioniert, muss das Radikalpaar magnetisch hinreichend empfindlich sein; das Reaktionsprodukt muss in genügend hoher Ausbeute entstehen; und es

Ein Modell des Magnetsinns

Vögel nutzen das Erdmagnetfeld, um zu navigieren. Fotorezeptorzellen in der Netzhaut des Rotkehlchens (*Erithacus rubecula*) enthalten ein Protein namens ErCRY4, das sich an das Molekül FAD anlagert. Der resultierende Komplex heißt ErCRY4-FAD, wenn FAD im Grundzustand vorliegt, beziehungsweise ErCRY4-FADH[•], wenn FAD von blauen Lichtphotonen energetisch angeregt wird. Bei Absorption eines solchen Photons entsteht ein Radikalpaar – hervorgebracht von Wechselwirkungen zwischen FAD, das ein Elektron aufnimmt, und einem Tryptophan-Aminosäurerest von ErCRY4, der dieses Elektron abgibt.

Das Radikalpaar oszilliert schnell zwischen einem Singulett- und einem Triplett-Zustand hin und her, die sich durch verschiedene Spin-Zustände auszeichnen. Als Ergebnis kann entweder ErCRY4-FADH[•] entstehen, ein relativ langlebiges Reaktionsprodukt, das dem Organismus vermutlich als Botenstoff dient. Oder der Komplex kehrt in seine ursprüngliche Form ErCRY4-FAD zurück. Welches dieser Ereignisse eintritt, hängt davon ab, in welchem Zustand sich das Radikalpaar gerade befindet: Triplett-Zustände münden immer in das Produkt ErCRY4-FADH[•], Singulett-Zustände können zusätzlich auch in die Ausgangsform zurückfallen.

Ändert der Vogel seine Flugrichtung, so orientiert er sich im Erdmagnetfeld neu, was die jeweiligen Anteile der Singulett- beziehungsweise Triplett-Zustände verändert. Das wiederum modifiziert die Ausbeute von ErCRY4-FADH[•]. Eine aktuelle Studie hat jetzt gezeigt, dass ErCRY4 alle physikalischen Voraussetzungen erfüllt, um als Grundlage des Magnetsinns zu dienen.



muss lange genug existieren, um als Signal zu wirken. Xu und ihr Team haben in ihrer Studie gezeigt, dass ErCRY4 all diese Bedingungen erfüllt – zumindest im Reagenzglas. Möglich war ihnen das mit Hilfe eines umfangreichen Methodenrepertoires der biophysikalischen Chemie, einschließlich spektroskopischer Verfahren und Simulationen der Moleküldynamik.

Laut der Studie besitzt ErCRY4 eine höhere magnetische Empfindlichkeit als CRY4-Varianten in Tauben und Hühnern, die keinen jahreszeitlichen Vogelzug praktizieren. Zudem weist ErCRY4 einige Mutationen in der

Aminosäuresequenz auf, die wahrscheinlich zur Folge haben, dass reichlich Reaktionsprodukt entsteht und dieses eine lange Lebenszeit von mehr als einer Millisekunde hat. Beides ist wichtig für einen leistungsfähigen Magnetsinn. Die Arbeit von Xu und ihren Kolleginnen und Kollegen liefert zwar noch keinen endgültigen Beweis dafür, dass ErCRY4 der rätselhafte Magnetsensor bei Tieren ist, die anhand des Erdmagnetfelds navigieren. Doch sie bringt uns einer Aufklärung des Geheimnisses deutlich näher.

Eric J. Warrant arbeitet als Professor für Funktionale Zoologie an der Universität Lund in Schweden.

QUELLEN

Hore, P.J., Mouritsen, H.: The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annual Review of Biophysics* 45, 2016

Mouritsen, H.: Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. *Nature* 558, 2018

Xu, J. et al.: Magnetic sensitivity of cryptochrome 4 from a migratory songbird. *Nature* 594, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 594, S. 497–498, 2021

RADIOASTRONOMIE BLITZSCHNELL UND GRUNDVERSCHIEDEN

Immer wieder erreichen uns von überall her im Kosmos kurze Ausbrüche intensiver Radiostrahlung. Ein Teleskop hat nun gleich Hunderte solcher Ereignisse registriert. Die Daten weisen erstmals deutlich auf zwei verschiedene Signaltypen hin: Manche Quellen senden einen einmaligen Blitz aus, andere wiederholen sich.

Ein Radioteleskop in Kanada hat 535 schnelle Radioblitze entdeckt und damit die bisher bekannte Anzahl dieser kurzen, hochenergetischen Phänomene auf einen Schlag vervierfacht. Die Ergebnisse belegen, dass es zwei verschiedene Arten der rätselhaften, Fast Radio Burst genannten Ereignisse gibt. Die meisten Quellen scheinen nur einmal aktiv zu sein, während sich einige wenige Signale periodisch wiederholen und mindestens zehnmal länger dauern als der Durchschnitt. Somit dürften schnelle Radioblitze von mindestens zwei grundverschiedenen astrophysikalischen Phänomenen hervorgerufen werden. Studien-Koautor Kiyoshi Masui vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge ist optimistisch, mit der Untersuchung erstmals klare Unterschiede aufgezeigt zu haben: »Damit dürften wir jetzt einen Beweis haben.«

Die quasi über Nacht rapide gestiegene Datenfülle hat die Fachwelt in helle Aufregung versetzt. »Als ich an

dem Tag aufgewacht bin, hatten sich in diversen Nachrichtengruppen bereits alle möglichen Leute über die Veröffentlichungen unterhalten«, erzählt Laura Spitler, eine Astrophysikerin am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Sie hat 2016 den ersten sich wiederholenden Radioblitz mitentdeckt – mit dem mittlerweile eingestürzten Arecibo-Teleskop in Puerto Rico.

Die nun zusammengetragenen und aufbereiteten Erkenntnisse stammen aus dem ersten Betriebsjahr des im September 2017 fertig gestellten Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) in der Nähe von Penticton in British Columbia. Das Team präsentierte die Ergebnisse während eines virtuellen Treffens der American Astronomical Society am 9. Juni 2021 und lud die Dokumente als Vorabveröffentlichungen beim Online-Archiv »arXiv« hoch.

CHIME hat keine beweglichen Teile, es lässt sich also nicht gezielt auf einen Ort am Himmel ausrichten.

Vielmehr besteht es aus vier jeweils 100 Meter langen, halbzylinderförmigen Antennen, die durchgehend einen Ausschnitt des Himmels über sich erfassen. Im Verlauf der Erddrehung scannt das Teleskop den Himmel ab. Mittels Hochleistungselektronik entsteht aus den einlaufenden Signalen ein Bild.

Ursprünglich war CHIME dafür konzipiert, die Verteilung der Materie im Universum zu kartografieren. Aber mit zusätzlich angebrachter Technik lassen sich darüber hinaus Radioblitze einfangen. Spitler erinnert sich, dass viele Kolleginnen und Kollegen skeptisch hinsichtlich des Potenzials zum Aufspüren von Fast Radio Bursts waren. Nun zeigen die neuen Daten, wie gut der Ansatz funktioniert. »Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen«, sagt Spitler. »Es ist sehr beeindruckend.«

Die physikalischen Vorgänge hinter den Radioblitzen sind noch unklar. Doch die CHIME-Sammlung stützt die Hypothese, dass es darunter mindes-



KOSMOLOGISCHE HALFPIPE In einem Tal in Kanada empfangen die halbzylinderförmigen Reflektoren des CHIME-Teleskops Radiostrahlung aus dem All.

ANDRÉ REICHMANN COLLABORATION

tens zwei verschiedene Typen gibt. 61 der 535 entdeckten Radioblitzes waren »Repeater«. Sie stammen von 18 Quellen, bei denen mehrfach Strahlungsausbrüche beobachtet wurden. Die beiden Gruppen unterscheiden sich durch ihre Dauer: Einmalige Ereignisse beanspruchen eine viel kürzere Zeitspanne. Repeater emittieren Photonen außerdem auf einem viel schmaleren Frequenzband als vereinzelte Bursts. Spitler hält das für den »bei Weitem überzeugendsten Beweis dafür, dass es zwei Arten gibt«.

Intergalaktische Signalverzögerung

Darauf gab es bislang allenfalls dürftige Hinweise. Einige Astronomen hatten daher argumentiert, es könnte sich bei den isoliert vorkommenden Fast Radio Bursts in Wirklichkeit um Repeater handeln, die lediglich nicht lange genug beobachtet wurden, um sie erneut ausbrechen zu sehen. »Das Phänomen muss nicht zwangsläufig ein vollkommen anderes sein, aber es ist möglich«, stellt Kiyoshi Masui jetzt fest.

In irdischen Instrumenten schlagen sich schnelle Radioblitzes in der Regel mit einer Signaldauer von einer Sekunde oder mehr nieder. Doch das ist irreführend. Die Radiowellen legen im Kosmos Millionen von Lichtjahren zurück, und intergalaktische Materie kann die Strahlung über das gesamte Spektrum hinweg verwischen. Wegen dieser »Dispersion« kommen niederfrequente Wellen hier im Vergleich zu höherfrequenten verzögert an. Laut

Berechnungen dauert die Emission eines Radioblitzes an der Quelle typischerweise nur Millisekunden. Währenddessen kann 500 Millionen Mal mehr Energie frei werden, als die Sonne im gleichen Zeitraum abstrahlt.

Das Ausmaß der Dispersion gibt einen groben Hinweis darauf, wie weit die Strahlung gereist ist. Mit Ausnahme eines Ereignisses aus der Milchstraße stammten alle Ausbrüche aus anderen Galaxien. Dem CHIME-Team zufolge sind die Ursprungsorte gleichmäßig über den Himmel verteilt, und die meisten waren keiner bestimmten Galaxie zuzuordnen.

Bei der gezielten Überwachung von Himmelsregionen, in denen es in der Vergangenheit zu Ausbrüchen kam, ließen sich in einigen Fällen wiederkehrende Signale beobachten. Der Repeater, den Spitler und ihre Gruppe 2016 entdeckt haben, wird beispielsweise alle 160 Tage aktiv und sendet dann etwa einen Tag lang mehrere Blitze pro Stunde aus.

Die Regelmäßigkeit bietet einige Anhaltspunkte für Spekulationen über mögliche Ursachen. Laut Spitler könnten die wiederholten Ausbrüche beispielsweise auftreten, wenn sich ein Neutronenstern in einer Umlaufbahn um einen gewöhnlichen Stern befindet. Jedes Mal, wenn sich die Partner nahekomen, könnte das extrem starke Magnetfeld des Neutronensterns den elektrisch geladenen Sternwind bündeln und ins All schleudern. Sich nicht wiederholende Blitze hingegen sind möglicherweise das

Ergebnis zerstörerischer Ereignisse wie Kollisionen von Neutronensternen. Auch magnetische Stürme auf jungen Neutronensternen mit besonders kompakten, intensiven Feldern werden diskutiert.

Mit einem solchen Magnetar könnte das Ereignis in der Milchstraße zusammenhängen, denn in der zugehörigen Himmelsregion war bereits ein derartiges Objekt bekannt. Die Hypothese erscheint inzwischen jedoch als weniger wahrscheinlich. Denn am 20. Januar 2020 blitzte ein Objekt im CHIME-Detektor auf, das sich laut einer im Mai 2021 veröffentlichten Analyse in einem Kugelsternhaufen in der Galaxie M81 befindet. Kugelsternhaufen sind Ansammlungen von sehr alten Sternen, die vermutlich keine Magnetare beherbergen.

Noch 2007 waren Fast Radio Bursts etwas völlig Neues: In jenem Jahr war die erste Entdeckung eine große Überraschung für die Astronomiegemeinschaft, und viele Jahre lang waren nur wenige Fälle bekannt. Bald gab es mehr Hypothesen zu den denkbaren Ursachen als tatsächliche Beobachtungen des Phänomens. Masui zeigt sich zuversichtlich, den Trend jetzt mit CHIME umgekehrt zu haben: »Die Theoretiker werden uns nicht mehr einholen.« Auch, weil die nun veröffentlichte Sammlung von Entdeckungen zwischen 2018 und 2019 erst der Anfang ist. Das Team hat seitdem bereits viele weitere schnelle Radioblitzes gefunden und wird die Erkenntnisse noch über Jahre hinaus auswerten.

Davide Castelvecchi ist Wissenschaftsautor in London und schreibt über Physik, Astronomie, Mathematik und Computerwissenschaften.

QUELLEN

Kirsten, F.: A repeating fast radio burst source in a globular cluster. arXiv 2105.11445, 2021

The CHIME/FRB Collaboration: The first CHIME/FRB fast radio burst catalog. arXiv 2106.04352, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 10.1038/d41586-021-01560-4, 2021

PALÄOANTHROPOLOGIE EIN WEITERES PUZZLESTÜCK DER MENSCHLICHEN EVOLUTION

Ein Fund aus Israel legt nahe, dass dort vor 120000 bis 140000 Jahren noch archaische Menschen lebten – und sogar auf den frühen modernen Menschen trafen.

Es sind nur wenige Fossilien, die in Israel ans Licht kamen: Teile eines Unterkiefers und die beiden Scheitelbeine eines Schädels, das rechte immerhin fast komplett. Doch Israel Hershkovitz von der Universität Tel Aviv und sein Team sind davon überzeugt, mit den Knochen die Überreste einer bislang unbekannt Menschenlinie in Händen zu halten. Jenes Individuum, das vor 120000 bis 140000 Jahren im heutigen Israel lebte, war nach ihrer Ansicht weder ein Neandertaler noch ein *Homo heidelbergensis* noch gar ein anatomisch moderner Mensch. Sie nennen es den »Nesher-Ramla-Homo«, nach seinem Fundort.

»Es ist ein sehr interessanter Fund«, meint Jean-Jacques Hublin vom Max-

Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, der die Untersuchung bestens kennt, an ihr aber nicht beteiligt war. Über hunderttausende Jahre sei das Gebiet entlang der östlichen Mittelmeerküste – die Levante – ein Treffpunkt unterschiedlichster Menschenlinien gewesen, sagt Hublin. Das zeige sich nun einmal mehr. Am Fundort Nesher Ramla sind die Phasen jener Begegnungen dokumentiert. Im Umland von Tel Aviv, unweit des Städtchens Ramla, liegt Kalkstein unter einer zwölf Meter dicken Ton-schicht. Als Arbeiter eines Zementwerks diese Deckschicht abtrugen, stießen sie auf einen Karsttrichter. Es handelt sich um ein spitz zulaufendes, einige dutzend Meter breites Loch im Kalkstein, das sich in der Altsteinzeit

langsam mit Sedimenten gefüllt hatte. Als Archäologen 2010 dort zu graben begannen, entdeckten sie neben vielen Tierknochen auch Steinwerkzeuge und schließlich fossile menschliche Überreste. Hershkovitz und sein Team gehen davon aus, dass der Kiefer und die Schädelteile, die sie in der untersten und damit ältesten Kulturschicht fanden, zu einem einzelnen Individuum gehörten. In den tiefen Schichten lagen auch sehr viele Steinwerkzeuge, die mit der so genannten Levallois-Technik hergestellt wurden. Dabei wird der Rohling zunächst mit geschickten Schlägen zugerichtet, bis man mit einem entscheidenden Schlag eine lange, dünne Klinge herauslösen kann. Eine Innovation war diese Methode seinerzeit allerdings nicht: Sie

GRABUNG Die Fundstätte liegt nahe dem Ort Ramla, auf halbem Weg zwischen Tel Aviv und Jerusalem.



war damals bereits seit gut 150 000 Jahren in Gebrauch. Neandertaler in Europa und Asien nutzten sie, moderne Menschen in Afrika und deren Nachbarn ebenfalls. Entsprechend wenig verrät ein Feuerstein, der nach dieser Technik behauen wurde, über seinen einstigen Hersteller.

Ein zweites Team israelischer Fachleute versuchte trotzdem, so viel wie möglich über die Macher der Neshar-Ramla-Steinwerkzeuge herauszufinden. Yossi Zaidner von der Hebräischen Universität in Jerusalem und seine Gruppe verglichen die Funde mit den Levallois-Traditionen, die in verschiedenen Weltgegenden üblich waren. Das Fazit: Im Herzen Israels pflegte man vor 120 000 bis 140 000 Jahren dieselbe Technik wie der frühe moderne *Homo sapiens*, der zur selben Zeit dort lebte. Hatten also moderne Menschen die Werkzeuge in Neshar Ramla geschaffen?

Weder Neandertaler noch anatomisch moderner Mensch

Dagegen spricht der Fossilfund. Der Backenzahn im Unterkiefer gehört eindeutig nicht zu einem modernen Menschen. Eher schon zu einem Neandertaler. Doch einem solchen kann der Schädel laut Hershkovitz ebenso wenig zugewiesen werden. Die beiden Scheitelbeine seien dicker als bei einem Neandertaler, und zum *Homo sapiens* passten sie wegen ihrer Form nicht. Ähnliche Schädelpartien hatten indes die mutmaßlichen Vor-

SCHÄDELTEIL UND KIEFER

Mehr fanden die Ausgräber nicht von den Menschen, die vor 120 000 bis 140 000 Jahren im heutigen Israel lebten.



SCHÄDEL VON HARBIN Ein chinesischer Bauarbeiter entdeckte 1933 das Fossil am Fluss Songhua, ein Kollege verbarg den Fund. Erst kurz vor dessen Tod erfuhren die Angehörigen vom Verbleib des Fossils, das sie 2018 an Paläoanthropologen übergaben.

gänger der Neandertaler, die etwa vor rund 400 000 Jahren in der Atapuerca-Höhle in Spanien lebten. Gewöhnlich rechnen Paläoanthropologen sie zu *Homo heidelbergensis*. Ein solcher sei das Neshar-Ramla-Individuum aber auch nicht. Die Forscher diagnostizieren deutliche Unterschiede zwischen den Unterkiefern der beiden Gruppen.

Insgesamt wirken viele Merkmale des Neshar-Ramla-*Homo* archaisch – so, als gehöre das Individuum in eine andere Zeit, einige hunderttausend Jahre früher. Hershkovitz und seine Gruppe führt das zu einer provokativen Schlussfolgerung: Stammen die Fossilien womöglich von einer Menschenlinie, die bereits vor 400 000 Jahren in der Levante lebte? Entsprechende Überreste dieser alten Population hätten Archäologen in den Höhlen Tabun, Zuttiyeh oder Qesem gefunden, wie die Archäologin Marta Mirazón Lahr



von der University of Cambridge in einem Kommentar zu Hershkovitz' Studie schreibt. Sind jene Gruppen vielleicht gar nicht in den Neandertalern aufgegangen oder ausgestorben, sondern lebten einfach weiter in der Levante? Und als der anatomisch moderne Mensch in ihrer Nachbarschaft auftrat, hatten sie mit den Alteingesessenen das Knowhow über die Werkzeugherstellung ausgetauscht?

Mit der pragmatischen Bezeichnung Neshar-Ramla-*Homo*, die nur auf den Fundort und die Gattung *Homo* Bezug nimmt, vermeiden die Forscher um Hershkovitz jede Festlegung, was den Status als eigene Art oder die Zugehörigkeit zu einer der bereits beschriebenen angeht. Auch beim Denisova-Menschen, dessen Überreste im sibirischen Altai-Gebirge gefunden wurden, haben die Entdecker es so gehandhabt. Die Entscheidung von Hershkovitz und seinem Team »wird auf unterschiedliche Reaktionen bei Paläoanthropologen stoßen«, prognostiziert Mirazón Lahr. Übersetzt heißt das: Es wird wohl auch mit Widerspruch nicht gespart werden.

In jedem Fall zeigen die Ausgrabungen von Neshar Ramla, dass die Geschichte der Menschheit viel komplizierter war, als es jeder hübsch gezeichnete Stammbaum suggeriert. In Israel zeigt sich das Neben- und Nacheinander der verschiedenen Linien deutlich: Von dort sind inzwischen Spuren von frühen modernen

AVI LEVIN AND LIAN THELER, SACKLER FACULTY OF MEDICINE, TEL AVIV UNIVERSITY

KA GENG

Der Drachenschädel von Harbin

»Drachenschädel« oder *Homo longi* – so heißt eine weitere neu beschriebene Menschenform, die vor zirka 146 000 Jahren im Gebiet des heutigen China gelebt haben soll. Paläoanthropologen um Ni Xijun sowie Ji Qiang von der Hebei GEO University in Shijiazhuang begründeten die Spezies anhand eines Schädels, der 2018 an die Institution der Forscher übergeben wurde. Der Fund aus der Nähe der Stadt Harbin weist archaische und moderne menschliche Merkmale auf, schreibt das Team zusammen mit Chris Stringer vom Londoner Natural History Museum in einer von drei Studien.

Bei dem Fossil handle es sich um eine bislang unerkannte Schwestergruppe von *Homo sapiens*, die näher mit diesem als mit den Neandertalern verwandt sei. Die Artbezeichnung *Homo longi* rührt von einem Namen der Fundregion her – Long Jiang, der Drachenfluss.

Angesichts derzeitiger genetischer und anthropologischer Erkenntnisse überrascht dieses Fazit allerdings. Zeitlich und örtlich läge es nahe, den Schädel den Denisovanern zuzuordnen. Immerhin weilten diese Frühmenschen zur selben Zeit wie *Homo longi* in Asien. 2010 haben Paläogenetiker um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig das Erbgut der Denisovaner entziffert, die sich genetisch als enge Verwandte der Neandertaler und etwas entferntere Verwandte von *Homo sapiens* herausstellten.

Am nun vorgestellten Harbin-Schädel dokumentierten Ni, Ji und ihr Team Merkmale, die nicht mit der Kopfform des heutigen *Homo sapiens* übereinstimmen. Doch auch mit dem Neandertaler und seinem Vorläufer *Homo heidelbergensis* sei der Schädel nicht deckungsgleich. Auffällig seien die prominenten Über-

augenwülste, die längliche und flache Form des Schädels sowie der einzige erhaltene Backenzahn: »Schließlich, und vielleicht bedeutsam, stimmen die Form und Größe des Harbin-Backenzahns am ehesten mit (...) zwei bleibenden Backenzähnen aus der Denisova-Höhle überein«, heißt es in der Studie von Ni, Ji und Stringer.

Zudem sehen die Forscher Ähnlichkeiten zum Unterkiefer von Xiahe aus der Baishiya-Höhle auf der tibetischen Hochebene, fast 3000 Kilometer von Harbin entfernt. In dem Knochenstück, das zirka 160 000 Jahre alt ist, stecken noch zwei auffällig große Backenzähne. »Der Backenzahn des Harbin-Schädels stimmt mit der Zahngröße vom Xiahe-Unterkiefer überein«, erläutern die Studienautoren. Der stammt allerdings sehr wahrscheinlich von einem Denisovaner, wie eine paläoproteomische Untersuchung von Jean-Jacques Hublin vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig 2019 ergab.

Dass der Harbin-Schädel tatsächlich zu einer bislang unbekanntem Menschenform namens *Homo longi* gehörte, scheinen wohl auch nicht alle Beteiligten des Projekts zu glauben. In der Hauptstudie taucht der neue Name nicht auf. Nur in einem Kommentar dazu haben Ji, Ni und einige ihrer Kollegen die neue Spezies beschrieben und definiert. Chris Stringer vom Natural History Museum hält den Harbin-Schädel dagegen offenbar für einen Denisovaner, ebenso Jean-Jacques Hublin. Noch völlig unklar ist hingegen, welche genetische Abstammungsgeschichte in dem Fossil steckt – eine DNA- oder Proteinanalyse steht aus.

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

Menschen bekannt, die 200 000 Jahre alt sind. Von vor 140 000 bis vor 120 000 Jahren war dann der archaisch anmutende Neshar-Ramla-*Homo* zugange. Vor etwa 120 000 Jahren kamen wieder die frühen modernen Menschen zum Zug, während vor 80 000 Jahren erneut Neandertaler im Nahen Osten auftauchten, die schließlich vor vielleicht 50 000 Jahren anscheinend endgültig vom modernen Menschen ersetzt wurden.

Im Erbgut der Menschen finden Forscher zudem Spuren des Aufeinandertreffens unterschiedlicher Gruppen. Aus der DNA der Neandertaler ist

bekannt, dass ihre Vorfahren im Zeitraum von vor 470 000 bis vor schätzungsweise 220 000 Jahren einer »Geisterpopulation« begegnet sein mussten – eine bislang nicht identifizierte Linie anderer Menschen. Gut möglich, dass es im Nahen Osten geschah. Vielleicht hat das Team um Hershkovitz mit dem Neshar-Ramla-*Homo* einen Nachfahren genau jener rätselhaften Geisterpopulation erwischt, deren Erbgut sich später bei den eurasischen Neandertalern findet.

Roland Knauer ist Wissenschaftsjournalist in Lehnin.

QUELLEN

Hershkovitz, I. et al.: A Middle Pleistocene *Homo* from Neshar Ramla, Israel. *Science* 372, 2021

Ji, Q. et al.: Late Middle Pleistocene Harbin cranium represents a new *Homo* species. *The Innovation* 2021.

Mirazón Lahr, M.: The complex landscape of recent human evolution. *Science* 372, 2021

Shao, Q. et al.: Geochemical provenancing and direct dating of the Harbin archaic human cranium. *The Innovation* 2021

MIKROBIOLOGIE LEBEN IN EINER CO₂-WELT

Manche Mikroorganismen können sich von Kohlenstoffdioxid ernähren, wenn es in großen Mengen vorkommt. Ihr Stoffwechsel zeigt, wie Leben in extremen Umgebungen aussehen kann – und wie es sich wohl einst auf der Erde entwickelt hat.

Es gibt nur wenige chemische Verbindungen, über die so viel berichtet wird, dass ihre Formel allseits bekannt ist. Eine davon ist Kohlenstoffdioxid oder kurz Kohlendioxid. Das Gas ist derart entscheidend für den Klimawandel, dass CO₂ inzwischen als Synonym für die Bedrohung unserer Zukunft steht. Für viele Mikroorganismen gleicht der Stoff jedoch eher einem Festmahl als einer Gefahr. Sie verfügen über so genannte CO₂-Fixierungswege, mit denen sie den Kohlenstoff (C) des Gases CO₂ in ihre Zellen einbauen können. Solche Mechanismen, mit denen sich aus Kohlendioxid organisches Material herstellen lässt, sind Voraussetzung für das Leben auf der Erde.

Lydia Steffens und Eugenio Pettinato von der Universität Münster sowie Thomas M. Steiner von der Technischen Universität München und weitere Kollegen berichteten nun im Fachmagazin »Nature« über bislang unbekannt Details eines Stoffwechselwegs von Bakterien, der es diesen ermöglicht, in Umgebungen mit sehr hohen CO₂-Konzentrationen zu gedeihen – etwa in heißen Tiefseequellen.

Die Forschergruppe untersuchte dazu *Hippea-maritima*-Bakterien. Diese Mikroorganismen meiden Sauerstoff und lieben Temperaturen nahe 60 Grad Celsius. Ihre Energie beziehen sie aus der chemischen Reaktion von Wasserstoff (H₂) mit Schwefel zu Schwefelwasserstoff (H₂S).

Wie alle Lebensformen brauchen die Bakterien aber auch eine Kohlenstoffquelle, um zu wachsen. Und wie viele sind sie flexibel, was die Quelle angeht: Wenn beispielsweise genügend eiweißhaltige Nährstoffe vorhanden sind, nutzt *H. maritima* diese als Bausteine für sein Wachstum. Leben die Mikroorganismen jedoch in Umgebungen mit CO₂-Kon-

zentrationen von 40 Prozent, das ist 1000-mal höher als in der heutigen Atmosphäre, verwenden sie einen Stoffwechselweg, den Fachleute als den umgekehrten oxidativen Tricarbonsäurezyklus bezeichnen.

Der »normale« Tricarbonsäurezyklus, kurz TCA, ist etwas ganz Alltägliches: Nachdem Nahrung im Darm aufgespalten wurde, wandeln Körperzellen die darin enthaltenen Zucker, Fette und Proteine darüber in Energie und CO₂ um. Fast alle Lebensformen nutzen diesen Vorgang, der auch als Zitratzyklus bezeichnet wird, da das Enzym Zitrat synthase im ersten Schritt des Zyklus Zitrat aufbaut – also letztlich Zitronensäure.

Bestimmte Bakterien sind nun aber in der Lage, den Zyklus auch rückwärts ablaufen zu lassen: Dieser so genannte umgekehrte oxidative TCA-Zyklus (siehe »Umgekehrter Stoffwechselweg«) benötigt Energie, um CO₂ in Aminosäuren, Zucker und Lipide umzuwandeln.

Weshalb rückwärts?

Warum der Zyklus unter bestimmten Bedingungen andersherum stattfindet, war bisher nicht klar. Um Antworten zu finden, fütterten die Forscher die Bakterien mit Aminosäuren und CO₂, das mit dem ¹³C-Isotop des Kohlenstoffs markiert war. So konnten sie verfolgen, wo sich in wachsenden Zellen Kohlenstoff anreichert und welche Kohlenstoffquelle die Zellen in welchem Zyklus verwendeten.

Dabei zeigte sich, dass *H. maritima* bevorzugt immer dann CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzt, wenn es im Überfluss vorhanden ist. Dann läuft der Zyklus rückwärts, wobei das Acetyl-Coenzym-A-Molekül (Acetyl-CoA) entsteht, welches durch Reaktion mit CO₂ das Zwischenprodukt Pyruvat bildet, das schließlich zu Lipiden,

Zuckern und Aminosäuren umgewandelt wird (siehe »Umgekehrter Stoffwechselweg«).

Sowohl die Entstehung von Pyruvat als auch die beiden anderen Reaktionen, die CO₂ in diese Abfolge einbinden, sind reversibel und können in beide Richtungen ablaufen. Eine hohe Kohlendioxidkonzentration – typischerweise ausgedrückt als hoher Partialdruck im Verhältnis zum Gesamtdruck aller vorhandenen Gase – begünstigt bei allen drei Reaktionen den Einbau von CO₂. Somit wird der gesamte Stoffwechselweg in Richtung Pyruvatproduktion gedrängt, solange es keinen Engpass bei der von der Zitrat synthase katalysierten Reaktion gibt. Dies verhindern die Zellen, indem sie stets große Mengen des Enzyms bereithalten. So können sie hohe CO₂-Konzentrationen nutzen, sobald sie auftreten.

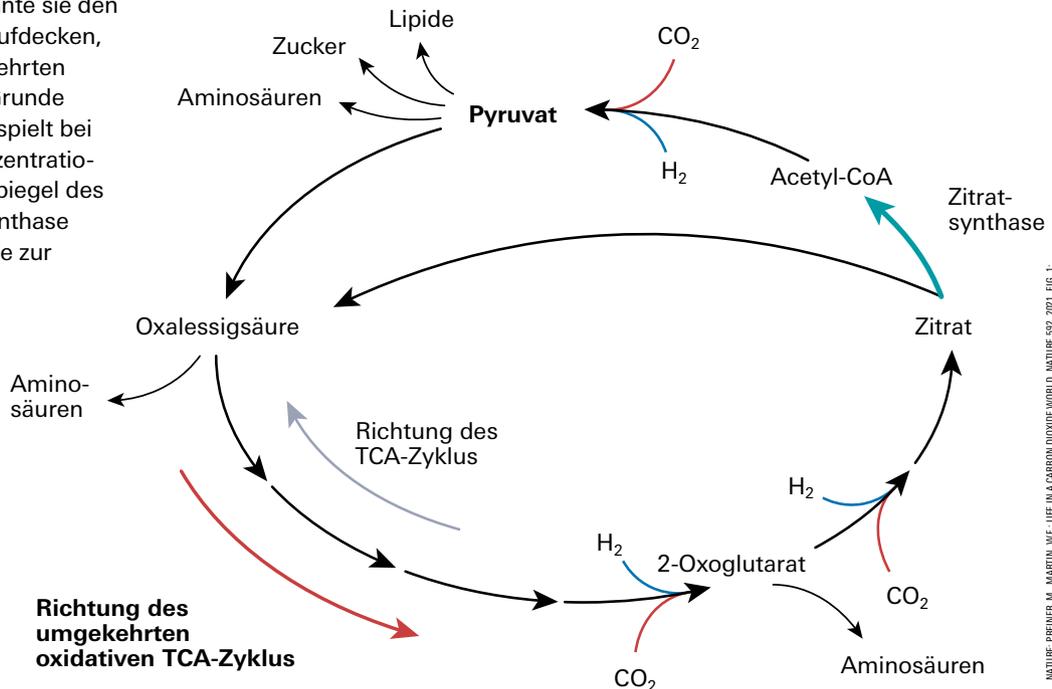
H. maritima ist nicht das einzige bekannte Beispiel eines Bakteriums mit reversiblen Stoffwechsel. Ein weiteres ist *Thermacetogenium phaeum*, das unter ähnlichen Bedingungen gedeiht (hoher CO₂-Gehalt und Abwesenheit von Sauerstoff), allerdings in industriellen Reaktoren zur Zelluloseverarbeitung. Wenn die Umgebung reichlich H₂ und CO₂ bietet, wächst *T. phaeum* und stellt daraus unter Energiegewinnung Acetat her. Wenn die beiden Gase allerdings knapp werden und Acetat im Überfluss vorhanden ist, läuft die Stoffwechselreaktion rückwärts ab. Die Mikrobe gewinnt dann bei der Umwandlung von Acetat in H₂ und CO₂ Energie. Aber wie das im Detail funktioniert, ist noch nicht geklärt.

Dass einzelne Mikroben wie *H. maritima* und sogar ganze Ökosysteme von der aus der Reaktion von H₂ mit CO₂ gewonnenen Energie leben können, ist wahrscheinlich ein Relikt aus

Umgekehrter Stoffwechselweg

Fast alle Lebensformen nutzen den Tricarbonsäurezyklus, kurz TCA-Zyklus, um Moleküle wie Aminosäuren, Zucker und Lipide in Energie und Kohlendioxid umzuwandeln. Einige Bakterien können diesen Zyklus in umgekehrter Richtung ablaufen lassen; er wird dann als umgekehrter oxidativer TCA-Zyklus bezeichnet. Dabei werden Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2) genutzt, um Moleküle wie Aminosäuren, Zucker und Lipide zu bilden. Eine Forschergruppe verfolgte nun den Stoffwechselweg von markierten Kohlenstoffatomen im Bakterium *H. maritima*. Auf

diese Weise konnte sie den Mechanismus aufdecken, der dem umgekehrten TCA-Zyklus zu Grunde liegt. Demnach spielt bei hohen CO_2 -Konzentrationen ein hoher Spiegel des Enzyms Zitratsynthase die Schlüsselrolle zur Richtungsänderung des Stoffwechselwegs.



NATURE PREINER, M., MARTIN, W.F.: DIE IN A CARBON DIOXIDE WORLD. NATURE 592, 2021, FIG. 1: BEGRIFFUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

der frühen Entwicklung des Lebens. Die ersten Mikroben mussten mit einer reichhaltigen Kohlendioxid-Diät überleben, da ihnen auf der frühen Erde lediglich diese Kohlenstoffquelle zur Verfügung stand.

Allerdings ist CO_2 nur die Hälfte der Geschichte, die andere ist Wasserstoff. Um CO_2 in organische Verbindungen umzuwandeln, benötigen die Mikroben Energie und Elektronen. Seit vier Milliarden Jahren beziehen sie diese von den riesigen Mengen an H_2 , die in der Erdkruste ständig entstehen.

Angesichts des Aufwands, den *H. maritima* in die Herstellung von Pyruvat aus H_2 und CO_2 investiert, scheint es zunächst fast unvorstellbar, dass die allerersten biochemischen Pfade in Gang gekommen sind, bevor es Enzyme zur Unterstützung der

Kohlenstoff fixierenden Reaktionen gab. Doch überraschenderweise können H_2 und CO_2 auch ohne Enzymbeteiligung Pyruvat bilden, wenn einfache Metallkatalysatoren vorhanden sind, wie in der ozeanischen Kruste. Dies deutet darauf hin, dass sich die ersten Stoffwechsel auf der frühen Erde in mineralreichen Umgebungen unter Anwesenheit von CO_2 und H_2 entwickelten.

Die chemischen Reaktionen, auf der der Stoffwechsel von *H. maritima* beruht, reichen also zurück in eine Zeit, als die ersten Zellen in einer Welt aus Kohlendioxid lebten. Die Untersuchung von Organismen, die auch heute noch auf diese Weise Energie und Biomasse gewinnen, lehrt uns daher etwas über die frühesten mikrobiellen Lebewesen.

Martina Preiner und **William F. Martin** forschen und lehren am Institut für Molekulare Evolution der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

QUELLEN

Baross, J. A.: The rocky road to biomolecules. Nature 564, 2018

Preiner, M. et al.: A hydrogen-dependent geochemical analogue of primordial carbon and energy metabolism. Nature Ecology & Evolution 4, 2020

Steffens, L. et al.: High CO_2 levels drive the TCA cycle backwards towards autotrophy. Nature 592, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 592, S. 688–689, 2021



SPRINGERS EINWÜRFE WO DIE NEUGIER SITZT

Ohne Wissbegier treten wir auf der Stelle, mit ihr wagen wir uns auf riskantes Gelände. Dafür scheint ein Hirnareal den Ausschlag zu geben.

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/1897525

Eigentlich seltsam, wo überall wir den Sitz der Neugier umgangssprachlich verorten. Zum Beispiel im Riechorgan: Professionelle Schnüffler gehen, wie wir finden, einem anröchigen Beruf nach, denn sie stecken in alles ihre Nase hinein. Oder lauert sie im Seh Sinn? So tadelte der antike Kirchenvater Augustinus die Neugier als sündige Augenlust. Wieder andere Moralapostel sahen die Neugier nicht optisch, sondern vielmehr akustisch am Werk, wenn Männlein und Weiblein die Köpfe zusammenstecken, um nach Herzenslust über Abwesende zu tratschen.

Jedenfalls galt ungehemmter Wissensdrang traditionell geradezu als Laster. Noch am Beginn des 20. Jahrhunderts degradierte der Philosoph Martin Heidegger »Neugier« neben »Gerede« und »Zweideutigkeit« zu minderwertigem Benehmen: Ein »Verfallen des Daseins« sei das. Kaum eine Spur also vielerorts von dem hohen Ansehen, das die Wissbegierde als elementare Triebfeder der Wissenschaft doch eigentlich genießen sollte.

Neugierig, wie sie sind, haben sich Forscher kürzlich gefragt: Von wo in unserem Kopf mag sie ausgehen, die riskante Suche nach dem Unbekannten? Der Verdacht der Neurowissenschaftlerinnen und Neurowissenschaftler um Mehran Ahmadlou und Alexander Heimel vom Netherlands Institute for Neuroscience konzentrierte sich auf ein 1877 beschriebenes Hirnareal, das seither den sprechenden Namen Zona incerta trägt. Die Funktion dieser ungewissen Zone war anfangs unklar und wurde auch später kaum präzisiert (*Science* 372, eabe9681, 2021).

Die geheimnisvolle Zone liegt tief im Hirninnern unterhalb des Thalamus und scheint mit ihren weit reichenden Nervenverbindungen als eine Relaisstation zwischen der Hirnrinde und dem Rückenmark zu fungieren. In ihr vermutet man biologisch elementare, evolutionär uralte Antriebe wie Hunger

und Durst sowie damit zusammenhängend den Jagdinstinkt – und somit eben auch den Drang, sich aus der Deckung zu wagen und fremde Objekte zu beschnuppern.

Das holländische Team studierte das Verhalten von Mäusen, denen eine arg reduzierte Versuchsumgebung präsentiert wurde. Sie bestand aus nur zwei Gegenständen: Ein Objekt war dem Versuchstier vertraut, das andere nicht. Die Forscher identifizierten bei den Testmäusen zweierlei neugierige Verhaltensweisen. Manche interessierten sich zwar durchaus für das unbekannte Ding, schnüffelten aber nur so an ihm herum; andere hingegen ließen es nicht beim Schnuppern bewenden, sondern umklammerten den fremdartigen Gegenstand, leckten ihn ab oder begannen sogar daran herumzuknabbern. Den Unterschied interpretierte das Team als das mehr oder weniger starke Anspringen einer – in der Zona incerta lokalisierten – speziellen Neugier-Programmierung, die durch überraschende Umweltreize getriggert wird.

Tatsächlich ließ sich neurophysiologisch nachweisen, dass eine spezifische Population von Nervenfasern aus höheren Hirnregionen in die Zona incerta hineinführt, die bei künstlicher Stimulierung besonders heftiges Neugieverhalten auslöst. Derart erregte Versuchstiere stürzen sich frenetisch auf unbekannte Objekte oder Artgenossen und wollen sie gar nicht mehr loslassen, sondern förmlich auffressen.

Ist die Neugierstudie nicht ein schönes Beispiel für Erkenntnisstreben, das sich in diesem Fall sogar den eigenen Ursprüngen zugewandt hat? Wenn man den gierigen Mäusen zusieht – oder einem menschlichen Säugling, der alles Erreichbare erst einmal zu den Lippen führt, um es näher kennen zu lernen –, dann drängt sich der Schluss auf: Die Anfänge der Wissbegier drehen sich um die Frage, ob das Neue essbar ist.

Bewegende Geschichte, spannende Zukunft.



Geschichte, echt spannend.



Neugierig auf morgen.

P.M. Jetzt im Handel.

Tipp! Unsere besten
Artikel, Videos und Podcasts im Netz:
pm-wissen.com

NATURSCHUTZ HILFE FÜR KORALLENRIFFE

Meeresforscher erproben, ob künstlich zugesetzte probiotische Bakterien gestresste Korallen vor dem Untergang bewahren könnten. Allerdings ist das Verfahren unter Fachleuten umstritten.



