

Spektrum

der Wissenschaft

Mathematik für die Zukunft

Zwei Forscher stellen
das Fach auf eine neue Basis

9,30 € (D/A/L) · 14,- sFr. D6179E

Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

EVOLUTION **Wie Säugetiere die Erde eroberten**
KOSMOLOGIE **Rätselhafte Radioblitze**
ARCHÄOLOGIE **Umstrittene Funde in Jerusalem**

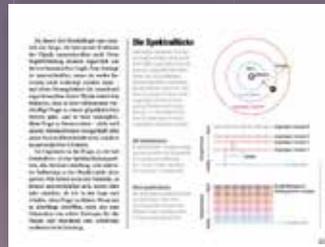


Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung.

Wählen Sie unter mehr als 400 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



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



Hier bestellen:

E-Mail: service@spektrum.de

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

Feintuning

Wenn ich vor der Kühltheke im Supermarkt stehe, schaue ich mir immer auch die Auswahl an pflanzlichen Fleischersatzprodukten an. Ich betrachte mich nicht als Vegetarier, bin mir aber bewusst, dass der Fleischkonsum in der westlichen Welt reduziert werden muss – nicht nur aus gesundheitlicher oder ethischer Sicht, sondern ebenso aus Umweltschutzgründen. Und letztlich geht es mir um den Geschmack. Warum also nicht einem Sojawurstchen oder -burger eine Chance geben? Daher teste ich regelmäßig solche Produkte, die sich tatsächlich mehr und mehr dem Original annähern. Noch merkt man den Unter-

schied beim Blindverkosten, aber in den nächsten Jahren könnte dieser durch fortgesetztes Optimieren verschwindend klein werden. Bis es allerdings ein täuschend echtes Steakimitat gibt, dürfte noch einige Zeit ins Land gehen.

Ein Käseersatz soll dagegen schon recht bald aus der Retorte kommen, wie unser Artikel ab S. 44 beschreibt: Milchproteine aus entsprechend modifizierten Mikroben können bereits im großen Maßstab in Bioreaktoren hergestellt und zu einem veganen Imitat weiterverarbeitet werden. Und sogar bestimmte pflanzliche Lebensmittel, deren Erzeugung oft wenig umweltfreundlich ist, stehen auf der Agenda. Beispiele sind der stark wasserverbrauchende Anbau von Avocado oder auch Kaffee, sofern er auf frisch gerodeten Flächen kultiviert wird. In Labors werden Zellkulturen aus den Originalfrüchten gewonnen, massenhaft vermehrt und so prozessiert, dass am Ende ein nutzbares Handelsprodukt entsteht, etwa Avocadopaste oder geröstetes Kaffeepulver. Hier ist ebenfalls ein ausführliches Feintuning der Herstellungsprozesse nötig, um den Unterschied zum Vorbild möglichst zu minimieren.

Das Resultat einer ganz anderen Art von Feintuning sehen Sie in der äußeren Erscheinung des vorliegenden Hefts. Seit unserem »Relaunch« im Herbst 2016, für den das Layout von Grund auf neu entwickelt wurde, sind nun sechs Jahre vergangen. Wie so oft stellt sich erst nach einer gewissen Zeit heraus, welche Veränderungen die Erwartungen auf Dauer erfüllen und welche nicht. Im Wesentlichen hat sich das Layout bewährt, aber in einigen Punkten kristallisierte sich doch Optimierungspotenzial heraus. Ich hoffe, die eher subtilen, aber unserer Ansicht nach wirkungsvollen Änderungen finden Ihre Zustimmung und



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

erhöhen Ihre Freude beim Lesen der Texte; wir freuen uns über Rückmeldungen an redaktion@spektrum.de.

Damit nicht genug: Wir verabschieden uns von der Rubrik »Zeitreise«, die zukunftsweisende, aber auch eher randständige oder skurrile Entwicklungen aus der Welt der Forschung vor 100 und vor 50 Jahren dokumentierte. Für die langjährige gute Zusammenarbeit bedanken wir uns bei Peter Banik von der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums, der uns die Ausschnitte aus alten Zeitschriften zur Verfügung gestellt hat.

Stattdessen präsentieren wir Ihnen nun jeden Monat wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse und Zusammenhänge in Form einer Infografik in unserer neuen Rubrik »Im Bild«. Auch zu dieser Veränderung sind wir auf Ihre Meinung gespannt.

Herzlich Ihr

In dieser Ausgabe

Peter Scholze (Foto), Dustin Clausen

Die zwei Forscher gelten als Ausnahmetalente ihres Fachs. So wurde Scholze 2018 mit der Fields-Medaille ausgezeichnet. Nun formulieren die beiden die Mathematik von Grund auf neu, wie ab S. 12 zu lesen ist.



VOLKER LAMBERT / UNI BONN

Stephen Brusatte

Der Paläontologe schildert ab S. 34, wie die Säugetiere beinahe zusammen mit den Dinosauriern untergegangen wären – und es dann doch noch knapp schafften.



Edgar Shaghoulain

Einer der Begründer der Stringtheorie, Leonard Susskind, betreute seine Doktorarbeit. Nun versucht der US-Theoretiker, einige jener abstrakten Konzepte auf unser reales Universum zu übertragen (S. 60).



3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

22 **Der erste Zweibeiner war wohl keiner**

Entstand der erste Vormensch tatsächlich vor sieben Millionen Jahren?

25 **Algebraische Geometrie**

Ein junges Paar löst ein jahrtausendealtes Problem.

28 **Genetisches Backup**

Dank einer speziellen räumlichen Anordnung sichert unser Erbgut seine Daten.

31 IMPRESSUM

SPRINGERS EINWÜRFE

32 **Umweltpolitik ohne China?**

Reduzierte Verflechtungen erschweren den Weg.

59 IM BILD

FREISTETTERS FORMELWELT

71 **Überlichtschnelle Blitze**

Wenn etwas schneller ist als das Licht, freuen sich Astronomen.

82 VORSCHAU

Unter spektrum.de/plus/ finden Sie folgende Artikel:

MATHEMATISCHE
UNTERHALTUNGEN

Acht Richtige aus elf

Von Christoph Pöppe

SCHLICHTING!

**Kristallenes Haar auf
moderndem Holz**

REZENSIONEN

FUTUR III – KURZGESCHICHTE

VERDICHTETE MATHEMATIK

12 **Neubau der Mathematik**

Nichts Geringeres als das haben sich Peter Scholze und Dustin Clausen vorgenommen. Mit dem Ansatz der verdichteten Mengen begeistern sie die Fachwelt. Von Manon Bischoff

PALÄONTOLOGIE

34 **Wie die Säugetiere die Welt eroberten**

Nur wenige Säuger überlebten die globale Katastrophe am Ende der Kreidezeit. Sie nutzten ihre evolutionäre Chance und läuteten ein neues Zeitalter ein. Von Stephen Brusatte

ERNÄHRUNG

44 **Fleisch vom Acker, Gemüse aus dem Tank**

SERIE: NACHHALTIGE ERNÄHRUNG (TEIL 2) Für etliche Nahrungsmittel könnte es bald Ersatzprodukte aus Bioreaktoren geben. Denn es ist nicht tragbar, sie weiterhin so zu erzeugen wie bisher üblich – aus ökologischen wie ethischen Gründen. Von Ralf Nestler

ATMOSPÄRENCHEMIE

52 **Blitze mit Nachwirkung**

In unmittelbarer Nähe eines Gewitters laufen zahlreiche chemische Prozesse ab. Viele davon beginnt man erst jetzt genauer zu verstehen. Von James Mitchell Crow

QUANTENKOSMOLOGIE

60 **Grenzen von Raum und Zeit**

SERIE: SCHWARZE LÖCHER (TEIL 2) Sowohl bei Schwarzen Löchern als auch beim Universum als Ganzes gibt es Regionen, in die wir nicht blicken können. Von Edgar Shaghoulian

ASTROPHYSIK

66 **Seltene kosmische Strahlungspulse**

Immer wieder ereignen sich rätselhafte Ausbrüche von Radiostrahlung am Himmel. Mit spezialisierten Teleskopen läuft die Ursachenforschung auf Hochtouren. Von Adam Mann

ARCHÄOLOGIE

72 **Graben auf dem Pulverfass**

In Jerusalem, der Stadt dreier Weltreligionen und dem Brennpunkt des Nahostkonflikts, soll die Archäologie oft das Existenzrecht Israels untermauern. Von Andrew Lawler

TITELBILD: AGSANDREW / STOCK.ADOBE.COM;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



INDIANO / GETTY IMAGES / ISTOCK

12 **Neubau der Mathematik**



BETH ZAIKEN / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2022

34 **Säugetiere**



VITTECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND

44 **Nachhaltige Ernährung**



KWASNY21 / GETTY IMAGES / ISTOCK

52 **Blitze mit Nachwirkung**



KENN BROWN, MONOLITHIC STUDIOS

60 **Schwarze Löcher**



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

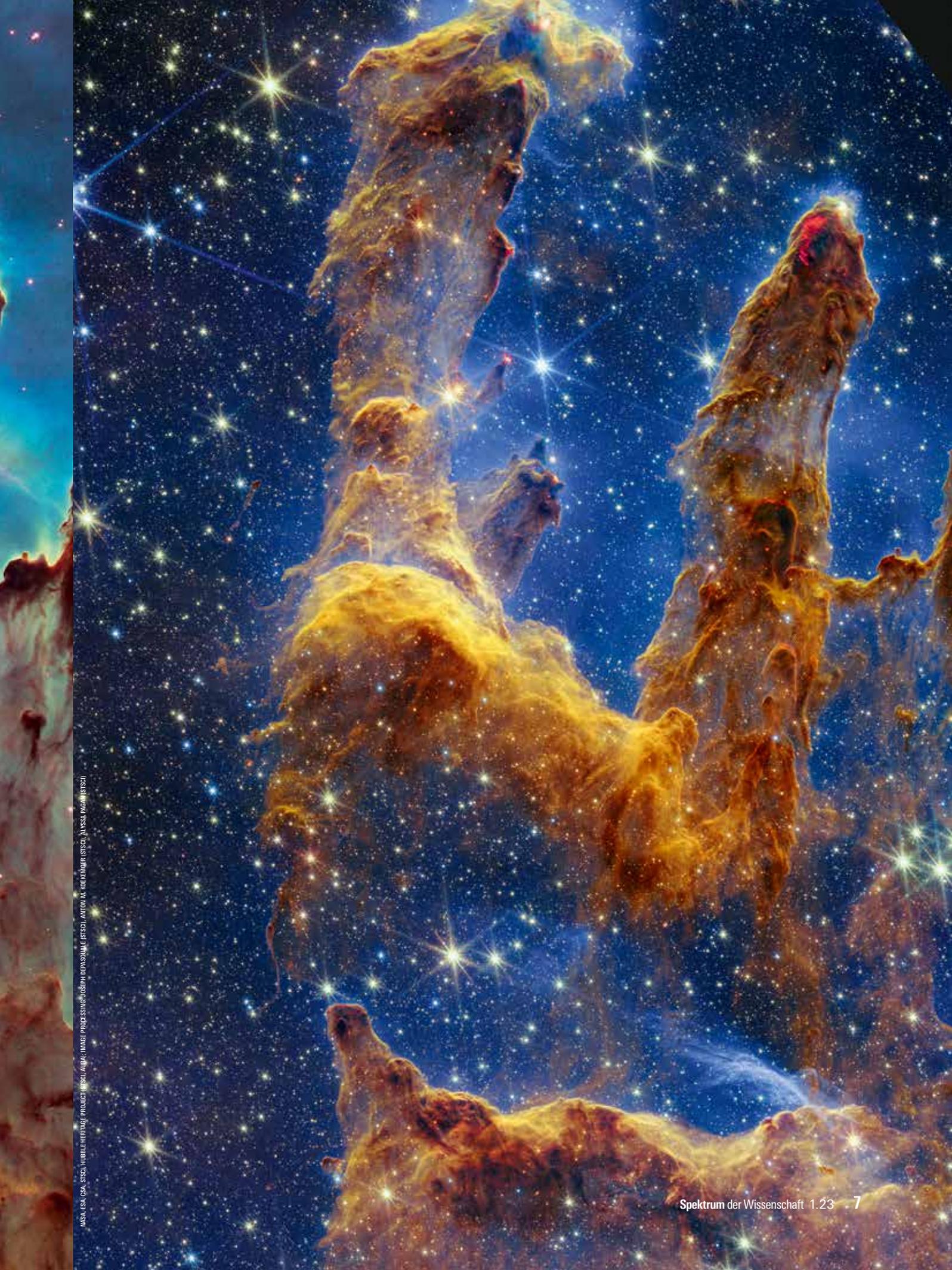
Auf Spektrum.de berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

»Säulen der Schöpfung« in neuer Pracht

Sterne entstehen in riesigen Gasnebeln. Darin gibt es dichte Wolken aus Staub und Wasserstoff, die sich unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenziehen, zu rotieren beginnen und allmählich eine Kugel hervorbringen – den späteren Stern. Ein bekanntes Sternentstehungsgebiet sind die »Säulen der Schöpfung« im etwa 6500 Lichtjahre entfernten Adlernebel. Im Jahr 1995 machte das Weltraumteleskop Hubble eine atemberaubende Aufnahme davon, die zu den bekanntesten Astro-Motiven zählt (links).

Nun legt das James-Webb-Weltraumteleskop noch einen drauf (rechts). Mit Hilfe seiner Nahinfrarotkamera hat es die »Säulen« in nie da gewesener Schärfe und Auflösung abgeleitet. Die hellen, auf Grund der Lichtbrechung gezackt erscheinenden Kugeln im Bild sind junge Sterne mit einem geschätzten Alter von einigen hunderttausend Jahren. Das karmesinrote Leuchten an der rechten Säule stammt von energiereichen Wasserstoffmolekülen.

Pressemitteilung der NASA vom 19. Oktober 2022



MASA, ESA, STSC, HUBBLE HERITAGE PROJECT (STSC/J. DAUER), IMAGE PROCESSING: JOSEPH DEPAOLIS (STSC), ANTON M. KOEDEMER (STSC), ALISSA PAGANI (STSC)

VERHALTENSFORSCHUNG

Hummeln, die mit Bällen spielen

► Hummeln zeigen ein spielerisches Verhalten: Sie rollen Kugeln durch die Gegend, und das offenbar nur »zum Spaß«. Ein Forschungsteam um Hiruni Dona von der Queen Mary University of London hat das in einer Reihe von Experimenten nachgewiesen – die erste derartige Beobachtung an Insekten.

Legen Tiere wiederholt ein Verhalten an den Tag, das ihnen keinen erkennbaren Nutzen bringt (etwa in Form von Nahrung oder höheren Fortpflanzungschancen), betrachten Wissenschaftler das als Spiel. Mit unbelebten Gegenständen zu spielen, ist bei Tieren weit verbreitet – soweit bisher bekannt, hauptsächlich unter Säugern und Vögeln. Ein solches Verhalten gilt als wichtiges Indiz dafür, dass die jeweilige Spezies empfindungsfähig ist. Auf Säugetiere und Vögel sowie Kopffüßer und Fische trifft das offensichtlich zu. Und möglicherweise ebenso auf Insekten, wie die neue Studie vermuten lässt.

Das Forschungsteam richtete Parcours ein, in denen Hummeln ungehindert zu einem Futterbereich mit Zuckerlösung gelangen konnten.

An den Seiten des Wegs platzierten die Wissenschaftler kleine bunte Holzkugeln, von denen einige am Boden befestigt waren und andere lose herumlagen. Anschließend beobachteten sie über 54 Stunden hinweg an 45 Hummeln, wie diese sich in den Parcours verhielten.

Insgesamt 910-mal rollten die Insekten Kugeln durch die Gegend, obwohl das nicht nötig war, um die Saccharose zu erreichen. Einige Hummeln wiederholten das immer wieder und bewegten die Murmeln auf verschiedene Weise. Vor die Wahl zwischen einem Parcours mit beweglichen oder mit festsitzenden Kugeln gestellt, bevorzugten sie den ersten. Nahrungsaufnahme und Kugelrollen geschahen zu verschiedenen Zeiten und unterschiedlich oft, was darauf hindeutet, dass die Tiere jeweils abweichende Beweggründe dafür hatten. Jüngere und männliche Hummeln zeigten sich besonders emsig darin, die Bälle zu bewegen.

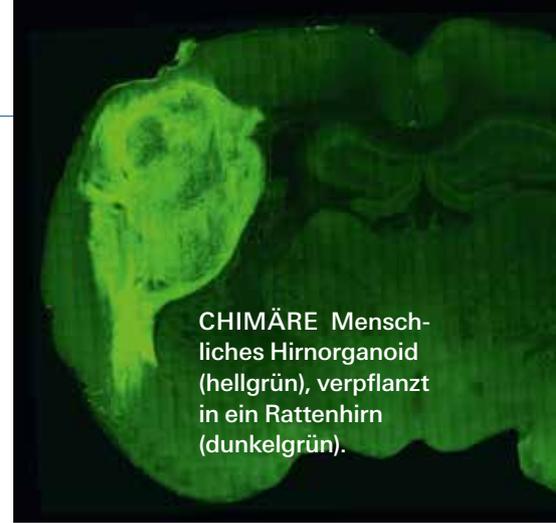
Die Forscherinnen und Forscher werten das als Hinweis auf spielerisches Verhalten. Um genauere Schlüsse zu ziehen, müsse man beispielsweise analysieren, welche Neurotransmitter beim Murmelrollen aktiviert werden.

Animal Behaviour 10.1016/j.anbehav.2022.08.013, 2022

KICKER MIT SECHS FÜSSEN Die Bildsequenz zeigt, wie eine Hummel vier Sekunden lang mit einer Murmel interagiert. Sie berührt die weiße Kugel, rollt sie hinter die gelbe und zieht dann weiter.



GARYRAGE DONA, H.S. ET AL. / DO RUMBLE REES PLAY. ANIMAL BEHAVIOUR, 2022, FIG. 2 (DOI:10.1016/J.ANBEHAV.2022.08.013) / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS ORG./LICENSES/RY/4.0/LEGALCODE)



CHIMÄRE Menschliches Hirngewebe (hellgrün), verpflanzt in ein Rattenhirn (dunkelgrün).

STANFORD UNIVERSITY

HIRNFORSCHUNG

Menschliches Hirngewebe steuert Verhalten von Ratten

► Ein Forschungsteam um Sergiu Pașca von der Stanford University hat menschliches Hirngewebe in die Denkkorgane neugeborener Ratten transplantiert. Das humane Gewebe verwuchs anschließend mit dem tierischen, tauschte Nervensignale mit diesem aus, reagierte auf Umweltreize – und steuerte das Verhalten der Tiere mit.

Ähnliche Versuche gab es schon früher, allerdings an ausgewachsenen Nagern. Die menschlichen Neurone integrierten sich dabei nur unzureichend in den tierischen Organismus, da dieser bereits fertig entwickelt war. Die neue Studie hat die Hürde nun umgangen.

So genannte Hirnorganoide, gezüchtet aus Stammzellen, sollen einmal helfen, neurodegenerative und neuropsychiatrische Erkrankungen zu behandeln. Dabei handelt es sich um millimetergroße Zellverbände, die Hirngewebe ähneln, aber meist kein Binde- und Stützgewebe sowie keine Gefäße enthalten. Pașca & Co. pflanzten menschliche Hirnorganoide in die Gehirne neugeborener Ratten ein, genauer in deren somatosensorische Kortex, die körperliche Empfindungen verarbeiten. Die transplantierten Zellen waren gentechnisch so verändert, dass sie feuerten, sobald sie mit Licht stimu-

liert wurden, das sich über Glasfasern in die Rattenhirne einstrahlen ließ.

Anschließend trainierte das Team die Nager: Leckten die Tiere immer dann an einem Trinkröhrchen, wenn blaues Licht ihr Gehirn flutete, so erhielten sie Wasser. Taten sie das hingegen bei rotem Licht, gab es keine Erfrischung. Nur Ratten mit eingepflanzten menschlichen Hirnorganoiden labten sich nach einigen Tagen bevorzugt während der Blau-Stimulation an der Tränke. Demzufolge war das implantierte Gewebe offenbar so weit ins Gehirn integriert, dass es das Verhalten der Nager steuerte. Zupften die Experimentatoren an den Tasthaaren der Ratten, feuerten die menschlichen Neurone ebenfalls; offenbar konnten sie die entsprechenden sensorischen Informationen empfangen.

Nature 10.1038/s41586-022-05277-w, 2022

ASTRONOMIE

Rekordverdächtiger Gammablitz

▶ Vor rund zwei Milliarden Jahren starb in den Tiefen des Alls ein Stern. Das geschah, wie bei sehr massereichen Sternen üblich, in einer enorm energiereichen, gleißend

hellen Explosion. Deren elektromagnetische Strahlung hat nun endlich die Erde erreicht und ist am 9. Oktober 2022 von etlichen Messgeräten aufgezeichnet worden, darunter vom NASA-Forschungssatelliten Swift. Die Strahlung kommt aus Richtung des Sternbilds Pfeil und kennzeichnet einen der hellsten und intensivsten Gammastrahlenblitze, die bisher detektiert worden sind.

Gammastrahlenblitze setzen binnen einer Sekunde so viel Energie frei wie unsere Sonne während ihrer gesamten, rund zehn Milliarden Jahre währenden Existenz. Ihre Strahlung hat eine viel kürzere Wellenlänge als sichtbares Licht und zeichnet sich somit durch eine wesentlich höhere Photonenenergie aus. Der am 9. Oktober empfangene Blitz, katalogisiert unter der Bezeichnung GRB 221009A, wies rekordverdächtige Photonenenergien von mehr als 100 Millionen Elektronenvolt auf. Er ließ sich mehr als zehn Stunden lang beobachten.