Elizabeth Svoboda ist Wissenschaftsjournalistin in San José (USA).

► spektrum.de/artikel/1897510

AUF EINEN BLICK MIKROBEN GEGEN HITZESTRESS

- 1** Weltweit sind Korallenriffe vom Klimawandel bedroht. Mit verschiedenen Methoden wie der Zucht besonders hitzeresistenter Arten versuchen Forscher, das Absterben zu verhindern.
- 2** Einige Arbeitsgruppen setzen auf Probiotika: Bestimmte Bakterien sollen die Korallen widerstandsfähiger gegen Hitzestress oder Krankheiten machen.
- 3** Laborversuche mit solchen Mikroben verliefen bereits viel versprechend. Doch der Einsatz im Meer bleibt auf Grund unvorhersehbarer Konsequenzen umstritten.

BEDROHTE UNTERWASSERWELT Korallen im Roten Meer tolerieren durchaus warmes Wasser. Doch die auf Grund der globalen Klimakrise ansteigenden Meerestemperaturen setzen sie immer mehr unter Hitzestress.



► Mantas und Haie gleiten an den Besuchern des handgroßen Meerwasseraquariums AquaRio in Rio de Janeiro vorbei. In einem Labor über der Hauptgalerie bereiten Meeresbiologinnen und Meeresbiologen ein neues Experiment vor. Es geht um die Rettung der Korallenriffe. 20 rasterartig angeordnete Wasserbecken, jedes etwa 30 Zentimeter breit, beherbergen farbenfrohe Ansammlungen von Korallen. Zu einigen Tanks wollen die Wissenschaftler Cocktails aus Probiotika geben – ein Bakteriengemisch, das die Korallen widerstandsfähiger gegenüber Umweltstress machen soll.

João Rosado zieht eine trübe Flüssigkeit in einer Pipette auf, beugt sich über das erste Becken und drückt vorsichtig auf den Kolben, um die Mixtur in das Meerwasser zu spritzen. »Können Sie das sehen – wie Rauch?«, fragt mich Rosados Kollege Pedro Cardoso von der Bundesuniversität Rio de Janeiro. »Das sind die Bakterien.« Über eine Videoschaltung, die das Forscherteam installiert hat, kann ich die Prozedur mitverfolgen. Die graue Bakterienwolke legt sich um die Korallen wie ein Schutzmantel. Später wird Rosado in andere Becken mit Probiotika angereicherte Rädertierchen (Rotifera) setzen – mikroskopisch kleine Meeresbewohner, die von Korallen gefressen werden. In einer dritten Versuchsgruppe werden die Korallen sowohl Bakterien als auch Rädertierchen erhalten, und in einer vierten, der Kontrollgruppe, bleibt das Meerwasser ohne jeglichen Zusatz. Die Forscher wollen im Verlauf der kommenden Wochen Korallenproben entnehmen, um zu sehen, inwieweit die Maßnahmen deren Gesundheit verbessern.

Der Einsatz von Rädertierchen ist ein neuer Ansatz, um stressgeschädigten Korallen »gute Mikroben« zukommen zu lassen. Hohe Wassertemperaturen und Krankheitsausbrüche drohen die Korallenriffe zu überrollen. Mit ihren im Dezember 2020 gestarteten Versuchen wollen die Biologen herausfinden, inwieweit sich mit Probiotika die Überlebenschancen von Korallen in der freien Natur steigern lassen.

Das Experiment von Rosado und Cardoso baut auf den Untersuchungen ihrer Mentorin Raquel Peixoto auf, die 2015 hierzu erste Studien veröffentlichte. Die Meeresbiologin, die inzwischen an der König-Abdullah-Universität für Wissenschaft und Technologie in Thuwal (Saudi-Arabien) forscht, gehörte zu den Ersten, die vorschlugen, Probiotika ins Meer einzutragen, um die Korallen zu retten – ein wegen seiner unklaren Auswirkungen auf das Ökosystem umstrittenes Verfahren. Doch angesichts der immensen Bedrohung der Korallenriffe sei es ihrer Meinung nach an der Zeit, »gewisse Risiken in Kauf zu nehmen«.

Korallenriffe bedecken weltweit schätzungsweise bis zu 600 000 Quadratkilometer des Meeresbodens. Sie konzentrieren sich hauptsächlich auf ein Dutzend Regionen, beeinflussen aber das Leben von Meeresbewohnern und Menschen auf dem gesamten Planeten. Fast ein Viertel aller marinen Spezies verbringt zumindest einen Teil seines Daseins im Korallenriff. Die Riffe dämpfen die Wucht von auflaufenden Wellen und Sturmfluten und spielen somit eine wichtige Rolle für den Küstenschutz. Sie ernähren Millionen von Menschen; Schätzungen gehen von jährlichen Einnahmen aus dem globalen Tourismus von etwa 30 Milliarden Euro aus (siehe »Riffe in schwerer See« ab S. 42).

Doch die Korallen der Erde könnten ihrem Untergang geweiht sein. 1983 beobachtete man erstmals eine massenhaft auftretende Korallenbleiche – ein Indiz für Nahrungsmangel –, und seit den 1990er Jahren wird dieses Ausbleichen mit den ansteigenden Wassertemperaturen in Zusammenhang gebracht. Seit 1980 haben 94 Prozent aller Korallenriffe zumindest eine Episode starken Ausbleichens durchgemacht. Das australische Great Barrier Reef war im Verlauf der letzten fünf Jahre dreimal von einem solchen Ereignis betroffen. Nach einem 2020 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen veröffentlichten Bericht werden die meisten Riffe unserer Erde ab 2034 jedes Jahr eine schwere Korallenbleiche hauptsächlich auf Grund der

TODESZONE Im australischen Great Barrier Reef bleichen immer mehr Korallenstöcke aus. Die Polypen haben ihre symbiontischen Algen verloren und verhungern.

Klimakrise erleiden und bis 2100 gänzlich verschwunden sein, falls nichts dagegen unternommen wird. Selbst wenn die Länder der Erde beginnen, ihren Kohlenstoffdioxid-ausstoß unter Kontrolle zu bringen, wird sich der weltweite Tod der Riffe sehr wahrscheinlich weiter fortsetzen. »Für eine Trendumkehr haben wir nur ein sehr kleines Zeitfenster – eigentlich nur eine Dekade«, meint Peixotos Kollege Carlos Duarte. »Dieses Fenster schließt sich gerade sehr schnell.«

»Das klingt ziemlich radikal – aber mit dem richtigen Ansatz könnte es klappen«

Die Wissenschaftler sehen in der Behandlung mit Probiotika nicht nur eine Notlösung, um den Zerfall der Riffe hinauszuzögern, sondern vielmehr eine reelle Chance, bereits eingetretene Schäden zu beheben. Kränkelnde Korallenbänke könnten damit wieder aufblühen, und neu gezüchtete Korallen, die auf gefährdete Riffe verpflanzt werden, sollten die Stressresistenz steigern. »Das klingt ziemlich radikal«, sagt die Meerestmikrobiologin Rebecca Vega Thurber von der Oregon State University in Corvallis (USA). »Aber mit dem richtigen experimentellen Ansatz und entsprechender Ausführung könnte es klappen.«

Wichtige Fragen bleiben allerdings offen: Werden die ins Meer eingebrachten Probiotika nicht einfach wieder weggeschwemmt? Werden die aufwändigen Verfahren nicht Unsummen verschlingen, sobald man versucht, hunderte Kilometer lange Riffe zu behandeln? Und selbst die glühendsten Verfechter sind sich der Risiken bewusst. Das Ganze erinnert an vielfach diskutierte Maßnahmen des Geoengineering wie ins Meer verbrachte Eisenverbindungen, um das Wachstum von CO₂ verbrauchenden Algen anzukurbeln, oder in die Atmosphäre entlassene Aerosole, um die Sonnenstrahlung zurück ins All zu reflektieren und damit die globale Erwärmung zu verringern. Die Impfung von Riffen mit Mikroben könnte das gesamte marine Öko-

system fundamental verändern. Einige Experten mahnen, dass bestimmte Bakterien den Ausbruch neuer Korallenkrankheiten hervorrufen könnten, wofür Laborversuche durchaus sprechen. Und keiner weiß genau, wie sich eine Probiotika-Therapie auf die marinen Lebewesen weiter oben in der Nahrungskette auswirkt: auf die Fische und Krebse, die sich von Korallenpolypen ernähren.

Schon seit den 1970er Jahren laufen Versuche, geschädigte Riffe wiederherzustellen. Im Jahr 2000 baute Baruch Rinkevich vom Nationalen Institut für Ozeanografie in Haifa (Israel) eine der ersten Aufzuchtanlagen für Korallen auf, die in von Fischfang, Tauchern oder Stürmen beeinträchtigte Riffe verpflanzt werden konnten. Einige Jahre später begann die Erprobung spezifischer Maßnahmen gegen das Ausbleichen. Das Team um Christopher Page vom Mote Marine Laboratory in Florida berichtete 2018, dass sich abgeschabte Bruchstücke gesunder Korallen unter Laborbedingungen zu reifen Stöcken entwickelten. Solche Fragmente transplantierten mexikanische und israelische Fachleute auf Riffe vor der mexikanischen Pazifikküste. Die daraus hervorgegangenen Korallen zeigten eine erstaunliche Überlebensrate von rund 60 Prozent – trotz der zerstörerischen Kraft des 2018 wütenden Hurrikans Willa. Und auf den Riffen Floridas verschmolzen eingebrachte Korallenbruchstücke zu größeren Kolonien, die sich ab 2020 erfolgreich in freier Natur fortpflanzten.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vom Australian Institute of Marine Science versuchen seit 2015, im Labor so genannte Superkorallen zu züchten. Dabei kreuzen sie Wildformen mit erwünschten Merkmalen wie Hitzetoleranz, um Nachkommen mit einer Vielzahl derartiger Eigenschaften zu erhalten. Wie eine 2020 durchgeführte Studie ergab, überstanden solche hitzetoleranten Exemplare extreme Wassertemperaturen mit einer um das 26-Fache höheren Wahrscheinlichkeit als normale Korallen.





FREIWASSERVERSUCHE
Die Meeresbiologin Kelly Pitts trägt auf Korallen vor der Küste von Florida eine Paste mit einem Probiotikum auf, um damit eine Steinkorallenkrankheit zu bekämpfen.

Ein weiterer Ansatz, den Fortbestand der Korallen zu sichern, ist die Steigerung ihrer Fortpflanzungsfähigkeit. 2017 begann ein Team der California Academy of Sciences zusammen mit den Naturschutzorganisationen Nature Conservancy und SECORE International die Ei- und Samenzellen aufzufangen, die gesunde Korallen in freier Natur während weniger, aber voraussagbarer Nächten abgeben. Nach Befruchtung im Labor verfrachtete man die Larven auf Not leidende Riffe.

All diesen Verfahren haftet jedoch ein schwer wiegender Mangel an: Die Manipulationen an den Korallen sowie die Entwicklung der Techniken, um entsprechende Exemplare auf die ums Überleben kämpfenden Riffe zu verpflanzen, dauern lange und sind teuer. Schneller und billiger wäre es, so die Idee von Forschenden wie Peixoto, eine Art Heilmittel direkt auf kranke Korallen in freier Natur zu applizieren. Außerdem ließen sich, zumindest theoretisch, selektiv aufgezogene Laborkorallen oder abgeschabte Bruchstücke ebenfalls derart behandeln, um sie widerstandsfähiger gegenüber Hitze oder Krankheit zu machen, bevor sie ins Meer verbracht werden.

Korallenformationen bestehen aus Ansammlungen tausender Tiere, so genannter Polypen, die oftmals winziger sind als der Nagel des kleinen Fingers. Jeder Polyp beherbergt sein eigenes Mikrobiom, eine vielfältige Gemeinschaft an Bakterien, Algen, Pilzen und anderen Mikroorganismen. Wie die Mikroben des menschlichen Darms erfüllen diese winzigen Bewohner Aufgaben, die das ganze System am

Laufen halten. Dank Metagenomanalysen, also der Sequenzierung sämtlicher mikrobieller Gene eines Polypen, wissen wir inzwischen, was die Organismen zu leisten vermögen. So hat eine Arbeitsgruppe vom Massachusetts Institute of Technology Bakterien isoliert, die überschüssigen Stickstoff aufnehmen und dadurch im unmittelbaren Umfeld von Korallen Algenblüten und die damit verbundene Nährstoffkonkurrenz unterbinden. Andere Mikroorganismen bauen schädliche Sauerstoffradikale ab oder unterstützen Korallen dabei, Kohlenstoff als Energiequelle zu binden. Ähnlich wie Darmbakterien unsere Verdauung und unsere Gesundheit fördern, könnten somit nützliche Korallenmikroben die Polypen widerstandsfähiger gegen Umweltstress machen, indem sie Krankheiten ihrer Wirte abwehren.

»Jedes Jahr wurde es schlimmer«

Mit steigenden Wassertemperaturen beginnt jedoch das Beziehungsgeflecht zwischen Mikroben und Korallen auseinanderzubrechen. Wie Wissenschaftler von der Oregon State University herausgefunden haben, werden Bakteriengemeinschaften auf gestressten Korallen häufig instabil, was die Verbreitung pathogener Keime fördert. Die Erwärmung der Ozeane und die durch den höheren CO₂-Gehalt verursachte Versauerung des Meerwassers bringt zusätzlich den mikrobiellen Verkalkungsprozess zum Erliegen, der den Korallen ihre Struktur verleiht und die Regeneration geschädigter Stöcke ermöglicht. Gleichzeitig stoßen gestresste Polypen ihre symbiontischen Algen ab,

EINGETÜTET Bei einem anderen Tauchgang pumpt Kelly Pitts das Mittel in einen Plastiksack, unter dem ein Korallenstock sitzt.



die mit Hilfe von Sonnenlicht Nährstoffe aufbauen. Dieser Verlust entzieht den Polypen ihre Nahrungsgrundlage und verleiht den Stöcken die charakteristische Bleiche, die als Warnzeichen für den drohenden Untergang bekannt ist. Raquel Peixoto kennt die alarmierende Verwandlung aus erster Hand.

Schon als Kind war Peixoto fasziniert von der bunten Unterwasserwelt, wenn sie während der Ferien in den Riffen bei Bahia schnorchelte. Als Erwachsene musste sie bei ihren Tauchgängen mit ansehen, wie dieses Universum langsam zerfiel. Korallen wandelten sich zu leblosen Skeletten; die noch übriggebliebenen wirkten blass und krank. »Jedes Jahr wurde es schlimmer«, erzählt sie. »Beim Tauchen sieht man, dass 90 Prozent der Korallenarten tot sind.« Peixoto beschloss, etwas dagegen zu tun.

2010 gelang es ihrem Team, ölverseuchte Mangroven mit Erdöl abbauenden Bakterien zu reinigen. Mit dem gleichen Ansatz wollte Peixoto daraufhin Korallenriffe gegen Umweltstress wappnen. Aus gesammelten Gewebe- und Meerwasserproben sequenzierte sie die darin enthaltenen bakteriellen Gene, um so jene Arten zu identifizieren, die für das Riff überlebenswichtige Funktionen ausüben. Die Wildformen dieser Mikroben ließ sie in Kultur wachsen und stellte für jedes Riffmilieu maßgeschneiderte mikrobielle Cocktails zusammen. 2019 zahlte sich ihre Arbeit aus: Die probiotischen Mixturen halfen tatsächlich Korallen im Aquarium, hohen Wassertemperaturen sowie Krankheitserregern besser zu trotzen.

Eine eingehende Analyse offenbarte, wie die Probiotika vermutlich ihre gesundheitsfördernde Wirkung entfaltet hatten: Die behandelten Korallen aktivierten weniger Gene, die Entzündungsreaktionen oder das Absterben von Zellen auslösen. »Die Korallen können zwar noch bleichen, aber längst nicht so stark, dass Gewebe zu Grunde geht«, erklärt Peixoto. »Die Probiotika sorgen für eine Art Puffer.« Das sollte die Erfolgchancen von anderen Reparaturmaßnahmen – wie der Züchtung von Superkorallen oder dem Erzeugen junger Stöcke aus Bruchstücken – ebenfalls steigern; und die ausgesetzten Korallen besäßen vermutlich bessere Karten, Umweltstress zu überstehen.

An einem kühlen Tag im Januar 2020 wagte ein Team von der Smithsonian Marine Station in Florida einen ersten Freiwasserversuch mit einem Probiotikum. Ausgerüstet mit Pressluftflasche und Flossen ließ sich die Meeresbiologin Kelly Pitts von einem kleinen Boot auf ein Riff hinabgleiten, das Floridas Ostküste vor Fort Lauderdale säumt. In etwa neun Meter Tiefe kam ein durchsichtiger Plastiksack von rund einem halben Meter Durchmesser in Sicht, der auf dem Meeresboden verankert war und einen über zehn Jahre alten Korallenstock wie ein Gewölbe umschloss. Einige Polypen des eingeschlossenen Stocks zeigten noch ein pulsierendes Orange, andere dagegen waren zu Khaki verblasst – ein typisches Symptom für eine der gravierendsten Bedrohungen, unter denen die Riffe Floridas leiden: die »stony coral tissue loss disease« (zu Deutsch: Steinkorallen-Gewebe-Verlust-Krankheit).



MIT FROLD GEN, VON RAQUEL PERKOTI, RED SEA RESEARCH CENTER, KAUST

Pitts nestelte einen biegsamen Schlauch unter die Kante des Plastikgewölbes und verband sein Ende mit einer mit Bakterien gefüllten Spritze. Als sie auf den Kolben drückte, breitete sich in dem Sack eine trübe weiße Flüssigkeit aus und verhüllte die Koralle. Das Team hatte das Probiotikum zuvor monatelang in Wasserbecken getestet, aber die Anwendung draußen im Riff war etwas komplett anderes. Was passiert, wenn die Mixtur aus dem Sack austritt?

Bei einem weiteren Experiment presste Pitts ein probiotisches Gel ähnlich wie Zahnpasta auf eine Koralle am Meeresboden, die diesmal völlig frei, also ohne schützenden Plastiksack, im Wasser stand. Doch trotz des umströmenden Wassers blieb die Paste fest auf dem Korallenstock haften. Pitts war erleichtert.

Die Steinkorallenkrankheit, die sich wie Säure durch die Polypen frisst, verwüstete seit 2014 fast 400 Quadratkilometer der Riffe von Florida sowie der Karibik. Die vermutlich bakteriell verursachte Seuche breitete sich ungehindert aus und ließ große Korallenformationen binnen Wochen oder Monaten absterben. Um der Krankheit Herr zu werden, hatte man seit 2018 hohe Dosen herkömmlicher Antibiotika wie Amoxicillin verabreicht – eine drastische Maßnahme, die auch Unmengen nützlicher Bakterien vernichtete.

Durch Gensequenzierung hatten die Forscher der Smithsonian Marine Station einen Bakterienstamm der Gattung *Pseudoalteromonas* identifiziert, der vereinzelt in Korallen vorkommt und die antibiotisch wirkende Substanz Korormicin bildet. Wie Tests in Aquarien ergaben, halten diese probiotischen Bakterien – in hoher Konzentration verabreicht – die Steinkorallenkrankheit erfolgreich in Schach.

Ende 2019 hatte das Smithsonian-Institut die Genehmigung erhalten, Anwendungsversuche im freien Meer durchzuführen. Eigentlich wollten die Wissenschaftler gar nicht

so schnell vorpreschen, aber die Krankheit breitete sich dermaßen rasant aus, dass örtliche Naturschützer den vorgeschlagenen Test befürworteten.

Bei ihren Freiwasserversuchen im Januar und September 2020 behandelten Pitts und ihre Kollegen 14 Korallenstöcke mit der Plastikglockenmethode und sieben weitere durch Auftragen der Paste. Als sich das Team zwei Wochen später einen ersten Eindruck verschaffte, war bei 80 Prozent der behandelten Korallen die Krankheit gestoppt worden. Einige der fleckenartigen Gewebläsionen begannen sogar zu heilen. Die Covid-19-Pandemie zwang die Wissenschaftler allerdings, ihre Versuche vorerst einzustellen.

»Es kann sehr schnell umschlagen«

In der Mikrobiologie gilt es immer, den Gesamtzusammenhang nicht aus den Augen zu verlieren: Erhöht man die Populationsgröße einer »nützlichen« Bakterienart, kann sich das auf andere Schlüsselarten unvorhersehbar auswirken. Diese Komplexität und Unsicherheit sind der Grund für die Skepsis, die Kritiker gegen den Einsatz von Probiotika bei Korallen hegen. »Vielleicht funktioniert es anfangs ganz gut«, meint Vega Thurber. »Aber es kann sehr schnell umschlagen.«

Der Molekularökologe Ty Roach vom Hawai'i Institute of Marine Biology hat in seinem Labor selbst Probiotika getestet. Auch er macht sich Gedanken über irreversible Veränderungen von Korallenmikrobiomen oder gar kompletter mariner Ökosysteme. »Je mehr ich daran herumgetüftelt habe, umso beunruhigter bin ich«, sagt er. Nachdem sein Team rund 130 fingerlange Korallen der Gattung *Porites* in einem Dutzend Zehn-Liter-Aquarien mit einer Dosis natürlich vorkommender Bakterien behandelt hatte, erkrankten einige Stöcke und starben ab. Zunächst fiel auf, dass die

LABOREXPERIMENT Die Meeresforscherin Raquel Peixoto testet einen bakteriellen Breitbandcocktail in Aquarien. Später möchte sie die Probiotika im Roten Meer einsetzen, um die Abwehrkräfte von Korallen zu stärken.

Korallen auf ihrer Oberfläche eine dicke Schleimschicht wie nach einer Reizung bildeten. Dann gingen kleine Gewebepartien der Polypen zu Grunde wie bei einem sich ausbreitenden Krebsgeschwür. Roach war nicht überrascht. Zur natürlichen Mikrobenflora von Korallen gehören Bakterien der Gattung *Staphylococcus*, die bekanntermaßen auch beim Menschen Krankheiten verursachen.

Wie Roach betont, gibt es kaum wissenschaftlich begutachtete Studien, die den exakten biologischen Mechanismus beschreiben, durch den Probiotika Korallen schützen könnten. »Wir konnten einige Korallen widerstandsfähiger gegenüber leicht erhöhten Temperaturen machen«, sagt er. »Wie das vonstattengeht, ist allerdings völlig unklar.« Und er fragt sich, inwieweit sich diese Behandlung auf die übrigen marinen Lebewesen auswirken. »Zahlreiche andere Organismen stehen mit den Korallen des Riffs in einer direkten Wechselbeziehung«, erläutert er, darunter Fische, Algen und Krebse. Michael Sweet, Meeresbiologe an der University of Derby und langjähriger Kollege von Peixoto, unterstützt den Einsatz probiotischer Methoden, falls sie als sicher eingeschätzt werden können. Aber auch er teilt die Bedenken von Roach: »Ich möchte nicht derjenige sein, der für die Aussetzung eines Superkeims in die Umwelt verantwortlich ist, wo dann die nächste Korallenkrankheit ausbricht.«

Offen ist gleichfalls, wie häufig probiotische Behandlungen durchgeführt werden sollten. Beim Menschen müssen Probiotika für den Darm oft täglich oder sogar zweimal täglich eingenommen werden. Im Fall der Korallen können die Wissenschaftler nur raten, ob eine Kur einmal pro Woche oder einmal pro Monat genügt, um ein robustes mikrobielles Gleichgewicht zu schaffen.

Die Risiken stellen nur die eine Seite der Medaille dar, auf der anderen stehen die Kosten. Bislang lässt sich schwer kalkulieren, wie teuer es wird, Probiotika-Cocktails auf ein ganzes Riff auszubringen. Nach Peixotos Schätzung dürfte die Behandlung einer Rifffläche von einem Quadratkilometer zwischen 500 und 600 Euro kosten – den Einsatz erfahrener Taucher vorausgesetzt. Damit könnten die Korallen bis zu einem Monat vor Hitzestress geschützt sein. Auf lange Sicht wäre es ihrer Ansicht nach kostengünstiger, Roboter einzusetzen.

Laut den 2021 veröffentlichten Berechnungen von Michael Sweet könnte das Züchten von Laborkorallen inklusive ihrer Transplantation auf ein Riff sowie der anschließenden Überwachung zwischen 40 und 190 Euro pro Kolonie kosten. Riffe bestehen häufig aus Zehntausenden solcher Kolonien pro Quadratkilometer. Fügt man diesen Zuchtkorallen probiotische Bakterien hinzu, wären die zusätzlichen Kosten gering, meint Sweet. »Wenn wir aber die Probiotika regelmäßig erneuern müssen, könnte das ziemlich teuer werden.«

Doch angesichts siechender Korallenriffe steigt die Bereitschaft, zu außergewöhnlichen Mitteln zu greifen. Eine massive Bleiche brachte 2019 brasilianische Naturschützer zum Umdenken. Der World Wildlife Fund in Brasilien finanziert zum Teil Peixotos Forschungen und schätzt die Erfolgsaussichten durchaus optimistisch ein. Australiens Great Barrier Reef Foundation hat ebenfalls Hunderttausende Euro in die Probiotika-Forschung gesteckt.

Raquel Peixoto versteht die Bedenken ihrer Kritiker, möchte aber dennoch Freiwasserversuche im Roten Meer starten. Hier sind einige Riffformationen durch lange Streifen freien Meeresbodens voneinander getrennt, so dass sich Probiotika zielgerichtet an einer einzigen Formation anwenden lassen, während die benachbarten unbehandelt bleiben. Im Gegensatz zum Team von der Smithsonian Marine Station in Florida, das eine Mikrobenart gegen eine spezifische Korallenkrankheit einsetzt, will Peixoto die Korallen mit einem Breitbandcocktail widerstandsfähiger gegenüber der Bleiche und darauf beruhenden Krankheiten machen. Wie zuvor möchte sie nützliche Mikroben aus den im Gebiet vorkommenden Korallen isolieren und daraus eine maßgeschneiderte Mixtur kreieren. Verlaufen Aquarientests damit reibungslos, soll das Präparat auf verschiedene, ungefähr zwei Quadratmeter große Riffformationen aufgetragen werden. Dabei wollen die Forscher wasserresistente Heftpflasterstreifen auf die Korallen oder das umgebende Sediment kleben, die mit der Zeit die Probiotika abgeben. Bereits nach wenigen Wochen sollte feststehen, wie es um die Gesundheit der behandelten Korallen im Vergleich zu den unbehandelten steht; und nach einem Jahr ließe sich erfassen, ob sich die Bakterien eventuell auf Fische oder andere größere Organismen wie Schwämme unerwünscht auswirken.

Peixoto ist sich der Tragweite dieser Versuche bewusst, aber die Ausbreitung von Korallen-Geisterstädten, die sie bei ihren Tauchgängen immer öfter vorfindet, bestärkt sie in ihrer Entscheidung. »Wenn wir die notwendigen Techniken entwickeln, können wir immer noch wunderschöne Riffe haben«, betont sie. Ohne zielgerichtete Hilfe sieht sie allerdings dauerhaft finstere Zeiten auf die Unterwasserwelt zukommen. ◀

QUELLEN

Humanes, A. et al.: An experimental framework for selectively breeding corals for assisted evolution. *Frontiers in Marine Science* 8, 669995, 2021

Rosado, P.M. et al.: Marine probiotics: Increasing coral resistance to bleaching through microbiome manipulation. *The ISME Journal* 13, 2019

Santos, H.F. et al.: Impact of oil spills on coral reefs can be reduced by bioremediation using probiotic microbiota. *Scientific Reports* 5, 18268, 2015

Tortolero-Langarica, A.J.J. et al.: Micro-fragmentation as an effective and applied tool to restore remote reefs in the Eastern Tropical Pacific. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17, 2020

Vanwonterghem, I., Webster, N.S.: Coral reef microorganisms in a changing climate. *iScience* 23, 2020

MEERESBIOLOGIE

RIFFE IN SCHWERER SEE

Tropische Korallenriffe gelten als stark bedroht. Umweltverschmutzung, Überfischung und nicht zuletzt die Klimakrise setzen ihnen arg zu. Wie lassen sie sich schützen?



Reinhold Leinfelder ist Professor für Paläontologie an der Freien Universität Berlin und leitet dort die Arbeitsgruppe Geobiologie und Anthropozänforschung. Er interessiert sich vor allem für Korallenriffe, das Anthropozän sowie die Museologie. Sein Blog »Der Anthropozäniker« finden Sie bei den »Scilogs« unter: scilogs.spektrum.de/der-anthropozaaniker.

» spektrum.de/artikel/1897513

► Tropische Korallenriffe gehören zu den faszinierendsten Ökosystemen unserer Erde. Metaphern wie »Wiege der Evolution«, »Regenwälder der Meere« oder »Städte unter Wasser« beschreiben eine biologische Vielfalt, die in der Tat unseren menschlichen Metropolen in Kooperation, Arbeitsteilung und Verdichtung ähneln. Seit mehr als drei Milliarden Jahren existieren einfach strukturierte Mikrokalkriffe, so genannte Stromatolithen; seit über 450 Millionen Jahren gibt es korallenreiche Riffe; und paläontologische Daten zeigen uns, dass sich in diesen Biotopen Organismen entwickelten, die dann später ganz andere Regionen besiedelten.

Unsere heutigen tropischen Korallenriffe blicken demnach auf eine lange Evolution zurück. Erst in der jüngeren

Erdgeschichte passten sie sich an speziellere Bedingungen an. So gediehen sie im Jura, als sich die Gruppe der Steinkorallen (Scleractinia) zu entfalten begann, teilweise in sehr nährstoffreichen Gewässern; einige Korallen hielten es sogar im Brackwasser aus. Heute dagegen finden wir die riffbildenden Steinkorallen in den Nährstoffwüsten der tropischen Meere, oft weit draußen auf hoher See.

Um sich mit Energie zu versorgen, beherbergen die kleinen Polypen – Korallen gehören zu den Nesseltieren – in ihrem Gewebe einzellige Algen: Zooxanthellen, die einen Teil ihrer Fotosyntheseprodukte wie Zucker und Fette als »Mietzins« abgeben. Im Gegenzug erhalten die Algen bei dieser Fotosymbiose genannten Lebensgemeinschaft die Abfallstoffe der Korallentierchen, insbesondere Phosphate und Nitrate – ein perfektes Kreislaufsystem (siehe »Kurz erklärt: Die Symbiose der Steinkorallen«). Dass Steinkorallen auf diese Weise extrem nährstoffarme Gebiete erfolgreich besiedeln, bildet die Grundlage für das vielfältigste Unterwasserökosystem, das wir heute kennen.

Korallenriffe faszinieren uns aber nicht nur dank ihrer Mannigfaltigkeit, sondern sie schützen uns auch, indem sie Zigtausende von Kilometern tropischer Insel- und Festlandsküsten säumen. Wie Forschende um Michael Beck von der University of California in Santa Cruz 2014 berechneten, verringern die Riffe der Pazifikinsel Guam die Brandungsenergie um etwa 95 und die Wellenhöhe um mehr als 80 Prozent. Pflanzen fressende Fische, aber auch andere Organismen wie Seeigel wirken gleichsam als Gärtner im Riff und halten Makroalgen kurz, die sonst die Korallen überwuchern und abtöten würden. Die potenziellen Beutetiere ziehen wiederum eine Vielzahl räuberischer Fische aus den Lagunen sowie der Hochsee an. Auch als Kinderstuben dienen die Riffe, da sich junge Hochseefische hier hervorragend verstecken können. Der globale Fischfang hängt nach Schätzungen zu 25 Prozent von funktionierenden Korallen-

AUF EINEN BLICK DAS BEDROHTE ÖKOLOGISCHES SYSTEM DER TROPISCHEN KORALLENRIFFE

- 1 Tropische Korallenriffe stellen ein vielfältiges Ökosystem dar, das für Fischerei, Küstenschutz und Tourismus eine zentrale Rolle spielt.
- 2 Durch Umweltverschmutzung, Überfischung sowie die Klimakrise sind die Riffe weltweit stark in ihrer Existenz bedroht.
- 3 Schutzstrategien kombinieren die globale Bekämpfung des Klimawandels mit regionalem Riffmanagement sowie physikalischen, biologischen und naturunterstützenden Anpassungsmaßnahmen.



SÜDSEEPARADIES
Korallenriffe wie hier in Französisch-Polynesien stellen einen mannigfaltigen Lebensraum für zahlreiche Organismen dar.

DAVIDAS / STOCK.ADOBE.COM

riffen ab. Lagunen bilden sich dort, wo Riffe hohe Wellen abschirmen, welche wiederum Skeletteile der Rifforganismen abschmirgeln und damit Kalksand erzeugen. Dieser lagert sich im Innern der Lagunen ab, wo auch andere Organismen, allen voran Kalkalgen, ebenfalls Sandpartikel produzieren. Dadurch entstehen die schönen, von Palmen gesäumten weißen Sandstrände, die so viele Touristen anlocken, dass etliche Länder ausschließlich davon leben.

Damit nicht genug: Viele Rifforganismen, die kein hartes Außenskelett produzieren, schützen sich vor Fressfeinden oder Krankheitserregern mit Giften – eine wahre Fundgrube für zahlreiche biologisch wirksame Substanzen, darunter Fungizide, Antibiotika oder Virostatika. Ein Beispiel hierfür sind die aus der Kegelschnecke *Conus* isolierten Conotoxine, die bereits als Schmerzmittel eingesetzt werden. Selbst im Kampf gegen Krebs oder Aids könnten uns solche Stoffe beistehen.

Gestörtes Gleichgewicht

Und nicht zuletzt spielen Korallenriffe bei der globalen Klimakrise eine wichtige Rolle: Einerseits zeichnen die Skelette über spezielle Isotopenverhältnisse in ihren Jahresringen die jährlichen Temperaturen des Meerwassers auf, so dass uns ein umfangreiches Klimaarchiv zur Verfügung steht. Andererseits speichern sie seit ihrer Entstehung in ihren Kalkskeletten gigantische Mengen an Kohlendioxid (CO_2) und helfen so mit, den menschengemachten Temperaturanstieg zu reduzieren.

Das Wachstum der Riffe und damit die Aufrechterhaltung sowohl ihrer Vielfalt als auch ihrer Funktionen hängt allerdings davon ab, dass gut austarierte Rahmenbedingungen ineinandergreifen. Menschliche Eingriffe stören leider immer stärker dieses Gleichgewicht, häufig sogar extrem.

Tropische Korallenriffe vertragen keine hohen Nährstoffwerte, da sonst Veralgung und Planktonblüten drohen.

Algenfilme überwuchern dann die Korallen, Plankton verdunkelt das Wasser. Ohne Licht funktioniert aber die Photosymbiose nicht mehr. Von der Verschiebung des ökologischen Gleichgewichts profitiert etwa der Dornenkronenseestern (*Acanthaster planci*), da seine Larven von planktonischen Algen leben, die durch eingetragene Nährstoffe gedüngt werden. Die erwachsenen Tiere fressen wiederum Steinkorallen und haben insbesondere im australischen Great Barrier Reef bereits massive Schäden angerichtet.

Ebenso wenig kommen Korallenriffe mit aus dem Hinterland eingeschwemmten Substanzen wie feinen Sedimentpartikeln oder Chemikalien und Plastikteilchen zurecht. Flottierender Ton trübt das Gewässer, absinkendes Sediment verschmutzt die Polypen und bedeckt harte Untergründe, welche die Korallenlarven zum Befestigen benötigen.

Bedroht ist ebenfalls der Fischreichtum, der eine wesentliche Grundlage für ein gesundes Riff darstellt. Die starke Überfischung durch verbotene Methoden wie Dynamit- oder Giftfischerei, aber auch durch legale, vor den Riffen eingesetzte Schleppnetze vernichten die Bestände der als Algenabweider dienenden herbivoren Fischbestände und bringen so das gesamte Ökosystem durcheinander.

Der industriell bedingte Anstieg des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre wirkt sich direkt und indirekt auf die Meeresorganismen aus und führt zum berüchtigten Dreiklang: zu warm, zu sauer, zu hoch. Die Erwärmung der Atmosphäre lässt die Temperaturen im Wasser ebenfalls ansteigen, wenn auch etwas langsamer. Tropische Korallenriffe sind zwar an warme Gewässer angepasst, und höhere Temperaturen fördern sogar die Kalkabscheidung. Bei einem Zuviel geraten jedoch die Korallen in Stress und stoßen die für sie lebenswichtigen fotosymbiotischen Zooxanthellen ab. Diese Bleichung geschieht freilich reversibel – allerdings nur, wenn die Riffe genügend Zeit haben, sich zu regenerieren, was immer weniger der Fall ist.

Das CO_2 der Luft löst sich im Wasser, was den Klimawandel bislang noch abpuffert, aber auch den pH-Wert senkt und somit die Ozeane versauert. Tropische kalkabscheidende Organismen wie die Steinkorallen benötigen hingegen einen recht hohen, also basischen pH-Wert. Unter dem angestiegenen Säuregehalt können sie nur erschwert Kalk absondern, was wiederum das Wachstum des gesamten Riffs stark einschränkt.

Der dritte Effekt, der Meeresspiegelanstieg durch thermische Ausdehnung des Wassers sowie durch Abschmelzen von Festlandeis, könnte sich prinzipiell sogar als vorteilhaft erweisen. Korallen brauchen Platz und wachsen nach oben. Die Riffe könnten also mit dem ansteigenden Meeresspiegel einfach mitwachsen. Diesen Prozess hatte schon der Evolutionsforscher Charles Darwin (1809–1882) mit seiner Atolltheorie erkannt. Allerdings funktioniert das nur, solange der Meeresspiegel nicht zu rasch ansteigt und die

Korallenriffe nicht vorgeschädigt sind, etwa durch Überdüngung, Temperaturstress oder Überfischung.

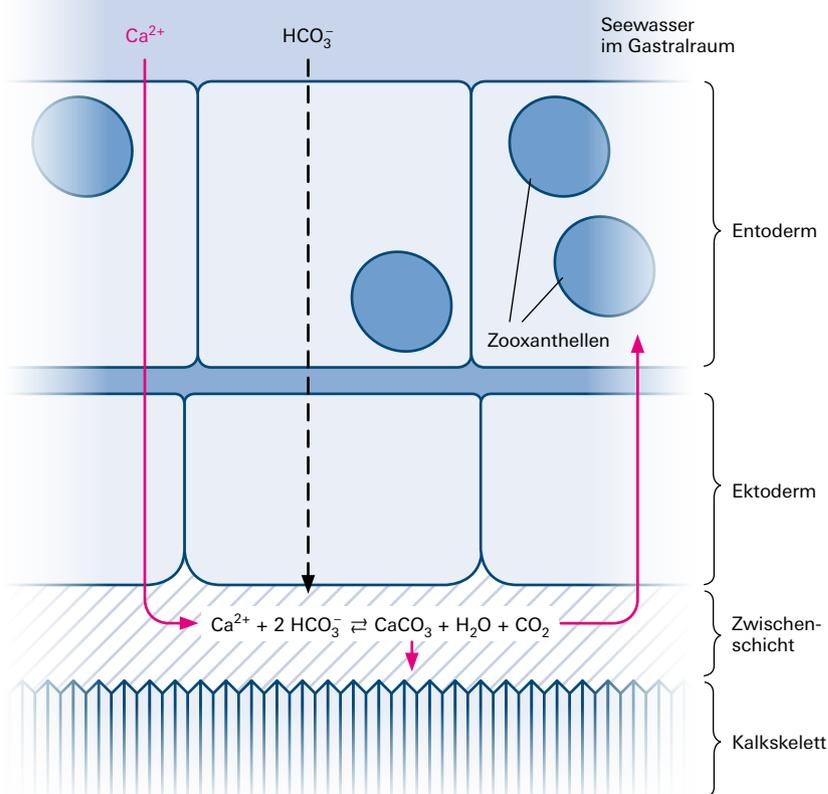
Es gibt noch viele weitere Herausforderungen. Von gelegentlichen mechanischen Schäden durch Wirbelstürme erholen sich Korallenriffe in der Regel sehr schnell. Ein Hurrikan kann sogar wie ein Jungbrunnen wirken, da danach auch langsamer wachsende Korallen wieder eine Chance auf Ansiedlung bekommen. Treten solche Stürme wegen der Klimakrise jedoch häufiger auf, fehlen die notwendigen Erholungsphasen. Beeinträchtigungen durch Schiffsanker, unkontrollierten Massentourismus, Abbau ganzer Riffe zur Zementgewinnung oder für den Souvenirhandel, aber auch Tankerunglücke und nicht zuletzt giftig wirkende Sonnenschutzmittel kommen hinzu.

Für all diese Probleme gilt: Nur selten auftretende einzelne Schädigungen kann ein Riff wegstecken, wenn es genügend Regenerationszeit erhält. Kommen dagegen viele

Kurz erklärt: Die Symbiose der Steinkorallen

Korallenriffe bestehen aus Kolonien tausender festsitzender Tiere. Zoologisch gehören diese zur Ordnung der Steinkorallen (Scleractinia), die wiederum der Klasse der Blumentiere (Anthozoa) und dem Stamm der Nesseltiere (Cnidaria) zugeordnet werden. Jedes einzelne, meist nur millimeter- bis wenige Zentimeter große Tier besteht aus einem sackartigen Polypen (von griechisch polypous = vielfüßig) mit einer Mund- und Ausscheidungsöffnung oben, an der die mit Nesselzellen versehenen Tentakel sitzen. Damit fangen die Tiere Planktonorganismen, die sie in ihrem Magen oder Gastralraum verdauen.