Bilder des Swift-Satelliten zeigen leuchtende Ringe um den Herkunfts-ort des Blitzes. Sie stellen »Licht-echos« dar, die entstehen, wenn die von der Explosion ausgehende Röntgenstrahlung von mikroskopisch kleinen kosmischen Staubpartikeln zur Erde gestreut wird. Nach Ansicht verschiedener Experten haben die Instrumente diese Strukturen bei GRB 221009A außergewöhnlich gut eingefangen. Der Gammastrahlenblitz

gehört zu den intensivsten derartigen Ereignissen, die bisher registriert wurden – unter anderem deshalb, weil er von einem offensichtlich sehr massereichen Stern ausging. Die Strahlungsintensität der Explosion war so hoch, dass viele Messdetektoren davon übersättigt waren, was eine Auswertung des Signals erheblich erschwert.

Pressemitteilung der NASA vom 13. Oktober 2022

NASA, ESA, JINR, YANKEE LI (PSU), JOE DEPASQUALE (STSCI)



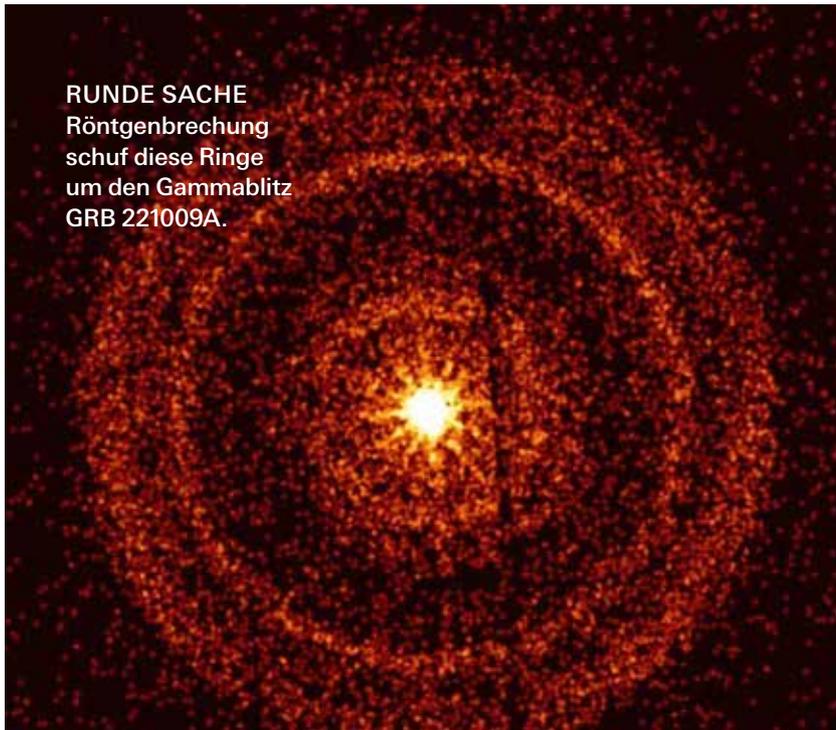
DOPPELT HÄLT BESSER
Das System Didymos-Dimorphos hat jetzt einen Zweifach-Schweif (rechts).

RAUMFAHRT

Himmelskörper abgelenkt

▶ Planmäßig ist die DART-Sonde der NASA am 27. September 2022 auf dem Asteroidenmond Dimorphos zerschellt. Dies sollte unter anderem die Möglichkeit testen, einen Himmelskörper abzulenken, der auf die Erde zu treffen droht. Der Aufprall war so stark, dass der Mond jetzt eine halbe Stunde weniger braucht, um den Asteroiden Didymos zu umrunden. Ein hervorragendes Ergebnis der Mission, denn schon rund eine Minute Differenz in der Umlaufzeit hätte als Erfolg gegolten. Weitere Folgen des Einschlags zeigen

NASA/SWIFT/A. BEARDMORE (UNIVERSITY OF LEICESTER)



RUNDE SACHE
Röntgenbrechung schuf diese Ringe um den Gammablitz GRB 221009A.

sich inzwischen auf Bildern des Weltraumteleskops Hubble: Wie die Europäische Weltraumorganisation ESA mitteilte, zieht das Didymos-Dimorphos-System mittlerweile einen Doppelschweif hinter sich her.

Seit dem Treffer hat Hubble den Asteroiden und seinen Begleiter mehrfach abgelichtet, um zu dokumentieren, wie sich die durch den Zusammenstoß entstandene Staub- und Schuttwolke weiterentwickelt. Das Material breitete sich demnach wie erwartet aus, während zugleich seine Helligkeit abnahm: Weit verteilter Schutt reflektiert Licht schwächer als eine dichtere Wolke. Überraschend sei allerdings, dass sich daraus ein Doppelschweif bildete, schreiben die beteiligten Forscher und Forscherinnen – auch wenn man dieses Phänomen bereits bei Kometen und aktiven Asteroiden beobachtet habe.

Laut den vorliegenden Daten entstand der Doppelschweif zwischen dem 2. und dem 8. Oktober, also nicht unmittelbar nach dem Einschlag der Sonde. Der von der Erde aus gesehen nördliche Schweif ist demnach neu. Wie die verschiedenen beobachtbaren Eigenschaften des Auswurfmaterials miteinander zusammenhängen, ist noch unklar. Ein tieferer Blick in die Messdaten soll hier genauere Aufschlüsse bringen.

Die DART-Sonde war mit knapp 22 000 Kilometer pro Stunde auf Dimorphos geprallt. Bereits kurz nach der Kollision zeigten Aufnahmen der Weltraumteleskope JWST und Hubble sowie zahlreicher irdischer Observatorien einen beeindruckenden Schweif aus Trümmern und Staub, den der Einschlag erzeugt hat. Wegen der Gravitationskräfte, die zwischen Dimorphos und Didymos wirken, wird sich überdies die Bewegungsrichtung des Asteroidenpaars als Ganzes verändern. Wie genau, möchten die Wissenschaftler in den kommenden Wochen und Monaten untersuchen.

Pressemitteilung der ESA vom 20. Oktober 2022



KEIN ZWERG
Dieser Mondfisch wog fast drei Tonnen.

ATLANTIC NATURALIST ORG

BIOLOGIE

Riesiger Mondfisch

▶ Vor der Küste der Azoreninsel Faial ist ein Mondfisch gefunden worden, der einen neuen Rekord aufstellt: Es handelt sich um den schwersten bisher bekannten Knochenfisch. Das berichten der Meeresforscher José Nuno Gomes-Pereira von der Atlantic Naturalist Association Portugals und sein Team.

Mondfische (Molidae) gehören zu den Knochenfischen und sind unförmige Meeresbewohner, die mit ihren hochovalen und seitlich abgeflachten Körpern wie paddelnde Köpfe wirken. Sie sind eher schlechte Schwimmer, die sich mit der Strömung treiben lassen. Vor deutschen Küsten erscheinen sie selten; manchmal gelangen sie in die Ostsee, wo sie wegen Nahrungsmangels und brackigen Wassers aber nur schlecht überleben können.

Ein besonders großes und schweres Exemplar trieb im Dezember 2021 tot in den Gewässern vor Faial. Nach der Entdeckung des Kadavers wurde ein Schiff herbeigerufen, das ihn an Bord hievte. An Land folgte die Vermessung: Das über 3,5 Meter lange Tier, das der seltenen Spezies *Mola alexandrini* angehörte, wog 2744 Kilogramm. Ein neuer Weltrekord, den im Fischreich bislang nur Knorpelfische wie der Walhai übertreffen. Dieser erreicht mehr als die doppelte Körperlänge und bringt bis zu 20 Tonnen auf die Waage.

Woran der Mondfisch starb, ist unbekannt. An seinem Kopf hatte er

eine Wunde mit Farbresten, die auf eine Kollision mit einem Schiff hindeuten könnte. Es ließ sich jedoch nicht ermitteln, ob die Verletzung vor oder nach dem Tod eintrat.

Journal of Fish Biology 10.1111/jfb.15244, 2022

GEOWISSENSCHAFTEN

Höchste bisher beobachtete Vulkaneruption

▶ Die Eruption des pazifischen Untersee-Vulkans Hunga Tonga-Hunga Ha'apai am 15. Januar 2022 war eine der gewaltigsten, die Menschen jemals aufgezeichnet haben. Nun zeigt sich: Sie verursachte die höchste bislang gemessene Aschewolke. Messungen von Simon Proud von der University of Oxford und seinem Team zeigen, dass der Explosionspiz bis in die Mesosphäre vordrang – die mittlere der fünf



BLICK VON OBEN Die Eruptionswolke des Hunga Tonga.

SIMON PROUD / UN OXFORD; HALSPACE NEWS / JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY

Schichten der Erdatmosphäre. Mit Hilfe der Daten dreier geostationärer Wettersatelliten konnten Proud und seine Arbeitsgruppe den Weg der Eruptionswolke verfolgen.

Während des Ausbruchs zeichneten die Satelliten alle zehn Minuten Bilder auf, die es erlauben, die Ausbreitung der Wolke sehr genau nachzuvollziehen. Laut diesen Aufnahmen erreichte sie an ihrem höchsten Punkt etwa 57 Kilometer. Das ist deutlich mehr als bei vergleichbaren Vulkanausbrüchen zumindest der vergangenen 50 Jahre: Am Pinatubo auf den Philippinen 1991 waren es 40 Kilometer, beim Ausbruch des El Chichón in Mexiko 1982 »nur« 31 Kilometer. Damit hat der Hunga Tonga-Hunga Ha'apai den ersten Nachweis geliefert, dass vulkanisches Eruptionsmaterial durch die Stratosphäre hindurch direkt bis in die Mesosphäre gelangen kann.

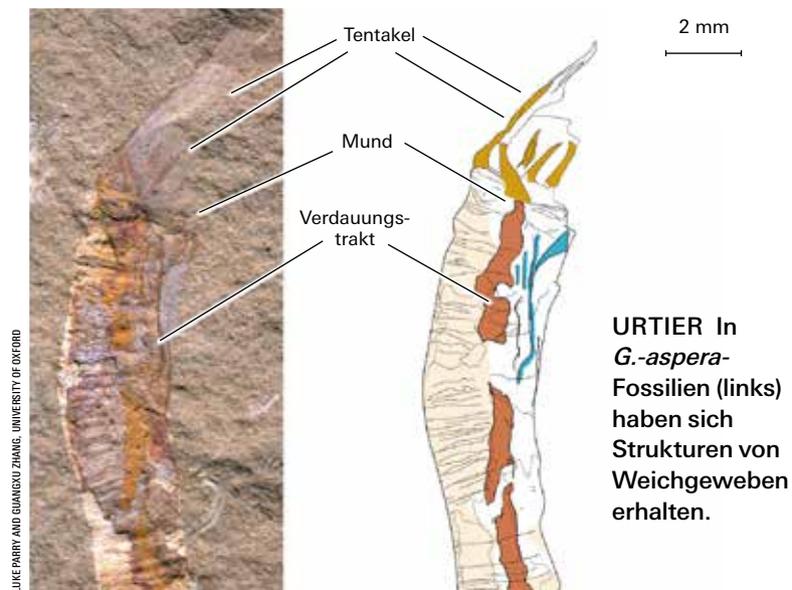
Als Nächstes wollen die Wissenschaftler klären, welche Faktoren dazu beigetragen haben, dass die Wolke so hoch aufsteigen konnte. Dass der Ausbruch einen größeren Einfluss auf das Wetter oder gar das Klima hatte, ließ sich nicht nachweisen. Die geschätzten 400 000 Tonnen Schwefeldioxid, die dabei in die Atmosphäre gelangten, reichten hierfür offenbar nicht aus. Der Pinatubo setzte seinerzeit zirka 50-mal mehr Schwefeldioxid frei und sorgte für eine leichte Absenkung der globalen Durchschnittstemperatur.

Science 10.1126/science.abo407, 2022

PALÄO BIOLOGIE

Röhre mit Fangarmen

Im südwestlichen China hat ein Forschungsteam um Guangxu Zhang von der chinesischen Yunnan University außergewöhnlich gut erhaltene Fossilien aus dem Zeitalter des Kambriums entdeckt. In den versteinerten Überresten sind harte



Schalen und Weichgewebe von damaligen Tieren konserviert. Die Überbleibsel erlauben es, zu rekonstruieren, wie die Wesen zu Lebzeiten ausgesehen haben – was bei einer derart lange zurückliegenden Zeit bemerkenswert ist.

Die Fossilien aus der chinesischen Provinz Yunnan datieren auf ein Alter von etwa 514 Millionen Jahren. Sie stammen somit aus dem Kambrium. Von Tieren jener Zeit haben sich in der Regel nur die harten Teile erhalten, sprich kalziumhaltige Schalen und Skelettelemente oder Körperhüllen aus Chitin beziehungsweise Knorpel. Denn wenn überhaupt, versteinern vor allem diese, während die Weichgewebe normalerweise rasch zerfallen und anschließend nicht mehr erkennbar sind. In den meisten Fällen lässt sich daher kaum sagen, wie kambrische Tiere zu Lebzeiten ausgesehen haben.

Bei den neu entdeckten fossilen Überresten ist das anders. Sie entstanden in einer sauerstoffarmen Umgebung, in der es offensichtlich kaum Bakterien gab, die üblicherweise das Weichgewebe zersetzen. Deshalb sind in ihnen nicht bloß Skelettteile, sondern auch fleischige Strukturen konserviert. Es handelt sich um die Überbleibsel von vier Meerestieren der Spezies *Gangtoucunia aspera*.

Wie die Versteinerungen zeigen, besaßen diese Wesen eine röhrenförmige Schale, die am Grund festsaß und aus deren oberem Ende ein Mund herausragte. Letzterer war von einem Kranz aus glatten, unverzweigten Tentakeln umgeben. Wahrscheinlich fingen die Tiere damit Beute – zum Beispiel kleine Gliederfüßer. Ihr Darm endete blind, hatte also keine separate Austrittsöffnung: Der Mund war zugleich After. Erkennen lässt sich zudem, dass der Verdauungstrakt in Längsrichtung unterteilt war.

Gangtoucunia aspera verfügte damit über Merkmale, wie man sie von heutigen Nesseltieren kennt, zu denen Quallen, Seeanemonen und Korallen zählen. Besonders auffällig ist die Ähnlichkeit zu Schirmquallen, die im Larvenstadium einen »Scyphopolypen« ausbilden – einen am Grund festhaftenden Polypen mit Rumpf, Mund, Tentakelkranz und untergliedertem Verdauungsraum. Bei den kambrischen Tieren stülpten sich Mund und Tentakel aus der röhrenförmigen Körperschale, ließen sich bei Gefahr aber wahrscheinlich einziehen. Die Schale selbst bestand aus Kalziumphosphat, einem Mineral, das auch in heutigen Zähnen und Knochen zu finden ist.

Proceedings of the Royal Society B 10.1098/rspb.2022.1623, 2022



VERDICHTE MENGEN

Neubau der Mathematik

Das Fach neu aufrollen: Nichts Geringeres haben sich Peter Scholze und Dustin Clausen vorgenommen. Mit einem revolutionären neuen Ansatz begeistern sie die Fachwelt.

» spektrum.de/artikel/2076183



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



BACKEN NACH REZEPT Möchte man ein Objekt, etwa einen Donut, auf seine Bestandteile hin untersuchen, kann man ein Stück herausschneiden und es genau analysieren. Das ist die herkömmliche Herangehensweise von Topologen. Die verdichtete Mathematik liefert hingegen das Rezept und die benötigten Zutaten, was vieles erleichtert.

AUF EINEN BLICK

Mathematik der Staubwolken

- 1** Topologische Räume zählen zu den Grundbausteinen der Mathematik: Ohne sie könnte man sich die moderne Analysis, Zahlentheorie und Geometrie kaum vorstellen.
- 2** Doch zwei junge Forscher, Peter Scholze und Dustin Clausen, sind mit dem Konzept unzufrieden. Denn manchmal führen die abstrakten Räume zu hartnäckigen Problemen.
- 3** Daher entwerfen die beiden Wissenschaftler eine andere Art der Mathematik, die auf völlig neuen, staubwolkenartigen Objekten fußt – und ernten dafür Anerkennung.

»Das ist falsch«, durchdringt es die Stille. Der Kreidestaub tanzt in den Lichtstrahlen, die sich ihren Weg durch die imposanten Buntglasfenster bahnen. In dem mit dunklen Holzvertäfelungen gesäumten Hörsaal in Bonn blicken etwa ein Dutzend Studierende auf und starren an die Leinwand. Quietschend kritzelt der Vortragende dort kryptische Zeichen an eine Tafel – und stockt. Im knapp 800 Kilometer entfernten Kopenhagen kratzt er sich am Kopf und fährt mit seinem Finger das zuletzt Geschriebene entlang.

»Eigentlich hatte ich mir dazu etwas überlegt ...« Wieder hält er inne. Man könnte regelrecht eine Stecknadel fallen hören. In der ersten Reihe sitzt der Störenfried, er ist dem Vortragenden zum Verwechseln ähnlich: Mitte 30, lange, dunkle Haare, große Statur, schlanke Figur. Beide heben sich kaum von den anwesenden Studierenden ab. Und doch sind sie die Professoren – und zudem keine Unbekannten: Dustin Clausen hält die Vorlesung in der Universität Kopenhagen, während Peter Scholze ihm mit den anderen Zuhörern in Bonn aufmerksam lauscht.

»So stimmt es nicht«, sagt Scholze und lehnt sich zurück. Dann platzt es aus ihm heraus, welche Einschränkungen nötig sind, damit Clausens Aussage korrekt wird. Dieser nickt: »Ich muss kurz darüber nachdenken.« Wieder ein paar Momente Stille. »Okay, ich bringe es später in Ordnung«, schließt er und setzt den Vortrag fort: Definition, Satz, Beweis.

Wer erwartet hat, in der Mathematikvorlesung Zahlen anzutreffen, wird enttäuscht. Über 90 Minuten stellt Clausen grundlegende Konzepte aus der komplexen Analysis vor – ein Thema, das fester Bestandteil des Bachelorstudiums der Mathematik ist. Die Studierenden wirken allerdings nicht, als hätten sie ihr Studium gerade erst begonnen. Im Gegenteil, viele von ihnen promovieren schon oder sind Postdocs. Tatsächlich verfolgen online auch Professoren den Vortrag.

Die Forscher entwickeln die Konzepte oft erst, kurz bevor sie diese präsentieren

Der Grund für ihr Interesse: Die Dozenten, Scholze und Clausen, krepeln gerade große Teile der Mathematik um. In der hybriden Vorlesung, die abwechselnd von Scholze in Bonn und Clausen in Kopenhagen gehalten wird, wenden die Forscher ihre Konzepte auf die komplexe Analysis an – und zeigen, wie man mit den neuen Grundbausteinen etablierte Ergebnisse reproduzieren kann.

»Es ist faszinierend, dem Fortschritt zu folgen«, so der Mathematiker Peter Woit in seinem Blog. Die Fachwelt ist mehr als gespannt, was die zwei Wissenschaftler hervorbringen werden. Sie gelten als Hoffnungsträger des abstrakten Fachs.

Trotz ihrer ähnlichen äußeren Erscheinung scheinen die beiden Charaktere recht unterschiedlich. Clausen wirkt extrovertiert und ist zu Scherzen aufgelegt. Bei Konferenzen schätzen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer seine oftmals unterhaltsamen Präsentationen, wie die Mathematikerin Mura Yakerson von der ETH Zürich in ihrem Podcast »Math-Life-Balance« erzählt. Clausen ist nicht der Einzige in seiner Familie, der über großes mathematisches Talent verfügt, sein Großvater John Tate (1925–2019) war der Fachwelt ebenfalls bekannt. Dieser erhielt unter anderem den Abelpreis, eine Art Nobelpreis des Fachs.

Dass sein Opa mehr als nur »irgendein« Wissenschaftler war, wurde Clausen erstmals bewusst, als er als Schüler an einem Mathematik-Sommercamp der Boston University teilnahm. Einer der Organisatoren, ein sonst selbstsicherer Professor, wurde plötzlich sichtlich nervös, als John Tate seinen Enkel dort besuchte und den Vorträgen lauschte.

Ungewollt im Rampenlicht

Der eher schüchtern erscheinende Scholze zählt hingegen zu den wenigen Mathematikern, die auch außerhalb der Fachwelt bekannt sind. In den letzten Jahren stand er dank seiner herausragenden Leistungen vermehrt im Rampenlicht, so berichteten etwa »Der Spiegel« und »Bild« über ihn. Die große Bühne behagt ihm allerdings nicht allzu sehr: Trotz vielfältiger Anfragen lehnte er TV-Auftritte bisher beharrlich ab.

Während der Vorlesung ist von dieser Scheu nichts mehr zu merken. Scholze zögert nicht, seinem Kollegen Nachfragen zu stellen oder auf Unstimmigkeiten hinzuweisen. Zwischen beiden entwickelt sich dann eine kurze Diskussion, der die Anwesenden stumm – fast schon ehrfürchtig – lauschen. Anders, als man es von den meisten Veranstaltungen an der Universität gewohnt ist, gibt es hier kein vorgefertigtes Skript, an dem sich die zwei Dozenten entlanghangeln. Tatsächlich entwickeln sie manche Konzepte erst, kurz bevor sie diese präsentieren. »Ich hatte keine Ahnung, worüber Dustin heute sprechen würde«, erzählt Scholze nach der Vorlesung.