Typisch für die riffbildenden Steinkorallen ist das Kalkskelett, das die Polypen insbesondere an ihren Fußscheiben absondern. Dabei nehmen sie im Meerwasser gelöste Kalzium- (Ca^{2+}) und Hydrogencarbonationen (HCO_3^-) auf und fällen daraus Kalziumkarbonatkristalle (CaCO_3), aus denen sich das Kalkskelett aufbaut. Bei der Reaktion entstehen Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2 ; siehe Grafik).



Der Prozess kann jedoch auch umgekehrt ablaufen. Daher sollte das aus dem Stoffwechsel der Korallenpolypen freigesetzte CO_2 das Kalkskelett wieder auflösen. Das verhindern die in den Zellen der inneren Gewebeschicht (Entoderm) lebenden symbiontischen Algen, die Zooxanthellen (von griechisch zoon = Lebewesen; xanthos = gelb):

Durch ihre Fotosynthese verbrauchen sie CO_2 und verschieben somit das Gleichgewicht in Richtung Kalkbildung. Gleichzeitig produzieren sie Sauerstoff und Kohlenhydrate und unterstützen damit die Ernährung ihrer Wirte. Im Gegenzug »düngen« die Korallenpolypen ihre Zooxanthellen mit ihren nährstoffreichen Abfallprodukten.

davon zusammen und bleiben diese negativen Einflüsse dauerhaft bestehen, wird es kritisch, zumal sich solche Probleme mit der Zeit auch noch verschärfen. Das betrifft Temperaturanstieg, Versauerung, Überfischung und insgesamt die Verschmutzung der Weltmeere. Zwar sind im Lauf der Erdgeschichte Korallen mehrmals fast ausgestorben und konnten sich wieder erholen, aber es dauerte jeweils viele Millionen Jahre, bis die Riffe zurückkehrten.

Wie lässt sich den Riffen helfen? Zahlreiche Ideen etwa für Maßnahmen zur Rettung des Great Barrier Reef kursieren: Ein solarbetriebenes Propellersystem könne das Wasser abkühlen, Dornenkronenseesterne sollten abgetötet werden, auf künstlichen Substraten könne man junge Korallen von Hand aufpflanzen, aus eingesammeltem Korallenlaich ließen sich Larven im Labor züchten und wieder aussetzen, resistenter Korallen könnten biotechnologisch erzeugt und gezüchtet werden, künstlich transparenter gemachte Wolken erhöhten die Wärmeabstrahlung der Erde, eine Abschattung der Atmosphäre ließe weniger Sonnenstrahlung durch. All dies wird nicht nur diskutiert, sondern es wird aktiv daran gearbeitet (siehe »Hilfe für Korallenriffe« ab S. 34). Am einfachsten erscheint es immer noch, die Korallenriffe als Naturparks zu schützen – doch das hilft nur bedingt: 2020 berichteten Meeresforscher um Andreas Dietzel von der James Cook University im australischen Townsville, dass das Great Barrier Reef in den letzten 30 Jahren die Hälfte aller Korallen verloren hat, obwohl es seit 1981 als UNESCO-Welterbe geschützt ist.

Dreiklang der Schutzmaßnahmen

Da die Gefährdungen ein ganzes Bündel zusammenhängender Probleme darstellen, werden auch Lösungsansätze lediglich im Verbund helfen. Bei manchen Vorschlägen wie dem Kühlpropeller oder dem Absammeln der Dornenkronenseesterne handelt es sich eher um blinden Aktionismus. Anderes funktioniert nur bei einem einmaligen und lokalen Schaden, wenn die sonstigen Bedingungen weiter stabil bleiben. So kann das rasche Schließen einer durch Schiffskollision verursachten Lücke im Riff durch künstliche Substrate mit jungen Korallen durchaus sinnvoll sein. Und natürlich bleibt es unabdingbar, den Klimawandel anzugehen, der zumindest derzeit sicherlich den größten negativen Einfluss auf die Korallenriffe ausübt. Doch die Sonne abzuschatten und sonst weiterzumachen wie bisher, würde wenig ändern: Die Versauerung sowie der Eintrag von Schweb- und Nährstoffen durch gerodete Mangroven, küstennahe Landwirtschaft und Abwasser gingen weiter.

Letztlich müssen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihre Ansätze noch besser abstimmen. Wer an einer Methode intensiv und mit voller Kraft forscht, hält sie vielleicht wirklich für das Beste und stellt andere ebenso sinnvolle und notwendige Lösungsansätze hinten. Diese lassen sich in drei Maßnahmenbündel einteilen:

1. Globale Vermeidung (Mitigation): Ohne eine drastische Reduzierung des menschengemachten Treibhausgasausstoßes bleiben alle anderen Maßnahmen sinnlos. Die Korallenriffe, zumindest so wie wir sie heute kennen, wären inklusive ihrer wichtigen ökologischen und wirtschaftlichen Rolle innerhalb der nächsten Jahrzehnte verschwunden.

Dabei verhindern vor allem die exponentielle Geschwindigkeit, mit welcher der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre ansteigt, und die damit in letzter Zeit schon fast jährlich auftretenden Hitzewellen eine natürliche Anpassung wie etwa die Optimierung der temperatursensitiven Fotosynthese. Zu den Vermeidungsaufgaben im globalen Maßstab gehören auch internationale Maßnahmen zur Reduzierung der Überfischung und der Schadstoffeinführung. Eine ständige Überprüfung muss dann Fortschritte und Misserfolge aufzeigen.

2. Regionales Management: Unter diesen Begriff fallen vielfältige Maßnahmen wie Einrichtung, Ausweitung und bessere Überwachung von marinen Schutzgebieten sowie lokale und regionale Aktionen gegen Überfischung und verbotene Fischereimethoden. Des Weiteren gehören hierzu die Reduktion der Überdüngung, der Übergang zum nachhaltigen Tourismus, das Sanktionieren von illegalem Raubbau an Riffen für Souvenir- und Zementproduktion sowie die Aus- und Weiterbildung der einheimischen Bevölkerung.

3. Assistierte Anpassung (assisted adaptation): Dieser Punkt steht derzeit besonders im Fokus und lässt sich in physikalisch-chemische, biologisch-biotechnische sowie in naturunterstützte Anpassungsmaßnahmen unterteilen. Zu ersteren gehören das Ausbringen geeigneter künstlicher Substrate, seien es Betonplatten, durchlöcherter Betonkugeln (Reef Ball Project) oder Metallgitter, durch die elektrischer Strom fließt, um Kalk auszufällen.

Müll wie Erdölplattformen, alte Schiffe oder Eisenbahnwaggons als künstliche Riffe zu versenken, verbietet sich hingegen, denn hier siedeln sich fast ausschließlich Weichkorallen, Schwämme und Algen an – die Kalk abscheidenden Steinkorallen als eigentliche Riffbauer meiden derartige Areale. Tatsächlich hat man 1972 vor der Küste Floridas zwei Millionen Autoreifen als Siedlungshilfe für Rifforganismen versenkt. Folge: Die Pneus wurden als Spielball der Gezeiten auseinandergerissen und zerstört als über den Grund treibende Einzelteile Seegraswiesen und bestehende natürliche Riffe, so dass man sie aufwändig und kostenintensiv wieder herausholen musste.

Am meisten freuen sich Fischer über derartige künstliche Riffe, denn Fische verstecken sich in großer Zahl darin und können somit leichter gefangen werden. Verpflanzt man junge Korallen auf geeignete Kunstsubstrate, können solche Ansätze in kleinem Maßstab funktionieren. Doch die Gefahr bleibt, dass diese Riffe durch Mehrfachbleichung schnell absterben oder wegen Überdüngung und Überfischung von Algen überwachsen werden.

An biologischen Anpassungsmaßnahmen wird an vielen Instituten zwischen Kiel und Townsville intensiv geforscht. Sie umfassen vor allem Zuchtversuche etwa mit Korallenlaich. Aus den daraus gewonnenen Larven und Jungkorallen sollen die robustesten Individuen identifiziert werden, um diese dann zu vermehren und auszubringen. Gentechnische Verfahren zum Herstellen von Korallen, die widerstandsfähiger gegen hohe Temperaturen, erniedrigte pH-Werte oder Überdüngung sind, werden ebenfalls getestet. Bislang halten sich die Erfolge im Grenzen, und es dürfen dabei keine »Monsterkorallen« erschaffen werden, die sämtliche andere Formen verdrängten und ökologisch fragwürdige Monokulturen ergäben.

Lange übersehen: Die Riffmethusalem

Unsere heutigen Korallenriffe resultieren aus einem über 450 Millionen Jahre laufenden evolutionären Anpassungsprozess. Lange glaubte man, dass die lichtabhängigen Flachwasserriffe in den nährstoffarmen tropischen Gewässern mit den Tiefwasserriffen, wie sie in nährstoffreichen Regionen etwa vor Skandinavien in Hunderten von Metern Wassertiefe auftreten, wenig zu tun haben. Im Jura, vor etwa 200 Millionen Jahren, gab es noch Korallenriffe in ganz unterschiedlichen Wassertiefen, von Tiefschwellenarealen im damaligen weltumspannenden Mittelmeer der Tethys bis hin zu extremen Flachwasserriffen, wie Fossilien etwa in der heutigen Fränkischen und Schwäbischen Alb oder in nordwestdeutschen Höhenzügen belegen. Somit existierten bereits damals lichtabhängige Formen aus der Gruppe der modernen Korallen. Wie uns charakteristische Muster im fossilen Korallenskelett jedoch zeigen, verlief die Fotosymbiose wohl nicht sehr effektiv. Die Korallen brauchten zusätzliche Planktonnahrung und gediehen daher, im Unterschied zu heute, oft auch in nährstoffreicheren oder etwas tieferen Gewässern.

Solche »atavistischen« Formen mit altertümlichen Eigenschaften gibt es noch heute. Die Arbeitsgruppe des Autors forscht an Korallenriffen, welche leicht erhöhte Nährstoffgehalte dauerhaft aushalten, etwa aus einer großen Bucht in der Karibik vor Panama oder in der Nähe von Flussmündungen vor Borneo sowie vor Westaustralien. Deutlich höhere Nährstoffgehalte und mehr abdunkelnde schwebende Sedimentpartikel vertragen die Abrolhos-Riffe vor Brasilien sowie die erst 2016 entdeckten Riffe vor der Flussmündung des Amazonas. Im Mittelmeer gibt es neben



STEINALT Bereits im Jura gab es Steinkorallen, wie dieses etwa 150 Millionen Jahre alte Exemplar von *Thecosmilia trichotoma* aus der Schwäbischen Alb belegt.

etlichen Weichkorallen auch die fotosymbiontische Gattung *Cladocora*, die kleine Riffhügel aufbaut und stark an manche Jurakorallen erinnert, denn sie kann offensichtlich im Winter wie ihre fossilen Ahnen von Fotoautotrophie auf Heterotrophie umschalten und sich so regenerieren.

Im Forschungsfokus stehen ebenfalls so genannte mesophotische Steinkorallen, die mit weniger Licht im etwas tieferen, kühleren Wasser auskommen. Vor der Pazifikküste von Chile wandern in den durch Lachsstock stark nährstoffübersättigten Buchten echte Tiefwasserkorallengemeinschaften zunehmend ins flache Wasser. Und sogar Kieselschwammriffe – die zur Zeit der Dinosaurier im Oberjura der Schwäbischen und Fränkischen Alb weit verbreitet waren und mindestens seit dem Beginn des Paläogens als ausgestorben

galten – haben ebenfalls als Rifftyp überlebt. Sie wurden Ende der 1990er Jahre auf dem tieferen Schelf vor der Küste der kanadischen Provinz British Columbia wiederentdeckt und sind erfreulicherweise inzwischen gut geschützt.

Browne, N. et al.: Borneo coral reefs subject to high sediment loads show evidence of resilience to various environmental stressors. *PeerJ* 10.7717/peerj.7382, 2019

Kersting, D.K., Linares, C.: Living evidence of a fossil survival strategy raises hope for warming-affected corals. *Science Advances* 5, 2019

Leinfelder, R.: 3.4 Using the state of reefs for Anthropocene stratigraphy: An ecostratigraphic approach. In: Zalasiewicz, J. et al. (Hg.): *The Anthropocene as a geological time unit. A guide to the scientific evidence and current debate.* Cambridge University Press, 2019, S. 128–136

WOLBENNI / COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKIFILE:JURAKORALLE_THECOSMILIA_TRICHOTOMA_SL_HENROTH.JPG / CC BY-SA 4.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/CC BY SA 4.0 / LEGALCOBI

Die Suche nach Korallen, die natürlicherweise toleranter sind als andere, gehört zum Feld der naturunterstützenden Maßnahmen (aided natural adaptation), mit dem sich auch unsere Arbeitsgruppe in Berlin intensiv beschäftigt. Tatsächlich existieren einige wenige Regionen mit resistenten Korallen. So beschrieb 2014 die Arbeitsgruppe der US-amerikanischen Meeresforscherin Kathryn Shamberger, damals an der Woods Hole Oceanographic Institution, Riffgemeinschaften von der südpazifischen Inselgruppe Palau, die sich durch eine besonders ausgeprägte Widerstandskraft gegen Versauerung auszeichnen. Ein Jahr zuvor konnten Meeresbiologen von der Stanford University um Daniel Barshis Gene identifizieren, die Korallen zu einer größeren Temperaturtoleranz verhelfen.

Es gibt keinen Königsweg zur Rettung

Doch leider lassen sich solche toleranten Gemeinschaften nicht einfach umsiedeln, schon allein auf Grund der unterschiedlichen ökologischen Korallenprovinzen: Spätestens seitdem sich die Meerenge von Panama vor etwa drei Millionen Jahren geschlossen hat und in der Eiszeit etliche Riffgemeinschaften ausgestorben sind, unterscheidet sich die karibische Region eklatant von der indopazifischen. Vermutlich sind die Korallen in ihre lokalen und regionalen Ökosysteme eingebunden, wobei das spezifische »Mikrobiom« ebenfalls mitwirkt: Bakterien, einzellige Algen und andere Mikroben spielen beim Recyceln der Nährstoffe, aber auch bei sonstigen ökologischen Abhängigkeiten eine große Rolle im Gesamtriff.

Etwas Hoffnung macht schließlich die Beobachtung, dass »atavistische« Riffe aus der Tiefsee in flachere Gewässer vordringen und so die ortsansässigen empfindlichen Korallenbänke ersetzen könnten (siehe »Lange übersehen: Die Riffmethusalems«). Es gibt demnach einige positive Entwicklungen, doch sie reichen nicht aus. Zum einen beschränken sich viele Schutzmaßnahmen auf die noch einigermaßen gut erhaltenen Riffe. Aber gerade in den bereits geschädigten Bereichen passen sich manche Arten besonders effizient an und können sich besser bei veränderten Umweltbedingungen durchsetzen. Wir sollten also auch solche kranken Riffe schützen. Zum anderen könnten Ökosysteme mit einer Hand voll zwar gut angepasster Korallenspezies, die aber wohl über Jahrtausende wenig divers blieben, viele Funktionen wie den natürlichen Küstenschutz ohnehin auf Grund ihrer tieferen Lage nicht mehr bewerkstelligen. Somit würden die meisten tropischen Lagunen verschwinden, was sich fatal auf die vom Tourismus abhängigen Länder auswirkte. Die geringere Diversität der Reliktriffe dürfte vermutlich auch ihr Potenzial als »blaue Apotheke« stark schmälern. Aber natürlich bleiben atavistische Riffe schützenswert und könnten zusammen mit anderen Maßnahmen dazu beitragen, dass sich unsere tropischen Flachwasserriffe wieder rascher erholen.

Einen Königsweg zur Rettung der Riffe gibt es nicht, vielmehr brauchen wir ein ganzes Maßnahmenpaket, um sie weiter zu erhalten. Allerdings bleiben sämtliche Bemühungen wirkungslos, wenn wir nicht von fossilen Energieträgern wegkommen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



SEPPFRIEDHUBER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Gleichzeitig müssen wir jedoch die anderen notwendigen Maßnahmen anpacken, ausweiten und verbessern. Ein schlecht gemanagter Riffpark, in dem Schutzmaßnahmen nicht kontrolliert werden, nützt genauso wenig wie ein gut geführtes Schutzgebiet, in das aus dem Hinterland zu viel Dünger und Schadstoffe gelangen und in dem wegen Überfischung keine Fische mehr die stark gedüngten Makroalgenrasen abweiden.

Geeignete Methoden der assistierten Anpassung können bei besonders starken lokalen Schädigungen helfen. Das gilt aber nur, wenn sich sonst die Riffbedingungen insgesamt deutlich verbessert haben. Bei biotechnisch erzeugten Neuzüchtungen gilt es zudem, größte Vorsicht walten zu lassen, doch auch eine gelungene Optimierung einiger Korallenarten kann den Verlust der Vielfalt nicht aufhalten.

Selbst im besten Fall, also unter rascher Reduktion des anthropogenen CO₂-Ausstoßes sowie geeigneter Schutz- und anderer Managementmaßnahmen werden die tropischen Riffe lange »in schwerer See« bleiben. Die Erholung wird viele Jahrzehnte dauern, vielleicht sogar länger. Wir brauchen einen langen Atem – rasche Erfolge wird es nicht geben. Allerdings bleibt die Unterstützung der natürlichen Anpassung gerade in schon stark geschädigten Arealen sowie bei den atavistischen Rifftypen durch geeignete Schutzmaßnahmen wichtig. Dies könnte dazu beitragen, dass Korallenarten auf natürliche Weise widerstandsfähiger gegen hohe Temperaturen und Nährstoffbelastungen werden und dann zu neuen wichtigen Mitgliedern der tropischen Riffe avancieren. Darüber hinaus könnten solche Maßnahmen Fischen und anderen Rifforganismen helfen, die Zeit der Anpassung zu überbrücken. Schutz auch von fast zerstörten Riffen sowie der vielen atavistischen Riffstrukturen sollten also die Reise durch die schwere See etwas verkürzen und erleichtern. ◀

QUELLEN

Dietzel, A. et al.: Long-term shifts in the colony size structure of coral populations along the Great Barrier Reef. *Proceedings of the Royal Society B* 287, 2020

Ferraio, F. et al.: The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications* 5, 2014

Hoegh-Guldberg, O. et al.: Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 2007

Hughes, T.P. et al.: Global warming impairs stock-recruitment dynamics of corals. *Nature* 568, 2019

Shamberger, K.E.F. et al.: Diverse coral communities in naturally acidified waters of a Western Pacific reef. *Geophysical Research Letters* 41, 2014

BEWUSSTSEIN DAS GROSSE EXPERIMENT

Zahlreiche konkurrierende wissenschaftliche Theorien versuchen, das Bewusstsein zu beschreiben. In einer noch nie da gewesenen Kollaboration finden nun weltweit Versuche an hunderten Probanden statt, um zwei der führenden Ansätze auf den Prüfstand zu stellen.



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

► spektrum.de/artikel/1897516

► Vor etwa 20 Jahren erhielt die damalige Psychologiestudentin Lucia Melloni eine tragische Nachricht. Ihre Mutter teilte ihr mit, dass der Partner ihrer Schwester einen schweren Unfall erlitten hatte und nun im Krankenhaus lag. Diagnose: hirntot. Die Familie fuhr schnell zu ihm, um sich verabschieden zu können, bevor man die lebenserhaltenden Maschinen abschaltete. »Es war wirklich unheimlich«, erinnert sich Melloni. »Da lag ein Mensch, der atmete und Wärme ausstrahlte. Als ich zu ihm sprach, bewegte er seine Beine.« Die Ärzte hatten den Besuchern mitgeteilt, dass so etwas passieren könnte, denn die grundlegenden Reflexe sind selbst bei hirntoten Patienten vorhanden. Doch wie kann man sicher sein, dass das Bewusstsein eines Menschen für immer verschwunden ist?

Schließlich verlieren wir tagtäglich beim Einschlafen das Bewusstsein und erlangen es wieder – ebenso, wenn man ohnmächtig wird oder vor einer OP eine Narkose erhält. Wie kann man als Außenstehender beurteilen, ob jemand erwachen wird oder für immer im unbewussten Zustand bleibt? Dieser Frage hat sich Melloni seit dem tragischen Ereignis verschrieben. Sie promovierte in Neurowissenschaft und widmete ihre Forscherkarriere, die sie inzwischen an das Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik in Frankfurt am Main geführt hat, der jahrtausendealten Problematik des menschlichen Geistes.

Deshalb zeigte sie sich sofort begeistert, als ihr Dawid Potgieter, der Programmverantwortliche der gemeinnützigen Organisation Templeton World Charity Foundation, vor mehreren Jahren seine ehrgeizige Vision vorstellte: ein noch nie da gewesenes Forschungsprojekt, das die führenden konkurrierenden wissenschaftlichen Theorien des

Bewusstseins auf den Prüfstand stellen soll. Er hofft, damit einige Ansätze verwerfen zu können und Neues über die Funktionsweise unseres Gehirns zu erfahren.

Dabei beeindruckt nicht nur die unterschiedlichen Methoden, die zum Einsatz kommen: Technologien wie die funktionelle Magnetresonanztomografie, Magneto- und Elektroenzephalografie sowie Elektrokortikografie sollen Aufschluss darüber geben, was im Denkkorgan hunderter Probanden vor sich geht.

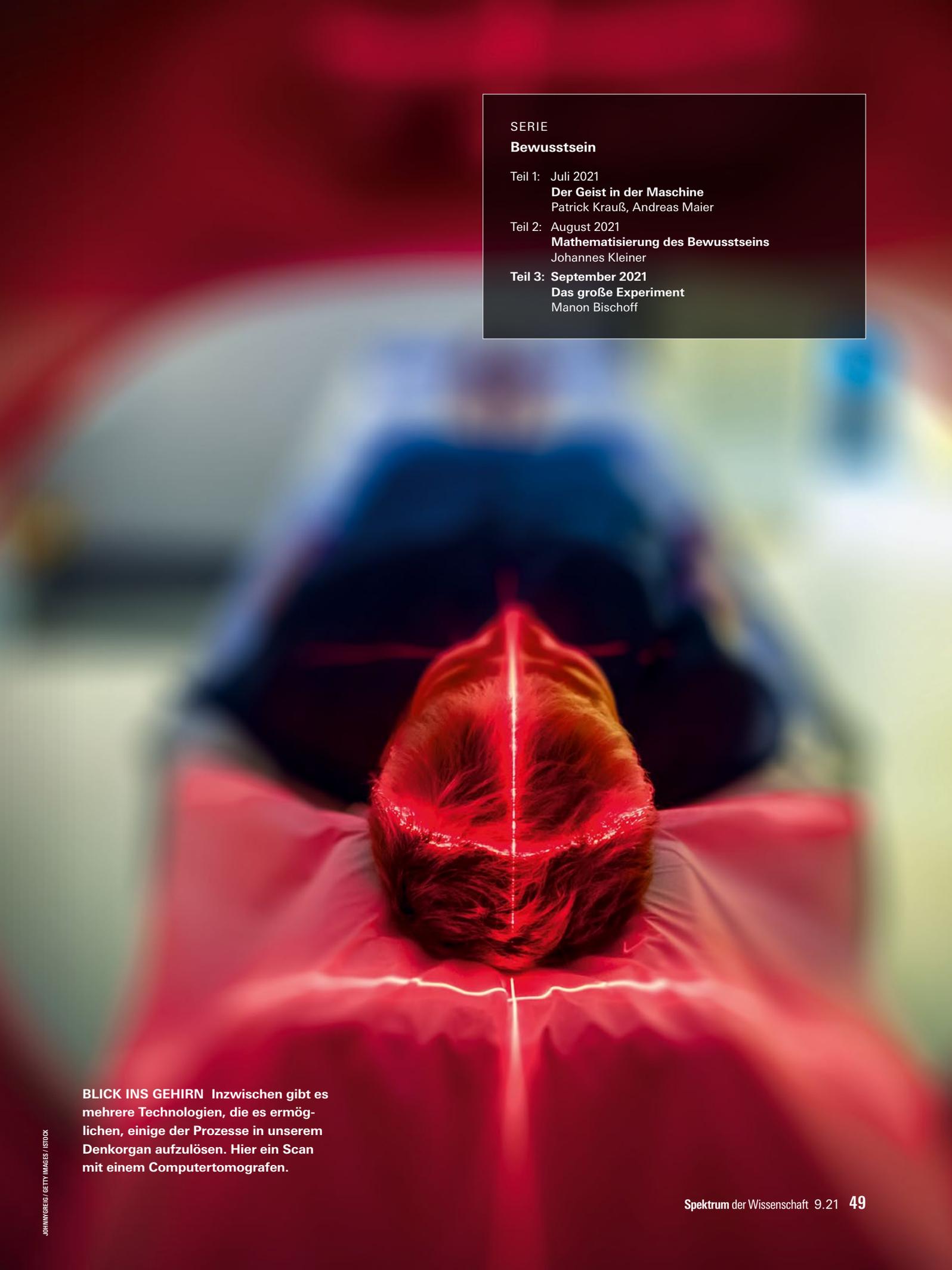
Zudem setzt man auf Reproduzierbarkeit. Die Versuche finden nicht nur in einem Labor statt, vielmehr widmen sich sechs Teams auf der ganzen Welt den gleichen Experimenten mit insgesamt 500 Versuchspersonen unterschiedlicher Herkunft. »Genau so stelle ich mir Wissenschaft vor, wenn man genügend finanzielle Mittel zur Verfügung hat. Ich meine, wie oft hat man schon die Gelegenheit, ein Experiment vollkommen richtig durchzuführen, direkt in mehreren Laboren, mit völlig unterschiedlichen Probanden und so weiter?«, schwärmt Melloni.

Eigentlich sollten die Ergebnisse des angelaufenen Projekts bereits vorliegen, aber die Corona-Pandemie hat den Termin etwas nach hinten verschoben. Nun hofft man, bis Ende 2021 alle Daten gesammelt zu haben, so dass die Auswertung beginnen kann.

Zusammenarbeit konkurrierender Teams

Unabhängig davon, was bei diesem aufwändigen Unterfangen herauskommt, ist den Organisatoren schon jetzt eine großartige Leistung gelungen: Sie haben die wichtigsten Vertreter der zwei führenden wissenschaftlichen Bewusstseinstheorien an einen Tisch gebracht, um gemeinsam zu überlegen, welche Eigenschaften ihrer jeweiligen Modelle sich in einem Experiment und mit den derzeit verfügbaren Technologien eindeutig überprüfen lassen.

In einem einjährigen Kraftakt haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einen detaillierten Plan ausgearbeitet, der preisgegeben wird, welcher der Ansätze am ehesten richtigliegt. »Ich glaube nicht, dass wir am Ende bei einer einzigen Theorie landen, die uns alles über das Bewusstsein verrät«, sagt Potgieter gegenüber dem »Quanta Magazine«. »Aber angenommen, es würde unter normalen



SERIE

Bewusstsein

Teil 1: Juli 2021

Der Geist in der Maschine

Patrick Krauß, Andreas Maier

Teil 2: August 2021

Mathematisierung des Bewusstseins

Johannes Kleiner

Teil 3: **September 2021**

Das große Experiment

Manon Bischoff

BLICK INS GEHIRN Inzwischen gibt es mehrere Technologien, die es ermöglichen, einige der Prozesse in unserem Denkorgan aufzulösen. Hier ein Scan mit einem Computertomografen.

Umständen 100 Jahre dauern, das hartnäckige Rätsel zu knacken – dann hoffe ich, dass wir die Dauer durch unsere Arbeit auf vielleicht 50 Jahre reduzieren können.«

Doch was, wenn sich beide Ansätze als falsch erweisen? »Das wäre toll!«, begeistert sich Melloni. Schließlich lerne man gerade in der Wissenschaft am meisten aus Fehlern. Zudem würden die gewonnenen Erkenntnisse neue Anhaltspunkte liefern, an denen man anknüpfen könne. Eine Eigenschaft des Forschungsprojekts kommt dabei besonders zum Tragen: Alle Versuchsdaten und Ergebnisse werden am Ende frei verfügbar sein. »Im Prinzip können sogar Schüler darauf zugreifen und sich ihre eigenen Gedanken über die Natur des menschlichen Geists machen und mit unseren Resultaten abgleichen«, so Melloni.

Aber was meinen Fachleute eigentlich, wenn sie von Bewusstsein sprechen? Allein eine passende Definition zu finden, ist alles andere als einfach. Einige wissenschaftliche Theorien verwenden den Begriff teilweise in grundlegend verschiedenen Zusammenhängen, was es unmöglich macht, sie miteinander zu vergleichen. Häufig wird damit jedoch die Fähigkeit bezeichnet, sich selbst und seine Umgebung wahrnehmen und beeinflussen zu können.

Dass Menschen bewusste Wesen sind, ist unbestritten. Bei Tieren, Pflanzen oder gar leblosen Systemen wird es dagegen schwieriger. Sicherlich besitzen Lebewesen wie Affen oder Vögel teilweise ausgeprägte kognitive Fähigkeiten, doch sind diese immer noch weit von denen des Menschen entfernt. Vielmehr scheint ihr Verhalten größtenteils von Trieben und Instinkten gesteuert, die unbewusste Reaktionen auf äußere Reize darstellen.

Auch Menschen verarbeiten viele Informationen, ohne es wahrzunehmen. Tatsächlich fanden Psychologinnen und Psychologen wie der Nobelpreisträger Daniel Kahneman heraus, dass die Menge der unbewussten Erinnerungen und Automatismen die der bewussten Erlebnisse deutlich übersteigt. Basierend auf diesen Erkenntnissen entwickelte der Kognitionswissenschaftler Bernard Baars daher 1982 die globale Arbeitsraumtheorie (englisch: global workspace theory, kurz: GWT), die heute zu den führenden For-

schungsbereichen der wissenschaftlichen Untersuchung des Bewusstseins zählt.

Demnach gibt es so etwas wie einen globalen Arbeitsspeicher im Gehirn, der eine bewusste Information enthält und sie von dort aus an andere Bereiche sendet, die mit gewissen Aufgaben verbunden sind. »Im Prinzip zirkulieren Informationen in einem Netzwerk weit entfernter Hirnareale, bevor eine von ihnen das Bewusstsein, den globalen Arbeitsraum, erreicht«, erklärt Stanislas Dehaene vom Collège de France in Paris, einer der führenden Vertreter der Theorie, in einem Interview mit »Pour la Science«, dem französischen Schwesternmagazin von »Spektrum der Wissenschaft«. Um eine neue bewusste Erfahrung zu machen, muss die vorherige verschwunden sein. »Sobald diese breit verfügbar gemacht wird, entsteht Bewusstsein«, so der Neurowissenschaftler Christof Koch vom Allen Institute for Brain Science in Seattle im »Quanta Magazine«. Damit reduziert sich der menschliche Geist auf einen Prozess der Informationsverarbeitung – eine Art Algorithmus.

Was ist real?

Es ist nicht sonderlich überraschend, dass die Ansicht nicht allen Forschenden behagt. Der italienische Arzt Giulio Tononi hat daher zusammen mit Koch und weiteren Kolleginnen und Kollegen einen völlig anderen Zugang zu der komplizierten Thematik gesucht und die so genannte integrierte Informationstheorie (kurz IIT) entwickelt. Anstatt sich auf biologische Prozesse im Gehirn zu konzentrieren und daraus ein Modell herzuleiten, liegt hier der Startpunkt im bewussten Erlebnis selbst. »Das Einzige, dessen man sich sicher sein kann, ist seine eigene bewusste Erfahrung«, so Melloni. »Ob andere Menschen auch ein Bewusstsein besitzen – geschweige denn andere Lebewesen oder Objekte –, kann man nie mit Sicherheit wissen.«

Deshalb haben Tononi und seine Kollegen zunächst fünf Eigenschaften herausgearbeitet, die ein bewusstes Erlebnis auszeichnen (siehe »Spektrum« August 2021, S. 76). Damit ein System, etwa das menschliche Gehirn, jene so genannten Axiome erfüllen kann, muss es gewisse Merkmale in seiner Struktur aufweisen. Inzwischen wurden diese identifiziert und können somit als Maß für kognitive Fähigkeiten gelten. Anders als bei vielen anderen Ansätzen ist ein System in der IIT also nicht entweder bewusst oder unbewusst. Stattdessen gibt es einen fließenden Übergang, der sich mit der Theorie quantifizieren lässt.

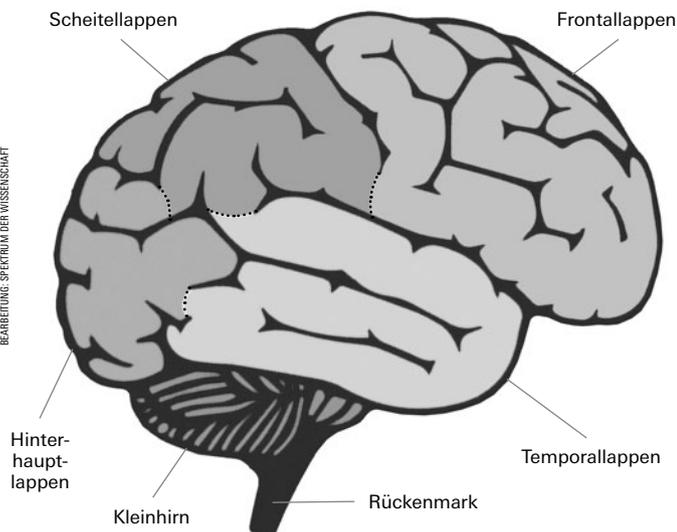
»Das Bewusstsein entspricht der Fähigkeit, sich selbst zu verändern: durch seinen vergangenen Zustand geprägt zu sein und seine Zukunft zu beeinflussen. Je besser ein System das kann, desto bewusster ist es«, erklärt Koch im »Quanta Magazine«. Vereinfacht gesagt, muss ein Netzwerk in seinem Aufbau also bloß gewisse Charakteristika aufweisen, um als bewusst zu gelten. Ein Beispiel dafür sind elektronische Schaltkreise oder Genregulationsnetzwerke, die in lebenden Zellen anzutreffen sind. Allerdings sind Systeme wie das menschliche Gehirn, die über ein besonders hohes Maß an Bewusstsein verfügen und dadurch ihre Existenz wahrnehmen können, extrem selten.

Auf den ersten Blick scheinen beide Theorien plausibel – und von Grund auf vollkommen verschieden. Damit ein

AUF EINEN BLICK DER MENSCHLICHE GEIST AUF DEM PRÜFSTAND

- 1** Gemäß der integrierten Informationstheorie (IIT) hat ein System, das seine Zukunft beeinflussen kann, ein hohes Maß an Bewusstsein.
- 2** Die globale Arbeitsraumtheorie (GWT) vertritt einen ganz anderen Ansatz: Der Geist ist nach dieser Ansicht bloß ein Prozess der Informationsverarbeitung.
- 3** Die IIT und die GWT sind die führenden Ideen zur wissenschaftlichen Beschreibung des Bewusstseins. Ein ehrgeiziges Projekt vergleicht sie nun miteinander.

ICOMEDIA/GETTY IMAGES/ISTOCK
BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



AUFBAU DES GEHIRNS Die zwei führenden Bewusstseinstheorien sind sich uneinig darüber, wo in unserem Denkgorgan bewusste Erfahrungen entstehen: im vorderen oder hinteren Teil des Gehirns.

Ansatz als wissenschaftlich gilt, muss er Vorhersagen liefern, die sich in Experimenten prüfen lassen. Bisher decken sich sowohl die Aussagen der IIT als auch der GWT mit empirischen Ergebnissen, die Forscherteams im Lauf der Jahre gesammelt haben. Eindeutige Widersprüche hat man also noch nicht gefunden. Das liege aber unter anderem daran, dass sich die Messwerte meist unterschiedlich interpretieren lassen, warnt Melloni.

Ein wesentliches Problem neurowissenschaftlicher Experimente ist, dass jedes menschliche Gehirn anders ist, erklärt Dawid Potgieter in einem Interview im Podcast »World of Wisdom«. Wenn man beispielsweise die neuronale Reaktion von Probanden untersucht, die das Bild eines Fußballs betrachten, wird sich bei allen ein leicht abweichendes Muster ergeben. Somit enthalten die Ergebnisse statistische Unsicherheiten, die verschiedene Schlussfolgerungen zulassen. Ob absichtlich oder unbewusst – häufig versucht man, diese den persönlichen Erwartungen anzugleichen.

Doch das ist nur eine der vielen Schwierigkeiten des Bereichs. Hinzu kommt, dass wissenschaftliche Resultate in der Regel erst als gesichert gelten, wenn sie sich reproduzieren lassen. Dazu führen andere Labore ein vermeintlich identisches Experiment durch. Um vergleichbare Daten zu erhalten, müssen die Forscherteams sich allerdings detailliert über den Ablauf austauschen: Sollten die Probanden etwas Bestimmtes tun, wenn das Bild eines Fußballs erschien? Wussten die Personen, welche Motive sie sich ansehen würden? Mit welchen Methoden hat man ihre Hirnaktivität untersucht? All diese Punkte können die Resultate erheblich beeinflussen.

Transparenz ist daher unbedingt notwendig. Leider lässt sich das aber nicht immer umsetzen. Häufig vergehen mehrere Jahre, bis Forscherteams versuchen, die wissenschaftlichen Ergebnisse anderer Gruppen zu reproduzieren.

In der Zwischenzeit erinnert man sich womöglich nicht mehr an alle Details. Falls die neuen Studien dann nicht zu den ursprünglichen Resultaten passen, lassen sie sich meist in Frage stellen: Vielleicht war der Ablauf etwas anders, oder der Messprozess wich leicht vom Original ab.

Deswegen hat die Templeton World Charity Foundation einen ungewöhnlichen Plan entwickelt: Anstatt wie die meisten anderen gemeinnützigen Organisationen Gelder auszuschreiben, um die sich verschiedene Forschungsgruppen bewerben können, geben sie selbst den Ablauf des Programms vor. Mit insgesamt 20 Millionen US-Dollar finanzieren sie fünf unterschiedliche Projekte, die alle das Ziel verfolgen, die Erforschung des menschlichen Bewusstseins voranzubringen. Die Vertreter konkurrierender Theorien werden dabei nicht separat gefördert, um anschließend über ihre Ergebnisse zu diskutieren, sondern sie treffen sich schon im Vorfeld und arbeiten Hand in Hand. Gemeinsam entwickeln sie Experimente, die ihre Modelle zweifelsfrei testen sollen.

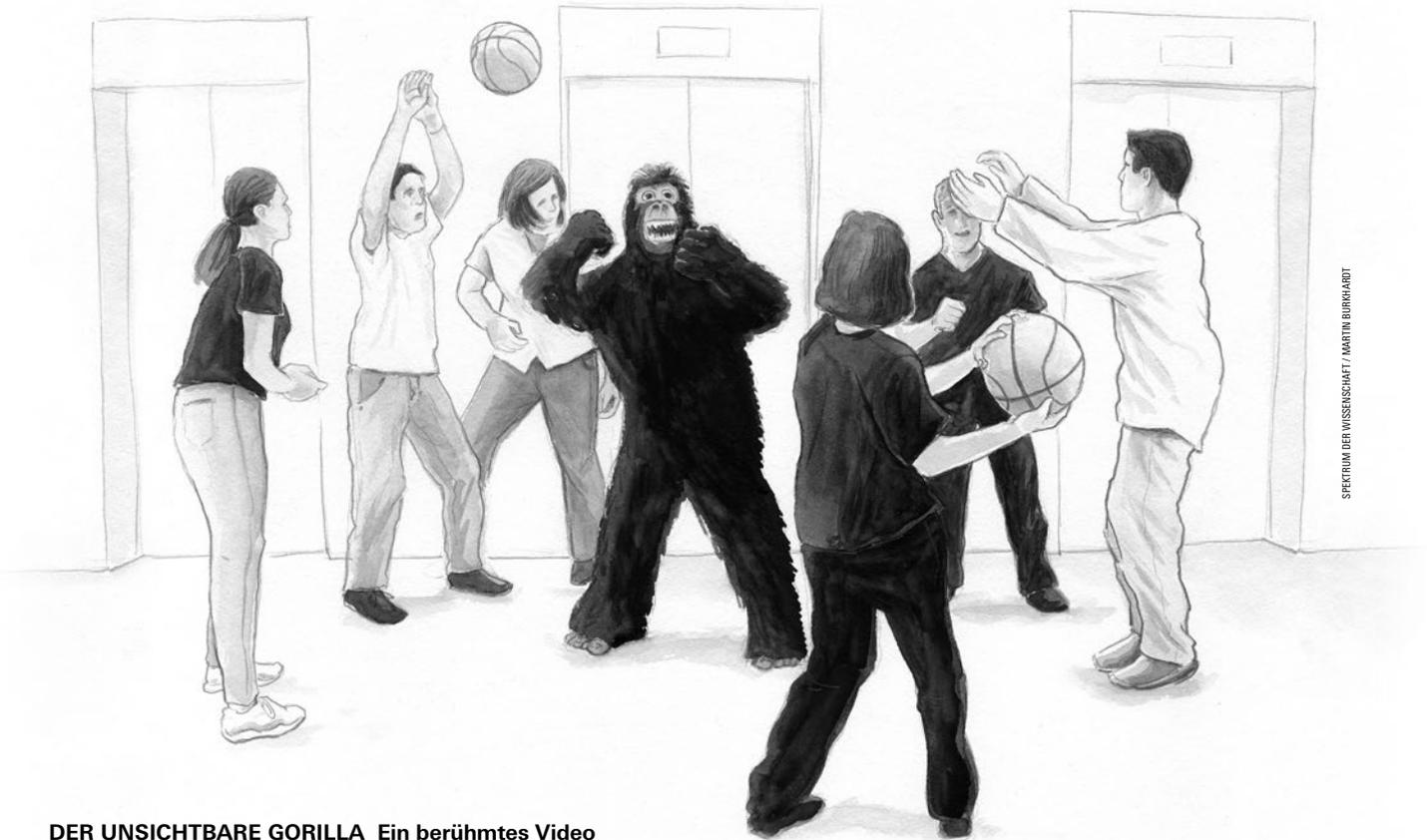
Mit diesem besonderen Anliegen wandte sich Potgieter vor einigen Jahren an Christof Koch, der daraufhin Lucia Melloni kontaktierte. Als erfolgreiche Neurowissenschaftlerin sollte sie das erste der fünf Projekte koordinieren. Schnell einigten sich die Beteiligten darauf, die zwei führenden Theorien des Bereichs auf die Probe zu stellen. Sie rekrutierten dafür Giulio Tononi, den Mitbegründer der IIT, sowie Stanislas Dehaene als einen der wichtigsten Vertreter der GWT.

Während eines mehrtägigen Symposiums, das im Allen Institute in Seattle stattfand, entstand ein Versuchsentwurf, der eine der Theorien – oder womöglich beide – falsifizieren würde. »Der grobe Ablauf war schnell klar«, erinnert sich Melloni, »doch all die Details auszuarbeiten, etwa die passenden Labore auszuwählen und zu kontaktieren, dauerte ein Jahr.«

Zwei Versuchsabläufe in sechs Laboren

Die Neurowissenschaftler haben sich auf zwei verschiedene Experimente geeinigt, bei denen sie auf je drei Bildgebungstechniken zurückgreifen: Sie nutzen funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI), Magneto- und Elektroenzephalografie (MEG und EEG) sowie Elektrokortikografie (ECoG). Erstere hat den Vorteil, dass sie das gesamte Gehirn abbildet. Dazu schiebt man die Probanden in eine Scannerröhre und erhält ein Abbild des Denkgorgans. Allerdings lässt sich damit nicht direkt die Reaktion der Neurone beobachten, sondern lediglich die der Blutgefäße. MEG und EEG sind hingegen genauer. Die beiden Technologien haben kombiniert eine hohe zeitliche Auflösung, wohingegen die räumliche eher schlecht ausfällt. Deutlich am besten schneidet die ECoG ab. Leider kann sie aber nur bei einer kleinen Zahl von Personen zum Einsatz kommen, da sie invasiv ist: Man muss die Schädeldecke öffnen und Elektroden ins Gehirn einführen, wodurch dieses sich extrem genau untersuchen lässt. Die Versuchspersonen sind meist Patienten, die beispielsweise an Epilepsie leiden und unabhängig von dem Experiment einen derartigen Eingriff benötigen.

Die Versuche werden in insgesamt sechs Laboren auf der ganzen Welt an 500 Freiwilligen umgesetzt. Damit sind



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MARTIN BURKHARDT

DER UNSICHTBARE GORILLA Ein berühmtes Video zeigt Personen beim Ballspiel und fordert die Zuschauer auf, die Ballkontakte zu zählen. Die meisten Menschen übersehen dabei den »Gorilla«, der durch die Szene läuft.

Probanden unterschiedlicher Ethnien und Kulturen vertreten, was gerade bei solchen Experimenten wichtig ist. Die beteiligten Forscherteams gehören weder der IIT-Denkrichtung noch der GWT-Schule an. »Das liegt nicht daran, dass man ihnen nicht vertraut«, betont Potgieter im Podcast von »World of Wisdom«. »Es ist nur so, dass man manchmal Ergebnisse unbewusst in eine bestimmte Richtung zu interpretieren versucht, wenn man von etwas überzeugt ist – und das möchten wir vermeiden.«

Dehaene, Tononi und ihre jeweiligen Arbeitsgruppen können sich im Anschluss an die Experimente die gesammelten Daten ansehen, um deren Qualität zu beurteilen. Geben die Forscher ihre Zustimmung, können die Labore mit der Auswertung beginnen. Dabei kommen die neuesten Analysetechniken zum Einsatz, um die eine Hälfte der Daten zu verarbeiten. Danach nutzen sie die zweite Hälfte der Messungen, um die vorherigen Ergebnisse zu replizieren. Die beteiligten Teams erhalten anschließend die Möglichkeit, wissenschaftliche Aufsätze zu verfassen.

Erst dann werden die Daten der breiten Masse zur Verfügung gestellt – und zwar in Gänze. Das ist ungewöhnlich, denn nur selten veröffentlichen Forschungseinrichtungen wirklich alle Informationen. Unabhängig davon, wie die Ergebnisse ausfallen, haben sich die konkurrierenden Vertreter zuvor darauf geeinigt, sie zu akzeptieren – auch wenn sie ihren Vorhersagen widersprechen.

Inzwischen sind die Experimente angelaufen, einige sogar schon beendet. Unter anderem sollen sie klären, wo

im Gehirn das Bewusstsein verankert ist. In der GWT geht man davon aus, dass sich die Bewusstsein erzeugenden Neurone im Scheitel- und Stirnlappen des Kortex befinden. Ersterer hängt mit dem Tastsinn und räumlichen Vorstellungsvermögen zusammen, während Letzterer mit dem Verarbeiten höherer Funktionen wie dem Gedächtnis oder der Entscheidungsfindung verbunden ist. Folgt man hingegen der IIT, muss die Vernetzung der Nervenzellen bestimmte Eigenschaften erfüllen, um ein Bewusstsein erzeugen zu können. Eine solche Struktur findet sich offenbar im hinteren Teil des Gehirns.

Eine weitere Vorhersage, die beide Theorien voneinander unterscheidet, betrifft die Dauer, mit der die Neurone während eines bewussten Erlebnisses feuern. Die GWT besagt, dass die Nervenzellen nach einem sensorischen Reiz etwa 300 bis 400 Millisekunden lang elektrische Signale übermitteln. In dem Modell entspricht das der Zeit, die nötig ist, um die Information über das Erlebte weiterzugeben. Anschließend ebbt das Signal ab und erscheint erst wieder, wenn der äußere Reiz verschwindet. Das Gehirn würde also nur am Anfang und am Ende eines Erlebnisses einen Informationsfluss in Gang setzen. Folgt man der IIT, bleibt die neuronale Aktivität hingegen während des gesamten Geschehens bestehen.

Um diese widersprüchlichen Vorhersagen zu überprüfen, haben die Forschenden zwei Versuche ausgearbeitet: In einem zeigt man den Probanden Bilder über verschiedene Zeiträume von 500, 1000 und 1500 Millisekunden. Dabei sind die Versuchspersonen nicht immer verpflichtet, äußerlich auf die Abbildungen zu reagieren. Das ist ein wichtiger Punkt, wie Melloni betont. »Viele Versuche bringen Perso-

nen in eine unnatürliche Situation: Sie müssen beispielsweise ständig darüber berichten, was sie sehen. Das ist etwas, was wir im echten Leben nicht tun.«

Unter anderem deshalb konnten bisherige Experimente auch nicht eindeutig erklären, ob das Bewusstsein im vorderen oder im hinteren Teil des Gehirns verortet ist. Es sei eher ein soziologisches als ein naturwissenschaftliches Phänomen, erklärt Melloni. Die Wissenschaftler würden die Versuche in solch einer Weise durchführen, dass sie stets das vorfänden, was ihre Theorie vorhersagt.

Experimente ohne Interpretationsspielraum: IIT versus GWT

Als Beispiel nennt sie mehrere Arbeiten von Dehaene, in denen er tatsächlich Aktivitäten im präfrontalen Kortex von Probanden messen konnte, wenn sie bewusste Erfahrungen machten. Doch die meisten durchgeführten Versuche waren mit einer Aufgabe verbunden: Die Versuchspersonen mussten auf etwas reagieren oder entsprechend handeln. Daher sieht Tononi, nach dessen Ansicht das Bewusstsein im hinteren Bereich des Gehirns verortet ist, keinen Widerspruch zu seiner Theorie. Denn gemäß der IIT findet nach einem bewussten Erlebnis durchaus Aktivität im präfrontalen Kortex statt – aber nur als Reaktion darauf, etwa um eine Handlung einzuleiten.

Deshalb haben Tononi, Dehaene und andere beteiligte Experten die derzeit stattfindenden Versuche so konzipiert, dass sie keinen Interpretationsspielraum zulassen: Da einige Experimente ohne Aufgabe auskommen, sollte es gemäß der IIT keine Aktivität im vorderen Teil des Gehirns geben.

Der zweite Versuch widmet sich hingegen der Frage, wie ein Reiz in unseren Geist gelangt. Dazu wurde ein Computerspiel entwickelt: Während die Probanden sich auf die Aufgaben des Spiels konzentrieren, treten unerwartete Ereignisse auf. Die Frage wird sein, welche davon es ins Bewusstsein schaffen und welche unbemerkt bleiben – und warum.

Die Situation ähnelt einem berühmten Video, bei dem man mehreren Personen beim Ballspielen zusieht und die Ballkontakte zählen soll. Irgendwann läuft jemand mit einem Gorillakostüm durch das Bild. Tatsächlich bekommen die meisten Menschen, die sich auf die Aufgabe konzentrieren, nichts davon mit.

Inzwischen sind einige der Versuche beendet, und mit Spannung werden die ersten Ergebnisse erwartet. Während die Forschergemeinschaft überwiegend einem Gewinner der zwei Theorien entgegenfiebert, vertritt Melloni eine differenzierte Ansicht: »Wir können mehr lernen, wenn sie beide versagen. Ich bin Agnostikerin und glaube, dass alle Modelle falsch sind – selbst wenn sich einige als nützlich erweisen.«

Inzwischen hat die Templeton World Charity Foundation ein zweites großes Forschungsprojekt bewilligt. Interessanterweise geht es auch dabei darum, die neuronale Reaktion auf statische Bilder zu erfassen, die einem Probanden unterschiedlich lange präsentiert werden. Doch die Versuchsobjekte sind in diesem Fall keine Menschen, sondern Affen und Mäuse. Damit lässt sich untersuchen, inwieweit sich die kognitiven Prozesse von Tieren und

Menschen unterscheiden. Die ersten Experimente dazu laufen jetzt an.

Zudem sind weitere Projekte in Planung, die jeweils zwei Bewusstseinstheorien gegenüberstellen: Das eine vergleicht so genannte Theorien höherer Ordnung mit solchen erster Ordnung. Letztere besagen, der menschliche Geist umfasse bloß die kognitive Verarbeitung sensorischer Informationen, ähnlich wie in der GWT. Im Gegensatz dazu ist eine bewusste Erfahrung laut den Theorien höherer Ordnung mehr als nur eine Aufzeichnung von Eindrücken. Zusätzliche Mechanismen würden demnach auf diese Informationen zurückgreifen, und erst dadurch drängen sie ins Bewusstsein.

Ein anderes Projekt wird die IIT mit einer weiteren beliebten Bewusstseinstheorie, der prädiktiven Codierung, konfrontieren. Ihr zufolge sammelt das Gehirn ständig unbewusst Informationen über die Umwelt und versucht daraus vorherzusagen, wie die nächsten sensorischen Eingaben aussehen, um ein passendes Modell der Welt zu schaffen. Demnach liefe die Wahrnehmung zum Großteil von innen nach außen ab, nämlich durch die Vorhersage.

Die führenden Vertreter der diskutierten Theorien haben schon mögliche Ideen für Experimente herausgearbeitet, die in den kommenden Jahren in verschiedenen Laboren umgesetzt werden. Allerdings glückt der kollaborative Ansatz nicht immer. Ein weiteres Projekt, das die IIT der so genannten orchestrierten Zielreduktion gegenüberstellen sollte, die das Bewusstsein durch quantenphysikalische Prozesse erklären möchte, ist gescheitert: Es gelang nicht, ein Versuchsszenario auszuarbeiten, das die konkurrierenden Modelle testen könnte. Deshalb hat die World Templeton Charity Foundation ein weiteres Projekt ausgeschrieben. Um welche Beschreibungen des menschlichen Geistes es dabei gehen wird, ist jedoch noch unbekannt.

Aus neurowissenschaftlicher Sicht versprechen die nächsten Jahre daher überaus spannend zu werden. Entscheidend ist dabei nicht unbedingt, wie die Experimente ausgehen und welche Theorien sich durchsetzen – oder ob sie alle versagen. Allein der Umfang und die Durchführung der Versuche lässt keinen Zweifel daran, dass sie viele neue Erkenntnisse über das menschliche Gehirn zu Tage bringen werden. Zudem könnte sich die Idee, eine Zusammenarbeit konkurrierender Ansätze zu fördern, dadurch etablieren und in Zukunft auch in anderen Bereichen zu spannenden Forschungsprojekten führen. ◀

QUELLEN

Ball, P.: Neuroscience readies for a showdown over consciousness ideas. *Quanta Magazine* 3/2019

Melloni, L. et al.: Making the hard problem of consciousness easier. *Science* 372, 2021

LITERATURTIPP

Mangin, L.: La métaphore de l'ordinateur fait du cerveau un dispositif de traitement inconscient de l'information. *Pour la Science* 8-9/2020, S. 8–11

Interview mit Stanislas Dehaene über das Bewusstsein (in französischer Sprache)

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile im Abonnement

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

- ▶ Download des Monats (kostenfrei): im August **Spektrum** KOMPAKT »Die Zelle«
- ▶ Reduzierte digitale Produkte: im August »Außerirdisches Leben«, »Reptilien« und »Angst«
- ▶ Regelmäßige Einladungen zu digitalen Redaktionsbesuchen oder zu Vorträgen (kostenfrei)
- ▶ Monatliche Verlosung von Büchern und **Spektrum**-KOMPAKT-Ausgaben
- ▶ Vergünstigungen und Rabatte bei Partnerangeboten:
 - Onlinekurs: **Spektrum**-Schreibwerkstatt (Preisnachlass)
 - Spektrum**-Hörbücher von Fliegenglas (reduzierter Abopreis)
 - Englischkurs von Gymglish (2 Monate kostenlos)
 - iversity Onlinekurse (Preisnachlass): »Die Toolbox für Deine Karrieregestaltung«, »Psychological Pricing in Practice« und »So gelingt Mitarbeitermotivation wirklich«

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus



FRANZI SCHÄDEL (FLORIAN-FREISTETTER.DE/PRESSE)/
CC BY-SA 4.0 (CREATIVCOMMONS ORG/LICENSING/SA/4.0/LEGAL/DDB)

FREISTETTERS FORMELWELT DAS PENDEL UND DER KOMET

Auf den ersten Blick scheint ein Pendel sehr einfach zu sein. Doch im Hintergrund läuft jede Menge höchst spannende Mathematik ab.

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

► spektrum.de/artikel/1897528

Wer ein Studium absolviert, das auch nur ein bisschen mit Naturwissenschaft zu tun hat, wird früher oder später mit dem »mathematischen Pendel« konfrontiert. Es beschreibt eine punktförmige Masse, die an einer masselosen Stange aufgehängt ist und nur in einer Ebene hin- und herschwingt, ohne dabei von Luftwiderstand oder anderen Effekten gestört zu werden.

In der echten Welt kann es so ein Objekt natürlich nicht geben. Dafür lässt es sich aber leicht in Formeln fassen. Diese zu lösen, kann allerdings erstaunlich schwierig sein. Ein klassisches Ergebnis für die Schwingungsdauer T_0 sieht zum Beispiel so aus:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Man erkennt, dass es – bei vorgegebener Schwerebeschleunigung g – allein von der Länge l abhängt, wie lang das Pendel für eine Schwingung braucht. Die Formel ist jedoch nur eine Näherungslösung für den Fall kleiner Auslenkungen. Für beliebig große Amplituden lässt sich die Bewegungsgleichung nicht mehr exakt lösen. Das hat mich durchaus überrascht: Ich hatte nicht damit gerechnet, dass etwas so Simples so komplex sein kann.

Das Pendel begegnete mir später im Studium nochmals, als es um die Definition von Chaos ging. Denn das einfache Konstrukt kann zwei unterschiedliche Arten von Schwingungen durchführen: Es kann hin- und herpendeln oder – mit ausreichend Energie angeschubst – einen vollständigen Kreis beschreiben. Die Grenze zwischen beiden Zuständen heißt »Separatrix«, und eine chaotische Bewegung findet immer dann statt, wenn sie überschritten wird. Das geschieht etwa,

wenn ein Pendel von der schwingenden in die rotierende Phase wechselt, weil von außen eine Kraft einwirkt.

Im Lauf meiner wissenschaftlichen Arbeit habe ich das Pendel schätzen gelernt und immer wieder gern mit den entsprechenden mathematischen Gleichungen herumgespielt. Möchte man etwa die chaotische Bewegung der Himmelskörper verstehen, kommt man ohne sie nicht aus. Meine Lieblingsgeschichte zur Pendelmathematik stammt aus dem Jahr 1755: Damals hat der französische Uhrmacher Jean André Lepaute das Buch »Traité d'horlogerie« veröffentlicht.

Ebenfalls an der Arbeit beteiligt – wenn auch nicht als Autorin aufgeführt – war Nicole-Reine Lepaute, seine Frau. Von ihr stammt unter anderem eine Tabelle am Ende des Werks, aus der man die Schwingungsdauer unterschiedlich langer Pendel ablesen kann beziehungsweise die für eine gewünschte Dauer nötige Länge. Möchte man eine Uhr bauen, ist das sicherlich nützlich. Nicole-Reine Lepaute ging mit ihrer Arbeit aber weit darüber hinaus; der letzte Eintrag der Tabelle beschreibt ein Pendel, das für eine Schwingung eine Stunde benötigt und dafür zirka 12000 Kilometer lang sein muss.

Es scheint, als hätte sie aus Spaß an der Physik gerechnet. Zumindest in diesem Fall; denn später hat sie sich durchaus mit praktischer Forschung beschäftigt. Gemeinsam mit dem Mathematiker Alexis Clairaut und dem Astronomen Jérôme Lalande berechnete sie die von Jupiter und Saturn auf den Halleyschen Kometen ausgeübten gravitativen Störungen. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass der Himmelskörper einige Wochen später auftauchen würde als bis dahin angenommen, und lagen damit absolut richtig.

Diese Anwendung der »Störungsrechnung« war ein bemerkenswertes Resultat. Lepautes Beitrag können wir jedoch nur dank Lalande würdigen. Während Clairaut die Arbeit einer Frau nicht anerkennen wollte, hatte der Astronom damit keine Probleme und erklärte explizit, dass man die Aufgabe ohne ihre Fähigkeiten nicht hätte lösen können. Manchmal muss eine Frau den Männern eben zeigen, wo das Pendel hängt!

ÖKOLOGIE ERREGER AUF REISEN

Per Flugzeug, Schiff und Landfahrzeugen verbreiten sich Pilze rund um den Globus. Das führt zu verheerenden ökologischen Schäden.



ROLAND KIMAUER

Kerstin Viering ist Wissenschaftsjournalistin in Lehnin/Brandenburg.

» spektrum.de/artikel/1897519



MIT FROL. GEN. VON DIRK SCHMELLER

LURCHSTERBEN Amphibien wie der Korsische Feuersalamander (großes Bild) sind von Pilzkrankungen bedroht. In Feldstudien untersuchen Forscher, wie sich die Bestände entwickeln (links).

MIT FROL. GEN. VON DIRK SCHMELLER



SERIE

Pilze – Die unterschätzten Schädlinge

Teil 1: Juli 2021

Bedrohte Ernte

Thomas Miedaner

Teil 2: August 2021

Verkannte Gesundheitsgefahr

Maryn McKenna

Teil 3: **September 2021**

Erreger auf Reisen

Kerstin Viering

Für die Kihansi-Gischtkröte kam das Ende sehr plötzlich. Das Verbreitungsgebiet dieser kleinen, gelbbraun gefärbten Amphibien mit der Bezeichnung *Nectophrynoides asperginis* beschränkte sich auf die vier Kilometer lange Kihansi-Schlucht in Tansania. Im Juni 2003 zählten Biologen dort rund 18000 Exemplare; im folgenden Winter waren es gerade noch fünf. Seit 2009 steht die Art als »in freier Natur ausgestorben« auf der Roten Liste der Internationalen Naturschutzunion IUCN.

Fachleute betreuen heute die letzten überlebenden Kihansi-Gischtkröten im Rahmen eines tansanisch-amerikanischen Zuchtprogramms. Eines Tages sollen die zwei bis drei Zentimeter großen Tiere wieder in ihre alte Heimat zurückkehren. Doch das könnte schwierig werden. Denn ausgelöscht wurden sie durch schwere Eingriffe in ihren Lebensraum, aber auch durch den Pilz *Batrachochytrium dendrobatidis* – einen tückischen Gegner, der dort womöglich immer noch lauert.

B. dendrobatidis ist seit 1998 bekannt und gilt als einer der gefährlichsten Erreger von Amphibienkrankheiten. Der Pilz nistet sich in der Haut seiner Opfer ein, stört ihre Atmung, bringt ihren Stoffwechsel durcheinander und vernichtet so in kürzester Zeit ganze Populationen. Viele Amphibienarten, die durch Umweltverschmutzung, Lebensraumverlust und andere Probleme ohnehin schon bedroht waren, setzt er weiter unter Druck. Selbst in intakten Ökosystemen löste er Massensterben aus. Besonders stark hat er die Lurche in den tropischen Regionen Australiens sowie Mittel- und Südamerikas dezimiert.

Eine internationale Schadensbilanz haben Forscherinnen und Forscher um Ben Scheele von der Australian National University 2019 in der Fachzeitschrift »Science« veröffentlicht. Demnach hat *B. dendrobatidis* in den zurückliegenden 50 Jahren zum Rückgang von rund 500 Amphibienarten beigetragen. Mindestens 90 davon rottete der Pilz wahrscheinlich aus, bei mehr als 120 weiteren hat er die Bestände um schätzungsweise 90 Prozent einbrechen lassen. Keine andere bekannte Wildtierkrankheit habe einen größeren Biodiversitätsverlust angerichtet, resümieren die Wissenschaftler.

Experten sind überzeugt davon, dass die Pilzkrankheit vielerorts schon in den 1980er Jahren grassierte – lange

bevor ihr Erreger bekannt war. Als er 1998 entdeckt wurde, ließ sich zunächst nichts über seine Herkunft aussagen. Denn um sie zu ermitteln, mussten Fachleute in möglichst vielen Weltregionen DNA-Proben des Pilzes sammeln und miteinander vergleichen – ein mühsames Unterfangen. Erst 2018 lagen genügend Daten für einen umfangreichen genetischen Abgleich vor. Dabei kam heraus, dass alle untersuchten Varianten von *B. dendrobatidis* auf eine asiatische Linie namens BdASIA-1 zurückgehen. Ihre größte genetische Vielfalt zeigt sie auf der koreanischen Halbinsel. »Dort liegt wahrscheinlich der Ursprung der Krankheit«, sagt Dirk Schmeller von der Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse (ENSAT), dessen Team zahlreiche Proben zu der entsprechenden Studie beigesteuert hat.

Im Lauf der Zeit hat sich der Pilz in verschiedene Unterformen aufgespalten, wie aus den Erbgutanalysen hervorgeht. Vor etwa 50 bis 130 Jahren ist die Linie BdGPL (»Global Panzootic Lineage«) entstanden, die weltweit die meisten Massen- und Artensterben verursachte. In Experimenten hat sie sich als hoch ansteckend und tödlich erwiesen. »Das hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass es sich um einen Hybriden aus mehreren anderen Linien handelt«, erläutert Schmeller. Hybride Keime, die aus der Verschmelzung verschiedener Erregerstämme hervorgehen, zeigen häufig neue Eigenschaften, die sie deutlich gefährlicher machen als ihre Vorgänger.

In Europa kursieren relativ harmlose Varianten des Schadpilzes

In Europa tritt BdGPL bisher nur in einigen Regionen zerstörerisch auf. In anderen Gegenden kommt die Pilzvariante zwar vor, setzt den Lurchen aber nur wenig zu. »Das kann eine ganze Reihe von Ursachen haben«, sagt Schmeller. So gedeiht der Pilz bei hohen Temperaturen und Trockenheit nicht gut. Zudem sind manche europäische Amphibienarten, etwa der Grasfrosch (*Rana temporaria*), resistent gegen den Erreger. Bei anderen Spezies entscheiden offenbar die Mikroorganismen auf der Haut mit, wie leicht sich das Tier infizieren kann.

Darüber hinaus variieren die Keime selbst: Ein Team um Frank Pasmans und An Martel von der Universität Gent in Belgien hat herausgefunden, dass es innerhalb der Linie BdGPL unterschiedlich gefährliche Sorten gibt. In etlichen europäischen Amphibienpopulationen kursieren offenbar relativ harmlose Varianten, mit denen sich die Lurche arrangieren können. In Flandern beispielsweise haben selbst kleine und isolierte Bestände der empfindlichen Geburtshelferkröte dem Pilz jahrelang getrotzt. Laborversuche bestätigen, dass diese Tiere zwar den aggressiven Formen des Erregers zum Opfer fallen, nicht aber den weniger virulenten aus ihrem eigenen Lebensraum.

Pasmans und Martel vermuten, die vergleichsweise gutartigen Pilzvarianten könnten die europäischen Amphibien bis zu einem gewissen Grad schützen. Möglicherweise aktivieren sie deren Immunsystem, ähnlich einer Impfung. Wenn dann später die aggressiveren Erreger auftauchen, wären die Tiere ihnen nicht hilflos ausgeliefert. Dirk Schmeller dämpft jedoch allzu große Erwartungen an diesen Mechanismus: »Die Idee, dass man die harmloseren

AUF EINEN BLICK DEN TOD IM GEPÄCK

- 1** Mit dem Güter- und Personenverkehr verbreiten sich diverse Pilzarten rund um den Globus.
- 2** Viele davon lösen in Regionen, in die sie neu eingeschleppt werden, verheerende Massensterben aus.
- 3** Dutzende Amphibien- und Pflanzenarten sind von Pilzkrankheiten ausgelöscht oder an den Rand des Aussterbens gebracht worden.



MIT FROH. GEN. VON DIRK SCHMELLER

TÜCKISCHE KRANKHEIT Geburtshelferkröten (oben) sind anfällig gegenüber dem Schadpilz *B. dendrobatidis*. Er verursacht die Krankheit Chytridiomykose, der zahlreiche Tiere erliegen (rechts).

Varianten gezielt in die Gewässer bringen und die Tiere so immunisieren könnte, hat bisher nicht wirklich funktioniert.«

Es ist nicht erwiesen, dass Lurche, die bislang empfindlich gegenüber dem Pilz waren, eine Resistenz dagegen entwickeln können. Hoffnung gibt es aber. Einige amerikanische Spezies, etwa die Froschart *Rana sierrae* in der kalifornischen Sierra Nevada, erholen sich wieder – ebenso manche Geburtshelferkrötenpopulationen in den Pyrenäen. Allerdings könnte das daran liegen, dass infolge des Klimawandels dort die Wassertemperaturen gestiegen und dem Pilz nun zu hoch sind. Künftige Untersuchungen sollen hier Klarheit schaffen.

»Jedenfalls können wir hinsichtlich *Batrachochytrium dendrobatidis* keine Entwarnung geben«, betont Schmeler. Zumal Ben Scheele und sein Team in ihrer »Science«-Studie nur bei zwölf Prozent der Arten, die vom Pilz dezimiert wurden, überhaupt Anzeichen für eine Erholung fanden. Viele Amphibienexperten plädieren daher für umfassende Maßnahmen, um die angeschlagenen Populationen zu schützen.

Wie bei der Kihansi-Gischtkröte könnte die Zucht in Gefangenschaft für einige Arten die letzte Rettung sein. Ebenso hilft ein besserer Habitatschutz. Wenn nämlich Lebens-



MIT FROH. GEN. VON DIRK SCHMELLER



INFIZIERT Der Pilz *P. destructans* bedroht in Nordamerika viele Fledermausarten, darunter die Kleine Braune Fledermaus (*Myotis lucifugus*, hier ein befallenes Tier).

räume geschädigt sind, setzt das ihre tierischen Bewohner unter Stress. Das wiederum beeinträchtigt deren Immunsystem, so dass der Pilz leichtes Spiel hat. Vor allem gilt es zu verhindern, dass sich der Erreger weiter ausbreitet. Speziell den Handel mit Amphibien sehen viele Experten kritisch: »Wenn man nicht jedes Tier aufwändig auf eine Infektion testen will, sollte man den lieber ganz unterbinden«, meint Schmeller.

Das gilt umso mehr, da der Tierhandel auch einen Verwandten von *B. dendrobatidis* um den Globus verbreitet, der als noch aggressiver und tödlicher gilt. Dieser Pilz trägt den Namen *Batrachochytrium salamandrivorans* (»Salamanderfresser«) – und zwar völlig zu Recht. Denn er frisst seinen Opfern regelrecht Löcher in die Haut und verurteilt sie damit fast immer zum Tod. Er stammt ebenfalls aus Asien, wo er Schwanzlurche wie Salamander und Molche schon seit Langem befällt. Die überstehen das in der Regel problemlos, oft ist ihnen die Infektion nicht einmal anzusehen. Genau das aber dürfte dem Erreger den Weg nach Europa geebnet haben. Vermutlich sind befallene Tiere über den Haustiermarkt in die Niederlande gekommen und dort ausgesetzt worden. Der Pilz konnte sich daraufhin neue Opfer suchen, die ihm nichts entgegenzusetzen hatten.

Am verheerendsten wütete *B. salamandrivorans* unter den Feuersalamandern (*Salamandra salamandra*). Als er 2010 die ersten Bestände in den Niederlanden dahinraffte, hatte zunächst niemand eine Erklärung dafür. Erst 2013 fand ein Team um Pasmans und Martel heraus, dass der bis dahin unbekannt Pilz hinter dem Desaster steckte. Im selben Jahr grassierte der Erreger zudem in Belgien; 2015 wiesen ihn Forscher der Universität Trier in der Eifel nach.

Seither hat sich der »Salamanderfresser« bundesweit rasant ausgebreitet. Mehr als 50 Ausbruchsherde sind der-

zeit bekannt, allein zwischen 2019 und 2020 kamen 17 neue dazu. »Deutschland hat sich zum Hotspot der Krankheit entwickelt«, warnt Schmeller. Große Sorge bereite, dass der Pilz sprunghaft weite Distanzen überwinde. Im April 2020 beispielsweise starben etliche Bergmolche in Gartenteichen im Allgäu – etwa 170 Kilometer entfernt von den nächstgelegenen bekannten Fällen.

»Damit ist ziemlich klar, dass Menschen den Erreger verbreiten«, sagt Schmeller. »Vielleicht hängt er an Wasserpflanzen, die sich Gartenbesitzer aus dem Baumarkt holen.« Der Pilz hat aber noch diverse andere Möglichkeiten, in neue Gebiete zu gelangen. Zum Beispiel mittels ausgesetzter Terrarientiere, die ihn unerkannt in sich tragen. Oder es bleibt ein bisschen Erde, in der die Sporen womöglich monatelang überleben können, an Wanderschuhen beziehungsweise Autoreifen hängen.

Das Ende der Feuersalamander?

Was der Siegeszug von *B. salamandrivorans* für die Amphibienpopulationen in Deutschland bedeutet, kann niemand absehen. Beim Feuersalamander beobachten Wissenschaftler einen ähnlich drastischen Schwund wie in den Niederlanden, wo der Pilz 96 Prozent dieser Lurche getötet hat. Zwar leben in den meisten Landesregionen immer noch Salamander, wengleich in geringer Besiedlungsdichte. Doch es gibt kaum Hinweise darauf, dass sich die Bestände erholen. Schmeller hält es für möglich, dass der Feuersalamander in freier Wildbahn aussterben wird.

Bei allen vier in Deutschland heimischen Molcharten wurde der Pilz ebenfalls nachgewiesen. Für sie muss das zwar nicht unbedingt ein Todesurteil sein, Bergmolche etwa können mild verlaufende Infektionen überleben. Allerdings bleiben sie dann monatelang infektiös und verbreiten den Erreger weiter. Damit wächst das Risiko, dass die Krankheit zusätzliche Arten in Bedrängnis bringt. Denn Modelle zeigen, dass der Pilz längst noch nicht alle Regionen Europas erreicht hat, die ihm geeignete Lebensbedingungen und Wirte bieten.

Insbesondere sorgen sich die Experten um den Alpensalamander (*Salamandra atra*), der nur in den Alpen und im Dinarischen Gebirge entlang der Adria vorkommt. »Die Bestände dieser Art könnten schneller zusammenbrechen als die des Feuersalamanders«, befürchtet Schmeller, »schließlich hat der Alpensalamander ein deutlich kleineres Verbreitungsgebiet.« Einen ersten Verdacht auf eine Infektion mit *B. salamandrivorans* gibt es bei der Spezies bereits. Und von den weltweit einmaligen Salamanderarten auf Korsika und Sardinien oder in der Türkei weiß niemand, wie sie auf den Erreger reagieren werden.

Nicht nur Amphibien haben unter eingeschleppten Pilzen aus anderen Weltregionen zu leiden. Ein Erreger namens *Pseudogymnoascus destructans*, der unter europäischen Fledermäusen schon lange grassiert, ist vor einigen Jahren nach Nordamerika exportiert worden – mit ernststen Folgen für die dortigen Säuger. Er mag kühle und feuchte Bedingungen und bevorzugt daher Höhlen, die Fledermäuse als Winterquartiere nutzen. Wenn die Tiere dort kopfüber an der Decke hängen und die kalte Jahreszeit verschlafen, schlägt er zu. Denn dann fahren ihren Stoffwechsel und damit die Immunaktivität deutlich herunter. Womit der Pilz leichtes Spiel hat: Er befällt die Schnauze, die Ohren und Flügel und überzieht sie mit einem weißlichen Belag, daher heißt das von ihm verursachte Krankheitsbild Weißnasen-Syndrom. Der Schaden, den er im Körpergewebe der Tiere anrichtet, bringt ihren Wasser-, Elektrolyt- und Energiehaushalt durcheinander, was sich während der winterlichen Schlafphase verhängnisvoll auswirkt.

Aufgefallen ist das Problem erstmals im Februar 2006 in einer Höhle bei Albany im US-Bundesstaat New York. Seither hat der Pilz in Nordamerika viele Millionen Fledermäuse getötet und etliche Arten massiv dezimiert, die früher zahlreich vertreten waren. So sind die Bestände des Kleinen Braunen Mausohrs, des Indiana-Mausohrs und der Östlichen Amerikanischen Zwergfledermaus in mehreren US-Bundesstaaten um 70 bis 90 Prozent geschrumpft. Das Nordamerikanische Mausohr hat der Erreger an den Rand des Aussterbens gebracht.

Warum aber leiden nordamerikanische Fledermäuse so stark unter *P. destructans*, während ihre europäischen Verwandten kaum Probleme damit haben? An der Aggressivität des Keims liegt es wohl nicht, denn die ist auf beiden Kontinenten ähnlich hoch. Den Ausschlag dürfte eher geben, wie die Befallenen dies- und jenseits des Atlantiks mit der Infektion umgehen. Entsprechende Hinweise hat kürzlich ein deutsch-französisches Forscherteam unter Leitung des Berliner Leibniz-Instituts für Zoo- und Wildtierforschung (IZW) gefunden.

Die Wissenschaftler haben 61 Große Mausohren untersucht, die mit dem Pilz infiziert waren und den Winter in Deutschland verbrachten. Manche zeigten überhaupt keine Symptome, andere nur milde Krankheitszeichen, wieder andere wiesen deutlichen Befall auf. Bei allen Tieren erfassen die Forscher die Größe und das Gewicht und entnehmen Blutproben, um verschiedene Parameter des Immunsystems zu untersuchen. Bei einigen Fledermäusen überwachten sie zudem während des Winterschlafs einen Monat lang die Hauttemperatur. So ließ sich erkennen, wie

oft die Säuger aus ihrem Energie sparenden Dämmerzustand aufwachen.

»Wir haben festgestellt, dass Tiere mit starkem Pilzbefall nicht häufiger wach werden als weniger stark infizierte Artgenossen«, berichtet Fledermausexperte Christian Voigt vom IZW. Demzufolge müssen europäische Fledermäuse nicht erst ihr Immunsystem ankurbeln, um den Angreifer zu kontrollieren. Ihre Basisabwehr, die selbst im Winterschlaf funktioniert, ist offenbar stark genug dafür. Eine zentrale Rolle dabei spielt ein Protein namens Haptoglobin, das die Tiere ohne großen Energieaufwand auf einem gewissen Aktivitätsniveau halten, ohne ihren Schlaf zu unterbrechen.

Nicht genug Zeit gehabt, sich auf den Erreger einzustellen

Das gilt zumindest für die eher schlanken Tiere, die das Team untersucht hat. Besser genährte Artgenossen dagegen leisten es sich, zwischendurch kurz aufzuwachen. Das kostet zwar Energie, scheint sich aber zu lohnen. Denn die Großen Mausohren nutzen solche Gelegenheiten, um sich zu putzen und dabei das Pilzgeflecht aktiv von ihrem Körper zu entfernen. Deshalb sind dickere Tiere am Ende des Winterschlafs oft in besserem Zustand als dünnere. Gleichwohl überleben auch die letzteren den Befall in der Regel.

Die nordamerikanische Verwandtschaft sieht sich einer deutlich schlechteren Situation gegenüber. Denn ihre Basisimmunität ist nicht stark genug, um den Gegner in

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



U. GERNHOEFER / STOCK.ADOBE.COM

Schach zu halten. Deshalb müssen Spezies wie das Kleine Braune Mausohr ihren Winterschlaf immer wieder unterbrechen und ihr Immunsystem ankurbeln, um den Pilz zurückzudrängen. Das kostet Energie und zehrt die Fettreserven vor dem Frühjahr auf, so dass die Fledermäuse verhungern. »Da der Erreger ursprünglich aus Europa stammt, hatten die nordamerikanischen Arten wohl noch nicht genug Zeit, um effiziente Abwehrstrategien zu entwickeln«, vermutet Voigt.

Obendrein sind die Tiere in amerikanischen Höhlen oft mit größeren Mengen von *P. destructans* konfrontiert. Das haben Joseph Hoyt vom Virginia Tech in Blacksburg und sein Team im Jahr 2020 festgestellt, als sie die Sporenkonzentrationen und Infektionszahlen an über 100 Orten rund um den Globus analysierten. Demnach bleibt die Belastung in nordamerikanischen Winterquartieren im Sommer auf konstant hohem Niveau. Treffen die Fledermäuse im Herbst dort ein, infizieren sie sich praktisch sofort. So bekommt der Pilz reichlich Zeit für sein energiezehrendes Zerstö-

rungswerk. In Europa und Asien dagegen nehmen die Erregerkonzentrationen über den Sommer hinweg deutlich ab und steigen erst im Winter wieder an. Die meisten Tiere handeln sich den Keim daher relativ spät ein und haben somit bessere Überlebenschancen.

Woran das liegt, weiß niemand genau. Möglicherweise hat der Pilz in Europa mächtige Konkurrenten und Fressfeinde, die jenseits des Atlantiks fehlen. Diese zu stärken oder den Erreger in Nordamerika anderweitig zu bekämpfen, könnte laut Hoyt und seinen Kollegen viele Tiere retten. Nach ihren Berechnungen müsste dazu die Pilzbelastung in nordamerikanischen Fledermausquartieren im Sommer auf etwa 20 Prozent des derzeitigen Werts sinken, um die Bestände der fliegenden Säuger stabil zu halten.

Die Forscher sehen aber noch mehr Möglichkeiten, den bedrohten Tieren zu helfen. So haben sie überwinternde Fledermäuse testweise mit dem Bakterium *Pseudomonas fluorescens* besprüht, das in Laborversuchen gegen den Pilz wirkt. Die Überlebensrate lag daraufhin mehr als sechsmal so hoch wie bei unbehandelten Verwandten. Von besseren Sommer- und Herbsthabitaten könnten die Tiere ebenfalls profitieren. Denn diese würden ihnen erlauben, mehr Nachwuchs aufzuziehen und ein dickeres Fettpolster für die kritische Winterzeit anzulegen. Zudem ließe sich

BÄUME UNTER STRESS Seit Jahrzehnten setzt ein Schlauchpilz Europas Ulmen zu. Befallene Pflanzen lassen sich unter anderem an geschädigten Blättern und verwelkten Kronen erkennen.

gezielt die Vermehrung solcher Populationen fördern, die dem Erreger trotzen. So gibt es einige Bestände des Kleinen Braunen Mausohrs, die nach dem Aufkommen der Krankheit 10 bis 25 Prozent ihrer alten Individuenzahl beibehalten haben.

Das Kleine Braune Mausohr scheint also das Potenzial zu besitzen, sich an die neue Bedrohung anzupassen. Dies schließen ebenso Giorgia Auteri und Lacey Knowles von der University of Michigan aus Untersuchungen, in denen sie das Erbgut von überlebenden und an der Infektion gestorbenen Artgenossen verglichen. Dabei fanden sich deutliche Unterschiede bei Genen, die mit der Regulation des Winterschlafs, dem Fettabbau und dem Energiehaushalt zu tun haben. »Tiere, die eine genetische Disposition dafür besitzen, fatter zu sein oder tiefer zu schlafen, sind möglicherweise weniger anfällig gegenüber der Krankheit«, erklärt Auteri.