Die Idee für die hybride Veranstaltung entstand, weil beide eine Einführung in die komplexe Analysis auf Basis ihrer neuen Theorie geben wollten. Deshalb beschlossen sie kurzerhand, es zusammen zu machen – »spätestens seit der Corona-Pandemie ist es nicht mehr ungewöhnlich, Vorlesungen digital abzuhalten«, so Scholze. Und für die Studierenden sei es abwechslungsreich, zwei verschiedenen Personen bei der Entwicklung ihrer Gedanken zu folgen.

Die komplexe Analysis ist nicht das einzige Gebiet, das den neuen Konzepten von Scholze und Clausen zum Opfer fällt. Tatsächlich wirken sich ihre Ansätze auf die Geometrie, die Zahlentheorie und die Funktionalanalysis – und wahrscheinlich noch weitaus mehr Bereiche – aus. Erst kürzlich teilte ein japanischer Kollege Scholze mit, dass er auf dem Gebiet der dynamischen Systeme (das der Physik nahesteht und etwa Planetenbahnen be-

Der große Satz von Fermat

Auf den ersten Blick sieht das Problem recht einfach aus: Es dreht sich um die Frage, ob die Gleichung $x^n + y^n = z^n$ ganzzahlige, positive Lösungen x , y und z besitzt.

Für $n = 1$ ist sie immer erfüllt: Egal, wie man die Werte für x und y wählt, z wird stets ein positives, ganzzahliges Ergebnis sein, zum Beispiel: $3 + 6 = 9$. Bei $n = 2$ wird es schon etwas kniffliger, denn die Gleichung ist dann quadratisch: $x^2 + y^2 = z^2$. Wenn x und y ganzzahlige Werte haben, muss das nicht notwendigerweise für z gelten, etwa ergibt für $x = 1$ und $y = 2$ die Formel $1^2 + 2^2 = 5$ – und 5 ist keine Quadratzahl. Das heißt, es gibt zwar eine Lösung für z (die Wurzel aus 5), die ist aber nicht ganzzahlig. Dennoch findet man Ausnahmen, für welche die quadratische Gleichung doch ein passendes Ergebnis hat, zum Beispiel: $4^2 + 3^2 = 25 = 5^2$.

Das lässt sich geometrisch interpretieren, ganz im Sinne von Pythagoras, dessen berühmte Formel Schülerinnen und Schülern in der Mittelstufe begegnet: Wenn $x^2 + y^2 = z^2$ ganzzahlige Lösungen x , y und z besitzen, dann gibt es rechtwinklige Dreiecke, deren Seitenlängen x , y und z ebenfalls ganzzahlige Werte haben. Und wie sich herausstellt, gibt es davon unendlich viele.

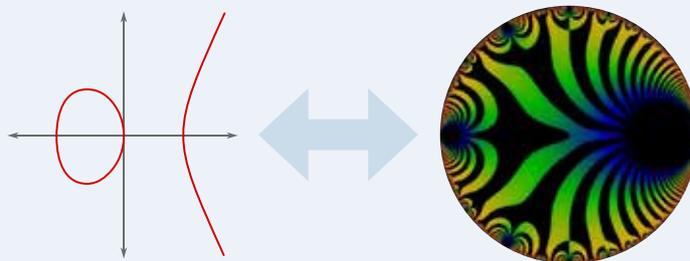
Sobald man die Gleichung aber für $n = 3$ betrachtet, kann man für $x^3 + y^3 = z^3$ erstaunlicherweise keine einzige ganzzahlige Lösung mehr finden. Das bedeutet, ein Würfel mit ganzzahligen Seitenlängen z lässt sich nicht in zwei weitere Würfel aufteilen, die ebenfalls ganzzahlige Seitenlängen (x und y) besitzen. Gleiches gilt für alle weiteren Werte von n .

Der französische Gelehrte Pierre de Fermat (1607–1665) erkannte das schon früh – und behauptete in einer Randnotiz, das auch belegen zu können. In einem Buch des antiken Wissenschaftlers Diophantos von Alexandria notierte er auf Latein: »Ich habe hierfür einen wahrhaft wunderbaren Beweis entdeckt, doch ist dieser Rand hier zu schmal, um ihn zu fassen.« Es war nicht das erste Mal, dass Fermat das tat. Tatsächlich hinterließ er zahlreiche ähnliche Hinweise an anderen Stellen. Alle übrigen konnte die Fachwelt nachträglich beweisen.

Davon überzeugt, dass dieser Beweis ebenfalls einfach zu realisieren sei, versuchten sich etliche Mathematikerinnen und Mathematiker, darunter namhafte Größen wie Leonhard Euler oder Ernst Eduard Kummer, daran – und scheiterten. Denn wie in dem abstrakten Fach üblich, lässt sich ein Problem nicht notwendigerweise leicht lösen, nur weil es einfach zu formulieren ist.

Es dauerte mehr als 350 Jahre, bis das Rätsel geknackt wurde. Der Geniestreich gelang Andrew Wiles 1994. Seine Arbeit schlug hohe Wellen: Wiles entwickelte Methoden, die zu weiteren bahnbrechenden Entdeckungen in dem Bereich führten. Dafür wurde er 2016 mit dem Abelpreis geehrt.

Für den Beweis muss man die Algebra, die man aus der Schule kennt, verlassen und in verzweigtere mathematische Gebiete eindringen. Gerhard Frey stellte 1984 die Vermutung auf, dass man aus den Lösungen x , y und z der Gleichung $x^n + y^n = z^n$ für $n > 2$ eine seltsame Art von Kurve konstruieren könnte: eine elliptische Kurve, für die es allerdings keine Darstellung als Modulform gebe – so nennt man eine höchst symmetrische Funktion, die im Reich der komplexen Zahlen (mit Wurzeln aus negativen Werten) existiert.



JEDE ELLIPTISCHE KURVE (links) besitzt eine dazugehörige Modulform (rechts).

Eine andere Vermutung besagt jedoch, dass sich jede elliptische Kurve als Modulform darstellen lässt. Wenn man also beide Hypothesen beweisen würde, hätte man gleichzeitig gezeigt, dass $x^n + y^n = z^n$ für $n > 2$ keine ganzzahligen Lösungen besitzt – und damit Fermats großen Satz bestätigt.

1986 konnte der Mathematiker Ken Ribet den Verdacht von Frey verifizieren. Also blieb nur noch der zweite Teil offen: Man musste zeigen, dass jede elliptische Kurve eine dazugehörige Modulform hat. Wiles gelang es Mitte der 1990er Jahre, auch diese Lücke zu schließen.

Eine Frage bleibt dabei aber offen: Fermat konnte vor mehr als drei Jahrhunderten nichts von den mathematischen Zusammenhängen gewusst haben, die Wiles und Ribet in ihrer Veröffentlichung genutzt haben. Elliptische Kurven und Modulformen waren damals unbekannt. Hatte sich der Gelehrte mit der Randnotiz einen Scherz erlaubt? Oder hatte er nur geglaubt, einen Beweis gefunden zu haben, und sich verrechnet? Es gibt eine dritte Möglichkeit: Eventuell existiert eine wesentlich einfachere Beweismethode, die bisher noch niemand anderem eingefallen ist.

LINKS: YASSINE MRABET (COMMONS WIKIMEDIA ORIGINALFILE/ECCURVES-3 SVG / CC BY-SA 3.0)
 RECHTS: LUIS SVEPSTAS (COMMONS WIKIMEDIA DISCRIMINANT_REAL_PARR.PEGI / CC BY-SA 3.0)
 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/BY-SA/3.0/LEGALCODE); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

schreibt) auf ähnliche Strukturen wie jene gestoßen sei, die Clausen und Scholze eingeführt haben.

Der Grund, warum die Arbeit der zwei Forscher so weitreichende Auswirkungen hat und von Fachleuten mit enormer Neugier betrachtet wird: Sie ersetzen ein fundamentales mathematisches Objekt durch eine völlig neue Größe.

Beide sind von der Idee überzeugt und halten damit nicht hinter dem Berg. Dennoch treffen sie kaum auf Widerstand – im Gegenteil, die meisten Kollegen scheinen von dem Ansatz sehr angetan. »Ich denke, viele haben während ihrer Arbeit gespürt, dass man etwas Neues braucht«, vermutet Clausen. Zudem hat Scholze einen hervorragenden Ruf. Trotz seines jungen Alters hat er bereits mehrere nützliche Konzepte etabliert, weshalb ihm seine Kolleginnen und Kollegen Vertrauen entgegenbringen. Daher gab es bis jetzt nur wenige Mathematiker,

die der neuen Theorie gegenüber Bedenken äußerten. Diese drehten sich um die Frage, inwiefern der Ansatz sich tatsächlich eignet, um spezielle Probleme zu beschreiben. Doch selbst die kritischsten Stimmen versäumen es nicht, ihre Faszination über das zu äußern, was die beiden Forscher erreichen könnten.

Clausen und Scholze vertreten die Meinung, dass topologische Räume, eine der grundlegendsten Strukturen des Fachs, nicht gut genug geeignet sind, um auf ihrer Grundlage Mathematik zu betreiben. Deshalb schlagen sie ein – aus ihrer Sicht – besseres Konzept vor, auf dem sie die abstrakte Disziplin aufbauen wollen. Um zu verstehen, was die zwei Wissenschaftler an topologischen Räumen stört, muss man sich dem zugehörigen Fachgebiet zuwenden, der Topologie.

Für anschauliche Erklärungen des Bereichs zieht man meist Gebäck heran. So sind für Topologen ein Donut und

0,999... = 1

Schon früh lernen wir, dass sich Zahlen auf verschiedene Arten darstellen lassen. Man startet mit dem Zählen der Finger, zieht dann aber eine etwas formellere Notation heran. Unter anderem gibt es römische, indisch-arabische und die in der westlichen Welt verbreiteten arabischen Ziffern. Zudem lernen wir, rationale Zahlen als Brüche oder als Dezimalzahlen auszudrücken. Schnell stellt man fest, dass die Dezimaldarstellungen einiger Bruchzahlen unendlich lang sind, etwa bei $\frac{1}{3}$. Allerdings sind die nicht endenden Ziffern hinter dem Komma nicht vollkommen willkürlich, sondern fangen ab einem bestimmten Punkt an, sich zu wiederholen, zum Beispiel: $x = 0,142857\ 142857\dots$

Anders verhalten sich hingegen so genannte irrationale Zahlen wie π oder $\sqrt{2}$, die unendlich viele Nachkommastellen haben, ohne dass ein periodisches Muster auftritt. Sie lassen sich insbesondere nicht als Bruchzahl ausdrücken. Um sie exakt darzustellen, wählt man daher ein Symbol, denn eine Dezimalschreibweise ist im-

mer nur eine Näherung an den eigentlichen Wert.

Zu den rationalen Zahlen gehören auch Beispiele wie 0,999...; 0,8999...; 0,7999... und so weiter, die mit einer unendlich langen Reihe von Neunen enden. Welchen Brüchen entsprechen sie? Überraschenderweise stimmen sie exakt mit der nächsten Rundung aller Neunen überein.

Eine einfache Erklärung ist folgende: Wenn man $\frac{1}{3}$ und die entsprechende Dezimalzahl 0,333... mit drei multipliziert, erhält man die Ergebnisse $1 (\frac{1}{3} \cdot 3)$ und 0,999... ($0,333\dots \cdot 3$). Daher müssen Eins und 0,999... gleich sein.

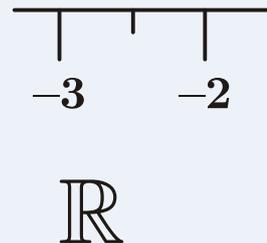
Der Sprung zwischen den Notationen führt allerdings zu Skepsis. Doch es gibt eine ganze Reihe weiterer Beweise, die belegen, dass 0,999... exakt eins ist. Einer davon ist folgender: Man schreibt die periodische Zahl in der Dezimalschreibweise bis zur n -ten Stelle hinter dem Komma aus: $9 \cdot \frac{1}{10} + 9 \cdot \frac{1}{100} + 9 \cdot \frac{1}{1000} + \dots + 9 \cdot 10^{-n}$. Nun lässt sich die 0,9 ausklammern, da sie vor jedem Summanden erscheint. Damit erhält man: $0,9 \cdot (1 + 10^{-1} + 10^{-2} + \dots + 10^{n-1})$. Anschließend schreibt man 0,9 als $1 - 10^{-1}$ um, damit eine schönere Formel herauskommt, die

nur die Zahlen 10 und 1 enthält: $(1 - 10^{-1}) \cdot (1 + 10^{-1} + 10^{-2} + \dots + 10^{n-1})$. Für eine solche Art von Gleichung haben Mathematikerinnen und Mathematiker bereits vor mehreren hundert Jahren eine Lösung gefunden, nämlich: $1 - 10^{-n}$.

Wenn man die volle periodische Zahl 0,999... betrachtet, deren Neunen niemals enden, dann wird n unendlich groß. In diesem Fall konvergiert der Term 10^{-n} zu null. Die Lücke, die zwischen 0,999...9 und 1 geklafft hat, wird in die Unendlichkeit verschoben.

Das ist nur einer von zahlreichen verschiedenen Beweisen, die belegen, dass 0,999... gleich 1 ist – ebenso wie $0,8999\dots = 0,9$; $0,7999\dots = 0,8$ und so weiter. Tatsächlich kann man unendlich viele Beispiele für Zahlen finden, die nicht nur eine Dezimaldarstellung besitzen, sondern zwei.

KONTINUUM
Die reellen Zahlen spannen den Zahlenstrahl lückenlos auf.



ein Bagel identisch (beide haben ein Loch), unterscheiden sich jedoch von einer Brezel (mit drei Löchern) oder einem Brötchen (kein Loch). Denn in der Topologie geht es darum, Figuren möglichst grob zu sortieren. Man identifiziert die globalen Eigenschaften eines Körpers und ignoriert lästige Details. Ein Teig lässt sich beliebig kneten und verformen – solange man ihn nicht zerreißt oder zusammenklebt, bleibt das ursprüngliche Objekt (für Topologen) unverändert. Geometer haben da mit Sicherheit eine andere Meinung.

Ziel der abstrakten Disziplin ist es, geeignete Parameter zu finden, um Figuren voneinander zu unterscheiden. Für zweidimensionale Oberflächen kann das zum Beispiel die Anzahl an Löchern sein: Alle Objekte mit der gleichen Lochzahl werden als identisch angesehen. Doch in mehr Dimensionen wird es schwieriger – beginnend mit der Frage, wie ein hochdimensionales Loch aussieht. Daher sucht man nach algebraischen Größen wie Zahlen, Matrizen, Gruppen oder Ähnlichem, die mit einer Figur zusammenhängen, und unter erlaubten Verformungen ebenfalls unverändert bleiben (oder auf ganz bestimmte Art transformieren).

Unter den Grundbausteinen aufräumen

Die grundlegendsten Bausteine der Disziplin sind topologische Räume. In der Mathematik entsprechen Räume einer Menge aus Punkten. Zum Beispiel enthält eine Kugel alle Punkte, die innerhalb eines festen Abstands vom Mittelpunkt entfernt sind. Wenn man zwei dieser Punkte kennt, kann man sogar deren Distanz bestimmen.

Topologische Räume sind hingegen allgemeiner gefasst: Man muss den Punkten nicht zwangsweise einen genauen Abstand zuordnen können, sondern lediglich definieren, welche sich halbwegs nah zueinander befinden. Das bietet den Vorteil, dass man sie verformen kann, solange man nicht ihre grundlegende Struktur ändert: Nahe gelegene Punkte müssen sich nach der Transformation immer noch in der gleichen Umgebung befinden. Zudem ermöglichen topologische Räume Konzepte wie Nähe für Objekte zu definieren, die keine Zahlen sind.

Mit solchen Strukturen arbeiten Mathematikerinnen und Mathematiker schon seit mehr als 100 Jahren – und sie tauchen inzwischen in fast jedem Gebiet auf. Ein Beispiel dafür ist die Analysis, der wir durch Kurvendiskussionen bereits in der Schule begegnen. Eigentlich geht

Spätestens seit seiner Masterarbeit gilt Scholze als mathematisches Wunderkind

es in dem Fachgebiet aber darum, Funktionen zwischen topologischen Räumen zu untersuchen. Und nun behaupten die beiden Mittdreißiger Scholze und Clausen, man solle von diesem Konzept ablassen und stattdessen andere Objekte als Basis verwenden: nämlich die von ihnen entwickelten »verdichteten Mengen«.

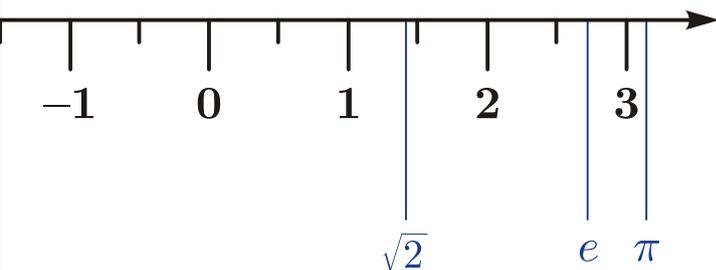
Scholze sitzt auf einer Holzbank im Außenbereich der Universität Bonn und bedient sich ebenfalls einer Analogie aus dem Bereich des Backens, um die neuen Strukturen anschaulich zu machen. Der laue Frühlingstag hat viele Studierende herausgelockt. In kleinen Grüppchen tummeln sie sich an hölzernen Picknicktischen, die auf der gepflegten Rasenfläche verteilt sind. Durch sein jugendliches Aussehen und seine legere Kleidung fällt der Mathematiker kaum unter ihnen auf.

»Es ist, als wolle man einen Kuchen untersuchen – dieser symbolisiert einen topologischen Raum«, erklärt er geduldig. »Ein Topologe würde sich dafür einen Punkt herauspicken und den darum herumliegenden Teil des Kuchens herausschneiden. Dann würde er versuchen, ihn zu analysieren. Findet man Schokoladenstückchen, Kirschen oder Mandeln? Wurde er mit Weizen- oder Dinkelmehl gebacken, enthält er Eier oder ist gar vegan? Das lässt sich auf diese Art nur schwer herausfinden.«

Viel einfacher wäre es, wenn man das Rezept für den Kuchen besäße, das erklärt, welche Zutaten man auf welche Weise hinzugeben muss. Das ist der Ansatz der verdichteten Mathematik: Anstatt den topologischen Raum selbst als Grundlage zu nehmen, zerstückelt man ihn in seine Einzelbestandteile und liefert eine Anweisung, um diese wieder zu einem großen Ganzen zusammenzufügen. Die verdichtete Menge ist das Rezept, das man laut Scholze und Clausen nun als elementaren Baustein nutzen sollte.

Da fast alle Bereiche des Fachs auf topologischen Räumen aufbauen, bringt das nichts Geringeres mit sich als den Neubau weiterer Teile der Mathematik. Dabei hat die Fachcommunity wohl von Scholze schon so etwas erwartet. Spätestens seit seiner Masterarbeit, die er bereits mit 22 Jahren abschloss, galt er als mathematisches Wunderkind. Damals, 2010, war es ihm gelungen, einen Beweis auf nur 34 Seiten zu fassen, mit dem seine renommierten Kollegen Michael Harris und Richard Taylor zuvor ein Buch mit immerhin 288 Seiten füllten. Das zahlentheoretische Theorem, um das sich die Arbeit dreht, gehört zum so genannten Langlands-Programm.

Allein dieses Gebiet lässt viele Fachleute ehrfürchtig aufhorchen. Es umfasst mehrere Vermutungen, die der Mathematiker Robert Langlands am Anfang seiner Karriere in den späten 1960er Jahren formuliert hatte. Sie



betreffen ungeahnte Verbindungen zwischen den Gebieten der Zahlentheorie, Analysis und Geometrie. Seit mehr als 60 Jahren versuchen Fachleute, die vorhergesagten Brücken nachzuweisen und die Bausteine zusammenzusetzen, die Langlands damals vermutet hatte. Teilweise waren sie dabei erfolgreich, doch wie bei allen monumentalen Bauwerken ergeben sich durch jede Lösung neue Anknüpfungspunkte, die das Gebiet wachsen lassen (siehe »Spektrum« April 2022, S. 12).

Die Expertinnen und Experten sind weit davon entfernt, sämtliche Hypothesen Langlands bewiesen zu haben. Dennoch gab es bereits Erfolge. Durch eine Verbindung zwischen Zahlentheorie und Geometrie konnte Andrew Wiles 1995 beispielsweise endlich den großen Satz von Fermat beweisen.

Ein Problem, das ihn jahrelang verfolgte

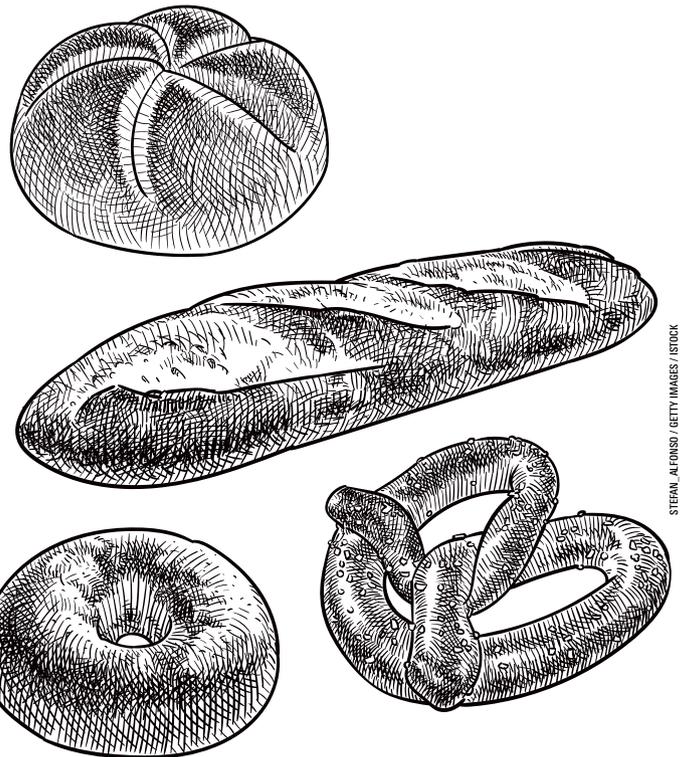
Das erregte einige Jahre später die Aufmerksamkeit des damals 16-jährigen Scholze. Durch seine Teilnahme und – zumindest für ihn unerwarteten – Erfolge bei Mathematik-Wettbewerben lernte er mehrere gleichaltrige Personen kennen, die seine Leidenschaft teilten. Durch diese Kontakte stieß er auf das besagte Theorem von Fermat. Als er sich damit beschäftigte, stellte er überrascht fest, dass es schon bewiesen war.

Scholze nahm sich daraufhin vor, Wiles' Arbeit zu verstehen. Wie er schnell bemerkte, war das keine einfache Aufgabe. Immerhin hatte es mehr als 350 Jahre gedauert, bis die Fachwelt eine Lösung fand. Doch der damalige Schüler ließ sich davon nicht entmutigen und blieb hartnäckig. »Es hat mich eben wirklich interessiert«, erklärt er.

Das Problem begleitete ihn sechs Jahre lang, bis zum Ende der Schulzeit und durch sein gesamtes Studium hindurch – das er nach nur drei Jahren mit einem Masterabschluss beendete. Zwei Jahre später promovierte er und wurde gleich darauf zum Professor berufen: dem damals jüngsten in ganz Deutschland. Im Alter von nur 30 Jahren erhielt er schließlich die Fields-Medaille, eine der höchsten Ehrungen der Mathematik.

Den ehrwürdigen Preis bekam er unter anderem für die so genannten perfektoiden Räume, ein extrem abstraktes Konzept, das er in seiner Doktorarbeit entwickelt hatte. Sie ermöglichen eine geometrische Betrachtung komplizierter Strukturen, beispielsweise bestimmter Zahlensysteme. Dafür muss man diese vervielfältigen und gewissermaßen auftürmen, wodurch ein Gebilde entsteht, dessen Geometrie vollkommen zerklüftet ist, wie eine Staubwolke. Zwar ist die Vorgehensweise komplex, doch wie sich herausstellt, lässt sich das Ergebnis – der perfektoiden Raum –, oft besser untersuchen als das ursprüngliche Objekt, etwa das Zahlensystem.

Scholze gelang es, solche Räume für eine Vielzahl von Strukturen zu konstruieren. Damit trieb er die Forschungen von mehreren Fachgebieten maßgeblich voran. Während er mit seinen Arbeiten die Aufmerksamkeit der mathematischen Gemeinschaft auf sich zog, fiel dem jungen Forscher ein – wie er meinte – interessantes Detail



STEFAN_ALFONSO / GETTY IMAGES / ISTOCK

IN DER TOPOLOGIE betrachtet man Objekte als gleich, wenn man sie ineinander verformen kann, ohne sie zu zerreißen oder zusammenzukleben. Dadurch sind Figuren mit der gleichen Anzahl von Löchern für Topologen ununterscheidbar: Ein Brötchen und eine Laugenstange sind topologisch gesehen äquivalent, ein Bagel und eine Brezel hingegen nicht.

auf: Die Idee, einen perfektoiden Raum in eine Art Staubwolke zu verwandeln, lässt sich auf allgemeinere Räume anwenden.

Scholze nannte diesen Prozess den Pro-Étale-Situs. In dem Ergebnis, das er gemeinsam mit dem Mathematiker Bhargav Bhatt von der University of Michigan veröffentlichte, sah der junge Wissenschaftler allerdings keinen großen Gewinn. »Das Aufschreiben hat zwar Spaß gemacht, aber es war jetzt nichts wirklich Bedeutendes«. Auch Clausen wunderte sich, woran sein Kollege forschte. »Er meinte, ich soll mal wieder richtige Mathematik machen«, erzählt Scholze lachend.

Die zwei standen kurze Zeit darauf in Kontakt, weil sich der deutsche Forscher für ein Thema interessierte, an dem Clausen ebenfalls arbeitete. Schließlich bot ihm Scholze 2018 eine Postdoc-Stelle bei sich in Bonn an. Da es sich aber um eine befristete Anstellung handelte, ermutigte Scholze seinen Schützling, sich für eine bessere Position zu bewerben. Hierfür musste Clausen einen Forschungsantrag verfassen.

»Nach der Lektüre sagte mir Peter, der Antrag sei furchtbar – einer der schlechtesten, die er je gesehen hatte«, erinnert sich Clausen. Er hatte darin geschildert, woran er die letzten fünf Jahre gearbeitet hatte – und wie

er dabei gescheitert war. Scholze riet ihm, stattdessen über seine Erfolge zu berichten. Clausen hatte geglaubt, bisher kaum etwas Nennenswertes gefunden zu haben. Doch als er mit seinem Vorgesetzten über seine Forschung sprach, realisierte er, dass das nicht stimmte.

Und dann die Überraschung: Während des Gesprächs kam Scholze etwas plötzlich sehr bekannt vor. Wenn auch anders formuliert, nutzte Clausen selbst das Konzept des Pro-Étale-Situs, das er zuvor belächelt hatte. »Nein, auf keinen Fall!«, reagierte der Postdoc ungläubig, als Scholze ihn darauf aufmerksam machte. Nach einiger Diskussion sah er es allerdings ein. Ohne es zu merken, hatte er die von Scholze entwickelten Ideen, die er als belanglos angesehen hatte, in anderer Erscheinung verwendet.

Doch Clausen war radikaler. Er verwendete den Ansatz, um den Begriff der topologischen Räume in manchen Situationen zu ersetzen. Das half ihm, sich aus einigen Sackgassen zu manövrieren, in die er im Lauf seiner Forschung geraten war. Diese hingen stets mit der Definition topologischer Räume zusammen – und wie er feststellte, gab es keine einfache Möglichkeit, sie zu umgehen. Ihm blieb also nichts anderes übrig, als die Strukturen zu ersetzen.

Man braucht eine völlig neue Sprache

Etwas Ähnliches war ihm bereits während seiner Bachelorarbeit widerfahren. Zu dieser Zeit hatte er Gruppen und deren Darstellungen untersucht, die sich aus bestimmten Symmetrien ergeben. Als er nicht weiterkam, beschlich ihn der Verdacht, dass man eine neue Art von Sprache benötigen könnte, um die komplexen Zusammenhänge auf ganz andere Weise anzugehen. Dann stieß er auf die Arbeit von Jacob Lurie, damals am Massachusetts Institute of Technology und heute in Princeton, der genau diesen Formalismus entwickelte. Ohne zu zögern, entschloss sich Clausen daher, seine Doktorarbeit zu jenem Thema bei Lurie zu absolvieren.

Bei den topologischen Räumen hatte er allerdings weniger Glück. Bisher hatte sich niemand der Hindernisse angenommen, die die Strukturen verursachen. Und so lag es nun an ihm, eine geeignetere Sprache zu erfinden.

Als er Scholze davon erzählte, war dieser gleich Feuer und Flamme. Denn für den deutschen Forscher spielen gute Definitionen eine wichtige Rolle – sie seien manchmal bedeutender als Theoreme, betont er. Gemeinsam arbeiteten die Wissenschaftler die Idee weiter aus und entwickelten so die verdichtete Mathematik.

»Zugegeben, anfangs habe ich verdichtete Mengen nur benutzt, um ein praktisches Problem

TOPOLOGIE Die Menge $\{a,b,c\}$ stellt zusammen mit den Untermengen $\{\}$, $\{a,b\}$, $\{c\}$ und $\{a,b,c\}$ einen topologischen Raum dar. Man kann sich vorstellen, dass sich die Objekte a und b nah beieinander befinden, während c nicht in ihrer Umgebung ist.

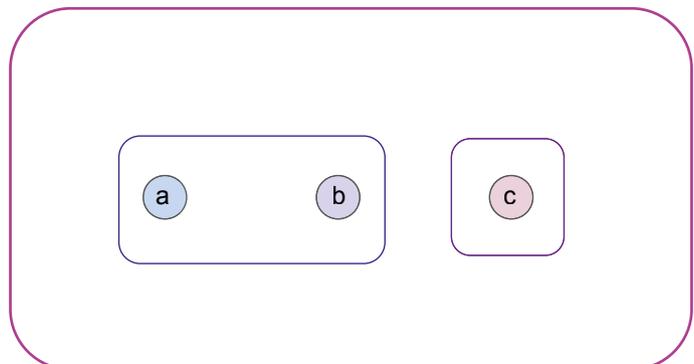
»Dustin Clausen meinte, ich soll endlich mal wieder richtige Mathematik machen«, erzählt Peter Scholze lachend

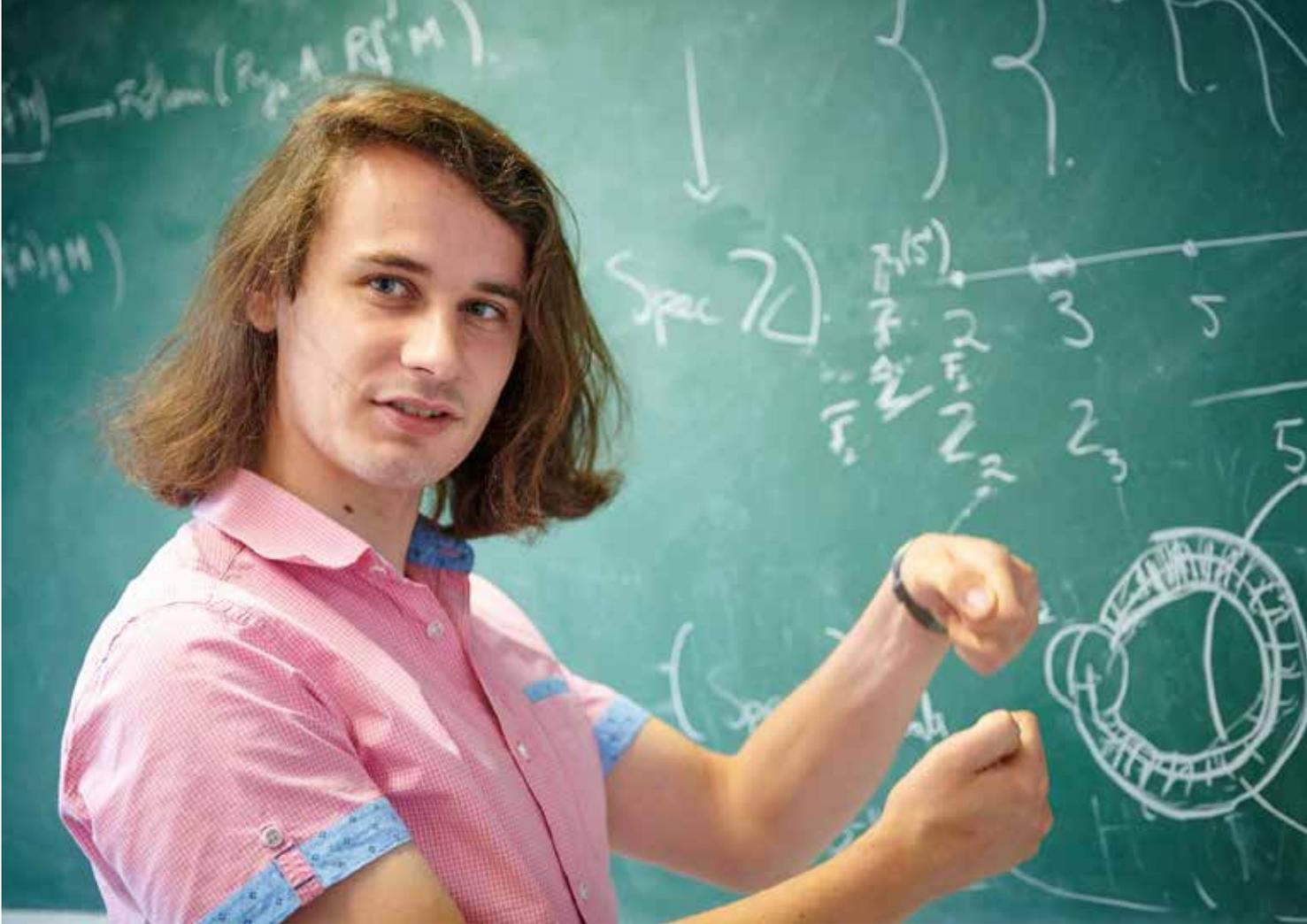
zu lösen«, erklärt Clausen. »Doch im Nachhinein betrachtet, machen sie auch aus philosophischer Sicht mehr Sinn.« Denn topologische Räume vereinen zwei unterschiedliche Arten von Objekten in sich: Sie bestehen aus einer Menge M von Punkten sowie einer weiteren Menge von Untermengen von M . Diese definieren das abstrakte Konzept von Nähe – nahe gelegene Punkte befinden sich in der gleichen Untermenge. Beide Strukturen passen aber nicht wirklich zusammen, da sie verschiedener Natur sind. Es ist in etwa so, als würde man zwei Größen mit unterschiedlichen Einheiten in der Physik zusammenfassen. »Eigentlich ist es ein Wunder, dass es überhaupt so gut funktioniert hat«, sagt Clausen. Verdichtete Mengen beziehen sich hingegen nur auf Punkte und umfassen nicht auch noch Untermengen, was sie greifbarer macht.

Der verdichtete Mechanismus lässt sich als eine Art Diskretisierung verstehen: Man nimmt etwas Kontinuierliches und nähert es durch Punkte an – wie eine Flüssigkeit, die in Wirklichkeit aus Atomen besteht. Wie sich herausstellt, lassen sich fast alle topologischen Räume durch solche diskreten Näherungen konstruieren. Die genauen Anleitungen, wie man die Bausteine wieder zusammensetzen muss, sind in den verdichteten Mengen enthalten.

Auch wenn der Ansatz zunächst abstrakt wirkt, ist er vielen von uns – zumindest unbewusst – bereits in der Schule begegnet, als die reellen Zahlen eingeführt wurden. Diese umfassen alle Werte auf einem Zahlenstrahl, von Primzahlen über Brüche bis hin zu irrationalen Zahlen wie π oder $\sqrt{2}$.

Im Unterricht definiert man reelle Zahlen in der Regel durch die Dezimalschreibweise, also als Zahl, die unendlich viele Stellen hinter dem Komma haben kann. Meist





denkt man als Schüler nicht weiter darüber nach, doch in Wirklichkeit ist die Definition lückenhaft. Denn sie widerspricht einer wichtigen Eigenschaft reeller Zahlen: dass sie lückenlos den gesamten Zahlenstrahl aufspannen. Gibt man zwei reelle Werte vor, lässt sich – egal wie nahe sie sich stehen – stets eine weitere reelle Zahl zwischen den beiden finden. Zum Beispiel, indem man den Mittelwert bildet.

Wenn man allerdings $0,999\dots$ betrachtet, dann ergibt sich ein Problem. Zwischen diesem Wert und der Eins klafft eine Lücke, in die keine weitere Zahl mehr passt. Aber keine Panik: Wie sich herausstellt, ist $0,999\dots$ nichts anderes als 1 (siehe » $0,999\dots = 1$ «).

Wenn man die reellen Zahlen jedoch durch die Dezimaldarstellung definiert, muss man das berücksichtigen. Es braucht daher eine zusätzliche Vorgabe: Alle Zahlen, die mit unendlich vielen Neunen enden, werden mit dem aufgerundeten Wert gleichgesetzt.

Die Dezimalschreibweise liefert also unendlich viele unzusammenhängende Intervalle des Zahlenstrahls (eine Art Staubwolke). Erst durch die Identifikation von $0,999\dots = 1$; $0,8999\dots = 0,9$; $0,45999\dots = 0,46$ und so weiter, werden die einzelnen Staubpartikel zu einem Kontinuum zusammengeklebt. Die reellen Zahlen sind ein topologischer Raum. Die Dezimaldarstellung entspricht einer Diskretisierung dieses Raums – und die Bauanleitung zum Zusammenkleben ist die verdichtete Menge.

Gerade im Bereich der Zahlentheorie funktioniert der verdichtete Mechanismus gut. Das ist nicht weiter verwunderlich, da Scholze die neue Idee aus diesem Gebiet abgeleitet hat. Zudem betreut er an der Universität Bonn mehrere Doktoranden zu dem Thema, wodurch es zu einigen Fortschritten kam. Anfangs beschränkten sie sich dabei auf ein ganz bestimmtes Zahlensystem, die so genannten p -adischen Zahlen, die sich oftmals einfacher untersuchen lassen als reelle Zahlen.

Ein extrem kniffliger Beweis

Um aber Analysis betreiben zu können, mussten Scholze und Clausen zeigen, dass der verdichtete Formalismus auch auf reelle und komplexe (die zusätzlich Wurzeln negativer Werte enthalten) Zahlen anwendbar ist. Die Forscher waren überzeugt, dass es möglich sein sollte.

Doch ihr erster Versuch, das nachzuweisen, scheiterte. Sie schwächten daraufhin die Aussage, die sie beweisen wollten, ab und wagten es erneut. Der Beweis verlief wesentlich schwieriger als erwartet. Eigentlich sollte er auf Methoden der Funktionentheorie aufbauen, aber als Scholze versuchte, Fachleuten aus dem Gebiet seine Überlegungen zu erläutern, waren die Fachleute schnell verloren.

Clausen und er gingen Schritt für Schritt vor und folgten dem natürlichen Weg, den der Beweis vorzugeben schien. Allerdings fühlte es sich irgendwie an, als führte

PETER SCHOLZE gilt schon im Alter von Mitte 30 als Ausnahmema­thematiker – und wurde dafür bereits mit zahlreichen Preisen ausgezeichnet.

er in eine völlig falsche Richtung. »Plötzlich ging es nur noch um Arithmetik, obwohl die ursprüngliche Aussage erst mal nicht viel damit zu tun hat«, erklärt Scholze. Es war eine Mammutaufgabe, aber letztlich gelang es dem deutschen Mathematiker, sie abzuschließen.

»Das war die erstaunlichste mathematische Leistung, die ich je gesehen habe«, sagte Clausen gegenüber der Fachzeitschrift »Nature«. Scholze hatte unablässig an der Aufgabe gearbeitet. Als sie das Ergebnis gemeinsam durchsahen, erschienen ihnen die Argumente schlüssig. Aber sie konnten sich nicht 100-prozentig sicher sein, dass sich nicht doch an irgendeiner Stelle ein Fehler eingeschlichen hatte. Die Kollegen, die sie um Begutachtung baten, gaben schnell auf.

»Ich konnte nicht guten Gewissens eine ganze Theorie auf einem Luftschloss aufbauen«, erklärt Scholze. Auch die Inhalte, die er gegenwärtig mit Clausen an der Universität Bonn und Kopenhagen lehrt, basieren auf besagtem Theorem. »Wir haben es den Studierenden ganz am Anfang der Vorlesung als Blackbox mitgegeben: Sie können es nutzen und wir ersparen ihnen die Details, die dahin führen.«

Da sich niemand fand, der die Arbeit prüfen konnte, die beiden Forscher aber sichergehen mussten, dass sich kein Fehler versteckt hatte, griffen sie auf eine ungewöhnliche Methode zurück. In einem Blogpost forderte Scholze im Dezember 2020 Informatiker heraus, mit algorithmischen Beweisassistenten zu überprüfen, ob sein Beweis korrekt ist.

Solche Software ist nicht neu. Seit Jahrzehnten gibt es derartige Computerprogramme, die mathematische Argumente anhand logischer Prinzipien verifizieren (siehe »Spektrum« Februar 2021, S. 76). Dafür brauchen die Rechner allerdings Unmengen an Daten: Sie benötigen alle formalen Grundlagen, auf denen ein Beweis aufbaut. Anschließend muss man die Argumentation in eine für den Computer nachvollziehbare Form überführen. All das erfordert viel Arbeit. Gemäß den Gesetzen der Logik kann der Algorithmus dann Schritt für Schritt alle Inhalte eines Beweises durchgehen und prüfen, ob die Schlussfolgerung am Ende korrekt ist.

Die Antwort auf Scholzes Anliegen ließ nur ein halbes Jahr auf sich warten, was die gesamte Fachwelt verblüffte. Wie sich herausstellte, war der Beweis richtig. Nun gab es also keinen Grund mehr, an dem Ergebnis zu zweifeln. Dennoch gefällt es Scholze nicht. »Vielleicht setzen sich in Zukunft ein paar Kollegen ran und finden einen schöneren Weg, es zu zeigen.« Er selbst werde es aber zunächst dabei belassen.

Inzwischen hat sich die verdichtete Mathematik in verschiedenen Situationen als hilfreich erwiesen, auch wenn sie noch in den Kinderschuhen steckt. Die Fargues-

Fontaine-Kurve, die einen der größten Fortschritte im Langlands-Programm der letzten Jahrzehnte darstellt, haben Scholze und sein französischer Kollege Laurent Fargues von der Sorbonne Université mit verdichteten Mengen hergeleitet. Zudem haben Clausen und er viele weitere Ideen, wie der neue Formalismus Vorteile bringen könnte. Doch wie beide Mathematiker betonen, seien sie nicht besonders gut darin, Dinge aufzuschreiben.