Ob das reicht, damit sich die Bestände wieder erholen, ist unklar. »Aber wir haben zumindest Hinweise auf genetische Veränderungen gefunden, die das Überleben leichter machen könnten«, sagt Knowles. »Wenn diese Varianten häufiger werden, gibt es Hoffnung, dass nicht alle Kleinen Braunen Mausohren an der Krankheit sterben werden.«

Neue Bewältigungsstrategien für den Umgang mit Erregern sind auch woanders dringend erforderlich: in der Welt der Pflanzen. Denn sie leiden ebenso unter eingeschleppten Pilzkrankungen. Für Europas Ulmen begann das Verhängnis zu Beginn des 20. Jahrhunderts, als der Schlauchpilz *Ophiostoma ulmi* aus Ostasien hierherkam. Dieser Keim, den Borkenkäfer verbreiten, blockiert die



Wasserleitungsbahnen der Bäume und lässt zunächst einzelne Äste, später ganze Kronen verdorren.

Zuerst trat der Pilz in den Niederlanden auf, 1925 dann in Deutschland. Rund zehn Jahre später hatte er den gesamten Kontinent erobert und mit Holzexporten den Sprung nach Nordamerika geschafft. Viele Ulmen in Europa und den USA wurden vernichtet. Mitte des 20. Jahrhunderts schien die Epidemie zunächst abzuflauen, dann aber tauchte mit Holzlieferungen aus Nordamerika eine neue und aggressivere Variante namens *Ophiostoma novo-ulmi* auf und setzte das Zerstörungswerk fort. Glimpflich davon kam lediglich die Flatterulme, für die Ulmensplintkäfer (welche den Pilz verbreiten) nicht viel übrig haben. Die Bestände der Feld- und Bergulmen dagegen brachen vielerorts zusammen.

Die Bäume starben massenhaft, und niemand wusste warum

Um die Krankheit einzudämmen, konzentrieren sich Förster vor allem darauf, die übertragenden Käfer aus dem Verkehr zu ziehen. Dazu fällen sie infizierte Bäume und vernichten das Holz. Inzwischen haben Züchter auch resistente Sorten auf den Markt gebracht, die aus Kreuzungen verschiedener Ulmenarten hervorgegangen sind. Diese trotzen dem Erreger zwar und kommen mit Trockenheit, Wind und allerlei anderen Widrigkeiten zurecht. Als Straßenbäume oder in Parks und Gärten könnten sie deshalb eine Zukunft haben. In der freien Landschaft aber werden sie die heimischen Arten wohl nicht ersetzen können.

Zudem fürchten Fachleute um eine andere Baumart, die in Europa weit verbreitet ist. Ende der 1990er Jahre raffte ein unbekanntes Leiden zunächst in Polen zahlreiche Eschen dahin, 2002 griff es auf Deutschland über. Während Wissenschaftler noch nach der Ursache suchten, erfasste das rätselhafte Baumsterben weitere Teile Europas und führte zu einem dramatischen Rückgang der Gemeinen und der Schmalblättrigen Esche.

Schuld ist in diesem Fall das Falsche Weiße Stängelbecherchen (*Hymenoscyphus fraxineus*), ein Schlauchpilz, der ursprünglich aus Asien stammt und sich wahrscheinlich mit Holztransporten verbreitet hat. Einmal in einem neuen Gebiet angekommen, fasst er effektiv Fuß – selbst ohne tierische oder menschliche Unterstützung. Denn er produziert gewaltige Mengen an Sporen, die der Wind über große Distanzen weht. Landen diese auf den Blättern von Eschen, dringt das Pilzgeflecht über die Blattstiele in Triebe, Zweige und Äste ein und unterbricht den Wasser- und Nährstofftransport. Dadurch sterben immer mehr Teile des Baums ab, bis er schließlich ganz tot ist.

Der Eschenschwund kann drastische ökologische Konsequenzen haben. Zum Beispiel in Schweden, wo der Erreger im Jahr 2001 auftauchte. Seit 2010 gilt die Gemeine Esche dort als bedroht – was ebenso die zahlreichen Organismen gefährdet, die auf ihren Wurzeln und Stämmen, Ästen und Blättern leben. So hat ein Team um Tove Hultberg vom Söderåsen Nationalpark im schwedischen Ljungbyhed 483 Flechten- und Pilz-, Insekten- und andere Arten identifiziert, deren Lebensweise mit den Bäumen verbunden ist. Elf Prozent dieser Spezies sind zwingend auf

Eschen angewiesen, weitere 23 Prozent zeigen eine starke Vorliebe für sie.

Laut den Analysen der Forscher drohen 115 Arten regional auszusterben, wenn die Eschen aus dem Gebiet verschwinden. Denn selbst Spezies, die nicht so stark auf die Bäume angewiesen sind, haben oft wenig Alternativen. Viele von ihnen siedeln außer auf Eschen auch auf Bergulmen – ausgerechnet jener Baumart, die massiv unter dem Ulmensterben leidet. Ohne Ulmen und Eschen aber bräunte es nach den Berechnungen der Wissenschaftler mindestens neun weitere Baumarten, um zumindest die nicht so stark spezialisierten Bewohner zu erhalten. Der eingeschleppte Pilz könne eine ganze Aussterbekaskade in Gang setzen, warnen die Ökologen.

Die Möglichkeiten, etwas dagegen zu unternehmen, sind begrenzt. Ganze Landschaften mit chemischen Fungiziden zu besprühen, kommt aus ökologischen Gründen nicht in Frage. Und eine biologische Waffe gegen das Falsche Weiße Stängelbecherchen hat niemand entwickelt. Es gibt zwar ein paar Kandidaten, etwa einen Pilz namens Ziegelrote Kohlenkruste (*Hypoxylon rubiginosum*). Doch dass dessen Inhaltsstoffe gegen den Erreger des Eschensterbens wirken, haben sie bisher nur im Labor bewiesen.

Ansonsten setzen Experten ihre Hoffnung vor allem auf die wenigen gesunden Bäume, die inmitten ihrer sterbenden Artgenossen überdauern. Etwa ein bis fünf Prozent der natürlichen Eschenpopulation in Europa scheint die Krankheit abwehren zu können. Miguel Nemesio-Gorrioz von der irischen Agrar- und Ernährungsbehörde Teagasc in Dublin und seine Kollegen haben diese seltenen Überlebenskünstler genauer unter die Lupe genommen.

Demnach haben pilztolerante und -empfindliche Bäume ein sehr unterschiedliches chemisches Profil. Erstere produzieren beispielsweise größere Mengen der Verbindungen Fraxetin und Esculetin, die unter Laborbedingungen das Wachstum des Falschen Weißen Stängelbecherchens hemmen. Einige Bäume haben somit eine funktionierende Verteidigung gegen die Krankheit entwickelt. Diese Fähigkeit ist offenbar erblich, beruht auf mehreren Genen und bleibt selbst bei ungeschlechtlicher Vermehrung erhalten. Daher könnte man die wenigen überlebenden Exemplare womöglich für die Zucht resistenter Eschen nutzen. Der Baum, dessen Äste sich nach der nordischen Mythologie über den Himmel und alle Welten erstrecken, hätte dann vielleicht doch eine Zukunft. ◀

QUELLEN

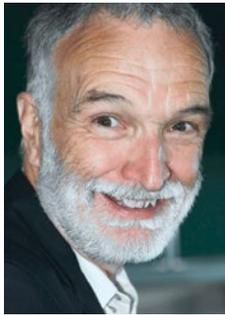
Fritze, M. et al.: Determinants of defence strategies of a hibernating European bat species towards the fungal pathogen *Pseudogymnoascus destructans*. *Developmental & Comparative Immunology* 119, 2021

Greener, M.S. et al.: Presence of low virulence chytrid fungi could protect European amphibians from more deadly strains. *Nature Communications* 11, 2020

Hultberg, T. et al.: Ash dieback risks an extinction cascade. *Biological Conservation* 244, 2020

Scheele, B.C. et al.: Amphibian fungal panzootic causes catastrophic and ongoing loss of biodiversity. *Science* 363, 2019

SCHLICHTING! AUF DER SPUR EINER SCHNECKE



Eine Schnecke kann sich auf ihrem Schleimfilm fortbewegen, weil das Sekret je nach Art der Beanspruchung zwischen flüssig und fest wechselt. Dank der viskoelastischen Eigenschaften der mobilen Unterlage vollführen die Tiere spektakuläre Kunststücke.

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/1897531

Lerne, Schnecken zu beobachten

Susan Ariel Rainbow Kennedy (geb. 1954)

► Schnecken sind zwar langsam unterwegs, dafür überwinden sie so gut wie jede Barriere. Sie erklimmen senkrechte Wände, gleiten über glatte oder scharfkantige Oberflächen und erreichen selbst kopfüber kriechend fast jeden Ort. Dabei hinterlassen sie deutliche Spuren in Form von Schleim (siehe »Schleimspur«). Auf ihm bewegen sie sich fort, und er macht ihren Körper so glitschig, dass sie kaum zu greifen sind.

Die Tiere sondern die Unterlage je nach Bedarf entlang ihres über die ganze Bauchseite verlaufenden Fußes ab. So schaffen sie sich auf einzigartige Weise ihren eigenen Straßenbelag. Er macht sie weitgehend unabhängig von den tatsächlichen Untergründen, seien es Zweige, Blätter, Sandböden, Spinnennetze oder Fensterscheiben. Schnecken fixieren das Sekret auf jeglichem natürlichen Material, und selbst künstliche superhydrophobe Oberflächen bremsen sie nur mit Mühe aus. Der dünne Belag mit einer Dicke von gerade einmal einigen zehn Mikrometern überbrückt sogar Abgründe (siehe »Hängebrücke«). Ist die Lücke doch zu groß, verwandeln die Tiere den Schleim in einen Faden, an dem sie sich einfach abseilen (siehe »Zäher Faden«).

Das alles beweist: Der Schleim ermöglicht nicht nur extrem gutes Gleiten, sondern er ist zugleich reißfest, tragfähig und ähnlich stabil wie ein elastischer Festkörper. Physikalisch gesehen handelt es sich um ein vernetztes Gel, das bis zu 97 Gewichtsprozent aus Wasser und zum Rest aus hochmolekularen Protein-Polysaccharid-Komplexen besteht. Obwohl die Mixtur also hauptsäch-

lich Wasser enthält, sind ihre Eigenschaften ganz und gar nicht typisch für dessen Verhalten. Vordergründig widersprechen sie sich sogar. Mit der Gleitfähigkeit scheint weder die Reißfestigkeit vereinbar zu sein, noch passt sie zu der Notwendigkeit, sich zum Vorankommen immer wieder abstoßen zu müssen. Denn jede Fortbewegung setzt voraus, dass man sich von der Unterlage wegdrückt. Beispielsweise wird es auf einer Eisfläche umso schwieriger, durch normales Laufen voranzukommen, je glatter sie ist.

Als so genannte nichtnewtonsche Flüssigkeit kann der Schneckenschleim die verschiedenen Ansprüche verbinden. Im Ruhezustand ist das Gel fest und klebrig. Wird es jedoch geschert – das heißt, entlang der Grenzschicht wirkt eine waagerechte Kraft –, gibt es bei einer bestimmten Stärke der Scherkraft nach. Dann geht es in den flüssigen, gleitfähigen Zustand über. Das passiert aber nur bis zu einer gewissen Tiefe, denn mit seiner Unterseite muss der Schleim ja fest auf dem zu über-rutschenden Objekt fixiert bleiben. Indem sie die physikalischen Gegebenheiten fein kontrolliert, kann die Schnecke die Zähigkeit bedarfsgerecht steuern.

Beim Vorwärtskriechen laufen durch den Fuß regelrechte Wellen. Sie entstehen in Folge von Muskelkontraktionen und -entspannungen, die sich periodisch von hinten nach vorn ausbreiten. Ein ruhender Teil des Fußes ist in seinem Auflagebereich mit dem Gel fest verbunden. Von dort aus schiebt die Muskulatur den übrigen Schneckenkörper ein Stück voran. Durch die während der Kontraktion auf den Schleim ausgeübte Scherkraft wird schließlich die Schwelle überschritten, bei der das Gel nachgibt und zerrinnt. Der Zeitpunkt trifft mit der Entspannung des Muskelements zusammen. Inzwischen



SCHLEIMSPUR Eine Nacktschnecke lässt einen Teil ihres Fortbewegungsmittels entlang des Wegs zurück.

FEUCHTE INSELN Unter widrigen Bedingungen sparen Unterbrechungen im Gelfilm wertvolle Flüssigkeit.



HÄNGEBRÜCKE Ein Schleimfilm wurde über ein Spinnennetz ausgelegt. An den irisierenden Farben, die durch Interferenz an dünnen Schichten entstehen, kann man erkennen, wie filigran er ist.

ZÄHER FADEN
Manchmal seilen sich Schnecken sogar kopfüber ab.



kontrahieren benachbarte Abschnitte, und der zuvor verankerte Teil des Fußes gleitet über das nunmehr verflüssigte Stück. So entsteht ein quasi kontinuierlicher Vortrieb.

Da das Sekret am Boden verbleibt, muss die Schnecke ständig neues nachproduzieren. Das nutzt sie nicht nur zur Fortbewegung. Es bedeckt den ganzen Körper, hält ihn feucht und wehrt dank chemischer Zusätze Mikroben und sogar Beutegreifer ab. Viele potenzielle Fressfeinde meiden die Klebrigkeit oder den widerlichen Geschmack einiger Arten. Der Heimatdichter Hermann Löns (1866–1914) hat in seiner Erzählung »Ein ekliges Tier« ausdrucksstark seine Abscheu beschrieben, nachdem er in einem Selbstversuch Schneckenschleim probiert hat. Dort vermischt er an einer Stelle seine Erfahrung sogar mit den physikalischen Eigenschaften, indem er berichtet, dass »Frachtkutscher, die schlecht geschmiert haben, diese Schnecken statt der Wagenschmiere gebrauchen; denn ich kann mir denken, daß selbst eine Radachse aus Angst vor einer zweiten Auflage sich fürder lautlos benimmt«.

Trotz der vielfältigen Einsatzzwecke des viskoelastischen Fluids bringt es für die Schnecken einige Nachteile. Neben der geringen Geschwindigkeit sind das vor allem der extreme Material- und Energieaufwand. Wegen des enormen Flüssigkeitsbedarfs müssen sich die Tiere vor Austrocknung schützen. Sie bleiben bevorzugt in feuchten und schattigen Gebieten und sind überwiegend nachtaktiv. Bei widrigen Bedingungen wie Hitze und stark absorbierenden Untergründen gehen sie manchmal zu einer besonders sparsamen Akrobatik über. Sie legen ihren Schleimteppich mit Unterbrechungen aus und hangeln sich von einem Fleck zum nächsten (siehe »Feuchte Inseln«). Von Artgenossen hinterlassene Spuren werden ebenfalls gern genutzt – was nicht nur die Fortbewegung beschleunigen dürfte, sondern auch die Partnersuche.

QUELLE

Iwamoto M. et al.: The advantage of mucus for adhesive locomotion in gastropods. *Journal of Theoretical Biology* 353, 2014

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN COMPUTER AUS TREPPEN- HAUS-LICHTSCHALTERN

Was wäre passiert, wenn die wissenschaftlichen Nachfolger von George Boole seine Werke ein bisschen anders interpretiert hätten? Vielleicht würden unsere Computer heute nach einem unterschiedlichen Grundprinzip funktionieren – und möglicherweise sogar besser.



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

► [spektrum.de/artikel/1897534](https://www.spektrum.de/artikel/1897534)

Logik mit der Eisenbahn

Zwei verschiedene Züge nutzen konkurrierend diese Gleisanlage. Rebekka (rechts) führt den roten (Plus-)Zug vom roten Ausgangspunkt (links auf dem Tisch) nach Rotenburg, Jonathan (links) den grünen (Mal-)Zug von dessen Ausgangspunkt nach Grünstadt. Die beiden Doppelkreuzweichen (hellblau und orange) lenken je nachdem, wie sie gestellt sind (Anzeige weiß auf schwarz), jeden Zug entweder »parallel« (0) oder »über Kreuz« (1). An manchen Weichen trennen sich die Wege der beiden Züge; dort weisen ihnen ein rotes Kreuz beziehungsweise ein grüner Punkt den richtigen Weg. In der Regel starten die Züge auf Gleis 0 ihres Ausgangspunkts. Ob ein Zug in seinem Zielbahnhof auf Gleis 0 oder Gleis 1 einläuft, ergibt sich aus der Stellung beider Doppelkreuzweichen: Der rote (Plus-)Zug fährt genau dann nach Gleis 1, wenn die Stellungen verschieden sind, der grüne (Mal-)Zug genau dann, wenn beide Doppelkreuzweichen auf 1 (über Kreuz) stehen. Genau umgekehrt verhält es sich, wenn die Züge auf Gleis 1 statt 0 des Ausgangspunkts starten. Auf diese Weise realisieren die Züge zwei logische Verknüpfungen unter den Stellungen der Doppelkreuzweichen: XOR (grün) und AND (rot). Mit seinen zwei Ein- und zwei Ausgängen ist sowohl der rote als auch der grüne Teil der gesamten Gleisanlage ein verallgemeinerter Kreuzschalter: In der Stellung 0 fährt der Zug von Gleis 0 nach Gleis 0 und von 1 nach 1, in Stellung 1 von 1 nach 0 und umgekehrt.



Der geniale Autodidakt George Boole (1815–1864) ist dafür berühmt geworden, dass er die seit der Antike geübte Kunst des logischen Schließens auf eine formale Grundlage stellte. Eine Aussage ist ein mathematisches Objekt, das genau zwei Werte annehmen kann: wahr und falsch, was man gern mit den Zahlen 1 und 0 ausdrückt. Aussagen kann man verknüpfen; für die verschiedenen möglichen Verknüpfungen haben sich englische Wörter in Großbuchstaben eingebürgert. Die Aussage »*a* AND *b*« ist genau dann wahr, wenn sowohl *a* als auch *b* wahr sind. Boole kam auf die einleuchtende Idee, die Verknüpfung AND als Multiplikation zu verstehen. Schließlich ist $a \cdot b$ gleich 1, wenn sowohl *a* als auch *b* gleich 1 sind, und sonst gleich 0.

Damit hatte Boole den ersten Schritt zu einer Beziehung zwischen dem logischen Schließen und dem Rechnen getan, die sich als ungeheuer fruchtbar erweisen sollte. Denn jede Zahl lässt sich im Binärsystem ausdrücken, das nur die Ziffern 0 und 1 kennt. Interpretiert man die Werte dieser Ziffern als logische Wahrheitswerte, führt man damit das gewöhnliche Rechnen mit (Binär-)Zahlen auf Booles Formalismus für die Verknüpfung von Aussagen zurück.

Dann repräsentiert man die Werte 0 und 1 auf elektrischem Weg: 1 heißt »Es fließt Strom«, 0 heißt »Es fließt kein Strom«, und die Verknüpfung AND entspricht zwei Schaltern in Serie: Durch die Leitung fließt nur dann Strom, wenn beide Schalter auf 1 stehen, also den Stromkreis schließen. Die Schalter können ihrerseits durch andere elektrische Ströme in einen der beiden Zustände versetzt werden, und das ist das elementare Bauprinzip eines Computers. Das Schalten der Schalter bewerkstelligen heute die Transisto-

ren, die zu Milliarden im Miniaturformat in einem Computertchip verbaut sind.

Während das mit AND und der Multiplikation eine klare Sache war, wurde es mit der Addition schwieriger. William Stanley Jevons (1835–1882), der Nachwelt eher als Ökonom denn als Logiker bekannt, identifizierte die Addition mit der logischen Verknüpfung OR. Gemeint ist die nicht ausschließende Variante. »*a* OR *b*« ist wahr, wenn entweder *a* oder *b* wahr ist – oder beide. Allerdings wäre dann $1 + 1 = 1$, was mit den Rechenregeln für die gewohnte Addition nicht vereinbar ist und deswegen Booles Missfallen erregte. Aber die so definierte Verknüpfung hat angenehme Eigenschaften, sie passt zum Formalismus der Mengenlehre (AND entspricht dem mengentheoretischen Durchschnitt, OR der Vereinigung), und sie ist elektrisch leicht zu realisieren: durch die Parallelschaltung zweier Schalter.

Also kehrte man von der Verwendung des Pluszeichens ab und schuf zusammen mit der dritten Verknüpfung NOT, die den Wahrheitswert einer Aussage genau umkehrt, einen Formalismus, in dem man jede logische Verknüpfung beliebig vieler Aussagen darstellen kann. Heute nennt man ihn »boolesche Algebra«. Eine Sonderform, die Schaltalgebra, dient zum Entwurf der elementaren Schaltkreise eines Computers (siehe »Logische Operationen«).

An dieser Stelle hätte die Entwicklung auch anders verlaufen können. Es gibt nämlich eine logische Verknüpfung, die als gewöhnliche Addition interpretierbar ist: das ausschließende Oder, was in der Literatur als XOR für »exclusive or« bezeichnet wird. $a \text{ XOR } b$ ist genau dann wahr, wenn genau eine der Variablen *a* und *b* wahr ist. Folglich gilt $0 + 0 = 0$, $0 + 1 = 1$, $1 + 0 = 1$ und $1 + 1 = 0$.



Von diesen Gleichungen ist nur die letzte gewöhnungsbedürftig. Doch sie ist mit den klassischen Rechenregeln für Addition und Multiplikation vereinbar. Man nennt die mathematische Struktur den »booleschen Ring«. Da man die klassischen Verknüpfungen AND, OR und NOT ohne Weiteres in AND und XOR umrechnen kann (insbesondere ist $\text{NOT } a = a + 1$), lässt sich auch in einem booleschen Ring jede logische Verknüpfung ausdrücken.

Die Verknüpfung XOR ist ebenfalls elektrisch leicht zu realisieren. Das wesentliche Bauteil kennt man aus dem täglichen Leben: den Treppenhaus-Lichtschalter. Wenn ich am Fuß unserer Treppe den Schalter betätige, geht zwar das Licht an; aber mit einem gleichartigen Schalter am oberen Treppenende kann ich das Licht wieder löschen. Beide Schalter geben nämlich nicht einfach dem elektrischen Strom Gelegenheit zum Fließen – oder eben nicht –, vielmehr schicken sie den Strom auf dem einen oder dem anderen von zwei Wegen zum nächsten Schalter. Das Licht leuchtet genau dann, wenn die Stellungen der beiden Schalter verschieden sind.

Das Prinzip wäre auch geeignet, in einem Hochhaus die Beleuchtung zu regeln. Auf jeder Etage sitzt ein Schalter mit zwei Eingängen und Ausgängen, und je nach Stellung verbindet er die Ein- und Ausgänge parallel (Zustand 0) oder über Kreuz (Zustand 1), weswegen Elektrotechniker ihn Kreuzschalter nennen. Einerlei in welchem Stockwerk ein Mensch in seiner Wohnung verschwindet, er kann überall das zuvor eingeschaltete Licht löschen. In echten Hochhäusern ist diese probate Schaltung nur darum nicht realisiert, weil damit ein zweiter Mensch im selben Treppenhaus den ersten durch einen schlichten Schalterdruck – versehentlich oder böswillig – im Dunkeln stehen lassen könnte. Zwei oder mehr Kreuzschalter, hintereinandergeschaltet, realisieren also die logische Operation XOR.

Ein Analogon zum Treppenhaus-Lichtschalter kommt in einem ganz anderen Kontext vor: bei der Eisenbahn. Dort heißt er Doppelkreuzweiche. Je nachdem, wie die vier Weichen, aus denen sie eigentlich besteht, gestellt sind, lenkt sie die Züge über Kreuz, oder der rechte Zug bleibt auf dem rechten Gleis und der linke auf dem linken. Für das Verständnis ist es oft hilfreich, sich an Stelle elektrischer Ströme, die über komplizierte Schaltungen fließen, Züge vorzustellen, die über Gleisanlagen fahren (siehe »Logik mit der Eisenbahn«).

Während der Kreuzschalter in unzähligen Treppenhäusern gute Dienste leistet, spielt er in logischen Schaltkreisen und damit auch in Computern keine nennenswerte Rolle. Denn keiner hatte bemerkt, dass die Verknüpfung AND ebenfalls mit Kreuzschaltern realisierbar ist, und zwar durch eine Art Parallelschaltung (siehe »Verknüpfte Kreuzschalter«).

Parallel angeordnete Kreuzschalter

Das gelang erst Anfang der 1980er Jahre einem Karlsruher Mathematiker. Wolfgang Hinderer, Jahrgang 1943, hatte bereits als kleiner Junge ein solches Bauteil als Umschalter für die Drehrichtung seines Spielzeug-Elektromotors kennen und schätzen gelernt. Als er 1977 beim Fraunhofer-Institut für Informationsverarbeitung in Technik und Biologie (IITB) anging (heute Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, IOSB), war eines seiner ersten Projekte die Prozesssteuerung einer Tiefofenanlage bei Thyssen. Aufgabe dieser Öfen ist es, Stahlblöcke, die außen schon abgekühlt, aber innen noch heißer sind, für die Weiterverarbeitung im Walzwerk auf eine gleichmäßige Temperatur zu bringen.

Die Aufgaben, welche die Steuerung zu erfüllen hatte, ließen sich als eine Liste von Anweisungen in Form von booleschen Ausdrücken formulieren. Dabei war sicherzustellen, dass diese Tabelle alle denkbaren Situationen abdeckte und vor allem widerspruchsfrei war, das heißt, man aus ihr nicht eine Anweisung und ihr Gegenteil zugleich herleiten konnte. Dafür musste Hinderer mit abstrakten Formulierungen rechnen: zum Beispiel eine Variable aus einer Anweisung durch einen Ausdruck in einer anderen Anweisung ersetzen, Klammern auflösen und das Ganze in eine Art Standardform bringen, um verschiedene Aussagen miteinander zu vergleichen. Das ist dem Umformen von Gleichungen, wie man es in der Schule lernt, auf den ersten Blick ähnlich, gleicht ihm aber nicht ganz. Die Rechenregeln sind anders und unübersichtlicher. Dagegen gelten für das Rechnen mit AND und XOR die bekannten Rechenregeln.

In der Folge fand Hinderer heraus, dass man allein mit XOR und AND sogar das Rechnen mit gewöhnlichen Zahlen realisieren kann; nichts anderes tut ein Computer tief in seinem Inneren. Einfachstes Beispiel ist das »kleine Einpluseins«, das Addieren einstelliger Binärzahlen:

$$\begin{aligned} 0 + 0 &= 0 \\ 0 + 1 &= 1 \\ 1 + 0 &= 1 \\ 1 + 1 &= 10 \end{aligned}$$

Wenn also a und b die beiden Summanden sind, dann ist die Einerstelle vom Ergebnis gleich $a \text{ XOR } b$. Und nur wenn beide Summanden 1 sind, gibt es einen Übertrag in die

Logische Operationen

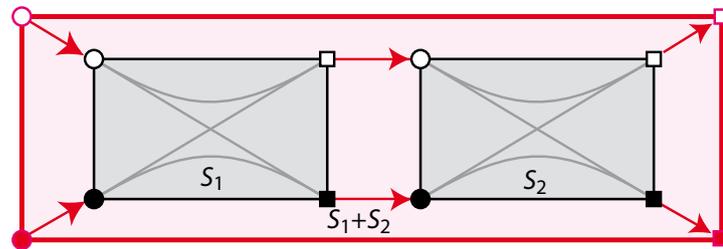
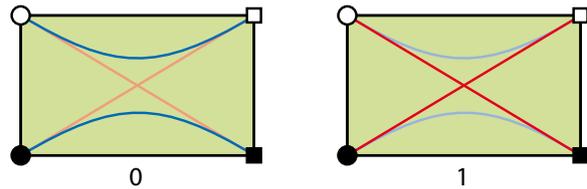
a	0	0	1	1
b	0	1	0	1
$a \text{ AND } b \quad a \wedge b$	0	0	0	1
$a \text{ OR } b \quad a \vee b$	0	1	1	1
$\text{NOT } a \quad \neg a$	1		0	
$a \text{ XOR } b \quad a \oplus b$	0	1	1	0

CHRISTOPH PÄPPE

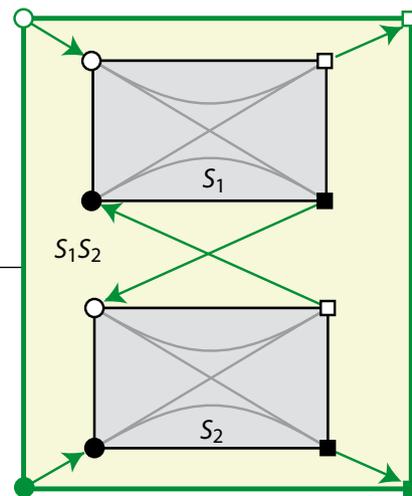
Zwei Variablen a und b können die Werte 0 (»falsch«) und 1 (»wahr«) annehmen. Eine logische Operation zweier solcher Variablen ist vollständig definiert durch eine Liste, die den Wert dieser Verknüpfung für jede mögliche Kombination der beiden Variablen verzeichnet. Diese Tabelle enthält diese »Wahrheitstabellen« für die Standard-Operationen AND, OR und NOT sowie für das Entweder-Oder (XOR). Neben den englischen Abkürzungen sind auch spezielle Verknüpfungszeichen üblich.

Verknüpfte Kreuzschalter

In einen Kreuzschalter gehen von links zwei Stromleitungen hinein, und zwei Leitungen gehen nach rechts hinaus. Die Eingänge sind durch Kringel gekennzeichnet, die Ausgänge durch Quadrate. Man unterscheidet den Null-Eingang (hohles Symbol) und den Eins-Eingang (ausgefülltes Symbol), ebenso für die Ausgänge. Der Schalter ist im Zustand 0, wenn er jeden Eingang mit dem gleichartigen Ausgang verbindet (links, blaue Linien), und im Zustand 1, wenn er sie über Kreuz verbindet (rechts, rote Linien).



Dieselbe Konvention gilt für Ensembles von mehreren Kreuzschaltern. Zwei hintereinandergeschaltete Exemplare (oben) wirken als XOR-Bauteil: Der Strom fließt genau dann über Kreuz von links nach rechts, wenn die Zustände der Schalter S_1 und S_2 verschieden sind. Dagegen ist die »Parallelschaltung« (unten) im Effekt ein AND-Bauteil: Das Ensemble ist genau dann im Zustand 1 (Strom fließt über Kreuz), wenn das für beide Schalter S_1 und S_2 gilt.



nächsthöhere Binärstelle. Also berechnet sich der Übertrag als $a \text{ AND } b$. Was wie oben im Binärsystem als 10 geschrieben wird, kennen wir als die Zahl 2. Entsprechend ist hier die nächsthöhere Stelle nicht die Zehnerstelle, sondern die Zweierstelle diejenige, welche die Vielfachen von 2 bezeichnet.

Größere Binärzahlen zu addieren ist nicht mehr ganz so einfach. Auf jeder einzelnen Stelle muss man zwar nach obigem Muster nur die entsprechenden Ziffern der beiden Summanden zusammenzählen und erhält dabei möglicherweise einen Übertrag in die nächsthöhere Stelle. Aber es könnte ja auch ein Übertrag von der nächstniederen Stelle dazukommen. Folglich braucht man einen »Volladdierer«. Dieses Bauteil nimmt drei Werte – jeweils entweder 0 oder 1 – entgegen und gibt zwei Werte aus, einen für die Summe und einen für den Übertrag.

Da jetzt die Darstellung etwas unübersichtlich zu werden droht, gehen wir auf kürzere Bezeichnungen für die logischen Operatoren über. An Stelle von XOR schreiben wir das gewöhnliche Pluszeichen, und für AND verwenden wir den Malpunkt oder, wie in der Algebra üblich, gar nichts. Diese Zweckentfremdung der gewöhnlichen Rechenzeichen hat sogar einen tieferen Sinn. Das XOR hat die Eigenschaften einer Addition und das AND die einer Multiplikation, wenn wir die Menge der Elemente 0 und 1 mit einer bestimmten Struktur versehen. Es handelt sich um einen so genannten Ring mit den Rechenregeln:

$$\begin{array}{ll} 0 + 0 = 0 & 0 \cdot 0 = 0 \\ 0 + 1 = 1 & 0 \cdot 1 = 0 \\ 1 + 0 = 1 & 1 \cdot 0 = 0 \\ 1 + 1 = 0 & 1 \cdot 1 = 1 \end{array}$$

Für die Zahlentheoretiker ist dieser Ring ein alter Bekannter: Man rechnet »modulo 2«, das heißt, statt der Ergebnisse, die beim gewöhnlichen Rechnen mit ganzen Zahlen herauskommen, nimmt man deren Rest bei der Division durch 2.

Mit den zweckentfremdeten Rechenzeichen für XOR und AND ergibt sich ein Paar von Formeln, die angeben, wie man der Reihe nach die Ziffern der Summe und die Überträge auf die jeweils nächste Stelle berechnet (siehe »Binärzahlen addieren«). In einem klassischen Computer werden nun diese Rekursionsformeln eine nach der anderen abgearbeitet. Es geht nicht anders: Die »Rohsummen« ohne

Binärzahlen addieren

Beide Summanden sollen $(n + 1)$ -stellige Binärzahlen sein, das heißt, sie haben die Form $a_n a_{n-1} \dots a_1 a_0$ und $b_n b_{n-1} \dots b_1 b_0$. Dabei ist a_j die Ziffer (0 oder 1), welche die Vielfachen von 2^j bezeichnet. Die Ziffern des Ergebnisses nennen wir s_j , s wie Summe, und die des Übertrags c_j , c wie »carry«.

Für die nullte (Einer-)Stelle lautet die Rechenvorschrift, wie im Text angegeben, $s_0 = a_0 + b_0$, $c_1 = a_0 b_0$.

Für höhere Stellen muss man den Übertrag mit berücksichtigen:

$$\begin{aligned} s_j &= a_j + b_j + c_j \\ c_{j+1} &= a_j b_j + a_j c_j + b_j c_j = a_j b_j \\ &\quad + c_j (a_j + b_j) \end{aligned}$$

Wenn man $c_0 = 0$ setzt, gilt dieses Formelpaar auch für die nullte Stelle. Das Ausklammern in der zweiten Formel ist erlaubt, da die üblichen Rechenregeln gelten.

Für $j = 1$ gilt $s_1 = a_1 + b_1 + c_1$. Wir wissen aber schon, dass $c_1 = a_0 b_0$ ist; das setzen wir ein und erhalten $s_1 = a_1 + b_1 + a_0 b_0$. Nach demselben Muster können wir jedes c_j durch seinen zuvor ausgerechneten Wert ersetzen und erhalten durch Ausmultiplizieren explizite Ausdrücke für alle Ziffern s_j der Summe:

$$\begin{aligned} s_1 &= a_1 + b_1 + a_0 b_0 \\ s_2 &= a_2 + b_2 + a_1 b_1 + a_1 a_0 b_0 \\ &\quad + a_0 b_1 b_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_3 &= a_3 + b_3 + a_2 b_2 + a_2 a_1 b_1 \\ &\quad + a_1 b_2 b_1 + a_2 a_1 a_0 b_0 \\ &\quad + a_1 a_0 b_2 b_0 + a_2 a_0 b_1 b_0 \\ &\quad + a_0 b_2 b_1 b_0 \end{aligned}$$

und so weiter ...

Wenn man diese Form allerdings unmittelbar in Schaltkreise (Zusammenschlüsse von Kreuzschaltern) realisieren wollte, wäre das mit einem ungeheuer hohen Aufwand verbunden.

Insbesondere müssten von den Eingangsgrößen a_j und b_j astronomisch viele Exemplare in Form von Kreuzschaltern bereitgestellt und für jeden Rechenvorgang »gleichgeschaltet« werden.

Überträge kann man zwar für alle Stellen gleichzeitig ausrechnen, doch für das Endergebnis muss jede Stelle sozusagen warten, bis sie den Übertrag von ihrer rechten Nachbarin geliefert bekommt. Entsprechend viele Schaltungsvorgänge müssen ablaufen, bis das Endergebnis vorliegt.

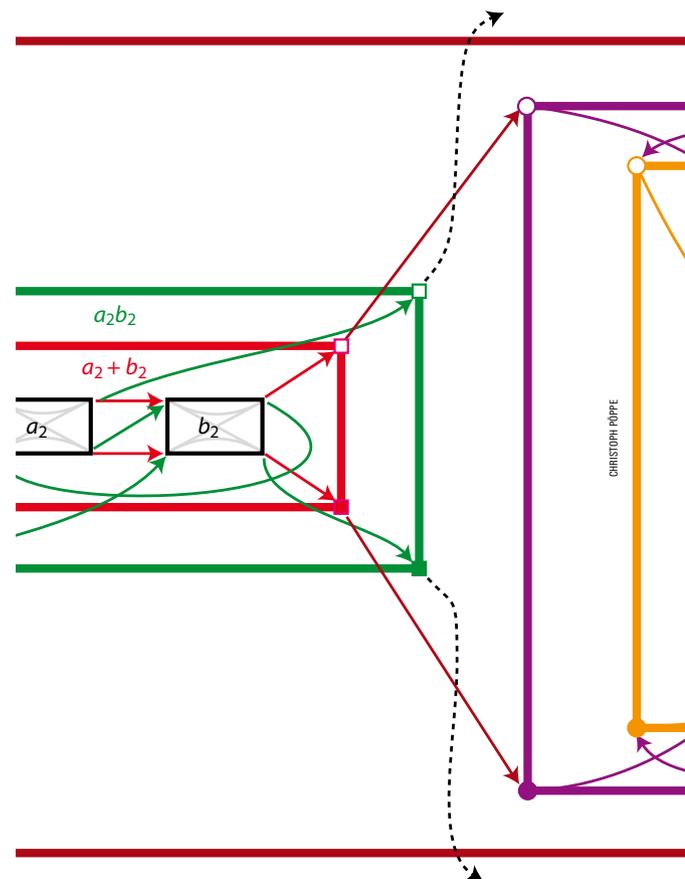
Ensembles aus Kreuzschaltern

Hier kommt Hinderers zweite Idee zum Tragen. Statt die Rekursionsformeln für einen Index j nach dem anderen abzarbeiten, realisiert er jede von ihnen durch ein geeignetes Ensemble von Kreuzschaltern. Und zwar kann man dieses wie die einfachen Zweiergruppen im Kasten »Verknüpfte Kreuzschalter« mit einem Rahmen umgeben, in den links zwei Eingänge hineinführen und rechts zwei Ausgänge hinaus. Formal lässt sich das ganze Ensemble demnach als verallgemeinerter Kreuzschalter auffassen, der als Ganzes den Wert 0 oder 1 realisiert, je nachdem, ob der Strom, durch den Eingang links oben eingeflossen, nach einer wilden Zickzackfahrt durch das Innere rechts oben oder rechts unten wieder herauskommt.

Wenn also zum Beispiel die Formel $c_2 = a_1 b_1 + (a_1 + b_1)c_1$ für den Übertrag in die 100er-(Vierer-)Stelle in einen verallgemeinerten Kreuzschalter umzusetzen ist, greift man auf die bereits vorhandenen verallgemeinerten Kreuzschalter (Rahmen) zu den Zwischenergebnissen $a_1 b_1$, $a_1 + b_1$ und c_1 zurück. Diese auf die in »Verknüpfte Kreuzschalter« beschriebene Weise zum Gesamtergebnis c_2 zu verknüpfen, erfordert dann keinen großen Aufwand mehr.

Die komplette Schaltung für die Addition zweier Binärzahlen mit den üblichen 31 Stellen (ganze Zahlen werden im Computer standardmäßig mit 4 Bytes = 32 Bits dargestellt, davon eines für das Vorzeichen) ist dann eine große Schachtelung von Rahmen in Rahmen in Rahmen ... Das sieht zwar kompliziert aus (siehe »Addierer für dreistellige Binärzahlen«), tut aber im Endeffekt nichts weiter, als

Addierer für dreistellige Binärzahlen



für jedes Bit s_0, s_1, s_2, \dots einen gedachten Zug von einem Ausgangsbahnhof zu einem von zwei Zielbahnhöfen zu leiten; je nach Zielbahnhof ist das entsprechende Bit dann 0 oder 1.

Das hat einen dramatischen Effekt. Sowie die Summanden in das Gerät eingegeben sind, das heißt alle internen Kreuzschalter auf die richtigen Werte gesetzt sind, liegt das Ergebnis bereits vor! Die ganze Addition nimmt nur noch einen Zeittakt in Anspruch. Man muss ja keine Zwischen-

ergebnisse mehr berechnen, um sie hinterher wieder verwenden zu können; vielmehr werden sie in demselben Moment verwendet, in dem sie – im Inneren der Schaltung und von außen unzugänglich – vorliegen. Das wäre eine gewaltige Beschleunigung der Rechenarbeit.