Raus aus der Nische

Genau das ist aber essentiell: Zum einen erkennt man durch sauberes Ausformulieren manchmal erst einige Schwierigkeiten, die man zuvor nicht bedacht hatte, zum anderen kann man auf diese Weise sein Wissen mit der Fachwelt teilen. Andernfalls ist es so gut wie unmöglich, weitere Kolleginnen und Kollegen in seine Forschung mit einzubeziehen. Die mangelnde Sachkenntnis anderer Personen war schließlich der Grund, weshalb die beiden Wissenschaftler in der Vergangenheit auf die Hilfe eines Computers zurückgreifen mussten.

»Wir wollen unsere Erkenntnisse teilen und tun das auch«, betont Scholze. Etwa durch einführende Vorlesungen, wie sie im Sommersemester 2022 an den Universitäten Bonn und Kopenhagen stattfanden. Die zwei Forscher hoffen so, nicht nur erfahrene Kollegen, sondern ebenso jüngere Studierende zu erreichen. »Das größte Ziel besteht für mich darin, dass die verdichtete Mathematik irgendwann so akzeptiert ist, dass man sie als fast schon banal ansieht«, so Clausen. »In diesem Fall würde man sie nicht einmal mehr als Bestandteil einer Problemlösung erwähnen, auch wenn sie überall implizit verwendet wird.« ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/zahlentheorie



FRANKRAMSPOTT / GETTY IMAGES / ISTOCK

QUELLEN

Bhatt, B., Scholze, P.: The pro-étale topology for schemes. arXiv:1309.1198, 2013

Fargues, L., Scholze, P.: Geometrization of the local Langlands correspondence. 2102.13459, 2021

Scholze, P., Clausen, D.: Lectures on condensed mathematics. <https://www.math.uni-bonn.de/people/scholze/Condensed.pdf>, 2019

Scholze, P., Clausen, D.: Lectures on Analytic Geometry. <https://www.math.uni-bonn.de/people/scholze/Analytic.pdf>, 2020

SAHELANTHROPUS TCHADENSIS

Der erste Zweibeiner war wohl keiner

Sieben Millionen Jahre alte Fossilien aus dem Tschad sollen vom ersten Vormenschen stammen – und belegen, dass dieser schon früh auf zwei Beinen lief. Doch die Beweislage ist dünn.

► In der weiten Savanne des Tschad streiften vor rund sieben Millionen Jahren Herden von Wildpferden, Elefanten und Antilopen umher. Mancherorts ragten die Sandzungen der Wüste in das wogende Grasland, an anderer Stelle grenzte die Savanne an einen See. In der Kühle des Gewässers, das dicht von Bäumen gesäumt war, lagerten Krokodile. Zwischen den Bäumen indes bewegte sich ein affenartiges Wesen. Es kraxelte durchs Geäst und sprang auf den Boden. Und dann? Lief es auf allen vieren weiter – oder doch auf zwei Beinen?

Über diese Frage streiten sich Forscher seit fast 20 Jahren. Es geht um nichts weniger als die Suche nach dem ersten Vormenschen und

ob er auf zwei Beinen lief. Nun haben Paläoanthropologen, federführend Guillaume Daver und Franck Guy von der Université de Poitiers, im Fachmagazin »Nature« eine neue Knochenanalyse jenes affenartigen Wesens vorgestellt. Doch ihre Studie löst den alten Streit nicht. Im Gegenteil.

Zum Ende des Miozäns lebten in Afrika die letzten gemeinsamen Vorfahren von Menschen und Schimpansen. Aus ihnen gingen vor fast sieben Millionen Jahren die ersten Vormenschen hervor. Darüber sind sich die meisten Fachleute einig. Ob aber Fossilien, die Anthropologen 2001 im Tschad gefunden haben, zu den ersten Exemplaren der Menschenlinie gehörten, darüber herrscht wenig Einstimmigkeit. *Sahelanthropus tchadensis* taufte die Ausgräber um Michel Brunet von der Université de Poitiers damals ihre Fossilfunde. Es handelte sich um einen fragmentierten Schädel, Kiefertelle und diverse Zähne, die sie am Fundplatz Toros-Ménalla in der Djurab-Wüste frei gelegt haben. Vor zirka sieben

Millionen Jahren habe dieser früheste bekannte Vorläufer des Menschen existiert, er sei der älteste bekannte Hominine gewesen. Zu dieser Gruppe zählen Experten die Gattung *Homo* – und damit uns Menschen – und deren ausgestorbene Vorfahren.

Menschenähnlich?

Am Schädel von *Sahelanthropus*, der den Spitznamen »Toumaï« bekam, machten Brunet und sein Team affen- und menschenähnliche Merkmale aus. Als wichtiges Indiz fürs Menschsein werteten sie beispielsweise die relativ kleinen Eckzähne. 2005 untersuchten sie dann genauer, ob der Primat auch auf zwei Beinen gelaufen sein könnte. Dazu rekonstruierten sie den Schädel virtuell, um die Position des Hinterhauptslochs zu bestimmen. In dieser Öffnung am Schädel steckt die Wirbelsäule. Aus deren Lage erschließt sich, ob das Rückgrat gebeugt oder aufrecht ausgerichtet war. Bei uns Menschen öffnet sich die Stelle nach unten, Hals und Rücken stehen folglich vertikal.

VON VIER AUF ZWEI Eine Gruppe Schimpansen überquert eine Straße in Uganda. Eines der Tiere läuft auf zwei Beinen. Begann die Evolution hin zum modernen Menschen mit dem dauerhaften Gang auf zwei Beinen?





DIE HERKUNFT DER FOSSILIEN
In Toros-Ménalla in der Djurab-
Wüste stießen Paläoanthropologen
2001 auf die Überreste eines sieben
Millionen Jahre alten Primaten.

eines fragmentierten Oberschenkelknochens. Seine Kollegin Aude Bergeret, heute Direktorin am Musée d'Histoire Naturelle Victor Brun in Montauban, hatte mit Macchiarelli das Fossil untersucht, als es einmal an der Université de Poitiers aufbewahrt wurde.

Vor allem um jenen Oberschenkelknochen dreht sich die Diskussion, wie sich *Sahelanthropus* am Boden fortbewegte. Beide Teams hielten dasselbe Beinfossil in Händen, doch ihre Ergebnisse könnten unterschiedlicher sein. Daver und Co schreiben in »Nature«: »Die Morphologie des Femurs [Oberschenkelknochen] ist am plausibelsten zu erklären mit einer gewohnheitsmäßigen Zweibeinigkeit.« Demnach sei *Sahelanthropus* bereits ans Gehen angepasst gewesen, anders als heutige Schimpansen, die sich nur in Ausnahmefällen aufrichten. In Macchiarellis Studie im »Journal of Human Evolution« heißt es hingegen: »Die Ergebnisse unserer vorläufigen Funktionsanalyse deuten darauf hin, dass der

Und bei »Toumaï«? Das Loch habe sich eher nach unten als nach hinten wie bei Vierbeinern geöffnet, urteilten die Forscher. *Sahelanthropus* hätte demnach aufrecht gehen können. Die Deutung von Brunet und Co blieb jedoch nicht unangefochten.

Fachkolleginnen und -kollegen bemängelten, dass der Schädel zu schlecht erhalten sei, um die Haltung der Wirbelsäule genau genug rekonstruieren zu können. Ein scharfer Kritiker ist der Paläoanthropologe Roberto Macchiarelli von der Université de Poitiers. Er hält Brunets These auch aus evolutionärer Sicht für problematisch. Ähnelte das Hinterhauptloch von *Sahelanthropus* tatsächlich derart stark dem von *Homo sapiens*, wäre der Miozänprimat jüngerer Vormenschen weit voraus gewesen. »Das würde nahelegen, dass vor sieben Millionen Jahren *Sahelanthropus* menschenähnlicher gewesen wäre als ein vier Millionen Jahre jüngerer *Australopithecus*, der sehr wahrscheinlich ein direkter Vorfahre der Gattung *Homo* war«, schreibt Macchiarelli in einer E-Mail an »Spektrum der Wissenschaft«. Solche Sprünge im Stammbaum, mahnt der Paläoanthropologe, sollten skeptisch machen, ob die Schädelrekonstruktion tatsächlich aussagekräftig genug sei.

Was oder wer war nun *Sahelanthropus tchadensis*? Für eine klare Antwort fehlten bisher Knochen vom Rest des Körpers – etwa Wirbel, Hüft-, Arm- oder Beinteile. Die Ausgräber hatten zwar derartige Fossilien schon 2001 in Toros-Ménalla

geborgen, die Funde aber schlicht nicht publiziert – was Fachkollegen jahrelang kritisierten. 2020 erschienen dann gleich zwei Studien: Daver und Guy stellten eine Vorabveröffentlichung ihres »Nature«-Papers auf den Preprintserver »Research Square«. Und Roberto Macchiarelli publizierte eine flüchtige Analyse

GEBROCHENE KNOCHEN
Unten links in zwei Ansichten
ist der fragmentierte Ober-
schenkelknochen von *Sahel-*
***anthropus tchadensis* abge-**
bildet, in der Mitte und rechts
die beiden Ellen, eine jede
ebenfalls in zwei Ansichten.
Es handelt sich um ein 3-D-
Modell der Fossilien.



FRANCK GUY / PALEVOPRIM / CNRS, UNIVERSITÉ DE POITIERS

Schaft eines Femurs zu einem Individuum gehört, das für gewöhnlich nicht zweibeinig war.« Für die einen war *Sahelanthropus* ein Aufrechtgänger, für die anderen ganz sicher keiner.

Daver und Guy haben neben dem Femur noch zwei Unterarmknochen vorgelegt, eine linke und eine rechte Elle. Die drei Fossilien waren 2001 zwar nicht an exakt derselben Stelle wie »Toumaï« entdeckt worden, gehörten aber sehr wahrscheinlich auch zu einem *Sahelanthropus* – zumindest darin sind sich die meisten Fachleute einig. Ebenso unstrittig ist die Funktionsanalyse der Vorderarmknochen. Ihr leicht gekrümmter Schaft und die Form der Ellbogengelenke sprechen dafür, dass der Primat einst in Bäumen herumkraxeln konnte.

Hingegen ist die Fortbewegungsart des Miozänprimaten am Boden wohl auch deshalb unklar, weil jener einzige Beinknochen, den man bislang fand, stark fragmentiert ist. Vom Femur ist nur der Schaft erhalten; der Gelenkkopf zur Hüfte hin ist abgebrochen, der Gelenkfortsatz zum Knie hin fehlt ebenfalls.

Wie die Beinknochen zu interpretieren sind, scheint Ansichtssache zu sein

Nach eingehender Analyse wollen Daver und seine Arbeitsgruppe dennoch Ähnlichkeiten mit den Gebeinen früher Vormenschen erkennen wie mit dem möglichen Homininen *Orrorin tugenensis*, der vor sechs Millionen Jahren vermutlich ab und an aufrecht dahintapste.

Ob der Beinknochen von *Sahelanthropus* so zu interpretieren ist, scheint jedoch Ansichtssache zu sein. Scott Williams von der New York University, der über die Evolution des aufrechten Gangs forscht, ist jedenfalls anderer Meinung. »Der

Femur unterscheidet sich meines Erachtens deutlich von den Oberschenkelknochen anderer Homininen – und des modernen Menschen«, äußert Williams gegenüber »Spektrum der Wissenschaft«. Und gibt es Übereinstimmungen zwischen dem älteren *Sahelanthropus* und dem jüngeren *Orrorin tugenensis*? Dem widerspricht der Paläoanthropologe ebenfalls. »Da sehe ich keine große Ähnlichkeit.«

Umstrittene Schlussfolgerungen

Die Paläontologin Madelaine Böhme von der Universität Tübingen schlägt in dieselbe Kerbe. Von Davers und Guys Ergebnissen ist sie kaum überzeugt: »Der Oberschenkelknochen ist extrem fragmentarisch, und die Schlussfolgerungen sind meiner Meinung nach wenig sicher.« Böhme hatte 2019 mit ihrem Team die Fossilien von *Danuvius guggenmosi* vorgestellt, eines bis dahin unbekanntes, zwölf Millionen Jahre alten Primaten, dessen Knochen aus einer Tongrube im Ostallgäu stammten. *Danuvius* war womöglich ebenfalls zweibeinig unterwegs – aber auch das ist umstritten (siehe »Spektrum« Januar 2020, S. 26).

Als schlagkräftigstes Argument für ihre These verweisen Daver und Guy auf den *Calcar femoris*. Diese knöcherner Verdickung liegt im Halsbereich des Oberschenkelknochens. Auch der sieben Millionen Jahre alte Femur aus dem Tschad weist eine solche auf. Vermutlich hilft sie, das Körpergewicht zu stützen, wenn man sich auf zwei Beinen bewegt.

Dass nur Aufrechtgänger damit gesegnet seien, ist allerdings nicht so gesichert, wie Davers und Guys Ausführungen glauben lassen. Eine im »Journal of Human Evolution« veröffentlichte Studie aus dem Jahr 2022 kommt jedenfalls zu einem gegenteiligen Ergebnis. Marine Cazenave vom American Museum of Natural History in New York hat mit einer Arbeitsgruppe ebenjenes *Calcar femoris* am Knochenbau von noch lebenden und ausgestorbenen Hominiden, also Menschenaffen, *Homo*

sapiens und seinen Vorläufern untersucht. In jeder der Gruppen entdeckten sie Beispiele mit und ohne Knochenverdickung. »Der *Calcar femorale* [femoris] kann nicht als »magisches Merkmal« oder diagnostisch für Zweibeinigkeit angesehen werden«, schlussfolgert Cazenave.

Der Streit um die Fortbewegung von *Sahelanthropus* hilft letztlich auch nicht weiter, eine andere wichtige Frage zu beantworten: War er denn nun ein Vormensch oder nicht? Denn gewohnheitsmäßig auf zwei Beinen zu gehen, sagt nicht unbedingt etwas übers Menschsein aus. »Das Problem ist, dass wir erwarten, die frühesten Homininen seien zweibeinig gewesen – aber das muss nicht unbedingt zutreffen«, meint US-Forscher Scott Williams. Gut möglich, dass sich unser allererster Vorfahre nur minimal vom gemeinsamen Vorläufer der Schimpansen und Menschen unterschieden hat. Neue Merkmale könnten kleinere Eckzähne gewesen sein, nicht der aufrechte Gang.

Madelaine Böhme sieht es ähnlich. Dem Gebiss nach passe *Sahelanthropus* zu den Homininen, seinen Extremitäten zufolge eher nicht. Zu unterscheiden, was menschlich und was affenartig war, wird laut Böhme »eine immer kompliziertere Angelegenheit«. Und so scheint es, dass sich selbst mit den alten Neufunden aus der Djourab-Wüste das Rätsel um *Sahelanthropus* noch nicht lösen lässt. ◀

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

QUELLEN

Cazenave, M. et al.: *Calcar femorale* variation in extant and fossil hominids: Implications for identifying bipedal locomotion in fossil hominins. *Journal of Human Evolution* 167, 2022

Daver, G. et al.: Postcranial evidence of late Miocene hominin bipedalism in Chad. *Nature* 609, 2022

Macchiarelli, R. et al.: Nature and relationships of *Sahelanthropus tchadensis*. *Journal of Human Evolution* 149, 2020

Junges Paar löst altes Problem

Welche Art von Kurve kann durch willkürlich verstreute Punkte im Raum verlaufen? Das ist eine der zentralen Fragen der Geometrie. Ein Forscherduo hat sie jetzt definitiv beantwortet.

Verteilt man zwei Punkte in einer Ebene, dann gibt es stets eine Gerade, die beide verbindet. Das ist seit Tausenden von Jahren bekannt. Wenn allerdings mehr Punkte verstreut sind, hat man Pech. Es ist unwahrscheinlich, dass eine einzige Gerade sie alle trifft. Allerdings kann man durch drei beliebig gelegene Punkte immer einen Kreis ziehen und durch fünf Punkte einen Kegelschnitt (eine Ellipse, Parabel oder Hyperbel) zeichnen.

Diese Überlegungen haben mit einer der wichtigsten Fragen der Geometrie zu tun, dem Interpolationsproblem: Wann lässt sich eine Kurve definieren, die beliebig viele Punkte in n Dimensionen trifft? »Eigentlich geht es dabei darum zu verstehen, was Kurven sind«, erklärt der Mathematiker Ravi Vakil von der Stanford University.

Obwohl Kurven in hochdimensionalen Räumen schon lange mit ausgeklügelten Mitteln untersucht werden, sind sie extrem schwer zu fassen. In der Ebene lässt sich eine Kurve durch eine einzige Gleichung beschreiben: eine Gerade etwa durch $y = 3x - 7$, während $x^2 + y^2 = 1$ einen Kreis liefert. In drei oder mehr Dimensionen ist das jedoch nicht so einfach. Man muss eine Kurve oft durch zahlreiche Gleichungen und viele Variablen definieren, woraus sich ihre Gestalt kaum verstehen lässt. Deshalb sind manchmal selbst die grundlegendsten Eigenschaften einer Kurve schwer zu erfassen – insbesondere, ob sie durch eine Sammlung von Punkten im Raum verläuft.

Einige Spezialfälle des Interpolationsproblems sind schon lange gelöst. Zum Beispiel, welche Kurve durch 16 Punkte im dreidimensionalen Raum führt oder durch eine Milliarde Punkte im fünfdimensionalen Raum. Solche Ergebnisse sind nicht nur für die algebraische Geo-

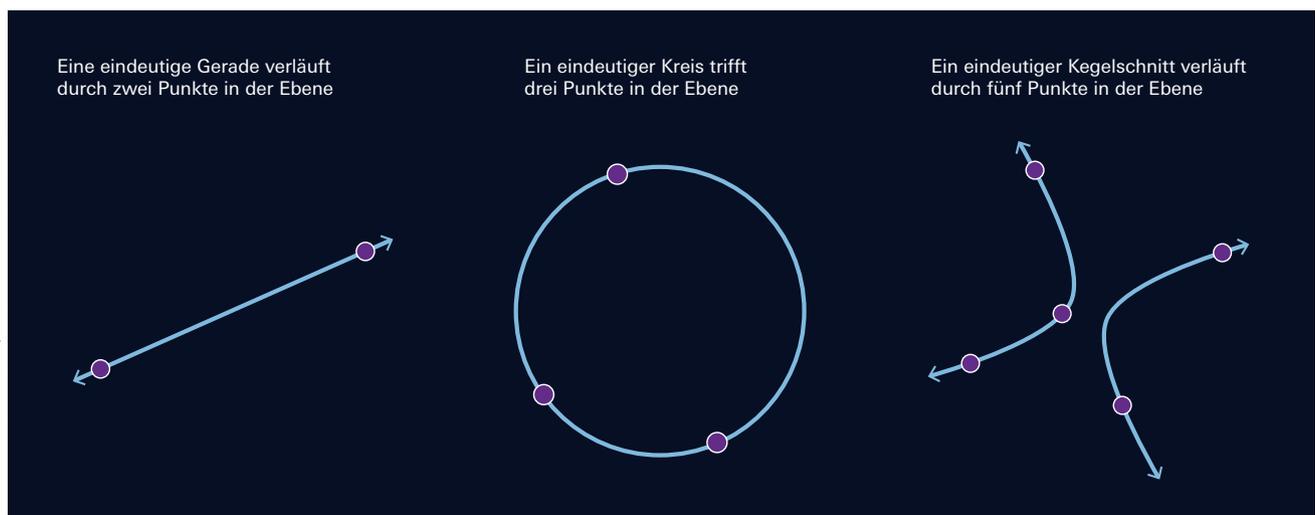
metrie wichtig, sondern führen auch zu Fortschritten in der Kryptografie, der Datenwissenschaft und anderen Bereichen. Dennoch reicht es laut Vakil nicht aus, die Interpolation für einige Kurven zu verstehen: Mathematiker wollen es für alle wissen.

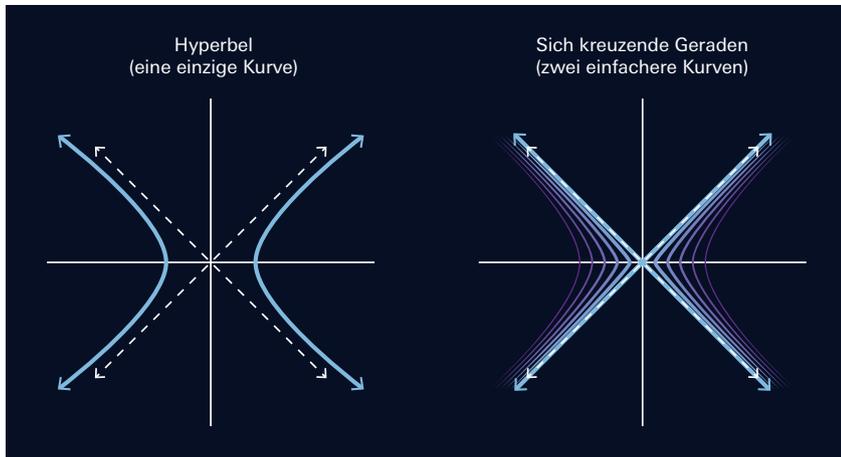
Anfang 2022 haben Eric Larson und Isabel Vogt von der Brown University das Problem nun vollständig gelöst. Ihre Veröffentlichung markiert den Höhepunkt von fast zehn Jahren harter Arbeit, in denen sie sich nach und nach an die Frage herantasteten.