Leider verhalten sich elektrische Ströme anders als Eisenbahnzüge. Dabei sind nicht die Kreuzschalter, die an die Stelle der Doppelkreuzweichen zu setzen sind, das Problem, sondern die Weichen. Die gedachten Züge in

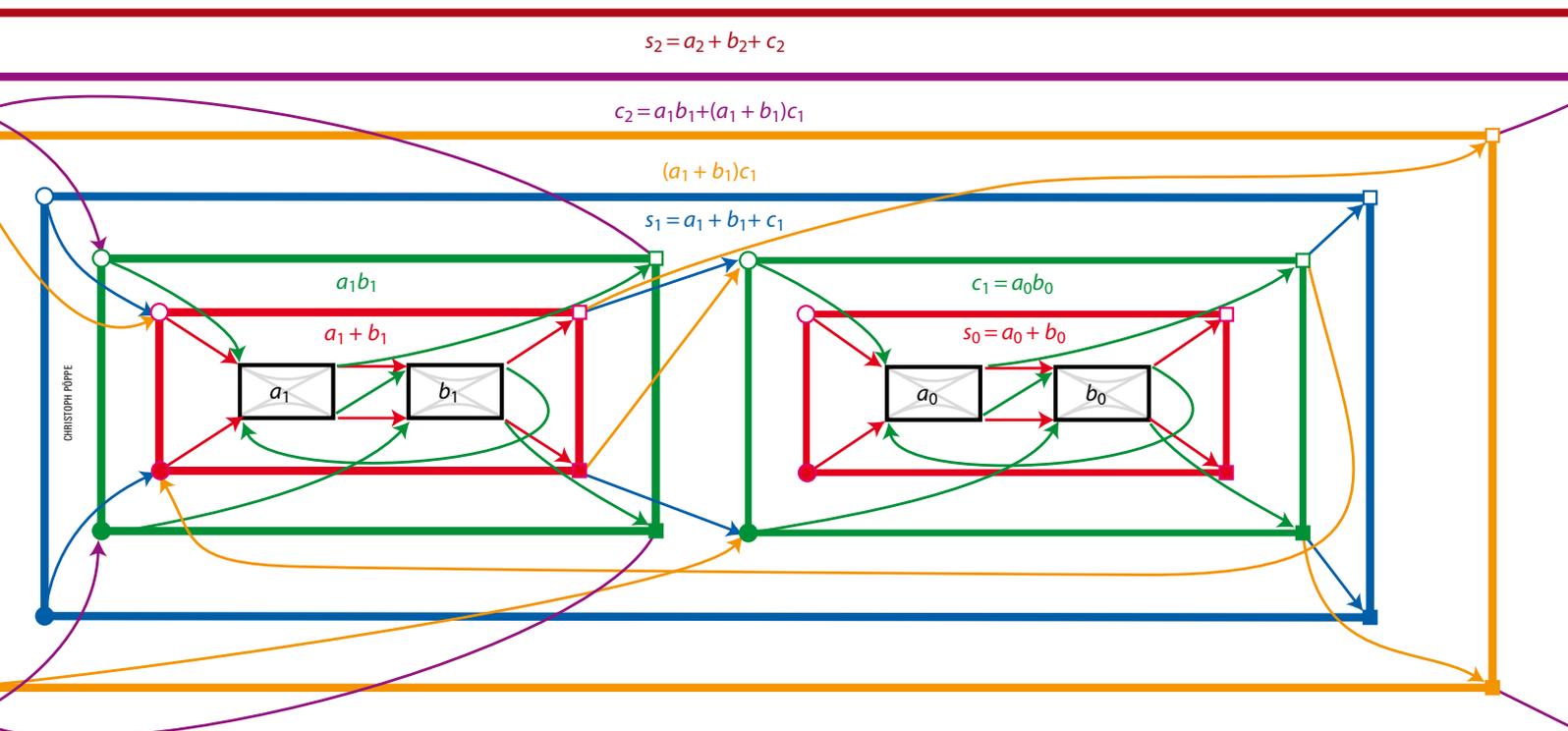
Diese Schaltung berechnet die ersten drei Bits s_0, s_1, s_2 der Summe $s = a + b$ aus den dreistelligen Binärzahlen $a = a_2 a_1 a_0$ und $b = b_2 b_1 b_0$ (hier sind die Binärziffern in der üblichen Weise hintereinandergeschrieben). Rahmen in verschiedenen Farben kennzeichnen die Berechnung diverser Zwischenergebnisse (oben innerhalb des Rahmens angegeben).

Eigentlich wäre noch der Übertrag c_3 in die nächste Stelle zu berechnen, was in dieser Grafik nicht mehr aufgeführt ist (gestrichelte Linien).

Im Bild mit der Eisenbahn fahren drei Züge namens s_0, s_1 und s_2 an ihren jeweiligen Ausgangsbahnhöfen los und enden in jeweils einem von zwei Endbahnhöfen. Jeder Zug trägt zu Beginn ein Etikett mit der Farbe des Rahmens, in dem er startet. Sowie er in den Eingangsbahnhof eines Rahmens einfährt, wird ihm ein Etikett mit der Farbe dieses Rahmens aufgedrückt; dieses wird ihm im Ausgangsbahnhof des Rahmens wieder abgenommen, so dass das vorherige Etikett zum Vorschein kommt.

Ein Rahmen schließt das Gebiet in seinem Inneren nicht hermetisch ein; etliche Züge fahren in einen Rahmen hinein und wieder heraus, ohne den Weg über die Bahnhöfe zu nehmen, und tragen entsprechend auch nicht das zugehörige Etikett.

An jeder Weiche wählt der Zug den Zweig mit der Farbe, die seinem sichtbaren (obersten) Etikett entspricht. Auf diese Weise teilen sich mehrere Züge dieselben Gleisanlagen, ohne deswegen auf denselben Weg gezwungen zu werden.



Vergleichen von Binärzahlen

Das klassische Verfahren arbeitet von links nach rechts, das heißt von den hochwertigeren Binärstellen zu den niederwertigen: Von zwei Zahlen a und b schaut man sich der Reihe nach von links nach rechts die Ziffern an. Die erste Stelle, an der beide Ziffern nicht gleich sind, liefert die Auskunft » $a < b$ « oder » $a > b$ «. Erst wenn das Verfahren alle Ziffern durchlaufen hat, ohne einen Unterschied zu finden, meldet es » $a = b$ «. Es handelt sich um ein mehrstufiges Verfahren, auch wenn es häufig vorzeitig abbricht – nämlich jedes Mal, wenn es einen Unterschied findet.

Dagegen arbeitet Hinderers Vergleichsverfahren von rechts nach links. Zu Beginn bildet es sozusagen eine Hypothese namens f_0 . Wenn die Grundfrage » $a \geq b$?« ist, lautet die Hypothese »Ja« ($f_0 = 1$), für die Frage » $a > b$?« lautet sie »Nein« ($f_0 = 0$). Daraufhin wertet das Verfahren für $j = 1, 2, 3, \dots$ folgende Rekursionsformel aus:

$$f_j = f_{j-1} (a_{j-1} + b_{j-1} + 1) + a_{j-1} (b_{j-1} + 1)$$

Die erste Klammer ($a_{j-1} + b_{j-1} + 1$) ist genau dann 1, wenn $a_{j-1} = b_{j-1}$ ist, denn $a_{j-1} + b_{j-1}$ ist 1, wenn die beiden ungleich sind, und der Term »+ 1« vollzieht eine Negation. Der zweite Term $a_{j-1} (b_{j-1} + 1)$ ist genau dann 1, wenn $a_{j-1} = 1$ und $b_{j-1} = 0$ ist: ein Indiz dafür, dass die Grundfrage mit »Ja« zu beantworten ist. Wenn also $a_{j-1} = b_{j-1}$ ist, ergibt sich $f_j = f_{j-1}$: Die bisherige Hypothese wird bestätigt. Im anderen Fall wird die Hypothese revidiert, indem sie durch das Ergebnis $a_{j-1} (b_{j-1} + 1)$ ersetzt wird.

Das Verfahren erscheint zunächst unnötig umständlich, weil es in jedem Fall bis zur letzten (höchstwertigen) Binärstelle durchlaufen muss. Da es aber wie das Addierverfahren ohnehin in einem einzigen Schritt abläuft, kommt es darauf nicht an.

»Addierer für dreistellige Binärzahlen« tragen Etiketten, die darüber entscheiden, welchen Zweig der Weiche ein Zug wählt. Doch wie kann man einem elektrischen Strom ein Etikett aufdrücken und hinterher wieder abnehmen?

Wolfgang Hinderer hat für dieses Problem eine Lösung gefunden, die Anleihen bei der Rundfunktechnik macht. Statt eines Etiketts erzeugt man eine Modulation durch eine Trägerfrequenz. Beim Eintreten in einen Bahnhof wird dem Strom ein hochfrequenter Wechselstrom aufgeprägt, so wie ein Rundfunksender ein Nutzsignal mit einer hochfrequenten Funkwelle auf die Reise schickt. Am Ausgangsbahnhof des Rahmens sitzt ein Filter, der genau diese Frequenz wieder wegdämpft; und jede Weiche lässt wie ein Rundfunkempfänger den Strom nur durch, wenn er die richtige Frequenz enthält. Im Inneren dieses sehr komplizierten verallgemeinerten Kreuzschalters tobt ein Gemisch

der verschiedensten Frequenzen; heraus kommt der Strom dennoch nur an den Ausgängen, die das Gerät auf diese Weise errechnet hat.

Was hier für das Addieren von Binärzahlen demonstriert wurde, lässt sich im Prinzip auch für die beiden anderen wesentlichen Rechenoperationen durchführen, das Multiplizieren und das Vergleichen (siehe »Vergleichen von Binärzahlen«) – selbst wenn bis jetzt für das Multiplizieren noch keine ähnlich einfache Rekursionsformel bekannt ist. Und wieder gilt das Ein-Schritt-Prinzip: Das Ergebnis liegt bereits vor, wenn die Eingangsdaten in das entsprechende Rechenwerk eingelesen sind; man braucht nicht mehrere interne Takte.

Völlig neuartige Computer

Damit wären die Zutaten beisammen, die man benötigt, um das Innerste eines Computers von Grund auf neu zu konstruieren – mit möglicherweise beträchtlichem Gewinn an Rechengeschwindigkeit. Aller Voraussicht nach wird das nicht geschehen. Vom ersten Entwurf eines logischen Schaltkreises bis zu dessen massenhafter Realisierung auf einem Computerchip ist es ein sehr langer Weg. Die Industrie hat in den letzten Jahrzehnten diesen Weg auf Grundlage der herkömmlichen Logik vollzogen – mit phänomenalem Erfolg. Immerhin hat sich die Leistungsfähigkeit der Computer alle elf Jahre ungefähr vertausendfacht. Um auf Grundlage der Kreuzschalterlogik einen Computerchip mit vergleichbarer Leistungsfähigkeit zu konstruieren, müsste man zwar nicht auf dem Stand von 1980 anfangen, aber doch einen erheblichen Teil der vielen kleinen Schritte zum Erfolg aufs Neue gehen. Ob ein Industrieunternehmen den dafür erforderlichen langen Atem aufbringen würde, erscheint zweifelhaft.

Hinderers damaliger Arbeitgeber, die Fraunhofer-Gesellschaft, hat seine Erfindung 2000 zum Patent angemeldet. Dieses wurde 2003 auch erteilt, ist jedoch inzwischen erloschen, weil die Gebühren nicht mehr bezahlt wurden.

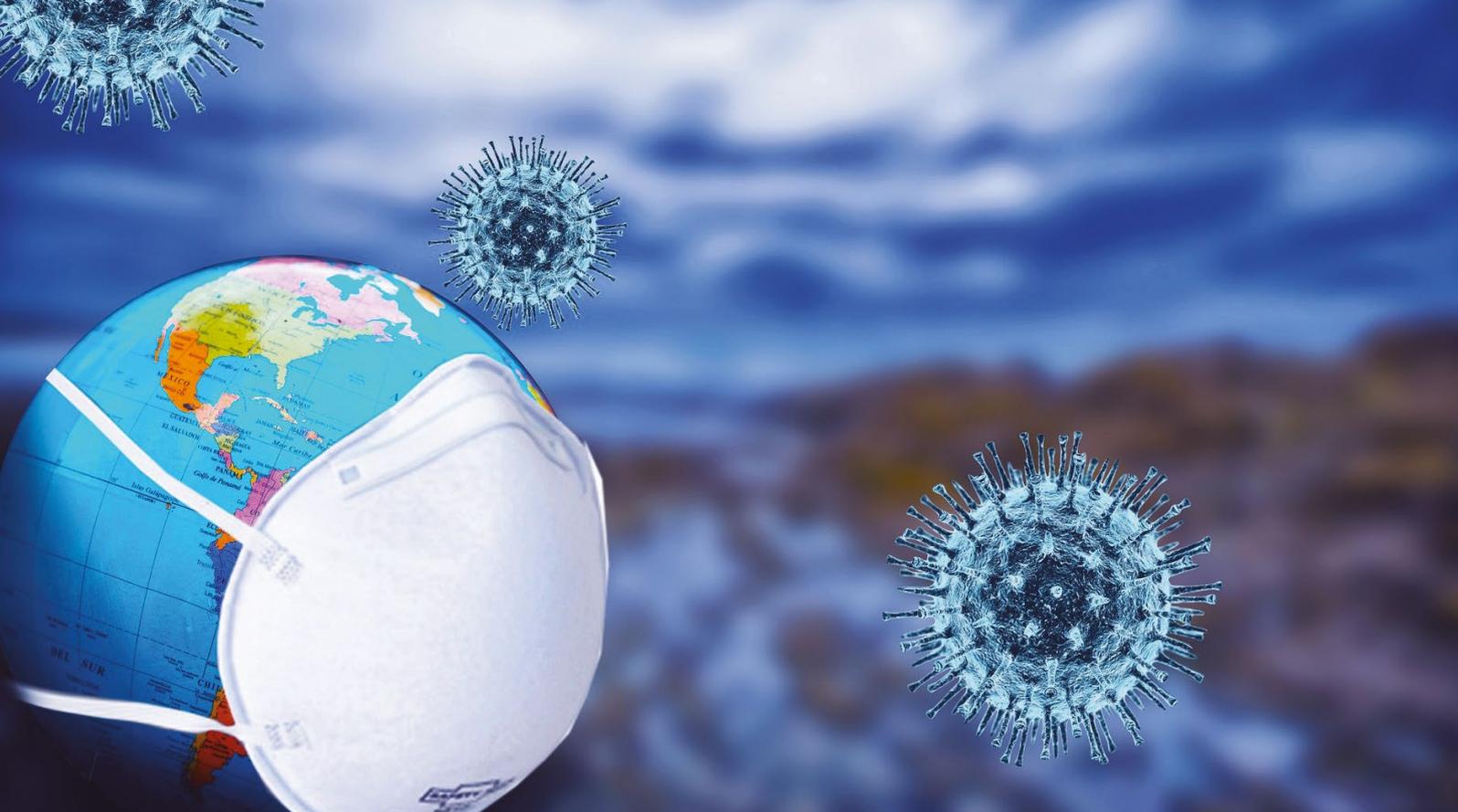
Mit diesem Schicksal ist Hinderers Konzept nicht allein. Gegenwärtige Computer mit ihrem Zusammenspiel aus Hard- und Software sind so komplex und mit den Gewohnheiten vieler Menschen so intensiv verwoben, dass niemand es unternehmen wird, einen Teil daraus herauszubrechen und durch einen besseren zu ersetzen. Diese Trägheit des Systems pflegen selbst die Betreiber der welt schnellsten Rechner intensiv zu beklagen. Denn die Entwicklung der Technik hat eine seltsame Parallele zur biologischen Evolution: Eine an sich äußerst vorteilhafte Innovation findet nicht statt, weil sie sehr viele Änderungen erfordert, deren Vorteil erst in ihrer Gesamtheit zum Tragen kommt. ◀

QUELLE

Schaltnetz auf der Basis des Kreuzschalters. Patentschrift DE 100 239 76 C2, erteilt durch das Deutsche Patent- und Markenamt am 30. 11. 2003. Erfinder: Wolfgang Hinderer. Online unter: <https://patents.google.com/patent/DE10023976A1/de>

WEBLINK

Website des Autors: www.hinderer-ka.de



(K)eine Zäsur!?
Die Covid-19-Pandemie
und ihre Folgen im
Spiegel der Wissenschaft

DHV-Symposium 2021

27. Oktober

Präsenzveranstaltung in Bonn

Online-Teilnahme möglich



Weitere Informationen und Anmeldung unter:
www.dhvseminare.de/symposium_2021

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**

ARCHÄOGENETIK ÜBERS EIS NACH AMERIKA

Zunehmend kommt Licht ins Dunkel von Amerikas Besiedlungsgeschichte. Klar ist inzwischen, dass die Ursprungspopulation jahrtausendlang abgeschnitten von der Umwelt die Eiszeit aussaß. Doch die Frage, wie sich die Menschen danach über den Doppelkontinent ausbreiteten, entzweit die Forschergemeinde.





Jennifer Raff ist anthropologische Genetikerin an der University of Kansas. Sie forscht über die Erstbesiedlung Nordamerikas.

► spektrum.de/artikel/1897522

► Vor mehr als 300 000 Jahren entstand *Homo sapiens* in Afrika. Von dort breitete er sich allmählich über die Erde aus, folgte der Spur seiner Vorgänger und deren Nachfahren – *Homo erectus*, den Neandertalern und Denisovanern. Aber die ersten anatomisch modernen Menschen, die den amerikanischen Doppelkontinent betraten, drangen in ein Gebiet vor, das bis dahin noch kein anderes Mitglied der Gattung *Homo* erreicht hatte. Die Erstan-kömmlinge erkundeten und besiedelten unterschiedliche Landschaften, passten sich der jeweiligen Umgebung an. Ihre Ankunft markiert denn auch den Beginn der vielgestaltigen Geschichte zahlreicher Ethnien und Gemeinschaften.

Die Besiedlung Amerikas war ein brutales Unterfangen. Sie verlangte den Vorfahren der heutigen indigenen Bevölkerung Außergewöhnliches ab: Die Menschen überlebten die bittere Kälte und harsche Trockenheit während des Letzteiszeitlichen Maximums (Last Glacial Maximum, kurz: LGM), eines globalen Klimaereignisses vor 20 000 bis 26 000

AUF GROSSER FAHRT Wie kamen die ersten Einwanderer nach Amerika? Nach bisherigem Kenntnisstand paddelten sie mit Booten entlang der Pazifikküste und umgingen so die mächtigen Eispanzer in Nordamerika.

Jahren. Ihnen gelang es, sich in jener Phase der Erdgeschichte mit einer unwirtlichen und unbekanntenen Landschaft vertraut zu machen.

Die indigenen Gemeinschaften kennen zahlreiche mündliche Überlieferungen über ihre Ursprünge, die von einer Generation an die nächste weitergegeben wurden. In diesem traditionellen Wissen sind wichtige kollektive Erfahrungen verwoben: wie jede Gruppe ihre Identität entwickelte, wie sie sich mit ihrem Land und nichtmenschlichen Lebewesen verbunden fühlt. Einige Geschichten handeln auch davon, dass die Vorfahren von einem weit entfernten Ursprungsort eingewandert waren.

Westliche Wissenschaftler gehen anders an die Geschichte der Erstbesiedlung Amerikas heran. Ihre Rekonstruktionen sind das Thema dieses Artikels. Dabei konkurrieren ihre Erkenntnisse nicht mit den mündlichen Überlieferungen: Jede der beiden Perspektiven lässt sich unabhängig voneinander einnehmen.

Eine Reise mit Umwegen

Schon lange erforschen Archäologen, biologische Anthropologen, Linguisten und Paläoklimatologen, wie der Mensch den amerikanischen Kontinent besiedelte. Entsprechend viele Theorien gibt es über die Ursprünge der indigenen Bevölkerung – darüber, wer ihre Vorfahren waren sowie wann und wie sie das Land bevölkerten. Ein Szenario hält sich dabei seit Jahrzehnten beharrlich in der Forschung: Eine einzige Gruppe von Jägern sei nach dem LGM der Fährte des Großwilds gefolgt und so von Ostasien nach Amerika gelangt. Aus dieser Gruppe seien alle heutigen indigenen Völker Amerikas hervorgegangen.

Doch in den letzten Jahrzehnten haben Genetiker dieses Kapitel der Menschheitsgeschichte fortgeschrieben. Viel mehr noch: Ihre Studien haben das Wissen über Amerikas Besiedlung von Grund auf erneuert. Zwar gibt es noch Lücken, aber die genetischen Erkenntnisse zusammen mit den jüngsten archäologischen Entdeckungen zeigen, dass der Weg nicht schnurstracks nach Amerika führte, sondern dass Eiszeiten die Vorfahren der Paläoindianer zu jahrtau-

AUF EINEN BLICK DIE BEZWINGER DER BERINGSTRASSE

- 1 Lange galt als gesichert, dass die Clovis-Kultur als erste vor zirka 13 000 Jahren die Neue Welt bewohnte. Archäologische Funde und Genanalysen haben diese These inzwischen weitgehend widerlegt.
- 2 Offenbar hatte sich schon zum Höhepunkt der letzten Eiszeit, vor mehr als 20 000 Jahren, auf der trockengefallenen Landbrücke der Beringstraße die Urpopulation der indigenen Amerikaner herausgebildet.
- 3 Zur Frage, wie sie den Doppelkontinent besiedelte, favorisieren Archäologen und Genetiker drei verschiedene Szenarien.

sendelangen Stopps zwangen. Dabei lautet das wichtigste Ergebnis: Die Ureinwohner gehen nicht auf eine, sondern auf mehrere Ursprungspopulationen zurück.

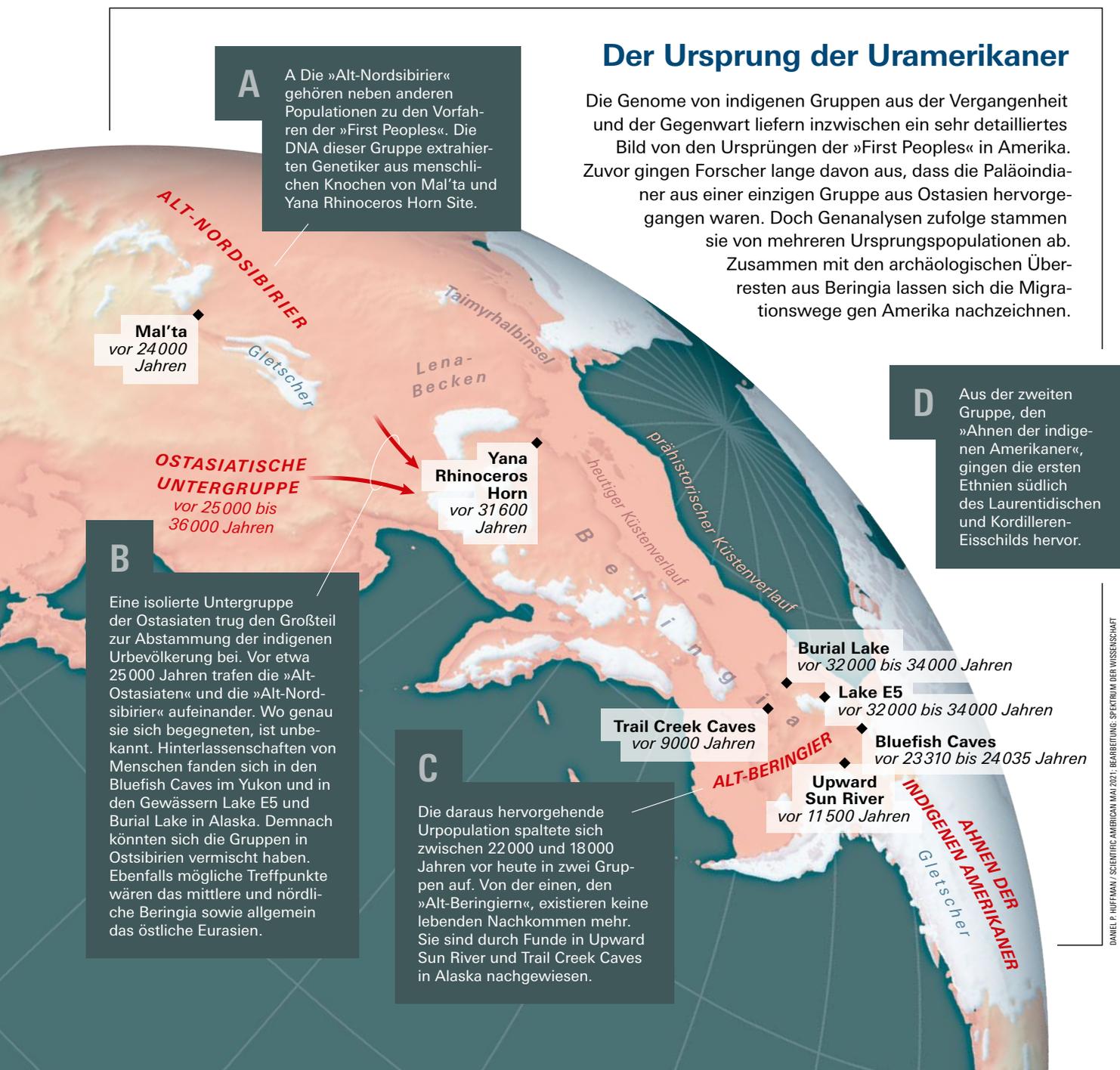
Zu der Frage, woher die indigene Bevölkerung Amerikas kam, vertraten im 20. Jahrhundert die meisten Archäologen die These von »Clovis first«. Was steckt dahinter? Clovis ist ein Fundort im heutigen US-Bundesstaat New Mexico. Dort kamen in den 1930er Jahren erstmals Steinspitzen ans Licht, deren charakteristisches Merkmal eine Kehlung am unteren Ende darstellt. Die frühesten dieser lanzettförmigen Projektile, die sich zusammen mit Knochenresten von Mastodonten, Mammuts und Bisons fanden, sind etwa 13000 Jahre alt. Ältere Kulturzeugnisse waren zunächst nicht bekannt. Damit schien klar zu sein: Die Macher der Clovis-Spitzen mussten zu den ersten Menschen auf dem nordamerikanischen Kontinent gehört haben – »Clovis first«.

Die vermeintlichen Pioniere lebten südlich zweier mächtiger Eisschilde, die zu jener Zeit große Teile Nordamerikas bedeckt hatten. Daraus und aus der Verbreitung der Clovis-Fundstellen entwickelten die Archäologen ihre These fort: Nach dem LGM mussten Menschen von Sibirien aus über die Landbrücke der damals trockengefallenen Beringstraße nach Nordamerika gewandert und rasch weiter nach Süden vorgestoßen sein – durch einen Korridor im schmelzenden Eispanzer, der entlang der Ostseite der kanadischen Rocky Mountains ins Innere Nordamerikas führte. Diese Erstankömmlinge waren Jäger und Sammler, die in kleinen Gruppen lebten und auf der Jagd nach Großwild weite Strecken zurücklegten. Daher erreichten sie bald Südamerika und ließen sich auch dort nieder. Alles in allem seien seit ihrer Ankunft in Amerika etwa 1000 Jahre verstrichen.

Aber vor rund zwei Jahrzehnten schwand die Gewissheit über »Clovis first«. Forscher hatten Wohnplätze frei gelegt,

Der Ursprung der Uramerikaner

Die Genome von indigenen Gruppen aus der Vergangenheit und der Gegenwart liefern inzwischen ein sehr detailliertes Bild von den Ursprüngen der »First Peoples« in Amerika. Zuvor gingen Forscher lange davon aus, dass die Paläoindianer aus einer einzigen Gruppe aus Ostasien hervorgegangen waren. Doch Genanalysen zufolge stammen sie von mehreren Ursprungspopulationen ab. Zusammen mit den archäologischen Überresten aus Beringia lassen sich die Migrationswege gen Amerika nachzeichnen.



die offenbar deutlich älter waren als die frühesten Clovis-Steingeräte. Eine dieser Stätten ist Monte Verde im Süden Chiles. Wie ¹⁴C-Datierungen ergaben, lebten dort schon vor 14200 Jahren Menschen. Und sie benutzten Werkzeuge aus Stein, Holz und Knochen, die keinerlei Ähnlichkeiten mit den Geräten der Clovis-Kultur haben. Offenbar waren Menschen mehr als ein Jahrtausend, bevor Clovis in Nordamerika auftauchte, bis an die Südspitze Südamerika vorgedrungen.

Ebenfalls vor ungefähr zwei Jahrzehnten erschütterten neue Analysen weitere Gewissheiten der Archäologen. In den späten 1990er Jahren waren molekularbiologische Methoden derart ausgereift, dass es möglich wurde, DNA aus jahrtausendealten menschlichen Überresten zu extrahieren. Auf diesem Weg ließ sich klären, wann Menschen sich erstmals auf den amerikanischen Kontinenten niedergelassen hatten. Dazu sequenzierten die Forscher zum einen die DNA der Mitochondrien, die nur in mütterlicher Linie vererbt wird, und zum anderen das männliche Geschlechtschromosom (Y-Chromosom). Sie nahmen sich das Erbgut sowohl von Angehörigen heutiger als auch einstiger indigener Gruppen vor.

Mittels dieser genetischen Daten zeichneten sie die Chronologie der Bevölkerungsentwicklung in groben Zügen nach. Das Stichwort dazu lautet molekulare Uhr. Anhand der Mutationen, die sich an bestimmten Positionen im Erbgut befinden, lässt sich die Zeit berechnen, die von Veränderung zu Veränderung verstrichen ist. Das Ergebnis im Fall der Paläoindianer: Die Vorfahren kamen tatsächlich aus Asien, doch gab es im LGM eine Phase, in der die Pioniere ohne Genfluss von anderen Populationen fortbestanden. Offenbar harrten sie an einem Ort abgeschnitten von der Umwelt aus. Danach breiteten sich die Gruppen umso schneller auf die amerikanischen Kontinente aus. Diese ersten Amerikaner gingen der Clovis-Kultur und den Bewohnern von Monte Verde offenbar um mehrere tausend Jahre voraus.

Die Gendaten sorgten damit für eine Überraschung, lieferten aber nur ein lückenhaftes Bild, da sie lediglich auf Teilen des Erbguts beruhten – der DNA der Mitochondrien und des Y-Chromosoms –, nicht auf dem gesamten Genom, aus dem sich sehr viel detaillierter die Abstammung eines Menschen rekonstruieren lässt. Inzwischen hat die Genforschung deutliche Fortschritte gemacht. So kann das vollständige Genom eines lebenden Menschen problemlos sequenziert werden. Im Fall einiger Gruppen der heutigen indianischen Ethnien zeigte sich, dass sie und die Europäer immer wieder gemeinsame Nachkommen zeugten – allerdings erst nachdem Kolumbus 1492 auf den Bahamas anlandete. Die Abschnitte im Erbgut, die von den »First Peoples«, den Uramerikanern ohne europäischen Einfluss, stammen, lassen sich hingegen zehntausende Jahre in die Vergangenheit verfolgen. Eine detaillierte Besiedlungsgeschichte konnten Genetiker aber erst im Zusammenspiel mit alter DNA (aDNA, »ancient DNA«) rekonstruieren.

BPK / THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM



CLOVIS-SPITZE Dieses Steinartefakt aus rotem Hornstein ist typisch für die Clovis-Kultur von vor 11000 Jahren. An der Basis ist die Spitze gekehlt, womöglich um sie leichter in einen Holzschaft einzusetzen.

Aus jahrhundertalten Überresten eines Menschen dessen Genom zu extrahieren, war anfangs in der Archäogenetik ein schwieriges Unterfangen. Die aus einem menschlichen Knochen oder Zahn gewonnene DNA ist stark mit dem Genmaterial von Bodenmikroben, Pflanzen, Tieren oder heutigen Menschen verunreinigt. Und die aDNA selbst ist fragmentiert, beschädigt und daher nur spärlich erhalten. Dank technischer Fortschritte kann inzwischen auch derart marodes Erbgut ausgelesen werden (siehe »Spektrum der Wissenschaft« 5/2020 auf S. 84/85). Deshalb sind heute sehr viel mehr Genome von prähistorischen Populationen bekannt. Zusammen mit den Gendaten lebender »First Peoples« lassen sich deren Ursprünge detaillierter nachzeichnen als mit den dünnen Informationen aus der mitochondrialen DNA und den Y-Chromosomen. So zeigte sich, dass der Stammbaum der Erstbesiedler aus verschiedenen Strängen

besteht. Und dass diese Vorfahren der Urpaläoindianer zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt aufeinandertrafen.

Grundsätzlich gilt: Einen einzigen Ursprung einer Bevölkerung zu markieren, ist eigentlich müßig und fast schon absurd. Menschliche Populationen haben sich im Lauf der Zeit immer wieder vermischt, so dass eine jede von ihnen eine komplexe Abstammungsgeschichte aufweist. Doch um die Entwicklung einer Bevölkerung rekonstruieren zu können, muss man an irgendeiner Stelle der genetischen Vergangenheit ansetzen. Und in diesem Fall ist es sinnvoll, ein gutes Stück vor dem LGM zu beginnen.

Die Vorfahren der Paläoindianer

Vor etwa 36000 Jahren lebte im heutigen Ostasien eine Gruppe von Menschen, die zunehmend von den übrigen Gemeinschaften der Region abgeschnitten wurde. Der Prozess verlief allerdings sehr langsam: Mehr als 11000 Jahre lang gab es weiterhin Austausch mit der Ausgangspopulation. Vor etwa 25000 Jahren dann waren sie genetisch von den Vorfahren der heutigen Ostasiaten unterscheidbar. Diese isolierte Gruppe altsteinzeitlicher Ostasiaten bildete in großen Teilen die Urbevölkerung der ersten Amerikaner.

Eine weitere Abstammungslinie lässt sich ungefähr 39000 Jahre zurückverfolgen. Sie lebte vor 31600 Jahren an einem Lagerplatz in Nordostsibirien, der heute als Yana Rhinoceros Horn Site bekannt ist. Der Fundort liegt im westlichen Teil von Beringia. Diese Region erstreckte sich über Ostsibirien und Westalaska sowie jene Landbrücke, die einst Sibirien und Alaska miteinander verbunden hatte und nun unter dem Meerwasser der Beringstraße schlum-

mert. An der Yana Rhinoceros Horn Site haben Archäologen zwei Milchzähne ausgegraben, die das genetische Profil der damaligen Menschen preisgeben. Archäogenetiker bezeichnen die dazugehörige Bevölkerung als »Ancient North Siberians«. Diese »Alt-Nordsibirier« lebten als Jäger und Sammler und hielten sich das ganze Jahr über in der Polarkreisregion auf. Die Milchzähne stammen von zwei Jungen. Ihnen waren die Zähne im Alter von zehn bis zwölf Jahren ausgefallen. Ein Team um Martin Sikora von der Universität Kopenhagen sequenzierte 2019 die aus den Zähnen gewonnene DNA und stellte fest: Die beiden Kinder waren nur entfernt miteinander verwandt und gehörten zu einer größeren Population, die etwa 500 geschlechtsreife Individuen umfasste. Zum Vergleich: Die Neandertaler lebten in deutlich kleineren Gruppen, die auch immer wieder ausstarben – darauf deuten jedenfalls Erbgutdaten der Frühmenschen hin.

Die Gemeinschaft der Alt-Nordsibirier scheint hingegen trotz der harschen Lebensbedingungen gewachsen zu sein. Sie breitete sich in ganz Nord- und Mittelsibirien aus. Dass sie dort vor 24000 Jahren ankam, belegen die Überreste des Kindes von Mal'ta im Süden von Mittelsibirien. Die DNA dieses Jungen findet sich in vielen weit verbreiteten Populationen wieder, einschließlich der heutigen Westeurasier, zu denen auch die Europäer gehören, sowie der »First Peoples« in Amerika.

GRABUNG IN NORDOSTSIBIRIEN Am Fundplatz Yana Rhinoceros Horn Site hatten vor 31600 Jahren Menschen gelebt. Davon zeugen Tierknochen, Steinwerkzeuge sowie zwei Milchzähne. In der DNA der Zähne entdeckten Genetiker Erbgutsequenzen einer Ursprungspopulation der amerikanischen Ureinwohner.



EEBIA/PANOWA

Die beiden Hauptstränge im Stammbaum der Paläoindianer – die Alt-Ostasiaten und die Alt-Nordsibirier – trafen vor zirka 20000 bis 25000 Jahren aufeinander und vermischten sich. Die neue Gruppe entstand bald nach dem Beginn des LGM, als in Sibirien ein extrem kaltes Klima herrschte und dort kaum Pflanzen oder Tiere existierten. Für Menschen wäre es nahezu unmöglich gewesen, in dieser Umgebung zu verweilen. Und tatsächlich haben im Nordosten Sibiriens keine Artefakte aus der Zeit von vor 15000 bis vor 29000 Jahren überdauert. Daraus schließen viele Archäologen, dass die Menschen damals Zuflucht in anderen Regionen gesucht hatten, an Orten mit mehr Ressourcen und besserem Klima. Was einst genau geschehen war, lässt sich bisher noch nicht rekonstruieren. Doch wahrscheinlich begegneten sich die Ostasiaten und Nordsibirier überhaupt nur deshalb, weil sie den unwirtlichen Verhältnissen in Sibirien entkommen wollten. Bleibt die Frage: Wo genau trafen sie sich?

Die möglichen Treffpunkte der Ursprungspopulationen

Im westlichen Beringia kreuzten sich ihre Wege wahrscheinlich nicht: Diese Region war nach bisherigem Kenntnisstand in der Zeit nach 29000 Jahren vor heute unbewohnt. Als Treffpunkte blieben allgemein das östliche Eurasien, die Mitte oder der Osten von Beringia sowie dessen nördlicher Bereich. Mit Hilfe der Genetik lässt sich die Frage nicht klären. Die Genome der indigenen Bevölkerung deuten aber darauf hin, dass ihre Vorfahren während des LGM mehrere tausend Jahre lang keinen Kontakt zu anderen Gruppen hatten. Ihre Isolation begann, kurz nachdem sich die Alt-Ostasiaten und die Alt-Nordsibirier vermischt hatten. Daher dürften die beiden nicht im östlichen Eurasien aufeinandergetroffen sein. Denn dort wären sie ziemlich sicher anderen, in der Nähe lebenden Gruppen begegnet und hätten sich mit ihnen vermischt. Einige Archäologen sind dennoch der Ansicht, dass sich die Ursprungbevölkerung im östlichen Eurasien aufgehalten haben muss, weil es nur dort entsprechende Funde aus der Kaltzeit gibt.

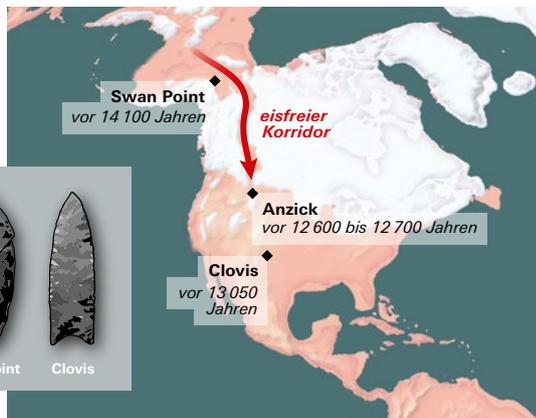
Möglicherweise hat die Ursprungspopulation das LGM an der Südküste von Mittelberingia ausgesessen. Wie paläoökologische Modelle zeigten, herrschte in diesem Landstrich ein mildes Klima. Es könnte ein Feuchtgebiet gewesen sein, da es unweit der Küste lag und Meeresströmungen vorbeiführten. Für Menschen und Tiere wäre es zu einer Zeit, als die Eisschilde ihre größte Ausdehnung erreicht hatten, ein vergleichsweise angenehmer Ort gewesen. Doch die Mitte von Beringia liegt heute unzugänglich unter Wasser, und Archäologen haben bislang nichts bergen können. Im östlichen Beringia gibt es allerdings einige interessante Fundstätten: Während des LGM hatten Menschen dort Jagd auf Wildpferde, Karibus und Wapitis gemacht und ihre Beute an Lagerplätzen zerlegt. Solche Orte fanden sich in Yukon (Kanada) und in der North Slope, einer Region im Norden Alaskas. In den Bluefish Caves in Yukon beispielsweise kamen Tierknochen mit Schnittspuren ans Licht. 2017 ergab eine ¹⁴C-Datierung, dass die ältesten Funde zwischen 22000 und 24000 Jahre alt sind – also genau ins LGM passen. Doch die wenigen Belege überzeugen nicht alle Archäologen.

Drei Szenarien der Besiedlung Amerikas

Experten sind sich uneins darüber, wann, wo und wie sich die Paläoindianer auf dem Doppelkontinent ausgebreitet hatten. Forscher diskutieren vor allem drei Szenarien.

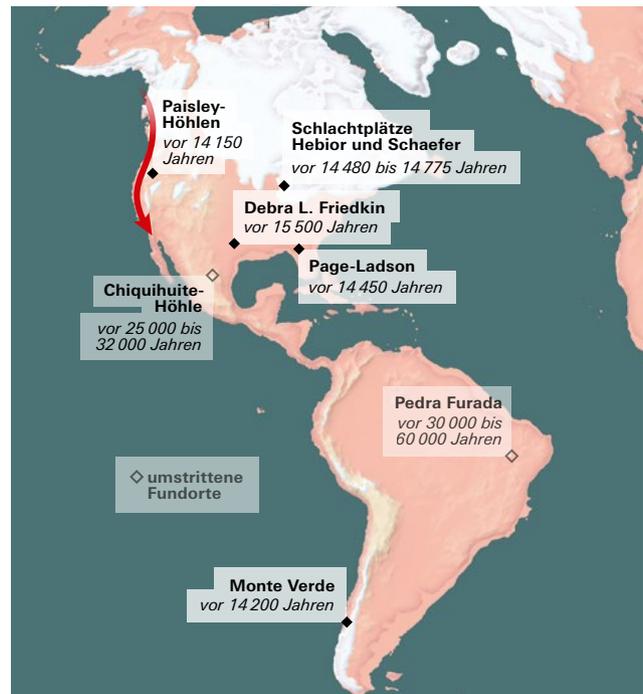
1. Späte Besiedlung

Die ersten Menschen, die sich in Amerika festsetzten, fertigten kunstvolle Steinspitzen, wie sie Archäologen erstmals in Clovis im US-Bundesstaat New Mexico und später an Orten wie Anzick in Montana entdeckt haben. Davon ist jedenfalls eine kleine Forschergruppe überzeugt. Der Fundort Swan Point in Alaska spielt dabei eine entscheidende Rolle. Dort fanden sich Steinwerkzeuge, die offenbar die ältere Diuktai-Kultur in Sibirien mit der jüngeren Clovis-Kultur in Nordamerika verknüpfen. Befürworter des Clovis-first-Modells gehen davon aus, dass die Erstankömmlinge nach dem Letzteiszeitlichen Maximum nach Amerika kamen. Diese seien durch einen eisfreien Korridor im schmelzenden Eispanzer gewandert. Fundorte, die deutlich älter als die Clovis-Kultur sind, halten die Forscher des »Clovis-first« für falsch datiert, oder sie schließen aus, dass jene Menschen Anteile zur späteren Bevölkerung beisteuerten. Der Streit um »Clovis-first« gleicht einem Glaubenskampf.



2. Frühe Besiedlung via Pazifikküste

Die meisten Archäologen sehen genügend Belege für Fundstellen, die älter als die Clovis-Kultur sind. Menschen waren also, lange bevor sich der Durchgang im Eisschild öffnete, in ganz Amerika verbreitet. Die Einwanderer waren per Boot entlang der Westküste nach Nordamerika gekommen. Schon vor zirka 17000 Jahren, und möglicherweise sogar vor 20000 bis 30000 Jahren, hatten sich die Ersten auf den Weg gemacht. Die Funde dazu stammen beispielsweise aus Pedra Furada und der Chiquihuite-Höhle, deren beider Datierungen in Fachkreisen stark umstritten sind.



3. Sehr frühe Besiedlung



Einige wenige Forscher sind der Ansicht, dass Menschen Amerika bereits viel früher erreichten. Ihr Hauptargument: die Fundstätte Cerutti Mastodon, an der vor 130000 Jahren ein Rüsseltier geschlachtet worden sein soll. Wenn tatsächlich Menschen die Knochen zertrümmert haben, dann hätten die ersten Zweibeiner in Amerika der Spezies *Homo erectus* angehört, nicht *Homo sapiens*. Die meisten Wissenschaftler lehnen dieses Szenario jedoch ab.

KARTEN: DANIEL P. HUFFMAN; STEINSPITZEN: LEN CHRISTIANSEN / SCIENCE/AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY



BRIDGAN FERGERT/UNIVERSITY OF ARIZONA

MASTODONTENKNOCHEN In Page-Ladson im Norden Floridas liegt unter Wasser ein Schlachtplatz, an dem vor 14450 Jahren ein Mastodon zerlegt wurde. Der Fundort belegt die frühe Präsenz von Menschen in Amerika.

kleineren an der Pazifikküste verlaufenden Kordilleren-Eisschild umherzogen.

Die Ancestral Native Americans hatten sich offenbar während des LGM in mehrere unterschiedliche Gruppen aufgespalten. Einer davon – sie trägt heute den Namen »Unsampled Population A« – konnten Archäologen bisher keine Überreste zuordnen, doch genetisch ließen sich Nachkommen ausfindig machen: Die heutige Ethnie der Mixe, die in Oaxaca in Mexiko ansässig ist, trägt Spuren deren DNA in sich.

Eine weitere Gruppe – »Population Y« – gibt ein noch größeres Rätsel auf. Gegenwärtige Menschen im Amazonasgebiet stammen unter anderem von ihr ab, aber auch Gemeinschaften in Australasien sind mit ihr verwandt. Hinzu kommt: Spuren ihres genetischen Signals fanden sich in Proben menschlicher Überreste aus der Tianyuan-Höhle in Peking, China. Ihr Alter: 40000 Jahre. Anscheinend gab es einst eine uralte, in ganz Asien verbreitete Population, deren Gene in die moderne Bevölkerung der Pazifikregion und in einige Ethnien im Amazonasgebiet eingeflossen sind. Wo diese Gruppe ihren Ursprung hatte, ist bislang jedoch unbekannt.

Über den Atlantik war niemand gekommen

Alles, was Forscher inzwischen über die genetische Herkunft der Paläoindianer wissen, widerlegt zudem eine langlebige, eher sensationsheischende Hypothese. Die beiden Archäologen Dennis Stanford und Bruce Bradley sind der Ansicht, dass Siedler auch von Osten kamen, über den Atlantik. Als Belege nennen sie einen 22000 Jahre alten Mastodontenschädel und eine von Menschen geformte Steinspitze. Beide Funde habe 1970 ein Muschelkutter an der Atlantikküste vor Virginia vom Meeresgrund gefischt. Zudem habe das Steingerät Ähnlichkeit mit den Spitzen der sehr viel späteren Clovis, aber vor allem mit Werkzeugen der westeuropäischen Solutréen-Kultur, die von vor ungefähr 18000 bis 23500 Jahren existierte. Was eingängig klingt, hält jedoch einer Überprüfung nicht stand, wie Forscher um Michael O'Brien von der University of Missouri 2015 herausfanden. Dass beide Funde aus demselben Kontext hochgefordert wurden, lässt sich nicht nachweisen. Daher kann auch die ¹⁴C-Datierung des Mastodontenschädels nicht mit dem Steingerät verknüpft werden. Der Form nach gehört das Werkzeug laut O'Brien und seinem Team zu einer der späteren Kulturen der amerikanischen Ostküste. Und mittlerweile kann eine vermeintliche Ost-West-Überquerung des Atlantiks auch genetisch ausgeschlossen werden. Aus keiner Genstudie geht hervor, dass sich die »First Peoples« vor dem Jahr 1492 mit Europäern, Afrikanern oder einer anderen Population vermischt hätten.

Nach dem LGM zogen die Ureinwohner Amerikas gen Süden und spalteten sich in mindestens drei Abstammungslinien auf. Eine Linie ist nur durch ein einziges Ge-

Problematisch für die Forschung bleibt, dass einige Lagerplätze der Voramerikaner heutzutage unter Wasser liegen dürften. Das würde auch auf die sibirische Arktis nördlich des Polarkreises zutreffen, die nördlich und westlich von Westberingia liegt. Dort könnten die Menschen der Alt-Ostasiaten und Alt-Nordsibirier zusammengekommen sein und die Kaltzeit überstanden haben. Damals erstreckte sich in diesem Gebiet eine weitläufige Ebene mit Steppe und Tundra, in der große Herden von Mammuts, Wollnashörnern, Bisons und Pferden umherstreiften. Die klimatischen Verhältnisse wären für Menschen zwar extrem harsch gewesen, doch ausgehend von den archäologischen und genetischen Erkenntnissen von der Yana Rhinoceros Horn Site liegt es nahe anzunehmen, dass sich die Wildbeute schon lange vor dem LGM an eisige Bedingungen angepasst hatten. Aber auch in diesem Teil der Arktis haben Archäologen kaum Funde gemacht. Ob Menschen vor mehr als 20000 Jahren hier lebten, ist also fraglich.

Obwohl unklar bleibt, wo sich die Alt-Nordsibirier und Alt-Ostasiaten zusammengeschlossen hatten, helfen genetische Erkenntnisse, die anschließenden Entwicklungen zu rekonstruieren. Unmittelbar nachdem sich die beiden Gruppen vermischt hatten und von anderen arktischen und sibirischen Kulturen isoliert waren, spalteten sie sich vor ungefähr 18100 bis 22000 Jahren in mindestens zwei Linien auf. Von dem einen Abstammungszweig, den Forscher »Alt-Beringier« (»Ancient Beringians«) genannt haben, sind keine lebenden Nachkommen bekannt. Aus dem anderen Zweig, den Ahnen der indigenen Amerikaner (»Ancestral Native Americans«), gingen die ersten Paläoindianer hervor, die südlich des mächtigen, fast ganz Nordamerika bedeckenden Laurentidischen Eisschildes und des

nom nachgewiesen, das aus den Überresten einer Frau stammt. Sie lebte vor etwa 5600 Jahren auf dem Fraser-Plateau in der kanadischen Provinz British Columbia. Zu den beiden anderen Linien rechnen Archäogenetiker alle derzeit bekannten Genome der indigenen Bevölkerung, die einst südlich der Eisschilde umherstreifte. Dazu gehören: die nördlichen Ureinwohner Amerikas und damit die Vorfahren der Algonkin, der Na-Dené, der Salish und der Tsimshian; sowie die südlichen Ureinwohner und ihre Vorfahren, die weit über Südamerika, Mittelamerika und einen Großteil Nordamerikas verbreitet sind. Nur die indigenen Völker der Arktis fallen heraus, sie haben sich durch spätere Wanderbewegungen noch mit anderen Paläogruppen vermischt. So sehr sich Experten darüber im Klaren sind, dass die drei Linien die Abstammungsgeschichte der amerikanischen Indigenen bilden, so wenig sind sie sich darüber einig, wann, wo und wie sich diese Populationen auf den Kontinenten ausgebreitet haben. Dazu existieren zurzeit drei unterschiedliche Szenarien.

Szenario 1 – Die späte Besiedlung: Einige Archäologen befürworten eine These, die im Wesentlichen eine aktualisierte Version des Clovis-first-Modells darstellt. Ihrer Ansicht nach ist die Fundstätte Swan Point in Mittelalaska der Schlüssel zur Rekonstruktion der Besiedlung Amerikas. Swan Point ist etwa 14100 Jahre alt und damit die früheste zweifelsfreie Fundstelle im östlichen Beringia. Die Steinge-

VOR DEN CLOVIS 13500 bis 15500 Jahre reichen die Steinwerkzeuge zurück, die an der Stätte Debra L. Friedman in Texas ans Licht kamen. Der Fundplatz liegt damit zeitlich vor der Clovis-Kultur. Jene galt lange als Beleg für die früheste Präsenz von *Homo sapiens* in Amerika.

räte werden zu einer Werkzeugtechnologie gerechnet, die sowohl mit der Diuktai-Kultur in Sibirien als auch mit der Clovis-Kultur in Verbindung stehen soll. Daraus schließen die Archäologen, dass sich die Vorfahren der »First Peoples« während des LGM in Nordostasien oder Sibirien aufhielten. Und erst vor 14000 bis 16000 Jahren überquerten jene die Landbrücke der Beringstraße nach Alaska. Diese Erstankömmlinge, die sich dauerhaft in Nordamerika festsetzen konnten, waren Clovis. Sie seien durch einen Korridor zwischen dem schmelzenden Kordilleren- und dem Laurentidischen Eisschild nach Süden gewandert, möglicherweise gefolgt von weiteren Migrationswellen aus Sibirien. Doch wie passen Fundstellen, die früher als die Clovis-Kultur datiert werden, in dieses Szenario? Nach Ansicht der Verfechter der Spätbesiedlungstheorie wurden solche Fundplätze entweder falsch ausgewertet oder stammen von Menschen, die weder kulturell noch biologisch zur indigenen Bevölkerung beigetragen haben.

Szenario 2 – Eine frühe Besiedlung via die Pazifikküste: Für die meisten Archäologen lässt sich die Beweiskraft früher Fundstellen nicht ohne Weiteres beiseiteschieben. Ein Beispiel ist Page-Ladson im Norden Floridas – mehr als 7000 Kilometer von Alaska entfernt. 2016 veröffentlichten Jessi Halligan von der Florida State University, Michael Waters von der Texas A&M University und ihr Team einen Bericht über diesen Lagerplatz, an dem Jäger einst unweit eines Teichs ein Mastodon zerlegt hatten. Heute liegt die Fundstelle unter Wasser, in einem Senkloch im Fluss Aucilla. Die US-Archäologen dokumentierten in Page-Ladson einige Steinartefakte, darunter eine zerbrochene Messerklinge, die sie in einem ungestörten Fundkontext mit den Mastodontenknochen aufgelesen haben. Eine ¹⁴C-Datierung der Gebeine ergab ein Alter von 14450 Jahren.



Was die Fundstelle von Page-Ladson so bedeutsam macht, ist nicht nur ihr Alter, sondern auch ihre einstige Beiläufigkeit: Es handelte sich um eine kleine Wasserstelle, die damals viel weiter von der Küste entfernt lag als heute und keine markanten Landschaftsmerkmale aufwies. Die Paläoindianer schlachteten dort ein Mastodon, nahmen das Fleisch und einen der Stoßzähne mit und ließen die Knochen, den anderen Stoßzahn und zerbrochenes Gerät zurück. Ihr Aufenthalt war kurz und diente nur dem Zweck, das Tier zu zerteilen. Nichts deutet darauf hin, dass sie dort für längere Zeit lebten.

Das heißt: Die Menschen waren schon vor 14450 Jahren mit der Landschaft und dem Beuteangebot vertraut. Sie wussten, dass sie an dem Wasserloch auf Mastodonten stoßen würden, weil die Tiere die Stelle wohl als Tränke nutzten. Eine Umgebung auszukundschaften und kennen zu lernen, braucht viel Zeit. Für einige Experten ist Page-Ladson damit ein klarer Beleg dafür, dass Menschen, schon lange bevor das Mastodon am Wasserloch geschlachtet wurde, in Amerika angekommen waren. Fragt sich nur: Wie viel früher waren sie da?

Weit südlich der einstigen Eisschilde sind mittlerweile mehrere Fundstellen ans Licht gekommen, die zwischen 14000 und 16000 Jahren alt sind: darunter Monte Verde in Chile oder die Debra L. Friedkin Site im US-Bundesstaat Texas. Sie lassen sich nicht im Einklang mit Szenario 1 erklären. Ihre Datierung legt vielmehr nahe, dass die Erstankömmlinge eigentlich nur über eine Route nach Nord-, Mittel- und Südamerika gekommen sein können. Und es dürfte nicht der eisfreie Korridor zwischen dem Laurentidschen und dem Kordilleren-Eisschild gewesen sein.

Die Erstankömmlinge kamen nicht durch den Eispanzer

Dieser Durchgang öffnete sich irgendwann in der Zeit nach 14000 Jahre vor heute. Wenn die Uramerikaner aber bereits davor, etwa in Page-Ladson, in Amerika etabliert waren, dann ist es sehr unwahrscheinlich, dass sie den Eispanzer durchquert haben. Zudem haben DNA-Spuren aus Bohrkerne von Seesedimenten aus der Mitte des Korridors gezeigt, dass dort erst vor etwa 12600 Jahren Pflanzen wuchsen und Tiere umherliefen – also lange nachdem sich Menschen in Amerika niedergelassen hatten. Der früheste archäologische Nachweis menschlicher Präsenz im Durchgang stammt von vor 12400 Jahren. Die Erstankömmlinge können demnach diesen Weg nicht genommen haben.

Die wahrscheinlichste Route führte entlang der Westküste – per Boot. Vor etwa 16000 bis 17000 Jahren wäre das Meer passierbar gewesen. Dieses Szenario würde auch besser zu den bisherigen genetischen Daten passen. Die südlichen Ureinwohner Amerikas hatten sich zwischen zirka 17000 und 13000 Jahren vor heute rasch in regionale Populationen aufgeteilt, die über ganz Nord-, Süd- und Mittelamerika verteilt lebten. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Untergruppen bildeten, und der Zeitpunkt ihrer Aufspaltung ließen sich mit einer Ausbreitung zu Wasser deutlich besser erklären als über einen Landweg.

Und womöglich waren Menschen noch viel früher entlang der Küste nach Süden gepaddelt – während oder



CENTER FOR THE STUDY OF THE FIRST AMERICANS, TEXAS A&M UNIVERSITY

SPEERSPITZE Eine Datierung des umgebenden Fundsediments ergab für diese rund fünf Zentimeter lange Steinspitze ein Alter von zirka 15000 Jahren. Archäologen entdeckten sie in Texas am Fundort Debra L. Friedkin.

etwas vor dem Höhepunkt der letzten Eiszeit, also schon vor zirka 20000 bis 30000 Jahren. Mutmaßliche Belege dafür kamen an mehreren Fundorten in Mexiko und Südamerika ans Licht, wie Pedra Furada im Nordosten Brasiliens oder der Chiquihuite-Höhle in Mittelmexiko. Viele Archäologen glauben jedoch nicht, dass diese Stätten tatsächlich so alt sind. Sie zweifeln an der Datierung der Kulturreste. Die aufgefundenen Steinwerkzeuge halten sie nicht für menschengemacht, sondern für das Ergebnis geologischer Prozesse.

Damit ist eine menschliche Präsenz in Amerika vor dem LGM weder bestätigt noch widerlegt. Es bedeutet lediglich, dass mehr Zeugnisse nötig sind, um eine noch frühere Besiedlung sicher nachzuweisen. Sollten aber tatsächlich Menschen um das LGM herum nach Süden gelangt sein, dann wären es wahrscheinlich nur einige wenige gewesen – ihre Spuren also entsprechend schwach. Sie würden allerdings eine Erklärung für das rätselhafte Gensignal der »Population Y« bei heutigen Gruppen im Amazonasgebiet liefern: Womöglich vermischten sich Menschen, die sich nach dem Schmelzen der Eisschilde in Amerika ausbreiteten, mit solchen, die bereits in Südamerika waren.

Szenario 3 – Eine sehr frühe Besiedlung: Eine kleine Forschergruppe ist der Ansicht, dass Menschen viel früher als bislang angenommen in diesen Teil der Erde gelangt waren. Ihre These stützt sich vor allem auf die 130 000 Jahre alten Überreste eines Mastodons, die an der Fundstätte Cerutti Mastodon in Kalifornien ausgegraben wurden. In einer Studie aus dem Jahr 2017 kommen Steven Holen vom San Diego Natural History Museum und seine Kollegen zu dem Schluss, dass Schäden an den Mastodontenknochen vom Schlachten des Tiers herrühren. Steine, die ebenfalls am Fundplatz lagen, deuten die Archäologen als zugerichtete Schlagsteine.

Zurzeit herrscht einigermaßen Einigkeit darüber, dass *Homo sapiens* vor etwa 70 000 bis 80 000 Jahren begann, in nennenswerter Zahl aus Afrika auszuwandern. Wenn die Überreste von Cerutti Mastodon tatsächlich auf prähistorische Menschen zurückgehen, dann würden sie nicht nur belegen, dass jemand viel früher als bisher angenommen auf den amerikanischen Kontinent gelangt war, sondern auch, dass diese Erstankömmlinge womöglich der Art *Homo erectus* angehört hatten.

Die meisten Archäologen lehnen das Szenario aus mehreren Gründen ab – unter anderem weil möglicherweise nicht Frühmenschen die Mastodontenknochen zertrümmert haben, sondern Baumaschinen. Die Fundstelle war nämlich bei einem Straßenbauprojekt entdeckt worden. Außerdem findet sich im Erbgut der heutigen Ureinwohner kein Gensignal, das die Paläoindianer von einer anderen Menschenart in Amerika aufgenommen hätten. Falls *Homo erectus* wirklich bis in diesen Winkel der Erde vorgedrungen war, dann hat er weder Fossilien noch Einsprengsel im Genom der Ureinwohner hinterlassen.

Es gilt, die Lücken in der Forschung zu schließen

Momentan sind sich die meisten Archäologen und Genetiker einig, dass sich Menschen vor mindestens 14 000 bis 15 000 Jahren auf dem amerikanischen Kontinent festgesetzt haben. Uneinigkeit herrscht darüber, welche Fundstellen zweifelsfrei aus der Zeit vor der Clovis-Kultur stammen und wie früh die Ersten da waren. Dass es überhaupt möglich ist, drei derart unterschiedliche Szenarien zu entwickeln, liegt auch an den großen Lücken im archäologischen Fundspektrum und den genetischen Daten. Allerdings lässt sich das zweite Szenario am ehesten aus dem derzeitigen Kenntnisstand plausibel ableiten. Aber selbst dieses Modell berücksichtigt nicht alle verfügbaren Informationen.

Je weiter die Forschung über die Besiedlung Amerikas voranschreitet, desto komplizierter wird die Sachlage wohl werden. Momentan gibt es vielleicht einige Dutzend öffentlich zugängliche und vollständige Genome von heutigen und alten indianischen Ethnien. Die Herkunftsorte der Erbgutdaten decken den Doppelkontinent aber nicht gleichmäßig ab – die meisten stammen aus Mittel- und Südamerika und den nördlichen Teilen Nordamerikas. Nur wenige Genome kommen aus den USA. Das ist wenig überraschend, sondern Folge eines berechtigten Misstrauens indigener Gruppen gegenüber Forschern. Ärzte und Anthropologen haben die »First Peoples« über Jahrhunderte betrogen und ausgebeutet; seit den Anfängen der Anthropologie raubten sie die Überreste indigener Vorfahren aus deren Ruhestätten. Viele benutzten die Knochen, um inzwischen längst widerlegte rassische Klassifizierungen aufzustellen. Daher ist es umso wichtiger, dass Genetiker mit den indigenen Gemeinschaften zusammenarbeiten, damit durch die Suche nach neuen Gendaten kein weiterer Schaden entsteht.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / JEDICAK

Die Archäogenetik Amerikas ist im ständigen Umbruch, auch weil die Forscher versuchen, die geografische Lücke in den USA zu schließen. Jedes neu sequenzierte Genom liefert einen enormen Wissensschub. Dabei blicken die Genetiker längst über das menschliche Erbgut hinaus und analysieren die DNA von Bakterien und Viren, die den Menschen besiedeln. Ebenso spüren sie Tieren nach, auf die indigene Gruppen einst Jagd machten oder die ihnen folgten. Deren Genspuren könnten Hinweise auf Wanderbewegungen geben – und zugleich die Unantastbarkeit von Überresten der Ureinwohner garantieren.

Mit Sicherheit werden künftig neue Funde gemacht, und wahrscheinlich werden in der Folge die bisherigen Szenarien modifiziert werden müssen. Vermutlich auch weil sich die Technologie der DNA-Analyse fortentwickelt. Auf diesem Weg lässt sich die letzte, beschwerliche Etappe rekonstruieren, die *Homo sapiens* auf seiner jahrtausendelangen Wanderung um die Welt antrat. ◀

QUELLEN

Halligan, J. et al.: Pre-Clovis occupation 14,550 years ago at the Page-Ladson site, Florida, and the peopling of the Americas. *Science Advances* 2, 2016

Raff, J.: Ancient DNA and bioarcheology. In: O'Rourke, D. H. (Hg.): *A companion to anthropological Genetics*, 2019, S. 187–197

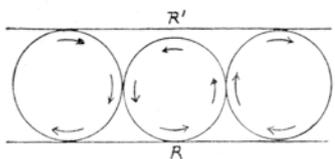
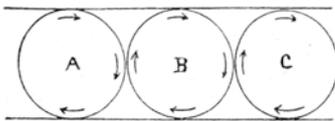
Sikora, M. et al.: The population history of northeastern Siberia since the Pleistocene. *Nature* 570, 2019

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

STONEHENGE VOR DEM UNTERGANG BEWAHREN

»Das Stonehenge war in Privatbesitz und wurde vor nicht allzulanger Zeit zur Versteigerung ausbezogen. Von Staats wegen schien kein Verlangen vorzuliegen, das merkwürdigste Denkmal der nordeuropäischen Steinzeit unter Schutz zu stellen. Inzwischen sind etliche Steine durch Sturm und Wetter umgelegt worden und mit einem Male regte sich das englische Gewissen: Mittel flossen reichlich, und unter sorgfältiger Begutachtung durch Altertumsforscher soll möglichst alles, was noch an Steinen vorhanden ist, wieder aufgerichtet und mit Beton im Boden befestigt werden.« *Kosmos 10, S. 253*

DEN ROLLWIDERSTAND PERFEKTIONIEREN



Oben gleich große Kugeln, unten mit einer kleineren in der Mitte.

»Was ein Kugellager ist, weiß jeder, der ein Fahrrad besitzt. Die sog. »gleitende« Reibung, bei der Flächen aufeinander entlanggleiten, soll durch die »rollende« Reibung ersetzt werden, bei der ein geringerer Kraftverlust eintritt. [Doch] ein Rest von gleitender Reibung bleibt. Zwischen die Flächen, die sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, sind genau gleichgroße Kugeln eingeschaltet [obere Grafik]. Oben und unten [rollen] die Kugeln, aber wo sie sich

berühren, müssen sie sich reiben – so daß die Gefahr der Zerstörung des Lagers nahe liegt. Durch einen Kunstgriff kann man Abhilfe schaffen. Man schaltet eine etwas kleinere Kugel zwischen zwei Normalkugeln [untere Grafik]. Eine solche wird von den größeren erfaßt und in Umdrehung versetzt.« *Technische Monatshefte 9, S. 215*

QUECKSILBERBEIZE SCHÜTZT PFLANZEN?

»Unter den Erbsenkulturen machte sich dieses Jahr die sog. Fußkrankheit bemerkbar, deren Erreger der Grauschimmel (*Botrytis cinerea*) ist. Da die Infektion von der Erbse aus erfolgt, ist das Saatgut zu beizen. Die Besichtigung einiger Felder, deren Saatgut mit Uspulun behandelt war, zeigte nur vereinzelt kranke Pflanzen, während auf den benachbarten Schlägen, die ungebeiztes Saatgut hatten, der Befall teilweise ganz erheblich war. Inwiefern Düngung zur Förderung des Grauschimmels [beiträgt], müssen Versuche ergeben.« *Die Umschau 37, S. 545*

1921

LÄRM VERÄNDERT DIE HIRNSTRUKTUR

»In Versuchen an 20 Albinoratten wurden die morphologischen Veränderungen der Neuronen im Hörzentrum bei anhaltender Lärmeinwirkung untersucht. Die Tiere wurden einer Schallfrequenz zwischen 1500 und 3000 Hz ausgesetzt. Dann wurden Hirnschnitte studiert. Nach einer Geräuscheinwirkung von 1 bis 7 Tagen traten signifikante Veränderungen in den Hörregionen der Großhirnrinde auf. Bei noch länger anhaltender Einwirkung (15 bis 28 Tage) gingen die kortikalen Veränderungen zurück, während sie in den subkortikalen Formationen stärker wurden.«

Die Umschau 19, S. 716

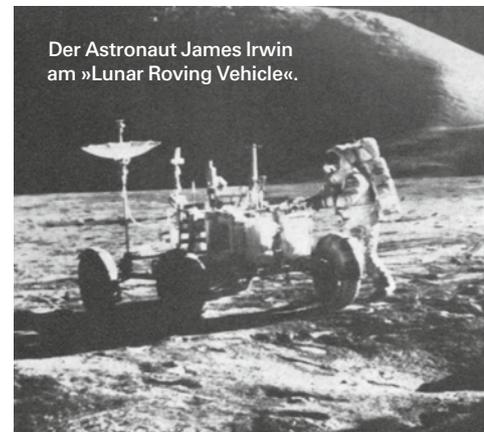
DER SPRECHGESANG DER WALE

»Tiefsee-Tonbandaufnahmen von Buckelwalen (*Megaptera nova-angliae*) führten zu der Entdeckung, daß diese Wale über ein besonderes Kommunikationsmittel verfügen. R. Payne (Rockefeller-Universität, New York) analysierte Tonbandaufnahmen. Es zeigte sich, daß die Buckelwale nicht nur quieken, pfeifen und grunzen, sondern ihre Laute zu einem sehr komplizierten »Gesang« verbinden. Diese Walgesänge dauern acht bis neun Minuten. Danach beginnt ein neuer Einsatz, bei dem die Folge der Töne fast genau wiederholt wird. Payne nimmt an, daß sich die Wale über Hunderte von Kilometern verständigen können.« *Kosmos 9, S. *252*

DIE ERSTE BEMANNTE MONDAUTOFAHRT

»Es begann mit einem zaghaften Spaziergang auf dem Erdtrabanten von N. A. Armstrong und E. E. Aldrin (Apollo-11-Mission, 1969). Die Astronauten von Apollo 12 (1969) bewegten sich schon etwas mutiger auf der Mondoberfläche, und die Apollo-14-Mannschaft (1971) führte bereits bei ihren Erkundungsausflügen einen kleinen Handwagen mit sich. 1971 schließlich konnte die Apollo-15-Mannschaft mit 12 km/h auf dem »Rover 1« drei ausgedehnte Exkursionen unternehmen. Das Photo zeigt J. Irwin neben dem Mondauto; im Hintergrund erhebt sich mit über 4000 m Höhe der Hardley-Berg.« *Die Umschau 18, S. 681*

Der Astronaut James Irwin am »Lunar Roving Vehicle«.



UNTEN: NASA, ABBILDUNGEN AUS ZEITSCHRIFTEN DES DEUTSCHEN MUSEUMS



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 3.200 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

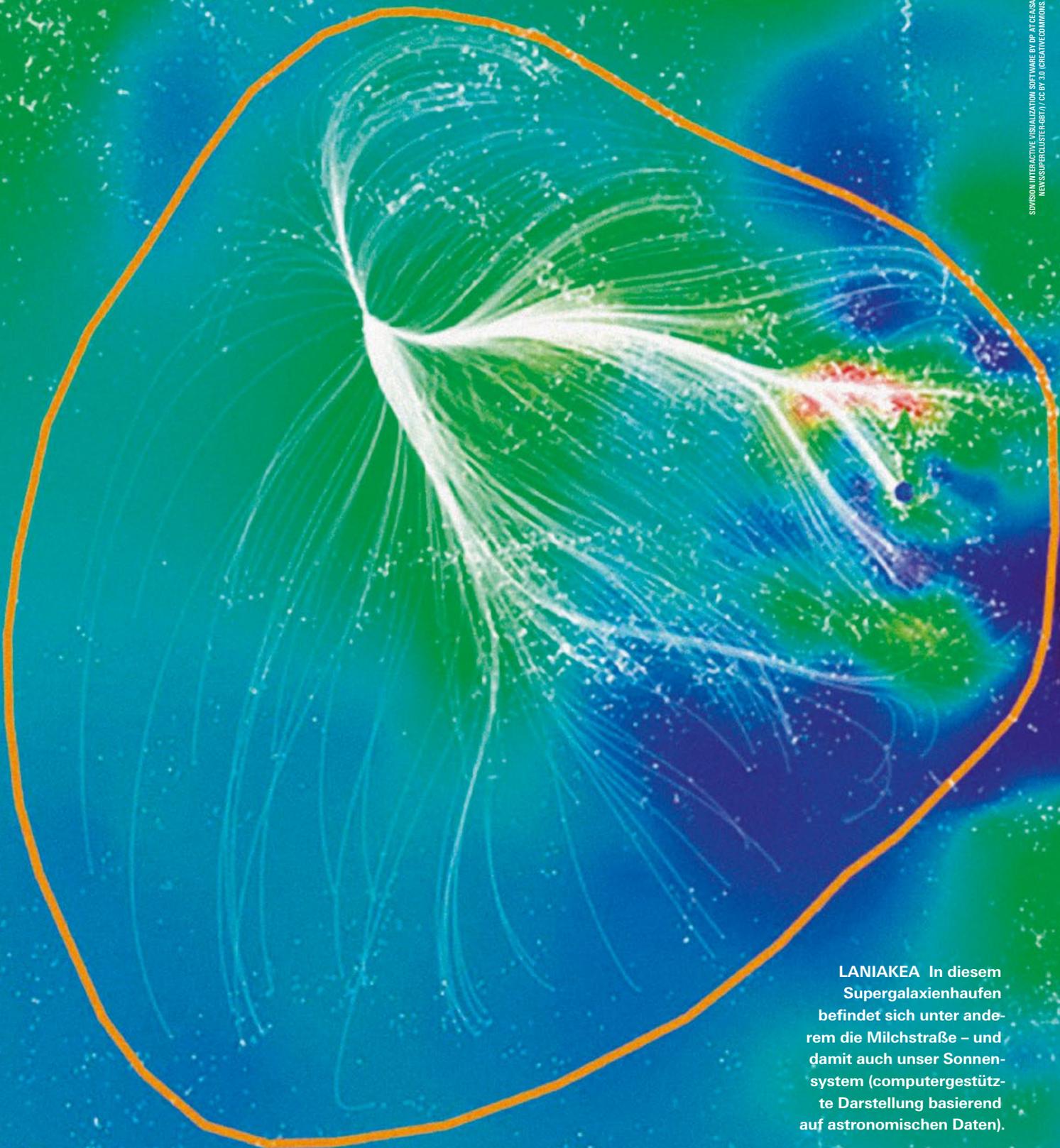
www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

REZENSIONEN



SONJON INTERACTIVE VISUALIZATION SOFTWARE BY DR. AT. CHAKRABARTY, FOUNDER (WWW.SONJON.COM)
NEW SUPERCLUSTER (SCL) BY D. J. GRANT AND COMMONS ORIGIN (NEWS BY D. J. GRANT)

LANIAKEA In diesem Supergalaxienhaufen befindet sich unter anderem die Milchstraße – und damit auch unser Sonnensystem (computergestützte Darstellung basierend auf astronomischen Daten).

ASTRONOMIE KARTOGRAFIE DES UNIVERSUMS

Seit der Entdeckung des Supergalaxienhaufens Laniakea haben wir eine neue kosmische Adresse. In ihrem Buch erklärt Hélène Courtois nicht nur die physikalischen Hintergründe, sondern plaudert auch aus dem Nähkästchen ihrer 20 Jahre andauernden Forschung.

► Wo befinden wir uns? Auf einer Postkarte können Sie Ihre Straße, Ihre Stadt und wenn nötig auch Ihr Land problemlos angeben. Doch Kosmologinnen und Kosmologen wie Hélène Courtois wollen es genauer wissen. Planet Erde, das Sonnensystem, die Milchstraße ... und dann? Dieser Frage widmen sich so genannte Kosmografen – die Geografen des Universums. Anstatt den Kosmos zu erobern, versuchen sie, eine möglichst akkurate Karte unserer Nachbarschaft anzufertigen.



In ihrem Buch »Von der Vermessung des Kosmos und der Entdeckung von Laniakea« nimmt uns die französische Astrophysikerin mit auf ihre 20 Jahre andauernde Reise durch den Kosmos, die zur Entdeckung des Supergalaxienhaufens Laniakea führte, dem auch die Milchstraße angehört. Im Original erschien das Buch bereits 2016 und wurde im darauf folgenden Jahr mit dem Astronomie-Buchpreis »Prix Ciel et Espace« ausgezeichnet.

Courtois erklärt die Grundlagen und Fortschritte der kosmischen Entfer-

nungsmessung anhand reichlicher Illustrationen und Bilder. Farbige Abbildungen finden sich gesammelt im Zentrum des Werks – das ständige Hin- und Herbl attern stört leider den Lesefluss. Durch kompakte Infoboxen gelingt es Courtois, viele Themen anzuschneiden, ohne ihre Leserschaft zu überfordern: von physikalischen Grundlagen wie elektromagnetischen Wellen und der Leuchtkraft von Gestirnen bis zu komplexeren Inhalten wie der Dunklen Materie und dem kosmologischen Prinzip. Lediglich in der Mitte des Buchs häufen sich die zahlreichen Messmethoden, und man verliert leicht den Überblick.

Courtois geht es aber nicht nur darum, die Ergebnisse ihrer Forschung leicht verdaulich aufzubereiten, sondern sie möchte auch den wissenschaftlichen Prozess als Ganzes präsentieren. So begegnet man im ersten Kapitel der Praktikantin Hélène, die im Observatorium in Lyon arbeitet, und verlässt sie 20 Jahre später kurz nach der Entdeckung des Superhaufens Laniakea. Man begleitet sie auf ihren Forschungsreisen nach Australien und Hawaii, die mit sentimental Anekdoten über Vogelfotografie, die nächtlichen Geräusche der Kängurus und den Geschmack exotischer Früchte geschmückt sind. Gleichzeitig verschweigt die Autorin nicht die Kehrseiten: lange Nächte, monotone Arbeiten und erfolglose Messungen. Zuweilen unterwarf sie ihren Tagesrhythmus vollständig ihrer Forschung, als sie 480 Beobachtungsnächte in nur einem Jahr durchführte, indem sie über drei Zeitzonen hinweg arbeitete. Sie macht deutlich: Die Wissenschaft ist kein ruhiger Fluss und selten eine reine Erfolgsgeschichte; Höhen und Tiefen gehören dazu.

Courtois begeht außerdem den etwas halbherzigen Versuch, Frauen der Astrophysik sichtbar zu machen. Zwar bereichert sie das Buch mit fünf Biografien von Wissenschaftlerinnen, doch ihren Erfahrungen als Mutter unter diesen familienfeindlichen Arbeitsbedingungen sind nur zwei Sätze gewidmet; den Erinnerungen eines Potsdamer Astrophysikers an die Berliner Mauer hingegen eine ganze

Seite. Zudem verzichtet die Autorin (und die Übersetzung) auf den Gebrauch gendergerechter Sprache.

Insgesamt wollte das Buch an manchen Stellen vielleicht zu viel. Die Überleitungen zwischen Anekdoten und wissenschaftlichen Erklärungen klingen bisweilen etwas holprig. Der Erzählstil ist stellenweise zu blumig mit einem Stich ins Kitschige. Zum Beispiel der Titel des Kapitels über die Auswahl einer geeigneten Spiralgalaxie: »Sch onheitswettbewerb: Miss Spirale«.

Einen Überblick über die Methoden der Kosmografie liefert das Werk jedoch allemal, und durch Courtois' eigene Erfahrung wird es um eine für Sachbücher untypische persönliche Note bereichert. Insbesondere Leserinnen und Leser, die nicht nur an physikalischen Erklärungen, sondern auch am Prozess wissenschaftlicher Entdeckung interessiert sind, werden an diesem Buch Freude finden.

Sabrina Patsch ist Doktorandin am Institut für Theoretische Physik der FU Berlin.

DIGITALISIERUNG BERICHTE AUS DEM MASCHINENRAUM

Der Datenwissenschaftler Holger Aust gewährt Einblicke in seinen Beruf.

► Big Data, Machine Learning, KI – in der Digitalisierungsdebatte geht es begrifflich munter durcheinander. Nicht alles, was als KI bezeichnet wird, fällt wirklich in diese Kategorie, und nicht jedes smarte Gerät ist intelligent. Holger Aust versucht in seinem Buch »Das Zeitalter der Daten« Ordnung in dieses Wirrwarr zu bringen. In sieben Kapiteln erklärt er, wie Maschinen lernen, wie neuronale Netze funktionieren und was die typischen Aufgaben eines Datenwissenschaftlers sind.

Zum Beispiel berechnet ein solcher die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Kunde ein Abonnement kündigt, etwa einen Strom- oder Handyvertrag. Wenn ein Unternehmen schon im Voraus über dieses Vorhaben Bescheid wei t, kann es durch entsprechende

Angebote gegensteuern. Hier kommen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ins Spiel: »Als Erstes benötigen wir einen Algorithmus, der für jeden Kunden vorhersagt, wie wahrscheinlich die Abo-Kündigung ist«, erklärt Aust. »Zweitens müssen wir überlegen, wie wir handeln können. Soll der Kundenservice Nachricht erhalten, damit er dem Kunden etwas anbietet, um zu bleiben? Oder erfolgt das Angebot sogar vollautomatisch per E-Mail?« Das Angebot müsse so an die Person angepasst werden, »dass die Wahrscheinlichkeit des Bleibens maximiert wird und gleichzeitig die Kosten möglichst gering bleiben«, erläutert der Autor.



Data Science, das wird bei der Lektüre klar, ist keine Raketenwissenschaft, sondern Mathematik. Mit Regressionsanalysen lässt sich etwa herausfinden, wie Variablen wie Geschlecht, Vertragslaufzeit oder Monatsgebühr eine mögliche Kündigung beeinflussen. Explorative Datenanalysen liefern jedoch nicht nur für solche Fälle wichtige Erkenntnisse – sie sind auch in der Logistik oder beim Online-Handel äußerst nützlich.

Jeder kennt Empfehlungssysteme, die bestimmte Produkte anpreisen (»Kunden, die diesen Artikel angesehen haben, kauften auch ...«). Für den Händler gebe es dabei verschiedene Strategien, so Aust: Man kann Produkte bewerben, die eine hohe Konversionsrate (der Anteil der Kaufabschlüsse gemessen an den Anzeigen) versprechen, aber auch solche, die nicht oft gekauft werden, doch dafür mehr Umsatz bringen.

Rund ein Drittel der Amazon-Käufe sind unmittelbar auf Empfehlungen des Algorithmus zurückzuführen. Je besser die Maschine funktioniert, desto mehr Umsatz generiert der Online-Riese. Verlässliche Prognosen bedeuten also bares Geld.

Auch Supermärkte müssen ihre Abverkaufsmengen prognostizieren, um die richtigen Mengen zu bestellen. Bei saisonalen Produkten wie Erdbeeren ist das schwieriger als bei Gütern wie Nudeln, die ganzjährig gekauft werden. Die Datenwissenschaftler berücksichtigen dabei verschiedene Faktoren wie Wettervorhersage oder Feiertage. Die Werte aus dem Vorjahr heranzuziehen, helfe leider nicht immer weiter, weil sich Nachfrage ändern könne, so der Autor.

Das war das Problem im ersten Lockdown 2020: Statt wie sonst Handy-Hüllen oder Ladegeräte wollten die Verbraucher plötzlich Toilettenpapier und Desinfektionsmittel. Produkte, die für gewöhnlich kaum nachgefragt wurden, waren begehrt wie nie. Das irritierte die algorithmischen Preisbildungssysteme derart, dass sie Mondpreise aufriefen: So kostete bei Amazon ein Päckchen Reis zeitweise über 60 Dollar. Auch die Staumelder und Verkehrsprognosen gerieten durcheinander, weil die Menschen die meiste Zeit zu Hause saßen und keine brauchbaren Standortdaten lieferten.