Die Lösung des Interpolationsproblems baut auf Arbeiten auf, die bis ins 19. Jahrhundert zurückreichen – Aufsätze, die sich mit einer noch grundlegenden Frage beschäftigten: Welche algebraischen Kurven gibt es überhaupt?

Eine Kurve ist ein eindimensionales Objekt, das in einem höherdimensionalen Raum liegt. Auch wenn nicht immer klar ist, wie die zugehörige

INTERPOLATION Welche Kurven treffen immer n willkürlich verteilte Punkte im Raum?





MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

UM DIE GEOMETRIE einer komplizierten Kurve zu verstehen, kann man sie in zwei Kurven zerlegen, die einfacher zu untersuchen sind.

Gleichung einer Kurve aussieht, kann man sie stattdessen durch drei Zahlen charakterisieren.

Zunächst spielt die Dimension des Raums, in dem sich die Kurve befindet, eine Rolle.

Die zweite Kennzahl ist der so genannte Grad der Kurve. Dafür zählt man alle ihre Schnittpunkte mit einer Hyperebene – das ist ein Raum, dessen Dimension um eins kleiner ist als die des eigentlichen Raums. Beispielsweise hat ein Kreis in der zweidimensionalen Ebene den Grad zwei, weil er von einer eindimensionalen Geraden in zwei Punkten geschnitten wird. Der Grad einer Kurve im 20-Dimensionalen entspricht der Anzahl der Schnittpunkte mit einer 19-dimensionalen Hyperebene. Der Grad ist also eine Art Maß dafür, wie verdreht die Kurve ist.

Die dritte Kenngröße, um eine Kurve zu beschreiben, ist der Genus. Um diesen zu verstehen, muss man die reellen Zahlen verlassen und zu den komplexen übergehen: Letztere setzen sich aus einem reellen Wert und einem imaginären (der Wurzel einer negativen Zahl) zusammen. Solche Zahlen kann man sich der Einfachheit halber als zweidimensionales Paar vorstellen: Der erste Wert entspricht dem reellen Beitrag, der

zweite dem imaginären Teil. Setzt man in die definierende Kurvengleichung komplexe Zahlen ein, erhält man dadurch statt einer eindimensionalen Linie eine zweidimensionale Oberfläche. Diese kann Löcher haben, wie ein Donut. Der Genus entspricht der Anzahl ihrer Löcher.

Nun stellt sich die Frage, welche Art von Kurven in welchen Umgebungen existieren können. Die Mathematiker Alexander von Brill und Max Noether vermuteten in den 1870er Jahren, dass man eine Kurve mit Genus g in einen r -dimensionalen Raum einbetten kann, wenn der Grad d ausreichend groß ist. Sie argumentierten, eine Kurve könne nur dann existieren, falls eine bestimmte Ungleichung in Bezug auf die Größen g , d und r erfüllt ist.

Das Theorem führt zu einer neuen Theorie

Belegen konnten die zwei Mathematiker ihre Vermutung allerdings nicht. Das gelang Phillip Griffiths und Joe Harris erst 1980 mit Hilfe moderner Techniken der algebraischen Geometrie. Inzwischen haben Fachleute etwa ein halbes Dutzend verschiedener Beweise für das Brill-Noether-Theorem gefunden und eine umfangreiche Theorie dazu entwickelt (siehe »Spektrum« Juni 2019, S. 12).

Damit konnte man sich nun endlich dem Interpolationsproblem zuwenden: Durch wie viele zufällig verstreute Punkte im r -dimensionalen Raum könnte eine Kurve mit Genus g

und Grad d verlaufen? Schnell formulierten Mathematikerinnen und Mathematiker eine Vermutung, wie die Antwort lauten könnte. Wie beim Brill-Noether-Theorem kam sie in Form einer Ungleichung, die von den Parametern g , d und r und n , der Anzahl der im Raum verteilten Punkte, abhängt.

Aber dieses Mal gab es klare Ausnahmen, bei denen die Kurven von der vermuteten Regel abwichen. In solchen Fällen beschränkt die Geometrie der Kurve die Anzahl der Punkte, durch die sie verlaufen müsste. »Das weist darauf hin, dass es sich um ein schwieriges Theorem handelt, das viel Arbeit erfordert«, so der Mathematiker Sam Payne von der University of Texas in Austin.

Doch genau jenes Problem zog Larson und Vogt schon während ihres Studiums in seinen Bann. Grund dafür war Joe Harris, einer ihrer Professoren an der Harvard University, der zu dem Thema forschte. Harris betreute später sowohl Larson als auch Vogt bei ihrer Doktorarbeit am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge.

Larsons Dissertation drehte sich eigentlich um ein anderes Problem der algebraischen Geometrie – ein extrem ehrgeiziges Promotionsprojekt. »Das schien eine wirklich dumme Idee zu sein«, so Vakil. »Er versuchte, etwas zu lösen, woran Menschen, die viel älter waren als er, über einen langen Zeitraum hinweg gescheitert waren.« Aber Larson ließ nicht locker und fand 2017 eine Lösung.

Der Schlüssel zu seinem Beweis war die Ausarbeitung verschiedener Fälle des Interpolationsproblems. Denn ein großer Teil von Larsons Arbeit bestand darin, eine Kurve in mehrere einfachere Kurven zu zerlegen, deren Eigenschaften zu untersuchen und sie dann auf die richtige Weise wieder zu dem ursprünglichen Objekt zusammenzufügen. Dabei musste er dafür sorgen, dass jede der Hilfskurven durch dieselbe Gruppe von Punkten verläuft – was wiederum bedeutete, ein Interpolationsproblem zu lösen.

Vogt hatte sich hingegen von Anfang an direkt mit Interpolation beschäftigt. In ihrer ersten Forschungsarbeit bewies sie alle Interpolationsprobleme im dreidimensionalen Raum. 2017 arbeitete sie dann mit Larson zusammen, um die Aufgabe im Vierdimensionalen anzugehen. Kurz darauf wurden sie ein Paar und heirateten. Seitdem diskutieren sie oft nach dem Abendessen über ihre Ideen und arbeiten an Problemen auf den Kreidetafeln in ihrem Haus.

Bei dem Interpolationsproblem geht es um die Frage, ob eine bestimmte Art von Kurve durch eine vorgegebene Sammlung von Punkten verlaufen kann. Um das zu beweisen, muss man untersuchen, wie flexibel eine Kurve ist. Angenommen, drei Punkte liegen auf einer Geraden. Verschiebt man einen der Punkte leicht von der Linie weg, ist es unmöglich, die Gerade so zu bewegen, dass sie durch die neue Anordnung verläuft. Der Versuch, alle drei Punkte zu treffen, würde die Linie krümmen

und sie somit zu einer anderen Kurve machen. Deshalb kann man eine Gerade bloß durch zwei Punkte interpolieren, nicht aber durch drei, sofern diese nicht zufällig linear angeordnet sind. Einen ähnlichen Ansatz wählten Mathematiker für kompliziertere Kurven in höherdimensionalen Räumen: Sie verschoben sie an bestimmten Punkten und untersuchten, wie sich die Kurven bewegen. Damit das in abstrakten Fällen gelingt, zieht man ein geometrisches Hilfsmittel heran, das so genannte Normalenbündel. Dabei handelt es sich um einen Strang von Vektoren, die senkrecht zu der Oberfläche einer Kurve stehen – sie geben im Prinzip an, wie sich die Kurve verformen kann. Das Interpolationsproblem entspricht dann der Aufgabe, gewisse Eigenschaften des Normalenbündels einer Kurve zu berechnen.

Durch diese Methode ließen sich einige knifflige Fälle lösen – aber nicht alle. Die beiden Fachleute beschlossen daher, die in Larsons

Doktorarbeit ausgearbeitete Strategie zu nutzen, nämlich komplizierte Kurven in einfachere zu zerlegen. Die Idee lässt sich am Beispiel einer Hyperbel veranschaulichen. Man kann Letztere so lange verformen, bis sie in zwei Geraden zerfällt, die sich in einem Punkt kreuzen. Einige Eigenschaften der ursprünglichen Hyperbel spiegeln sich immer noch in der Geometrie der Geraden wider. Da Geraden leichter zu studieren sind, kann man mit ihnen weiterarbeiten.

Akribische Buchführung ist entscheidend

Ganz so einfach ist es aber nicht: Man kann aus den Normalenbündeln der Geraden nicht sofort auf jenes der Hyperbel schließen. Denn an dem Punkt, an dem die Geraden zusammentreffen, verhält sich das Normalenbündel falsch – man muss es an dieser Stelle modifizieren.

Natürlich widmeten sich Larson und Vogt keinen Hyperbeln, sondern viel komplizierteren Objekten. Im



Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS

Im Dezember erhalten Sie den neuen Tagespiegel als digitale Zeitung 40 Tage gratis. Lesen Sie zwei Zeitungen in einer: 40 Seiten aus der Welt und 40 Seiten aus der Weltstadt Berlin. Über 1.000 Experten aus einem globalen Netzwerk bieten Ihnen exklusive Informationen und Analysen.

Jetzt bestellen unter:
tagesspiegel.de/Spektrum

ersten Schritt zerlegten sie eine Kurve in zwei Teile: eine Gerade und eine einfachere (aber immer noch komplexe) Kurve, die ein oder zwei Schnittpunkte mit der Geraden hat.

Dann teilten sie die neue Kurve derart in zwei Teile und wiederholten den Prozess immer wieder, bis es nicht mehr weiterging. Währenddessen verfolgten sie die entstehenden Normalenbündel und alle nötigen Modifikationen, die sich anhäuferten.

Leider reichte das jedoch nicht aus. Der Ansatz funktioniert nicht für jede Art von Kurve, die das Brill-Noether-Theorem abdeckt. Larson und Vogt entwickelten daher eine neue Methode – eine, bei der sie eine Kurve nicht in Geraden zerlegten.

Damit waren sie schließlich erfolgreich. Gleichzeitig fanden die beiden Forscher einen Weg, um mit all den Änderungen am Normalenbündel umzugehen, die sich im Lauf der Prozedur anhäufen. »Es ist eine erstaunliche Leistung, all diese Daten im Auge zu behalten und durchzuhalten«, so der Mathematiker Gavril Farkas von der Humboldt-Universität zu Berlin.

Letztendlich konnten die zwei Mathematiker beweisen, dass Kurven durch die zuvor vermutete Anzahl von Punkten verlaufen – mit Ausnahme von vier Spezialfällen. Zudem lieferten sie eine geometrische Erklärung dafür, warum jene vier Arten von Kurven von der Regel abweichen. Somit haben sie das Interpolationsproblem ein für alle Mal gelöst.

Doch damit ist die Geschichte noch lange nicht zu Ende. Denn an Fragen, die man über Kurven stellen kann, mangelt es nicht. Die Arbeit von Larson und Vogt liefert eine Art Rezept, um diese zentralen, aber schwer fassbaren mathematischen Objekte in den Griff zu bekommen, was zu großen Fortschritten auf dem Gebiet führen kann.

Außerdem haben Vogt und Larson nun Verstärkung: Larsons jüngere Schwester, Hannah Larson, ist ebenfalls Mathematikerin und arbeitet an ähnlichen Fragen zu algebraischen Kurven. Kürzlich entwickelte sie einen neuen Beweis für das Brill-Noether-Theorem und erforscht jetzt zusammen mit ihrem Bruder und seiner Frau, wie verschiedene Arten von

Kurven aussehen, wie sie sich verhalten und was das für andere mathematische Probleme bedeutet. ◀

Jordana Cepelewicz Wissenschaftsjournalistin in New York.

QUELLEN

Larson, E.: The maximal rank conjecture. ArXiv 1711.04906, 2017

Larson, E., Vogt, I.: Interpolation for Brill-Noether curves in P4. ArXiv 1708.00028, 2017

Larson, E., Vogt, I.: Interpolation for Brill-Noether curves. ArXiv 2201.09445, 2022

Vogt, I.: Interpolation for Brill-Noether space curves. ArXiv 1611.00081, 2016



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Old Problem About Mathematical Curves Falls to Young Couple« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

GENETIK

Backup schützt vor schädlichen Mutationen

Gruppen regulatorischer DNA-Sequenzen, so genannter Enhancer, steuern die Genaktivität. Sie sind offenbar so angeordnet, dass sie die Wirkung schädlicher Mutationen dämpfen.

Das menschliche Genom enthält etwa 20000 proteincodierende Gene – und rund eine Million regulatorische DNA-Bereiche namens Enhancer, welche die Expression (den Ablaufvorgang) der Gene steuern. Jede Erbanlage unterliegt somit der Regulation durch mehrere Enhancer, die gemeinsam darüber bestimmen, wann sie abgelesen wird, so dass ihr

Proteinprodukt in Erscheinung tritt. Enhancer sitzen oft an einer völlig anderen Stelle des DNA-Strangs als das Gen, das sie kontrollieren: Mitunter sind sie mehr als eine Million Basenpaare von diesem entfernt. Trotzdem können sie sich ihm nähern, und zwar, indem das Erbmolekül Schleifen bildet. Dabei gelangen sie in enge Nachbarschaft zu einer

DNA-Sequenz namens Promotor, die neben dem entsprechenden Gen liegt und dessen Expression letztlich antreibt. Bisher ist allerdings kaum bekannt, wie Enhancer zusammenarbeiten, die ein und dasselbe Gen steuern.

In den zurückliegenden Jahren haben Forscherinnen und Forscher erhebliche Anstrengungen unternom-

men, um genetische Varianten aufzudecken, die das Risiko für Volkskrankheiten wie Krebs und Herzleiden erhöhen. Mehr als 90 Prozent der bisher identifizierten Risikovarianten liegen in nicht proteincodierenden Teilen des Genoms – häufig in Enhancer-Regionen. Wie genau sie sich auswirken und welche Zellfunktionen sie jeweils beeinflussen, ist meist schwer zu ermitteln. Einige Fachleute zählen diese Aufgabe zu den größten Herausforderungen der Humangenetik. Ein Team um die Bioingenieurin Xueqiu Lin von der Stanford University hat nun neue Einblicke gewonnen, die das Rätsel der Enhancer zu entwirren helfen.

Verbesserte Genscherer

Genetiker und Genetikerinnen setzen heute oft die »Genscherer« CRISPR-Cas ein (siehe »Spektrum« Dezember 2020, S. 29), um solche Fragen zu beantworten. Mit diesem Werkzeug beeinflussen sie die Aktivität einzelner Enhancer und prüfen jeweils, wie

sich das auf die Zielzelle auswirkt. Lin und ihr Team haben den Ansatz weiterentwickelt zu einem CRISPR-Cas-Verfahren, mit dem sich entweder ein Enhancer allein oder zwei davon gleichzeitig gezielt ausschalten lassen. Damit manipulierten sie die Enhancer des *MYC*-Gens in kultivierten menschlichen Zellen. Die Autoren wählten diesen Erbfaktor aus drei Gründen: weil seine regulatorischen Bereiche gut erforscht sind; weil das Protein, für das er codiert, eine wichtige Rolle in der Zellvermehrung und -teilung spielt; und weil dieses Protein an zahlreichen Krebserkrankungen mitwirkt. *MYC* unterliegt der Steuerung durch sieben Enhancer, die sich auf zwei Gruppen oder »Cluster« aufteilen. Cluster 1 liegt nah beim *MYC*-Promotor und enthält vier Enhancer, Cluster 2 befindet sich weit von ihm entfernt und umfasst drei davon. Erstaunlicherweise sind beide Gruppen durch mehr als eine Million Basenpaare voneinander getrennt.

Die Arbeitsgruppe fand heraus: Werden zwei Enhancer im selben Cluster ausgeschaltet, sind die Auswirkungen auf die *MYC*-Expression und somit auf die Zellvermehrung relativ gering. Inaktiviert man aber zwei aus verschiedenen Clustern, bricht die *MYC*-Expression drastisch ein. Beide Enhancer stillzulegen, hat in diesem Fall eine größere Wirkung als die Summe der Effekte, wenn man jeden einzeln abschaltet. Lin und ihre Kollegen nennen solche Enhancer-Paare »Synergistische Regulatorische Enhancer« (SRE). Das Team entwickelte einen Algorithmus maschinellen Lernens, der die Existenz von SRE für zahlreiche weitere Gene vorhersagte. Sie überprüften einige seiner Vorhersagen im Experiment – und fanden sie bestätigt.

Welcher Mechanismus sorgt dafür, dass Enhancer aus verschiedenen Clustern synergistisch zusammenwirken? Die Studie von Lin & Co. liefert Hinweise darauf. Die beiden Eigenschaften, die laut dem lern-



MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!

STERNE UND
WELTRAUM

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2023

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen zeigen beispielsweise den Jupiter mit seinem Mond Europa, das kuriose Sterntrio GW Orionis, den Effekt einer Gravitationslinse, kollidierende Galaxien und weitere Himmelsregionen und -objekte.

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

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

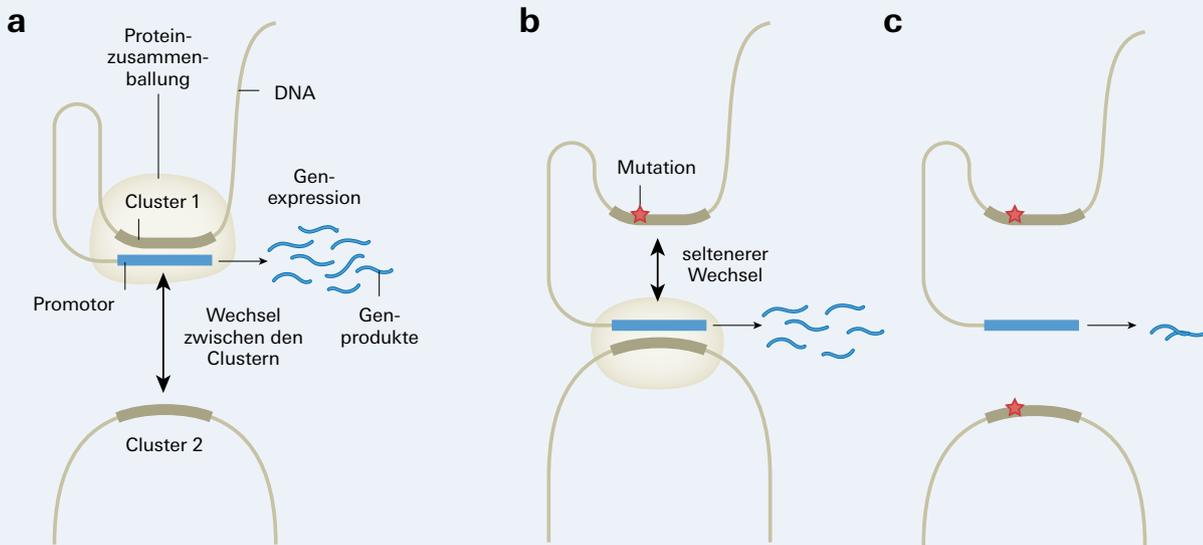
Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/aktion/hue

E-Mail: service@spektrum.de



Zweigleisiges System



ELKON, R., AGAMI, R.: TWO-LAYER DESIGN PROTECTS GENES FROM MUTATIONS IN THEIR ENHANCERS. NATURE GEN. 2022, FIG. 1, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der mutmaßliche Mechanismus von Enhancer-Netzwerken. (a) Mehrere Gruppen (»Cluster«) von Enhancern regulieren die Aktivität jeweils eines Gens. Innerhalb eines Clusters sitzen die Enhancer nah beieinander, der Abstand zwischen den Clustern kann aber mehr als eine Million Basenpaare betragen. Die Enhancer kommen in Kontakt mit einer DNA-Sequenz namens Promotor und fördern dort die Zusammenballung von Proteinen, welche die Genexpression hochfahren – was zum verstärkten Ablesen des Gens führt. Vermutlich interagiert der Promotor immer nur mit einem der Cluster, nicht mit beiden gleichzeitig; er kann aber zwischen ihnen wechseln. (b) und (c) Ein Team um Xueqiu Lin von der Stanford University hat Belege dafür gefunden, dass Paare von Enhancern verschiedener Cluster synergistisch zusammenwirken. Mutiert einer von beiden (b), reduziert das geringfügig die Proteinzusammenballung am Promotor und somit die Genexpression. Mutieren beide gleichzeitig (c), fällt diese Wirkung viel stärker aus, da es dann keinen nichtmutierten Cluster mehr gibt, mit dem der Promotor wechselwirken kann.

den Algorithmus am verlässlichsten auf die Existenz von SRE schließen lassen, sind: 1) wenige bis keine räumlichen Interaktionen zwischen beiden Enhancern sowie 2) umgekehrte Konzentrationen (an dem einen Cluster hoch, am anderen niedrig) bestimmter Proteine, welche die Genexpression fördern – beispielsweise das Eiweiß BRD4.

Laut früheren Arbeiten sorgen sehr starke Enhancer dafür, dass sich aktivierende Proteine wie BRD4 nahe dem entsprechenden Gen zusammenballen. Diese Moleküle sind für das Umschreiben von DNA in RNA erforderlich und sorgen damit für

eine hohe Genexpression. Wie Lin und ihr Team herausfanden, stört das Abschalten einzelner *MYC*-Enhancer eine solche Molekülanhäufung kaum, das Inaktivieren von SRE-Paaren aber sehr stark. Schaltet man BRD4 mittels Chemikalien aus, verschwindet das synergistische Zusammenspiel der SRE; offenbar sind dafür diese Proteinansammlungen nötig.