Modelle basieren häufig auf der Annahme, dass die Welt von morgen aussieht wie die von gestern. Doch für eine Pandemie gab es keine historischen Daten. Die Wissenschaftler mussten ihre Modelle daher nachjustieren. Auf diese Problematik geht der Autor an der Stelle leider nicht genauer ein. Allgemeine Aussagen wie »In der Vergangenheit liegt die Zukunft« wirken darum im Licht der Aktualität etwas erratisch. Trotz dieser kleinen Mängel liest man das Buch mit Gewinn, denn mit seiner Expertise vermag der Autor den technischen Fortschritt einzuordnen: »Der Aufwand, eine Aufgabe zu 100 Prozent zu automatisieren, ist wesentlich größer, als sie nur zu 90 Prozent zu automatisieren, wobei etwas menschliches Zutun notwendig bleibt«, so sein Fazit.

Holger Aust hat ein instruktives Werk vorgelegt, das fundiertes Hintergrundwissen vermittelt und anhand vieler Beispiele Einblicke in das Berufsbild des Datenwissenschaftlers gibt. Wer in der Digitaldebatte mitreden will, sollte dieses Buch lesen.

Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«.

UMWELT TIEFKÜHLTRUHE NUR FÜR SUPERMÄRKTE ODER SERIENKILLER

Krimiautoren wollen mit Wissen zum Handeln gegen die Klimakrise motivieren.

► Erst ist es dunkel, Sie lehnen sich gemütlich in Ihrem Kinossessel zurück, greifen in die Popcornütte, nehmen einen tiefen Schluck aus einer Getränkeflasche. Und warten darauf, dass sich der Vorhang öffnet und der Gruselfilm startet. In Filmen genießen wir diese Spannung, schreibt der Schriftsteller Frank Schätzing, der eigentlich ein ganz anderes Buch schreiben wollte, »einen Thriller. Dann dachte ich: Wir sind in einem Thriller. Sie und ich. Nicht als Hörer und Autor. Als Akteure.«

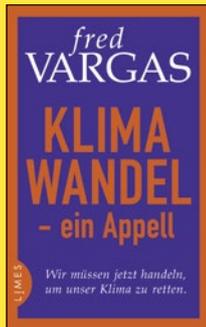
Mit seinem Buch will er zum Handeln in der Klimakrise motivieren. Die Wunderpille dagegen sei Wissen, erklärt er. Schätzing sieht aber auch, dass Menschen überfordert sind, wie gelähmt, da sie mit Horrormeldungen über immer neue Klimakatastrophen überflutet werden. Zudem erscheine das Problem nicht richtig sichtbar. Es gäbe keine Bilder wie bei einem Erdbeben. »Am Morgen öffnen wir die Tür, der Himmel sieht aus wie immer. Klimawandel? Wo? Und wo sind die intelligenten Maschinen, die uns vernichten wollen? Die Post bringt immer noch der Briefträger, nicht der Terminator«, so Schätzing.

Doch die Klimakrise ist real, und so nutzt der Autor sein Talent als Verfasser spannender Thriller und schreibt ein kreatives und eloquentes Sach-

Frank Schätzing
**WAS, WENN WIR
 EINFACH DIE
 WELT RETTEN?**
 Handeln in der
 Klimakrise
 Kiepenheuer &
 Witsch, Köln 2021
 336 S., € 20,-



Fred Vargas
**KLIMAWANDEL
 – EIN APPELL**
 Wir müssen jetzt
 handeln, um unser
 Klima zu retten
 Limes, München
 2021
 288 S., € 14,-



buch. Er erklärt unterhaltsam die Szenarien des Weltklimarats, sieht Kippunkte nicht nur in schmelzenden Eisbergen, sondern in einer Jugend, die rebelliert und auf die Straße geht. Oft geraten seine Erzählungen allerdings ausschweifend, auch wenn das Buch mit über 300 Seiten zu seinen kürzeren Werken zählt.

Die »Wunderpille« sei Wissen, denn sie helfe dabei, Fake News zu erkennen. Die Lösung für ein Überleben der Menschen sieht Schätzing in der grünen Technologie und mit Veränderungen, die Einzelne bewirken, wenn sie Güter teilen, statt sie allein zu besitzen, weniger Müll erzeugen und die Tiefkühltruhe besser nur den »Lebensmittelhändlern oder Serienkillern« überlassen.

Doch selbst wenn er in der Einleitung ankündigt, sich der »heiligen Kuh der kapitalistischen Weltordnung, dem Wachstum« zu widmen, bleibt dieser Aspekt verhalten und ungenau. Denn grundsätzlich sei die kapitalistische Weltordnung immer noch die beste, so der Autor. Dabei beschreibt er nur wenige Kapitel zuvor, wie Akteure dieser Ordnung, etwa ExxonMobil, die Katastrophe verschleiern, Klimafor-

scher verteufelten, Veröffentlichungen blockierten und noch 1997 den Regierungschefs erzählten: Die Welt werde kühler – denn Handeln gegen die Klimakrise wäre geschäftsschädigend gewesen.

An den Stellen, wo Schätzing eloquent und geschliffen schreibt, berührt das Buch dennoch nicht so wie das einer anderen Krimiautorin, die ebenfalls ihre nächste fiktive Geschichte verschoben hat. »Klimawandel – ein Appell« der französischen Autorin Fred Vargas ist emotional, sie wütet und klagt an, nennt es nicht Klimakrise, sondern Verbrechen. Auch ihre Fakten sind sorgfältig recherchiert und unterhaltsam dargestellt. Dabei liefert sie mehr Details als Schätzing und holt weniger weit aus (so zieht der Autor etwa Schwarze Löcher oder das Wetter bei der Entstehung des Romans »Frankenstein« von Mary Shelley heran, um Bedrohungsszenarien zu erläutern). Zudem richten sich Vargas' Vorschläge für eine bessere Welt nicht bloß an Einzelne, sondern sind als konkrete Forderungen an die Regierenden formuliert. Einfach wird es nicht, den Planeten zu retten, »es wartet ein Haufen Arbeit auf uns«, schreibt sie.

Eines schaffen beide Autoren aber sicher: Durch ihre Beliebtheit erreichen sie ein breites Publikum. Vielleicht nimmt ja der ein oder andere Krimifan, der sonst kein Sachbuch über die Klimakrise lesen würde, eines dieser Werke in die Hand. Für das Happy End muss er dann allerdings selbst sorgen.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

GENETIK BAUANLEITUNG FÜR DRACHEN

Ein Vater-Tochter-Autorenteam beschreibt auf unterhaltsame Weise, wie man mit gentechnischen Methoden einen Drachen erschaffen könnte – und welche Probleme dabei zu erwarten sind.

Drachen gehören zu den mythischen Wesen, welche die Sagenwelt aller Weltregionen bevölkern und in modernen Fantasy-Geschichten nicht fehlen dürfen. Dabei hat es sie in Wirklichkeit nie gegeben. Warum das künftig nicht so bleiben muss (und auch nicht sollte), erklärt ein US-amerikanisches Autorenduo aus Vater und Tochter.

Anlass für das gemeinsame Buch war ein Schulprojekt, in dem Julie Knoepfler sich mit der Frage beschäftigte, wie sich mit moderner Technologie ein echter Drache herstellen ließe. Da ihr Vater als Professor an der School of Medicine der UC Davis in Sacramento auf dem Gebiet der Stammzelltechnologie forscht und außerdem als populärwissenschaftlicher Blogger und Buchautor aktiv ist, war die Idee für das vorliegende Buch schnell geboren.

Gleich vornweg: Ganz ernst sollte man den Drachenbauleitfaden nicht nehmen. Ein neuartiges Lebewesen durch gentechnische Methoden zu erschaffen, ist nicht erlaubt und wohl auch nicht gesellschaftlich erwünscht, was den Autoren durchaus bewusst ist. Im Vorwort erklären sie, ihr Gedankenexperiment solle in erster Linie Kindern und jungen Erwachsenen »coole« Wissenschaft nahebringen und gleichzeitig den »Hype« um neue Geneditierungsmethoden auf die Schippe nehmen. So machen sie sich beispielsweise ausführlich Gedanken darüber, auf welche Weise man bei der Erschaffung eines Drachen ums Leben kommen könnte.

Trotz des unterhaltsamen, auf Jugendliche ausgerichteten Schreibstils enthält die Drachenbauanleitung eine geballte Menge Wissenschaft, die leicht verständlich aufbereitet ist. Nachdem sich die Autoren mit einem Blick auf die verschiedenen Drachenvarianten in Europa und Asien für ein großes, fliegendes, Feuer spuckendes Exemplar entschieden haben, suchen sie im Tierreich nach passendem »Ausgangsmaterial« für einzelne Eigenschaften wie Flugfähigkeit und Feuerspucken. Ausführlich werden die Unterschiede des Flugs bei Vögeln, Flugsauriern, Fledermäusen und sogar

Insekten diskutiert und Baupläne für verschiedene Flügeltypen betrachtet.

Für das Spucken von Feuer gibt es im Tierreich zwar keine Vorbilder, doch erzeugen Wiederkäuer im Pansen eine leicht entflammbare Gasmischung, die kombiniert mit einer Zündung durch die Signale eines elektrischen Fisches das gewünschte Ergebnis liefern könnte. Eine Alternative zum Feuer-spucken wäre das Ausstoßen heißer, ätzender Gase – der Schutzmechanismus des Bombardierkäfers. Auch an den Eigenschutz des Drachen haben seine Erzeuger gedacht: Ein Schleim-überzug könnte Verdauungstrakt und Haut feuerfest machen.

Viel Platz wird den Fragen nach der angestrebten Intelligenz des Drachen – hier kann Paul Knoepfler Forschungsergebnisse aus seinem eigenen Labor zur Hirnentwicklung einfließen lassen – sowie seiner Sexualität eingeräumt. Immerhin soll sich das mühsam konstruierte Tier, wenn möglich, anschließend selbst vermehren. Weiterhin überlegen die Autoren, ob und wie sie ihr Haustier mit mehr als einem Kopf, Hörnern oder Kiemen ausstatten können.



Am Ende folgt ein ausführliches Kapitel über die ethischen Probleme des Drachenbauprojekts, in dem unter anderem die (möglichen) Bedürfnisse des Tiers einbezogen werden. Wohin könnte ein Erfolg beim Drachenbau führen? Werden in Zukunft auch Einhörner und weitere mythische Wesen unsere Welt bevölkern? Welche Probleme bringt es mit sich, menschenartige Fabelwesen wie Elfen oder Meerjungfrauen zu erschaffen?

Ein wenig ermüdend sind – vor allem zu Beginn – die vielen Wiederholungen und Füllworte. Dennoch führt das Buch moderne Erkenntnisse und Methoden aus verschiedenen Fachbereichen zusammen und liefert wichtige Denkanstöße zur gentechnischen Manipulation von Lebewesen.

Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

ETHNOLOGIE ZWISCHEN NEUGUINEA UND SIBIRIEN

Zu Beginn des letzten Jahrhunderts lieferten Anthropologinnen bahnbrechende Einsichten in fremde Kulturen.

► Wer macht die ganze Arbeit, wenn ein Mann nur eine Gemahlin hat? Als Katherine Routledge vor rund 100 Jahren einer Kikuyu-Frau in Ostafrika die westliche Ehe erklärte, konnte sie deren Frage nicht so schnell von der Hand weisen. Schließlich genossen die Frauen des kenianischen Stamms in Vielehe oft tatsächlich ein einfacheres Leben als ihre britischen Zeitgenossinnen. Doch ganz grundsätzlich war Routledge weniger an heimischen Gepflogenheiten als an der fremden Kultur interessiert. Denn sie war als eine der ersten Anthropologinnen unterwegs.

Wie Frances Larson in ihrem bisher nur auf Englisch erschienenen und glänzend erzählten Buch »Undreamed Shores« berichtet, war Routledge nicht allein. Als sich die britische »anthropology« – die im deutschen Sprachraum jetzt eher der Ethnologie entspricht – zu Beginn des letzten Jahrhunderts als eigenständige Disziplin etablierte, konnten vor allem an der University of Oxford auch Frauen studieren. Fünf der Absolventinnen hat Larson ausgewählt und ihre Biografien fast nahtlos miteinander verwoben. So unterschiedlich ihre Persönlichkeiten waren, hatten sie doch eines gemeinsam: Freiheit fanden sie nur in der Fremde.

Katherine Routledge kam beispielsweise aus reichem Elternhaus, konnte sich aber nur über anhaltende Sturheit

die Ausbildung in Oxford erkämpfen. Die Arbeit in Ostafrika war möglich, weil sie zwischenzeitlich einen Ehemann mit ähnlichen Interessen an ihrer Seite hatte. Später machten sich die beiden im eigens gebauten Schiff auf zu den Osterinseln, um in einem ambitionierten Projekt die Herkunft der rätselhaften Riesenstatuen vor Ort zu entschlüsseln.

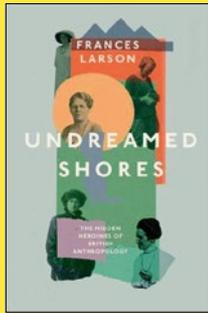
Maria Czaplicka konnte von solchen Ressourcen hingegen nur träumen. Die junge Polin war auf sich allein gestellt und stürzte sich in die Ausbildung in Oxford. Ihre Forschung sollte sie in eine ähnlich isolierte Gegend führen. Unter außerordentlicher physischer und psychischer Anstrengung suchte Czaplicka vom Schlitten aus im eisigen Winter nach den Rentierhirten Sibiriens und legte dabei mehr als 5000 Kilometer zurück. Auch hier war das Staunen gegenseitig: Diese Menschen hatten noch nie eine europäische Frau gesehen.

Barbara Freire-Marreco hatte zwar familiären Rückhalt, dem sie aber auch so manche berufliche Ambition opfern musste. Trotzdem verbrachte sie einige Zeit im amerikanischen Südwesten, um Pueblo-Gemeinschaften in New Mexico und Arizona zu erforschen. Kein leichtes Unterfangen, waren doch unverfälschte Kulturen gefragt, die sich ebendiese »Unberührtheit« nicht selten durch Feindseligkeit gegenüber Fremden bewahrten.

Beatrice Blackwood musste sogar an zwei Fronten kämpfen. Sie interessierte sich für kriegerische Stämme Neuguineas, die ihre Waffen noch aus Holz und Stein fertigten. Weil diese Männer aber als einfältig, faul und fast tierhaft galten, untersagte die koloniale Verwaltung weißen Frauen den Kontakt mit ihnen. Die von Selbstzweifeln geplagte Forscherin setzte sich schließlich durch und konnte im Inneren des Landes erfolgreich arbeiten. Wenn auch nicht so intensiv wie gewünscht, denn das »unberührte« Dorf verschob besonders geheime Rituale kurzerhand auf die Zeit nach Blackwoods Abreise.

Wenig mit Misstrauen zu kämpfen hatte Winifred Blackman. Sie trat ihre

Frances Larson
**UNDREAMED
SHORES**
The Hidden
Heroines of British
Anthropology
Granta Books,
London 2021
352 S., € 24,-



Ausbildung in Oxford zwar erst mit 40 Jahren an, verbrachte dann aber über fast zwei Dekaden jedes Jahr mehrere Monate bei ägyptischen Bauern mit engem Familienanschluss. Ihre Forschung war ergiebig, wenn auch finanziell nie gesichert. Immer wieder musste sie um die weitere Förderung bangen. Ein Problem, das bei den Anthropologinnen – anders als bei den männlichen Kollegen – fast chronisch war.

Czaplicka hat die Angst um die finanziellen Mittel vermutlich sogar das Leben gekostet. In einer vermeintlich aussichtslosen Situation schluckte die Kulturanthropologin Tabletten und starb mit bloß 36 Jahren.

Selbst die gut situierte Routledge konnte sich nicht auf ihren Reichtum verlassen, denn der wurde nach der Trennung ihrem ehemaligen Mann zugesprochen.

So ganz konnten sich die Forscherinnen den engen Grenzen ihrer von Männern dominierten Welt nicht entziehen. Aber hatte wenigstens die Forschung jenseits aller Geschlechtergrenzen Bestand?

Einige ihrer Arbeiten sind verloren, andere dagegen heute noch wertvoll. Oder könnten es zumindest sein: Wie Larson schreibt, sind die Pionierinnen der damals neuen Disziplin fast vollständig vergessen. Denn die Anthropologie etablierte sich nicht nur zu Beginn des letzten Jahrhunderts,

sondern vollzog auch schnell eine grundlegende Verwandlung. Noch während die Frauen bahnbrechende Arbeiten leisteten, setzte sich ein neuer Ansatz durch: Anstatt weite Gebiete in der Ferne abzudecken, sollten sich Anthropologen und Anthropologinnen nun lange und intensiv auf eine einzelne Gemeinschaft fokussieren.

Das wird den frühen Oxford-Forscherinnen aber nicht gerecht, die teils fremd im eigenen Land waren und sich vielleicht gerade deshalb den fernen Kulturen besonders sensibel näherten.

Unstrittig ist etwa, dass Fragen zu Beziehungen, häuslichen Belangen und der Kinderversorgung männlichen Wissenschaftlern meist verschlossen geblieben wären. Daher ist es höchste Zeit, die faszinierenden Frauen stärker ins Rampenlicht zu rücken.

Die Biologin Susanne Wedlich arbeitet als Wissenschaftsautorin in Münster.

Spektrum.tv

Dokumentationen und Reportagen zu den Tophemen der Wissenschaft

Für nur 4,99 € pro Monat
ohne Verpflichtung – ohne Werbung

tv.spektrum.de/DE/



STRINGTHEORIE GRUNDLAGENPHYSIK FÜR JEDERMANN

Was hält die Welt im Innersten zusammen? Dieser spannenden Frage widmet sich der Stringtheoretiker Michio Kaku und vermittelt mit großer Leichtigkeit die komplexesten Zusammenhänge der modernen Physik.

► »Alles Hype und große Töne, aber keine Substanz«, meinen die einen, während andere beteuern, es sei »die aufregendste Idee, die ich kenne« oder »Einstein wäre zufrieden gewesen«. Die Rede ist von der Stringtheorie, die seit Jahrzehnten die Physik-Community spaltet.

Meist laufen Diskussionen darüber auf einem fachlich so hohen Niveau ab, dass Laien keine Chance haben, die vorgetragenen Argumente nachzuvollziehen, geschweige denn, etwas beizusteuern. »Die Gottes-Formel« könnte das ändern: Der theoretische Physiker Michio Kaku schafft es, auf gerade einmal 200 Seiten die grundlegenden Prinzipien der komplexen Theorie verständlich aufzubereiten – inklusive ihrer Vorzüge und Probleme.

Um das zu schaffen, holt der Autor weit aus: Etwa drei Viertel des Buchs befassen sich mit den Hintergründen, die schließlich zur Stringtheorie führen. Für die Leser gestaltet sich die Reise dabei spannend. Kaku erörtert nicht nur die Geschichte der Physik – angefangen mit Demokrit, der die Existenz von Atomen postulierte, über Newton und die erste Gravitationstheorie, Maxwell mit seinem Elektromagnetismus hin zu Einsteins Relativitätstheorie sowie zu Pionieren wie Heisenberg, Dirac und Planck, die die Quantenmechanik entwickelten.

Der Autor spickt die Erklärungen mit unterhaltsamen Anekdoten, etwa wie Feynman während des Zweiten Weltkriegs einen Safe in einem Labor knackte, der die Geheimnisse der Atombombe enthielt, und darin aus Spaß eine kryptische Nachricht hinterließ, um seine Kollegen zu ärgern.

Kaku versteht es wie kaum ein anderer, komplizierte physikalische

Zusammenhänge klar zu vermitteln. Er führt die Leser mit Leichtigkeit durch die wichtigsten Etappen der Physikgeschichte, bis er in der Gegenwart ankommt, in der wir die Welt auf der einen Seite durch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie, auf der anderen durch das Standardmodell beschreiben, das den Elektromagnetismus, die starke und die schwache Kernkraft umfasst.

An diesem Punkt macht der Autor klar, dass wir auf eine neue Theorie angewiesen sind, um alle Phänomene in unserem Universum zu verstehen, inklusive des Urknalls und Schwarzer Löcher.



Als mögliche Lösung präsentiert Kaku die Stringtheorie. Er selbst beschäftigt sich seit ihren Anfängen in den 1960er Jahren mit der Theorie und gilt daher als einer ihrer Begründer. Obwohl das Forschungsgebiet extrem komplex ist und auf abstrakter Mathematik beruht, erklärt der Autor mit scheinbarer Leichtigkeit ihre wichtigsten Eigenschaften. So führt er die Leser durch eine zehndimensionale Welt, in der die fundamentalen Bausteine nicht punktförmig, sondern eindimensionale schwingende Schnüre sind. Ihre Vibrationen erzeugen demnach die Teilchen und Wechselwirkungen, die wir in unserer Welt beobachten.

Die Begeisterung des Autors für sein Forschungsgebiet schwingt auf jeder Seite des Buchs mit. Er erklärt anschaulich, welche zunehmend wichtige Rolle Symmetrien im Lauf der Zeit in der modernen Physik einnehmen. Dabei offenbart sich für Kaku die höchste Form der Symmetrie in der

Stringtheorie, was die Theorie in seinen Augen besonders »schön« macht. Gleichzeitig verschweigt er den Lesern nicht, dass nicht alle Kollegen seine Ansicht teilen: Er zitiert unter anderem die deutsche Physikerin Sabine Hossenfelder, die kritisiert, die aktuelle Grundlagenforschung konzentriere sich hauptsächlich auf »Schönheit, anstatt auch andere Aspekte – wie Überprüfbarkeit – einer Theorie zu berücksichtigen«.

Das ist eines der größten Probleme der Stringtheorie, denn bisher lässt sie sich durch Experimente weder verifizieren noch falsifizieren. Der Autor sieht den bedeutendsten Makel jedoch darin, dass die Theorie unendlich viele Lösungen besitzt: Neben unserem Kosmos sagt sie unendlich viele weitere Universen voraus, ohne zu erläutern, warum genau unser All real ist.

Der Verfasser stellt sich diesen Problemen und erklärt, wie man sie lösen könnte. Unter anderem beschreibt er, durch welche Versuche sich in Zukunft zumindest Hinweise auf die Gültigkeit der Stringtheorie finden ließen: Zum Beispiel könnte man bei der Suche nach Dunkler Materie auf ein von der Theorie vorhergesagtes Photino stoßen.

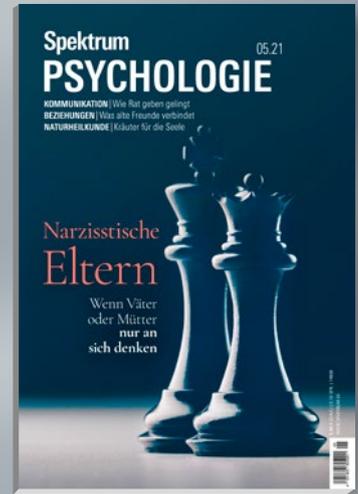
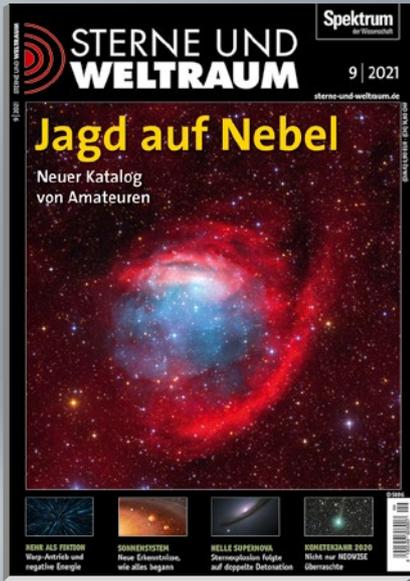
An manchen Stellen erscheinen Kaku's Aussagen leider etwas übertrieben, etwa wenn er behauptet, die meisten Physiker würden die Interpretation der Quantenmechanik nach Bohr inzwischen ablehnen und eher einer Viele-Welten-Theorie zustimmen. Oder Kernphysiker müssten nun versuchen, alles über zehndimensionale Stringtheorie zu lernen, »da diese vielleicht der Schlüssel zum Verständnis der Kernkraft« sein könnte – hier spielt er auf eine Dualität an, die es bisher allerdings nur in Modellen gibt, die sich stark von unserer Realität unterscheiden.

Dennoch kann ich das Buch uneingeschränkt allen empfehlen, die sich für Grundlagenphysik begeistern und erfahren möchten, wie nah man einer »Gottes-Formel« ist.

Manon Bischoff ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«, vorrangig für die Bereiche Mathematik und Informatik.

Unsere Neuerscheinungen

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



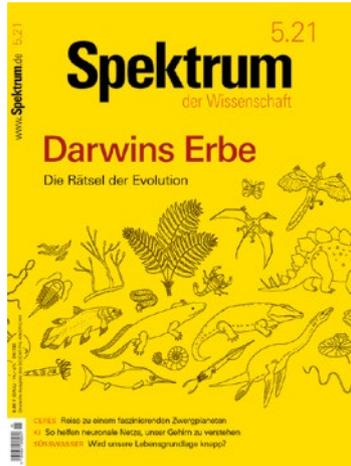
Informationen und eine Bestellmöglichkeit
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:
service@spektrum.de | Tel. 06221 9126-743
[Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen](https://www.spektrum.de/aktion/neuerscheinungen)

GENE MIT LANGEM ARM

Evolutionsbiologe Diethard Tautz erläuterte die Hintergründe zu Forderungen einiger Wissenschaftler, die Grundlagen der Evolutionstheorie zu überarbeiten, um epigenetische oder auch entwicklungsbiologische Vorgänge besser abzubilden. (»Evolutionstheorie auf dem Prüfstand«, »Spektrum« Mai 2021, S. 12)

Viktor Dick, Bielefeld: Der Artikel hat einen sehr schönen Überblick gegeben und manch spannenden und nicht offensichtlichen Aspekt der Evolution aufgezeigt. An einer Stelle musste ich jedoch stutzen. Im Bereich der Kooperation werden neben kooperierenden Individuen auch die Zellen eines mehrzelligen Körpers sowie Arbeiterbienen genannt. Gerade bei diesen Beispielen ist jedoch die einzige außer der sehr problematischen Gruppenselektion genannte Lösung durch das Konzept der evolutionär stabilen Strategie (ESS) nicht erforderlich und auch nicht zielführend.

Die Gene, die das Verhalten einer Arbeiterbiene steuern, haben nur eine Möglichkeit, Einfluss auf die Häufigkeit ihrer selbst in der nächsten Generation zu nehmen: über das Überleben und die Fortpflanzung der Bienenkönigin. Gleiches gilt für Nicht-Keimbahn-Zellen eines mehrzelligen Organismus. Die Zellen eines Körpers stehen nicht miteinander in Konkurrenz, weil die sie steuernden Gene durch den gleichen Kanal in die nächste Generation gelangen und damit das gleiche Ziel verfolgen. Eine Variante eines Gens kann nur insofern besser als eine andere dafür geeignet sein, sich selbst zu vervielfältigen, als sie der Keimbahn hilft, selbst wenn die direkte Auswirkung dieser Variante außerhalb der Keimbahn stattfindet. Statt der ESS, die in vielen anderen Situationen eine angemessene Erklärung bietet, handelt es sich bei den Beispielen also einfach um einen »erweiterten Phänotyp« – ein von Richard Dawkins hierfür geprägter Begriff.



PILZE ALS SYMBIONTEN

Heutige Anbaumethoden, Klimawandel und Fungizidresistenzen verschlimmern die Zerstörungen durch Schadpilze. Pflanzenwissenschaftler Thomas Miedaner stellte die Probleme und mögliche Gegenmaßnahmen vor. (»Bedrohte Ernte«, »Spektrum« Juli 2021, S. 38)

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 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.

Roland Philipp Hofmann, Ostfildern: Angeblich sind Pilze an sich Saprobionten, verwerten also totes Material. Und wenn ein Pilz, so der Artikel, sich nicht mehr saprobiontisch verhält, dann hat er sich vom Saprobionten zum Nekrobionten oder weiter entwickelt.

In der Realität ist das nicht ihre Hauptrolle. Es gibt extrem viele Pilzarten, die zum Beispiel symbiontisch leben, das heißt in Kooperation mit einer Pflanze. Daher findet man manche Pilze nur in der Nähe bestimmter Bäume. Anstatt abgestorbenes Material zu verwerten, sorgen diese Pilze dafür, dass ihre Partnerpflanzen leben können. Deshalb wäre es vielleicht wichtig gewesen, in der Einleitung und im Fazit die andere mögliche Rolle von Pilzen, nämlich als Nährstofflieferant im Rahmen einer Symbiose, zumindest zu erwähnen.

UNVERSTÄNDLICHE ABKÜRZUNGEN

Die meisten Meteoriten enthalten Unmengen kleinster Gesteinskügelchen – mit in der Fachwelt heftig umstrittenem Ursprung. (»Das Geheimnis der Chondren«, »Spektrum« Juli 2021, S. 60)

Daniel Schiller, Köln: In diesem Artikel stolpert man über die Abkürzungen CI, CB und CAI. Diese werden nie erläutert. Während sich CI und CB dem geeigneten Leser im Rahmen des Themas »Chondren« noch erschließen mögen, bleibt die Aussage »Bei ihnen könnte es sich um CAIs handeln, aber auch Chondren kommen in Frage« komplett unverständlich.

Antwort des Redakteurs Mike Beckers:

Bei den auf S. 63 eingeführten Begriffen CI-Chondrite und CB-Chondrite wurden die Fundorte eponym: Ivuna (Tansania) und Bencubbin (Australien). Analoges gilt für eine ganze Reihe weiterer CX-Chondrite, wobei X für den jeweiligen Anfangsbuchstaben des Ortsnamens steht. Es handelt sich also um willkürliche und nicht physikalisch motivierte Bezeichnungen.

Bei den CAIs haben wir leider versäumt, darauf hinzuweisen, wofür die Abkürzung steht: Sie bezieht sich auf die ebenfalls auf S. 63 erwähnten »Kalzium-Aluminium-reichen Einschlüsse« (englisch: Ca-Al-rich inclusions).

Die Spektrum eLearningFlat



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

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

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

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



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

Die Spektrum eBookFlat



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

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

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



ROUDESIGN / BETTY IMAGES / ISTOCK

Raumfahrt mit Paella

Was Sie bei Fernreisen bedenken sollten.

Eine Kurzgeschichte von Steven Fischer

Machen Sie bloß nicht den Fehler, in die erste Welt-
raumarche zu steigen.
Was ich Ihnen jetzt sage, das erfahren Sie weder
im Reisebüro noch in den Hologrammen, die das Amt für
Kolonisierung ausspuckt, also sperren Sie die Ohren auf.
Sie können mir vertrauen.

Hören Sie, ich verstehe Sie ja. Ich war auch einmal jung.
Ein Hitzkopf voller Sehnsucht nach den Sternen und Träumen
von Galaxien, die nie ein Mensch zuvor gesehen hat.
Mit großen Augen beim Anblick des ersten Tourismusver-
treters, der in seinem strahlend neuen Schwebeschlitten
beim Raumhafen vorfährt.

Die sind clever, diese Anwerber. Seifen dich ein mit
hübschen Bildern von Welten, die noch nicht umgegraben
und ausgeweidet wurden. Planeten, die noch klares Wasser
und Bäume vorzuweisen haben. Orte, wo du deine Arme
ausbreiten kannst, ohne gleich mit einem anderen Kohlen-
stoff-Emittenten zusammenzustoßen. Welten, in denen du
diesen besonderen Jemand finden und dir ein Plätzchen in
idyllischer Landschaft reservieren kannst. Vielleicht kriegt
ihr einen Nachkommen oder zwei. Was sag' ich, macht so
viele Kinder, wie ihr wollt; dort gibt es noch keine Geburten-
beschränkung. Wie gesagt, alles ganz nach Belieben.

Sie werden eher für Mindestlohn synthetische Säfte verkaufen

Außerdem wird der Flug nicht allzu beschwerlich. Die
Reise dauert 1000 Jahre, aber Sie werden fast die ganze
Zeit verschlafen, gemütlich wie ein Kochroboter in seiner
Küche, in Ihre eigene kleine Nische gekuschelt. Ziehen Sie
nur den Deckel herunter, pumpen Sie ein bisschen Kühlflüs-
sigkeit in Ihre Adern und lassen sich bloß alle 50 Jahre kurz
für Ihren Gesundheitscheck wecken. Und dann, schon ein
paar Nickerchen später, erwachen Sie endgültig in Ihrem
höchstpersönlichen Paradies, nicht wahr?

Nicht wahr!

Jetzt kommt, was man Ihnen nicht sagt. 200 Jahre,
nachdem Sie mit Ihrer Serie von kurzen Nickerchen ange-
fangen haben, bricht eine zweite Weltraumarche zu Ihrer
schönen neuen Heimat auf. Nur ist diese Arche zwei Jahr-
hunderte nach Ihrer gebaut worden. Vollgestopft mit den
allerneuesten Wunderdingen und Supertricks. Kühlnischen
mit doppelter Beinfreiheit. Gesundheitsscanner, die so
effizient funktionieren, dass Sie das altmodische »Bitte
aufsetzen und tief einatmen« beim nächsten Check verges-
sen können. Und ein Gravitationsantrieb, der doppelt so
schnell ist wie Ihrer.

Wie bitte? Doppelt so schnell? Der Verkäufer hat
Ihnen versprochen, Ihr Raumschiff sei der letzte
Schrei? Die Gesetze der Physik sprächen dafür –
was sag' ich, garantierten –, dies sei das schnellste Stück
Titan in der Milchstraße für die nächsten 5000 Jahre? Nun
ja, vor einigen Jahrtausenden haben die Leute auch fest
geglaubt, sie hätten ein Luxusschiff gebaut, das niemals
sinken würde. Ich wette, Sie können erraten, wie das
ausgegangen ist.

Damit will ich sagen: Zu der Zeit, da Ihr alter Schrotthau-
fen auf dem Planeten WasauchimmerseinNameseinmag
ankommt, hält sich Schiff Nummer zwei dort schon
300 Jahre lang auf. Also werden Sie, statt als furchtloser
Pionier zu erwachen, eher für Mindestlohn synthetische
Säfte an die Ururenkel von Schiff zwei verkaufen.

Wie bitte? Sie sind Ingenieur von Beruf? Da ist ja nett.
Zu dumm nur, dass Ihre Ausbildung um ein Jahrtausend
veraltet ist.

Übrigens, 100 Jahre nach Schiff zwei hat sich Raum-
arche drei auf den Weg gemacht und wird demnächst
landen. Also vergessen Sie lieber den Verkaufsstand für
synthetische Säfte, denn die Neuankömmlinge haben
Ihnen 300 Jahre Weiterbildung voraus.

Wenn Sie Glück haben, können Sie genug Kleingeld
zusammenkratzen, um sich ein mobiles Verkaufswägel-
chen zu leisten. Verkaufen Sie Paella an die Leute, die
klüger waren als Sie, und an die Touristen, die noch schlau-
er sind.

Denn wenn es eine Sache gibt, die sich nicht verbessern
lässt, dann ist das eine duftende Pfanne Paella, und bei all
den Lügen, die Ihnen der Tourismusvertreter aufgetischt
hat, stimmt immerhin eines: Ihr Wunschplanet Paradies-
fürDumme hat tatsächlich verdammt wohlschmeckende
Garnelen zu bieten. Und möglicherweise, wer weiß das
schon, haben Sie die Chance, mit ein paar jungen Leuten

ins Gespräch zu kommen und ihnen auszureden, denselben Fehler zu begehen wie Sie einst.

Also vertrauen Sie mir. Stellen Sie die Pfanne hin, hören Sie auf, sich mit Paella vollzustopfen, und schmeißen Sie dieses Ticket in Ihrer Hand schleunigst in den Papierkorb. Oder noch besser: Verbrennen Sie's.

Ich weiß, ich weiß. Sie sind nicht so weit gekommen, um jetzt aufzugeben, und das Gerede eines alten Knackers reicht nicht aus, um die Traumbilder eines perfekt ausgemalten Utopiefürjedenmann zu vertreiben. Ich verstehe. Aber wissen Sie was? Heute ist Ihr Glückstag.

Sehen Sie diesen Schwebeschlitten auf der anderen Straßenseite? Der Typ, der ihn steuert, ist ein guter Freund von mir. Er betreibt sein eigenes kleines Transportunternehmen. Allerneueste Technik, superschnelles Raumschiff, mit Garantie. Für so etwas ist sogar der Gravitationsmotor altes Eisen. Der letzte Schrei: 100 Pro-

zent Singularitätsantrieb. Der bringt Sie in einem Viertel der Zeit an Ihr gewünschtes Ziel; das sind nur 250 Jahre.

Und eins können Sie mir glauben, das kann ich Ihnen hoch und heilig versprechen: Es ist ganz und gar ausgeschlossen, dass in der Zwischenzeit irgendjemand etwas noch Schnelleres erfindet!

DER AUTOR

Steven Fischer lebt als Arzt im Nordwesten der USA. Mehrere seiner Geschichten sind in »Nature« sowie in »Flash Fiction Online« und »Daily Science Fiction« erschienen.

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 564, S. 154, 2018

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, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel,

Anke Heintelmann, 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. Ingrid Horn, Dr. Michael Springer

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

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

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

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 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.



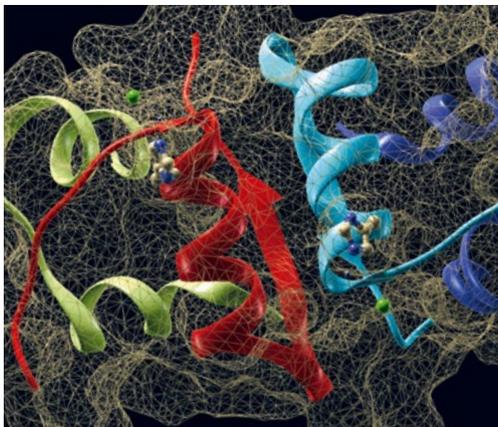
VORSCHAU



THORSTEN SPÖRLEIN / GETTY IMAGES / ISTOCK

BEDROHTE ARTENVIELFALT

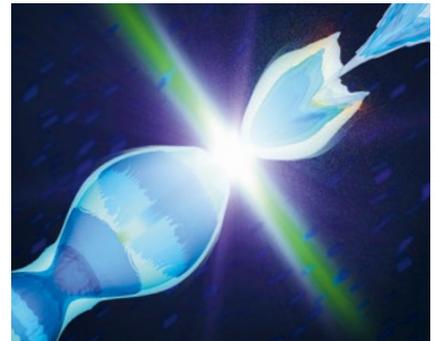
Der Mensch greift massiv in die Ökosysteme der Erde ein. Die Zerstörung der Umwelt löste nicht nur eine weltweite Klimakrise aus, sondern verursachte auch ein Artensterben in nie da gewesener Geschwindigkeit. Insekten – die als Bestäuber eine wichtige Rolle für die Welternährung spielen – verschwinden; die Lebensräume seltener Amphibien gehen zu Grunde. Auf der 15. Weltbiodiversitätskonferenz, die im Oktober 2021 in China tagt, wollen sich Wissenschaftler für den Erhalt funktionierender Ökosysteme einsetzen.



THEASIS / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIE FALTUNG VON PROTEINEN SIMULIEREN

Es gilt als kniffligstes Problem der Molekularbiologie: die räumliche Struktur von Proteinen berechnen. Computern gelingt das präziser denn je. Dies eröffnet ungeahnte Möglichkeiten in der Medizin.



F. TSINGIYU, ANUCLAS/LAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

ULTRAKOMPAKTE TEILCHENSCHLEUDERN

Mit Plasmawellen verleihen »Kiefeld-Beschleuniger« Teilchen auf wenigen Metern Energien, für die bislang Kilometer nötig waren.



KLAUS STANGE / DEUTSCHES BERGBAU-MUSEUM BOCHUM / IONAN / RUPH-UNIVERSITÄT BOCHUM / DEUTSCHES BERGBAU-MUSEUM BOCHUM / HANDICRAFTS AND TOURISM ORGANIZATION (CCTO)

MUMIEN AUS DEM SALZBERGWERK

Erst bebte die Erde, dann gab die Salzgrube nach und verschüttete die Bergmänner. 2400 Jahre später wurden die Kumpel wieder entdeckt – mumifiziert im persischen Salzberg Douzlākh. Eine Rekonstruktion von Leben und Tod der Bergleute.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
spektrum.de/newsletter

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren
und keine Ausgabe mehr verpassen!



Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten
von **Spektrum** PLUS – wie kostenlosen Downloads,
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

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

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **29** 22.07.2021

- > Die Faktoren hinter den vernichtenden Sturzfluten
- > Hubble ist wieder am Start
- > Remdesivir senkt das Sterberisiko nicht

SCHWERPUNKT FLUT

SCHWERPUNKTTHEMA: FLUT IN DEUTSCHLAND

»Es wäre völlig abwegig, Wasser in aktive Tagebaue zu leiten«

In der Ertfregion kam es zur Flutkatastrophe. Warum Tagebaue als Zwischenspeicher ungeeignet und Rückhaltebecken problematisch sind, erklärt der Hydrologe Bernd Bucher im Interview.

PALÄONTOLOGIE
Entzauberung eines Filmbösewichts

HOCHWASSER UND KLIMAWANDEL
»Die Klimamodelle haben das von Anfang an gezeigt«

BOOMENDES MAMMUTELFENBEIN
Weißes Gold aus braunem Schlamm

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