Zusammengenommen lassen die Erkenntnisse auf eine zweischichtige Architektur von Enhancer-Netzwerken schließen. Auf der ersten Ebene finden sich Verstärkerelemente, die innerhalb eines Clusters nah beieinanderliegen. Sie addieren sich in ihrer

Wirkung, die Aktivität des Promotors zu erhöhen, und stellen so sicher, dass die Genexpression auf hohem Niveau abläuft. Die zweite Ebene umfasst Enhancer verschiedener Cluster, die große Abstände zueinander haben und synergistisch zusammenwirken. Sie machen das Netzwerk als Ganzes robust, indem sie es mit Redundanz versehen – als Schutz gegen Mutationen. Ihre »Backup-Funktion« sorgt dafür, dass Sequenzänderungen in einem von zwei SRE-Partnern lediglich schwache Auswirkungen haben.

Möglicherweise treten beide Enhancer-Cluster gleichzeitig mit

dem Promotor in Wechselwirkung. Vorstellbar ist aber auch ein anderes Modell, das die umgekehrten BRD4-Konzentrationen an beiden Clustern berücksichtigt, welche offenbar wichtig sind. Demnach könnte der Promotor zwischen zwei Zuständen wechseln, und zwar so, dass sich jeweils nur an einem Cluster expressionsfördernde Proteine zusammenballen (siehe »Zweigleisiges System«). Mit anderen Worten: Wenn der erste Cluster aktiv ist, ist der zweite inaktiv und andersherum – was einer Backup-Funktion gleichkommt. Künftige Analysen einzelner Zellen könnten helfen, diese Hypothese zu prüfen.

Erbtes Risiko

Lin und ihr Team haben weiterhin belegt: In einigen Fällen äußert sich das synergistische Zusammenspiel der Enhancer in entsprechend gestaffelten Krankheitsrisiken beim Menschen. Auswertungen großer Gen-datenbanken zeigen beispielsweise, dass bestimmte genetische Varianten, die ein SRE-Paar des *MYC*-Gens

betreffen, sowohl die Expression dieses Gens in synergistischer Weise beeinflussen als auch das Risiko, an Morbus Crohn zu erkranken oder einen Leukämie-Rückfall zu erleiden.

Zusammengefasst liefert die Studie Hinweise auf einen Mechanismus, der Enhancer-Netzwerke robust gegenüber Mutationen macht. Unklar ist, wie häufig SRE im menschlichen Genom vorkommen. Sollten sie dort weit verbreitet sein, dann dürften sie einen großen Einfluss darauf haben, wie sich Mutationen in nicht proteincodierenden Sequenzen auswirken. Mediziner bewerten die genetische Veranlagung eines Menschen, eine bestimmte Krankheit zu bekommen, üblicherweise anhand so genannter polygener Risiko-Scores. Dabei berücksichtigen sie die vereinte Wirkung aller genetischen Risikofaktoren, die mit dieser Krankheit in Verbindung stehen. Meist gehen sie von einem additiven Effekt aus und nicht von einem synergistischen Zusammenspiel, was möglicherweise zu Fehleinschätzungen führt. Kön-

ten wir einen genomweiten »SRE-Score« erfassen, würde das unsere Fähigkeit eventuell deutlich verbessern, Erkrankungsrisiken aus genetischen Profilen abzuleiten. ◀

Ran Elkon forscht als Humangenetiker an der Universität Tel Aviv. **Reuven Agami** untersucht genetische Mechanismen von Krebserkrankungen am Netherlands Cancer Institute.

QUELLEN

Lin, X. et al.: Nested epistasis enhancer networks for robust genome regulation. *Science* 377, 2022

Maurano, M.T. et al.: Systematic localization of common disease-associated variation in regulatory DNA. *Science* 337, 2012

Nurk, S. et al.: The complete sequence of a human genome. *Science* 376, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 609, S. 477–478, 2022

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter); E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinkelmann, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Markus Fischer

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 9,30 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 98,40; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 75,-. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 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.

Ein Teil der Auflage beinhaltet eine Beilage von Plan International Deutschland e. V.

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom 1.1.2022.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmuth
President: Kimberly Lau



Erhältlich im Zeitschriften- und Buchhandlungsbereich und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



Umweltpolitik ohne China?

Westliche Industriestaaten möchten die Verflechtung mit China einschränken. Das erschwert den Weg zu einer ökologisch angepassten Weltwirtschaft.

» spektrum.de/artikel/2076186

Binnen weniger Jahrzehnte hat sich das alte Reich der Mitte von einem bettelarmen Land der Dritten Welt zur zweitgrößten Wirtschaftsmacht hochgearbeitet. Das gelang mit einer historisch einmaligen Mixtur von politischem Zentralismus und liberaler Marktwirtschaft. Jetzt stößt das paradoxe Erfolgsmodell an seine Grenzen. Zum einen zieht das Regime im Innern die Zügel an, zum anderen kursiert in den klassischen Industrieländern die Sorge, ihnen wachse da ein eher undurchsichtiger Konkurrent über den Kopf.

Unter Donald Trump begannen die USA, den Handel mit China durch Zölle zu bremsen und Embargos gegen Firmen wie Huawei zu verhängen. Außerdem stellte eine so genannte China-Initiative des Justizministeriums jede wissenschaftliche Kooperation zwischen chinesischen und US-amerikanischen Personen unter Spionageverdacht. Dieser Unfug wurde erst unter Joe Biden beendet, nachdem die Fachwelt heftig protestiert hatte und mehrere fälschlich angeklagte Forscher freigesprochen werden mussten.

Dennoch ist der vormals ansehnliche Prozentsatz von Artikeln mit gemischter US-chinesischer Autorschaft deutlich gesunken. Angesichts dessen warnt die britische Fachzeitschrift *Nature* in einem Editorial davor, die wissenschaftliche Zusammenarbeit mit China aufs Spiel zu setzen – und zwar nicht nur in der Grundlagenforschung, sondern auch hinsichtlich Seuchenbekämpfung, Artensterben und Klimawandel (*Nature* 611, S. 7, 2022).

Welche Konsequenzen hätte eine Abnabelung des Westens von China für den Übergang zu einer kohlenstofffreien Weltwirtschaft? Das hat ein Team um den Politologen Michael R. Davidson von der University of California in San Diego untersucht (*Science* 377, S. 1266–1269, 2022).

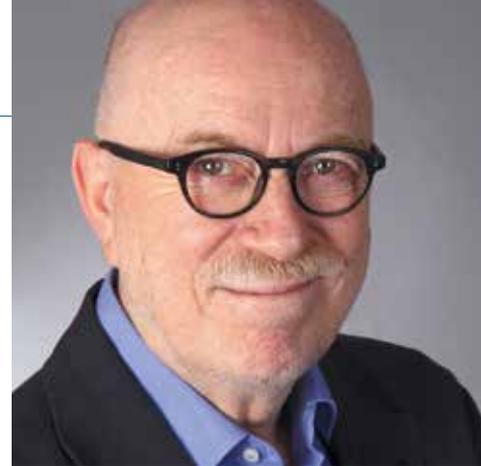
Nach Einschätzung der US-Gruppe wären die Folgen beträchtlich. Gegenwärtig produziert China drei Viertel des weltweiten Bedarfs an Lithium-Ionen-Batterien, zwei Drittel der Solarzellen sowie einen erheblichen Anteil der Bauteile für Windkraft-

anlagen. Der Handel mit diesen »grünen« Technikkomponenten ist derzeit international so intensiv verflochten, dass eine echte Entkopplung kaum durchführbar wäre – oder nur, wenn man dafür enorme Investitionen in den zähen Aufbau nationaler Ersatzindustrien in Kauf nähme und entsprechend höhere Produktpreise.

Damit stiege aber die relative Attraktivität der fossilen Energieträger, von denen man doch loskommen möchte. Das wiederum träfe vor allem die Entwicklungsländer, die, um ihre Klimaziele zu erreichen, besonders auf erschwingliche Umwelttechnik angewiesen sind.

Die Autorinnen und Autoren der Studie wägen die Nachteile einer Distanzierung von China gegen das Risiko ab, einem mächtigen Staat, dessen Innen- und Außenpolitik internationale Konflikte heraufbeschwört, wirtschaftlich allzu ausgeliefert zu sein. In puncto Energieabhängigkeit sind grüne Technologien allerdings besonders vorteilhaft, da sie das eigene Land von fossilen Importen ja gerade befreien. Ein Problem bereitet hingegen der Schutz geistigen Eigentums vor Wirtschaftsspionage und Patentverletzungen. Das fällt bei Batterien und Fotovoltaik weniger ins Gewicht als bei der Entwicklung von »grünem Stahl«. Gewiss lohnt es, diese Zukunftstechnologie, bei deren Entwicklung USA und EU eng zusammenarbeiten wollen, vor neugierigen Augen zu schützen.

Angesichts der Spannungen zwischen China und der westlichen Welt drängt sich manchem Beobachter der Vergleich mit dem Kalten Krieg auf. Doch zu Zeiten der Sowjetunion bestand eine ungleich geringere Verflechtung der Weltwirtschaft, und Klimawandel war kein Thema. Heute käme die Abkopplung von China einer schmerzhaften Amputation mit ungewissem Ausgang gleich.



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

GEO

Warum ich bin, wie ich bin.

Die Vielschichtigkeit des Menschen verstehen.



Alle drei Monate neu: geo-wissen.de/magazin

Wie die Säugetiere die Welt eroberten

AUF EINEN BLICK

Überlebende der Katastrophe

- 1** Im Erdmittelalter entwickelten sich die Vorfahren der Säugetiere parallel zu den Dinosauriern und spalteten sich zu zahlreichen Untergruppen mit hochspezialisierten Arten auf.
- 2** Mit dem Asteroideneinschlag am Ende der Kreidezeit verschwanden mit den Dinosauriern die meisten Säuger. Nur wenige Gruppen überlebten.
- 3** Im Paläozän blühten die Säugetiere auf. Artenvielfalt und Körpergröße nahmen zu; erst später stieg auch das Hirnvolumen an.

Jahrmillionenlang existierten sie im Schatten der Dinosaurier, bis ein Asteroideneinschlag für eine Zäsur sorgte. Nur wenige jener frühen Säuger überlebten die globale Katastrophe, doch diese nutzten ihre evolutionäre Chance und läuteten ein neues Zeitalter ein.

» spektrum.de/artikel/2076189



Stephen Brusatte ist Professor für Paläontologie und Evolution an der University of Edinburgh.



**KINDERSTUBE
IM PALÄOZÄN**
Als Plazentatier
brachte *Ectoconus*
lebende, gut ent-
wickelte Junge
zur Welt.

Jedes Frühjahr mache ich mit meinen Studenten eine Exkursion in die Wüste im Nordwesten von New Mexico. Bei unseren Wanderungen durch das pastellfarbene Ödland unweit des Chaco Canyon – wo Pueblo-Indianer vor 1000 Jahren eine große Stadt in den Fels gebaut haben – stolpern wir unweigerlich über Dinosaurierknochen. Massenhaft ist der Boden übersät von zerborstenen Oberschenkeln des *Tyrannosaurus rex* sowie von Wirbelbruchstücken, die vor etwa 70 Millionen Jahren die langen Hälse der Sauropoden trugen.

Doch sobald wir die Gesteinsschichten querend aufwärtssteigen, verschwinden diese Knochen, und wir stoßen auf andere Fossilien: bezahnte Kiefer. Dabei handelt es sich nicht um die messerscharfen Fänge des *T. rex*, sondern um Gebilde mit komplexen Höckern und Furchen – Backenzähne von Säugetieren. Bei einer Exkursion 2014 folgte ich ihrer Spur in ein trockenes Bachbett, das die Navajo »Kimbeto« nennen, zu Deutsch »Sperberquelle«. Plötzlich erklang ein Triumphschrei. Mein Kollege Tom Williamson hatte etwas gefunden: das Skelett eines großen Tiers, das einst etwa 100 Kilogramm gewogen haben muss. Wie uns die Beckenanatomie verriet, hatte es lebende, voll entwickelte Junge zur Welt gebracht. Demnach handelte es sich eindeutig um ein Plazentatier – so wie wir.

Ectoconus, wie der fossile Säuger heißt, war ein Revolutionär. Nur 380000 Jahre nach einer globalen Katastrophe tauchte er auf. Damals hatte ein Asteroid die Herrschaft der Dinosaurier mit einem Schlag beendet und eine

neue Ära eingeläutet. In Lehrbüchern wird diese Geschichte oft stark verkürzt dargestellt: Die Saurier verschwanden demnach am Ende der Kreidezeit, und die Säugetiere übernahmen rasch das Feld. Dabei wird allerdings die Tatsache übergangen, dass wir nur sehr wenig über die Wesen wissen, die das große Sterben überlebten und in den nächsten zehn Millionen Jahren während des Paläozäns die Szenerie beherrschten. Wieso konnten sie sich behaupten, wo doch drei Viertel aller Tierarten ausstarben? Wie legten sie die Basis für die Evolution der mehr als 6000 Arten plazentaler Säugetiere, die heute existieren – von Fledermäusen über Wale bis hin zum Menschen?

Wissenschaftler diskutieren solche Fragen seit den 1870er Jahren, als in New Mexico die ersten Placentalia-Fossilien aus dem Paläozän auftauchten. In den letzten zwei Jahrzehnten gaben neue Entdeckungen und Forschungsmethoden Aufschluss über das Leben dieser Pioniere.

Viele Menschen glauben, die Säugetiere seien erst nach den Dinosauriern entstanden. Tatsächlich stammen jedoch beide Gruppen aus der gleichen Zeit und der gleichen Region: Vor etwa 225 Millionen Jahren bildete die gesamte Landfläche der Erde einen einzigen Superkontinent namens Pangäa. Damals in der Triaszeit erholte sich der Planet von dem schlimmsten Massenaussterben der Geschichte, als Megavulkane im Bereich des heutigen Sibirien Millionen Jahre lang Lava und Kohlenstoffdioxid gespuckt und dadurch eine globale Hitzewelle verursacht hatten, der bis zu 95 Prozent aller Spezies zum Opfer gefallen waren. Nachdem die Vulkane erloschen waren, traten Dinosaurier, Säugetiere und viele andere neue Tiergruppen auf, um die verwüsteten Lebensräume zurückzuerobern (siehe »Spektrum« August 2019, S. 30).

FOSSILREICHE LANDSCHAFT Im Nordwesten des US-Bundestaats New Mexico liegen die Felsen des Torreón Wash. Die Gegend gilt als Eldorado für Säugerfossilien aus dem Paläozän.



In den nächsten 160 Millionen Jahren gingen Saurier und Säuger ihre eigenen evolutionären Wege – beide dabei überaus erfolgreich. Dinosaurier wuchsen zu Riesen und grenzten die Säuger aus den ökologischen Nischen der Großtiere aus. Diese setzten auf die gegenteilige Strategie: Mit geringen Körpergrößen konnten sie Nischen erobern, die den größeren Sauriern verschlossen blieben. Dank der so geschaffenen Wettbewerbsvorteile verhinderten die Säugetiere, dass ihnen *T. rex*, *Triceratops* & Co durch Verringerung der Körpergröße Konkurrenz machen konnten. So wuselten während der Jura- und Kreidezeit von vor 201 bis vor 66 Millionen Jahren zwischen den Beinen der Dinos eine Fülle von bestenfalls dachgroßen Wesen, die sich krabbelnd, kletternd, grabend, schwimmend oder gleitend fortbewegten. Als warmblütige, behaarte Organismen mit hoher Stoffwechselrate, einem aus Eckzähnen, Schneidezähnen, Prämolaren und Molaren bestehenden Gebiss sowie der Fähigkeit, ihren Nachwuchs mit Milch zu füttern, besaßen sie den typischen Säugerbauplan.

Ein weit verzweigter Stammbaum

Diese frühen Säugetiere erblühten in einem weit verzweigten Stammbaum. Es gab Dutzende von Untergruppen, die sich in Bezahnung, Ernährungsweise oder Fortpflanzung unterschieden (siehe »Spektrum« September 2020, S. 36). Eine davon – die Multituberculata – florierte während der Kreide und erschloss sich mit ihren Schneide- und Backenzähnen eine neue Nahrung: Früchte und Samen. Zahlreiche Multituberculata-Fossilien kamen in der Wüste Gobi bei polnisch-mongolischen Expeditionen zwischen 1963 und 1971 ans Licht – eines der ersten großen paläontologischen Feldforschungsprojekte unter weiblicher Führung, jener der polnischen Paläontologin

Zofia Kielan-Jaworowska (1925–2015), die für mich eine wahre Heldin darstellt.

Während der Blütezeit der Multituberculata spalteten sich drei weitere systematische Linien ab, aus denen die heutigen Säugetierunterklassen entstanden: die Ursäuger (Protheria) mit den Eier legenden Kloakentiere (Monotremata), die Beuteltiere (Marsupialia), deren unreife Jungen sich im Beutel weiterentwickeln, sowie die höheren Säugetiere oder Plazentatiere (Eutheria) wie *Ectoconus*, die größere Jungtiere gebären. Dank der Methode der molekularen Uhr, mit der sich auf Grund von Unterschieden in DNA-Sequenzen abschätzen lässt, wann sich bestimmte Erblinien heutiger Tierarten getrennt haben, wissen wir, dass einige Placentalia einschließlich der Primaten bereits zur Zeit der Dinosaurier existiert haben müssen. Allerdings wurden bisher noch keine Fossilien dieser frühen Plazentatiere gefunden.

Ein einziger verhängnisvoller Tag vor 66 Millionen Jahren beendete das urzeitliche Szenario, in dem Dinosaurier über das Land donnern und Säugetiere in deren Schatten umherhuschen. Ein Asteroid von der Größe des Mount Everest raste schneller als ein Düsenjet durch das All auf die Erde zu. Er schlug im Gebiet der heutigen mexikanischen Halbinsel Yucatán ein und riss mit der Energie von mehr als einer Milliarde Atombomben ein über 15 Kilometer tiefes und über 150 Kilometer breites Loch in die Erdkruste. Tsunamis, Waldbrände, Erdbeben und Vulkanausbrüche verwüsteten daraufhin den Planeten. Staub und Ruß erfüllten die Atmosphäre und verdunkelten die irdische Welt für Jahre. Pflanzen konnten keine Fotosynthese mehr betreiben, Wälder starben ab. Zahllose Pflanzenfresser verschwanden, und die Fleischfresser folgten ihnen. Die Ökosysteme zerfielen – das Zeitalter der Dinosaurier war zu Ende.

Die Apokalypse des Asteroideneinschlags veränderte den Lauf der Erdgeschichte radikal. Drei Viertel aller Tierarten waren dem nicht gewachsen und starben aus. Zu den wohl bekanntesten Opfern zählen die Dinosaurier: All die langhalsigen, gehörnten und scharfzahnigen Monster mussten abtreten – nur die Vögel konnten das Erbe der Urzeitgiganten bis in die heutige Zeit fortführen.

Aber was geschah mit den Säugetieren? Die meisten Schilderungen über das große Aussterben am Ende der Kreidezeit stellen sie als die Gewinner dar, die den Sauriern den Thron raubten. In gewissem Maße stimmt das auch: Säugetiere haben überlebt, sonst gäbe es uns Menschen nicht. Doch laut neuen Forschungsergebnissen kamen sie nur knapp davon. Ihr weiteres Schicksal wurde entscheidend geprägt von den Ereignissen in den ersten Tagen, Jahren und Jahrtausenden nach der Katastrophe. Der Asteroid katapultierte die Säuger in ihre größte Krise, ermöglichte aber auch ihren Durchbruch.

Die am besten erhaltenen Fossilien von Säugetieren, die mit dem Asteroideneinschlag konfrontiert waren, stammen aus den nördlichen Great Plains der USA. Fast ein halbes Jahrhundert lang durchstreifte der Paläontologe William Clemens (1932–2020) die nach Salbei duftenden Prärien im Nordosten von Montana. Die dortige



Hügellandschaft wurde in einem Zeitraum von drei Millionen Jahren, der das Ende der Kreidezeit und den Beginn des Paläozäns umfasste, von Flüssen geformt, die in den urzeitlichen Rocky Mountains entsprangen und durch ausgedehnte Wälder strömten. Zehntausende von Fossilien aus den Schichten dieser Landschaft wertete Clemens' ehemaliger Schüler Gregory Wilson Mantilla, heute an der University of Washington, statistisch aus, um herauszufinden, welche Arten damals existierten und welche wieder verschwanden.

Es mag überraschen, aber den Säugetieren ging es vor der Katastrophe am Ende der Kreidezeit ziemlich gut. Mindestens 30 Arten lebten auf dem Gebiet des heutigen Montana und besetzten zahlreiche ökologische Nischen an der Basis der von Dinosauriern dominierten Nahrungskette: Es gab Knochen-, Pflanzen-, Insekten- und Allesfresser. Die überwiegende Mehrheit bildeten frühe Vertreter der Beuteltiere sowie Multituberculata, derweil Plazentatiere noch selten waren. Diese Situation blieb während der letzten zwei Millionen Jahre der Kreidezeit stabil, ohne Anzeichen für ernsthafte Krisen.

Dann änderte sich plötzlich alles. In den Sedimentgesteinen aus der Zeit vor 66 Millionen Jahren taucht eine dünne Schicht mit einem vergleichsweise hohen Gehalt an Iridium auf. Dieses Element ist auf der Erdoberfläche selten, kommt jedoch im Weltraum häufiger vor. Es lieferte den chemischen Fingerabdruck des Asteroideneinschlags. Die Dinosaurier verschwanden abrupt; die Kreidezeit war dem Paläozän gewichen.

Die Krise der Säuger

Die Szenerie des frühen Paläozäns erscheint düster. Fossilienfunde in Montana werden auf etwa 25 000 Jahre nach dem Asteroideneinschlag datiert – dort riecht es förmlich nach Tod. Praktisch alle Säugetiere fehlen, die während der Kreide in dieser Region gediehen; nur sieben Spezies hatten überlebt. Mehrere andere Fundstellen, welche die nächsten 100 000 bis 200 000 Jahren repräsentieren, enthalten Fossilien von insgesamt lediglich 23 Säugerarten. Nur eine davon gehört zu den Beuteltieren, die in der Kreidezeit so zahlreich vertreten waren. Betrachtet man den gesamten Fossilienbestand von Montana zusammen mit vergleichbaren Daten aus dem übrigen westlichen Nordamerika, so ergibt sich ein erschreckendes Bild: Gerade einmal sieben Prozent der Säugetierarten überlebten die Katastrophe!

Dieser trostlose Befund wirft eine Frage auf: Wie retteten sich die wenigen Säuger? Eine Antwort zeichnete sich ab, als Wilson Mantilla die ausgestorbenen mit den überlebenden Arten verglich. Letztere waren kleiner als die meisten Säugetiere der Kreide, und ihre Gebisse deutete darauf hin, dass es sich um Allesfresser handelte. Die untergegangenen Spezies hingegen erschienen größer und hatten sich als Fleisch- oder Pflanzenfresser stärker spezialisiert. Damit waren sie zwar hervorragend an die ökologischen Bedingungen der ausgehenden Kreide angepasst, doch als die Katastrophe durch den Asteroiden hereinbrach, wurde ihnen ihre Spezialisierung

zum Verhängnis. Die kleineren Nahrungsgeneralisten waren dagegen besser in der Lage, sich von dem zu ernähren, was in dem Chaos nach dem Einschlag noch verfügbar blieb, und sie konnten sich leichter verbergen, um das Schlimmste zu überstehen.

Als sich die Ökosysteme im frühen Paläozän wieder erholten, gehörten viele der nun prosperierenden Säugtiere zu den Placentalia, die in der Kreidezeit nur eine bescheidene Nebenrolle gespielt hatten. Mit ihren winzigen Körpern, ihrer flexiblen Ernährung sowie ihrer vermutlich hohen Wachstums- und Vermehrungsrate vermochten sie, verwaiste ökologische Nischen zu besetzen und neue Nahrungsnetze aufzubauen. Etwa 100 000 Jahre nach dem Asteroideneinschlag tauchte in Montana ein weiteres Plazentatier auf und verbreitete sich rasch: *Purgatorius* konnte dank höckeriger Backenzähne Früchte vertilgen und wegen seiner flexiblen Fußknöchel auf Bäume klettern. Als frühes Mitglied der Primatenlinie zählte er oder ein enger Verwandter zu unseren Vorfahren.

Diese glücklichen Überlebenden schufen eine neue Welt: das Zeitalter der Säugetiere, in dem vor allem die Placentalia einen enormen Aufschwung erlebten. Einige der am besten erhaltenen Fossilien der ersten echten Plazentatiere, die verschiedene Lebensgemeinschaften des Paläozäns bildeten, stammen aus der Fossilagerstätte Kimbeto Wash in New Mexico. *Ectoconus*, dessen Skelett wir 2014 ausgruben, gehörte zu jenen Pionieren. Als er vor 65,6 Millionen Jahren durch sumpfige Regenwälder streunte und sich an Blättern und Bohnen labte, stellte er den größten Säuger dar, der jemals dort gelebt hatte. Er war eines von Dutzenden neuer Plazentatiere in einem Ökosystem, in dem die Zeit der Dinosaurier bereits ferne Vergangenheit zu sein schien.

Wir kennen solche Plazentatiere aus dem Paläozän seit fast 150 Jahren. Ihre Fossilien wurden in den 1870er und 1880er Jahren gefunden, als Geologen gemeinsam mit Kartografen und Soldaten das den amerikanischen Ureinwohnern genommene Land vermaßen. Einer dieser Forscher, David Baldwin, entdeckte bei Kimbeto Wash und anderen Fundorten ähnlichen Alters eine Reihe von Fossilien derartiger Säuger. Sie lagen just zwischen den Schichten mit den älteren Saurierfossilien aus der Kreide und jenen mit den jüngeren Säugetieren aus dem Eozän (56 bis 34 Millionen Jahre vor heute), die sich leicht in bekannte taxonomische Ordnungen wie Nagetiere (Rodentia) oder Unpaarhufer (Perissodactyla) einordnen lassen. Die Säugetiere des Paläozäns hingegen passten nicht in das herkömmliche Schema. Sie erschienen viel größer als die kreidezeitlichen Säuger, und ihnen fehlten die Beutelknochen an der Vorderseite des Beckens, was darauf hindeutet, dass sie eine leistungsfähige Plazenta besaßen, mit der sie ihre Föten im Mutterleib versorgten. Es handelte sich also mit Sicherheit um Plazentatiere. Aber ihr Körperbau wirkte eigenartig: stämmig und muskulös, mit einem Merkmalsmix aus ganz verschiedenen Gruppen moderner Säuger.

Diese paläozänen Sonderlinge waren schwierig einzuordnen, und Wissenschaftler begannen, sie als »archai-

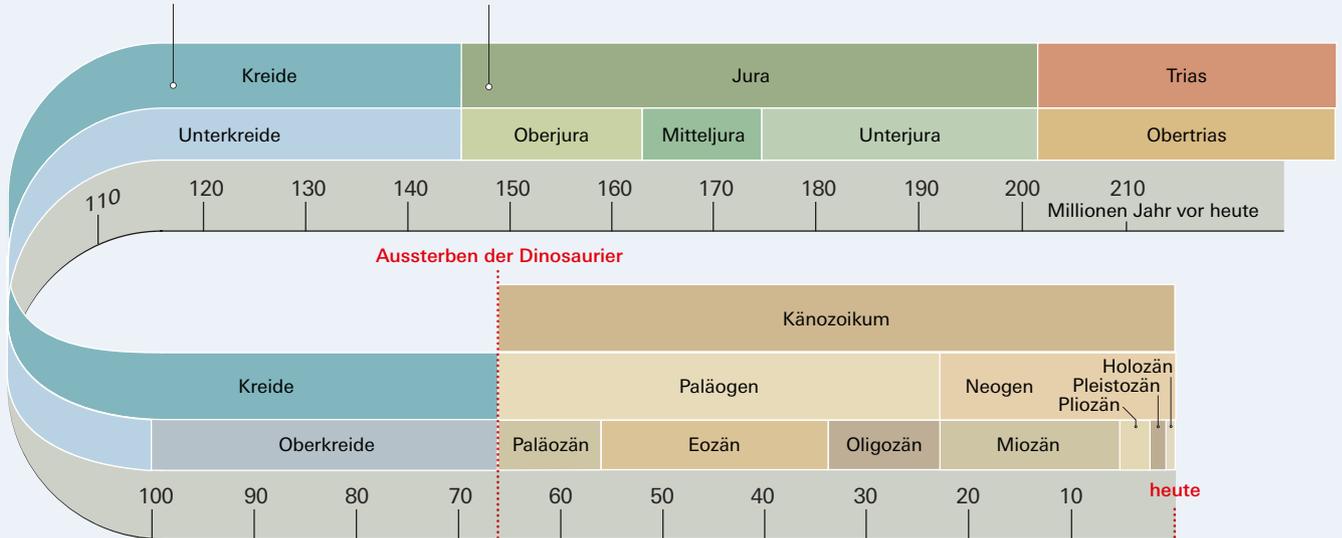
Aufstieg der Säugetiere

Für Jahrmillionen lebten die Säugetiere (Mammalia) mitten unter den Dinosauriern. Doch vor 66 Millionen Jahren stürzte ein Asteroid im Bereich des heutigen Golfs von Mexiko auf die Erde und löschte drei Viertel aller Arten aus – einschließlich der Dinosaurier (mit Ausnahme der Vögel). Jetzt schlug die Stunde der Säuger. Neue Erkenntnisse zeigen, wie sie das Massenaussterben überstanden und eine Vielzahl verschiedener Arten hervorbrachten, die Meer, Land und Lüfte bevölkern.

Die Vorfahren der drei Säugetierunterklassen – Kloakentiere, Beuteltiere und Plazentatiere – geben ihr Debüt.

Säugetiere entwickeln vielfältige Körperformen und besetzen diverse ökologische Nischen. Doch im Vergleich zu den Dinosauriern bleiben sie relativ klein.

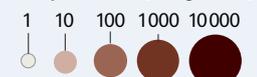
Vor 225 Millionen Jahren treten sowohl Dinosaurier als auch Säugetiere erstmals auf dem Superkontinent Pangäa auf.



Körpergröße

Nicht zuletzt dank ihrer geringen Körpergröße konnten einige Säuger den Asteroideneinschlag überleben, der die Dinosaurier auslöschte. Danach wuchsen die Plazentatiere allmählich heran und erreichten Ausmaße einer Ratte bis hin zu denen eines Rinds sowie darüber hinaus.

maximale Körpermasse (Kilogramm)



Ökologische Vielfalt

Unterschiedliche Körperformen und Merkmale öffneten den Plazentatiere eine breite Palette unbesetzter ökologischer Nischen. So vermochten einige Arten, auf Bäume zu klettern und Früchte zu fressen, andere gruben im Boden nach Knollen.

relative Diversität

niedrig ←→ hoch



Artenreichtum

Als die Kreidezeit in das Paläozän überging und sich die Ökosysteme von den Verheerungen des Asteroideneinschlags erholten, stieg die Zahl der Säugerarten rasch an.

relative Diversität

niedrig ←→ hoch



Intelligenz/Hirngröße

Unter den Wirbeltieren besitzen Säugetiere im Verhältnis zur Körpergröße das größte Hirnvolumen. Lange vermutete man, die Gehirne seien im Lauf der Evolution stetig angewachsen. Doch inzwischen zeigte sich, dass zunächst die Körpermasse zunahm und sich erst danach das Hirnvolumen stark vergrößerte.

relative Hirngröße

klein ←→ groß



Computertomografiebilder fossiler Tier Schädel offenbaren, dass das Hirnvolumen bei den frühesten Plazentatiere zunächst abnahm. Später stieg es in mehreren Abstammungslinien unabhängig voneinander deutlich an, wobei sich vor allem die an sensorischen Funktionen beteiligten Hirnregionen vergrößerten.



»archaisches« Plazentatier *Arctocyon primaevus* (Condylarthra) aus dem späten Paläozän



»archaisches« Plazentatier *Trogosus hillsii* (Tillodontia) aus dem mittleren Eozän



modernes Plazentatier *Hyrachyus modestus* (Perissodactyla) aus dem mittleren Eozän

sche« Plazentatiere abzutun. In welchen Verwandtschaftsbeziehungen standen sie zu ihren Vorläufern aus der Kreide sowie zu den heutigen Säugetieren? Wie bewegten sie sich, was fraßen sie, und wie rasch wuchsen sie? Derartige Fragen beschäftigten Generationen von Paläontologen. Dann kam Thomas Williamson, Kurator am New Mexico Museum of Natural History and Science. Seit mehr als einem Vierteljahrhundert durchkämmt er die von tiefen Erosionsrinnen durchzogenen Gebiete der Badlands und bildete dabei seine Zwillingsöhne Ryan und Taylor sowie etliche junge Navajo zu hervorragenden Fossilien-sammlern aus. In den vergangenen zehn Jahren schlossen sich meine Studenten und ich Toms Team an.

Ein vielgestaltiger Zoo

Die Gruppe hat bereits Tausende von Fossilien gesammelt, die ein detailliertes Bild des Lebens im Paläozän innerhalb der ersten Million Jahre nach dem Asteroideneinschlag zeichnen. Unter den archaischen Placentalia befanden sich Tiere wie *Ectoconus*, die der unscharf abgegrenzten Gruppe der Condylarthra (Stammhuftiere) angehörten. Deren Mitglieder waren vornehmlich Pflanzen- oder Allesfresser mit kräftigem Körperbau; viele von ihnen besaßen Hufe. Sie teilten sich die ökologischen Nischen der Pflanzenfresser mit den Pantodonta – kuhgroße, tonnenschwere Blattfresser mit riesigen Füßen. Eine andere Gruppe, die den Fantasiegestalten gotischer Kathedralen ähnelnden Taeniodonta, rissen mit ihren kräftigen krallenbewehrten Vorderfüßen die Erde auf, um dann mit ihren massiven Kiefern und übergroßen Eckzähnen Knollen auszugraben. All diese Säugetiere fürchteten die Vertreter der wolfsartigen Triisodontidae gefürchtet haben, den Schrecken des Paläozäns, die mit ihren Backenzähnen die Knochen ihrer Beute zermalmten.

Die Stammbäume jener archaischen Tierarten zu entwirren stellt eine echte Herausforderung dar. Gemeinsam mit Williamson sowie dem Säugetierexperten John Wible vom Carnegie Museum of Natural History und weiteren Kollegen will meine Arbeitsgruppe diesen gordischen Knoten der Abstammung zerschlagen. Mit Hilfe einer umfangreichen Datenbank der anatomischen und genetischen Merkmale fossiler und heutiger Säugetiere versuchen wir, einen Gesamtstammbaum zu konstruieren. Unsere ersten Ergebnisse sehen ermutigend aus. Einige der archaischen Formen wie die Taeniodonta könnten von primitiven Plazentatieren der Kreidezeit abstammen und stünden damit an der Basis des Stammbaums. Andere, darunter die Condylarthra, weisen Merkmale der heutigen Huftiere auf und sind wahrscheinlich Vorfahren der Pferde und Rinder. Die archaischen Plazentatiere erweisen sich somit als äußerst vielgestaltiger Zoo mit einigen hoch spezialisierten Exemplaren.

Auch wenn die genaue Position der Condylarthra und Taeniodonta sowie ihrer archaischen Verwandten im Stammbaum noch ungeklärt bleibt, können wir bereits erahnen, wie sie als lebende Organismen aussahen. Die von unserem Team gesammelten und mit modernen Methoden untersuchten Fossilien zeigen, wie diese

Plazentatiere neue Fähigkeiten und Verhaltensweisen entwickelten, um im Chaos des frühen Paläozäns offene ökologische Nischen zu nutzen. Viele der für Placentalia typischen Merkmale bildeten sich damals heraus und trugen dazu bei, dass sich die Überlebenden des Massenaussterbens von Generalisten zu neuartigen und vielfältigen Spezialisten entwickelten. Diese Eigenschaften untermauerten den Erfolg der Plazentatiere in den folgenden 66 Millionen Jahren und schufen somit auch die Grundlage der menschlichen Biologie.

Zu den wichtigsten Merkmalen der Placentalia gehört die Fähigkeit, gut entwickelte Jungtiere zur Welt zu bringen. Sie wachsen über einen längeren Zeitraum im Leib des Muttertiers heran, bevor sie in einem verhältnismäßig reifen Stadium geboren werden. Das unterscheidet sich deutlich von der Fortpflanzung der beiden anderen Säugetierunterklassen. Kloakentiere schlüpfen aus Eiern, während Beuteltiere sehr früh zur Welt kommen, um ihre Entwicklung über Monate im Beutel der Mutter fortzusetzen. Die längere Trächtigkeitsdauer verschafft Plazentatieren einen wichtigen Startvorteil: Die Jungen können sich oft schon kurz nach der Geburt eigenständig fortbewegen, Kontakt mit ihrer Gruppe aufnehmen oder sogar selbst Nahrung beschaffen.

Um herauszufinden, wie die archaischen Plazentatiere des Paläozäns heranwuchsen, schnitt mein Postdoc Gregory Funston fossile Zähne, darunter auch Milchzähne, in dünne Scheiben, um sie unter dem Mikroskop zu studieren. Indem er die täglich gebildeten Wachstumslinien abzählte und den Geburtszeitpunkt anhand chemi-

ALTE PFLANZEN- UND FLEISCHFRESSER
Im Kimbeto Wash im Nordwesten New Mexicos stießen Forscher auf verschiedene Säugerfossilien (rechts oben) – darunter Kieferknochen des Pflanzen fressenden *Ectoconus* (unten) sowie eines Fleischfressers aus der Familie der Triisodontidae (rechts unten).



SIMON NORFOLK



SIMON NORFOLK

scher Stressmarker im Zahnschmelz ermittelte, zeigte er, dass einige Arten ihre Jungen rund sieben Monate lang im Mutterleib versorgten – mehr als doppelt so viel Zeit wie bei Beuteltieren. Diese Beobachtung bestätigte die bereits vorliegenden Indizien aus der Beckenanatomie: Es handelte sich tatsächlich um Plazentatiere. Da die lange Trächtigkeit ein höheres Geburtsgewicht ermöglichte, konnten die Jungen auch zu größeren adulten Tieren heranwachsen. So gelang es den ersten Placentalia, binnen weniger hunderttausend Jahre nach dem Aussterben der Dinosaurier rasch an Größe zuzulegen, wohingegen ihre Vorfahren für 160 Millionen Jahre kleinwüchsig geblieben waren (siehe »Aufstieg der Säugetiere«).

Gleichzeitig nahm auch ihre Vielfalt zu. Meine ehemalige Doktorandin Sarah Shelley, ein wichtiges Mitglied unserer Feldteams in New Mexico und inzwischen am

Carnegie Museum of Natural History in Pittsburgh tätig, untersuchte die Skelette archaischer Säuger im Detail, wobei sie besonders auf die Muskelansätze achtete. Indem sie einen großen Datensatz statistisch auswertete, konnte sie Placentalia-Arten des Paläozäns mit ihren Vorläufern aus der Kreide und ihren heutigen Nachfahren vergleichen. Dabei stieß sie auf etwas Unerwartetes: Die Skelette der archaischen Plazentatiere zeigten eine hochdiverse Anatomie, und ihre Fußskelette schienen sich für viele Fortbewegungsarten zu eignen. Ihre Körperformen wirkten zwar stämmig und auf den ersten Blick eher plump – weshalb sie lange als primitiv galten –, doch ihr Muskelapparat erwies sich als äußerst anpassungsfähig, so dass die verschiedenen Spezies graben, laufen oder klettern und sich unterschiedliche Nahrungsquellen erschließen konnten. Eine solch hochgradige Diversifizierung gilt als Hinweis auf eine so genannte adaptive Radiation, bei der aus einer wenig spezialisierten Urspezies rasch zahlreiche neue Arten mit variierenden Körpermerkmalen und Verhaltensweisen entstehen, die neue Lebensräume und unbesetzte ökologische Nischen erobern.

Trotz dieser vielfältigen Spezialisierung dürften die archaischen Tiere des Paläozäns nicht besonders intelligent gewesen sein. So lautet das Ergebnis einer Studie meiner Postdoc-Mitarbeiterin Ornella Bertrand, die sich als wahre Meisterin im digitalen Rekonstruieren von Gehirnen und neurosensorischen Strukturen ausgestorbener Tiere mittels Computertomografie erwiesen hat. Sie hatte mehrere Schädel archaischer Plazentatiere aus New Mexico sowie weitere Fossilien untersucht, die kurz zuvor in der Nähe von Denver entdeckt worden waren. Demnach besaßen die im Vergleich zu ihren winzigen Vorgängern aus der Kreide viel größeren Säuger des Paläozäns



SIMON WORFOLK



SIMON WORFOLK



FOTOLIA / FRANK WASSERFÜHRER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/artenvielfalt-und-artensterben

zwar auch umfangreichere Gehirne. Doch wie wir aus Labor- und Feldstudien an heutigen Organismen wissen, kommt es für die Intelligenz auf die relative Größe des Gehirns an, also auf das Verhältnis zwischen Hirnvolumen und Körpermasse (siehe »Spektrum« September 2022, S. 36). Dieses erschien bei den archaischen Plazentatieren als geradezu lächerlich gering – nicht nur im Vergleich zu heutigen Säugern, sondern auch zu den kreidezeitlichen Spezies, die unter der Herrschaft der Dinosaurier lebten.

Großer Körper statt großes Gehirn

Demnach vergrößerten sich die ersten Plazentatiere anscheinend so rasch, dass ihre Gehirne anfangs nicht mithalten konnten. Das widerspricht der lang geltenden Annahme, wonach die Säuger Gehirne im Lauf der Zeit sowohl absolut als auch relativ gesehen stets voluminöser wurden. Sie passt eigentlich nicht zu unserer Erwartung: Hätten nicht die Säugetiere, als sie die Placentalia-Dynastie begründeten, ihren Verstand einsetzen müssen, um den Hindernisparcours des postapokalyptischen Überlebenskampfes zu bewältigen? Offenbar nicht. Ein großer Körper war wohl, zumindest anfangs, wichtiger als ein großer Kopf, um die vielen verwaisten ökologischen Nischen zu besetzen. Während dieser instabilen Periode, die ständig neue Überlebenschancen bot, könnten umfangreiche Gehirne wegen ihres hohen Energiebedarfs sogar hinderlich gewesen sein.

Als sich die Ökosysteme schließlich stabilisierten und der Wettbewerb zwischen den vielen neuen Arten zunahm, wuchsen auch deren Gehirne. Ein überwiegender Teil des Wachstums betraf den Neokortex, jene Großhirnregion, die an höheren kognitiven Fähigkeiten und der Integration sensorischer Signale beteiligt ist. Doch diese Entwicklung musste bis zum nächsten Zeitintervall nach dem Paläozän warten: dem Eozän, in dem die archaischen Plazentatiere allmählich verschwanden und die modernen Vertreter – darunter Pferde, Fledermäuse und Wale – den Planeten eroberten.

Das Paläozän war ein Treibhaus: Die Säugetiere im heutigen New Mexico bevölkerten den Dschungel, Krokodile wärmten sich in der Sonne der hohen Breitengrade. Dann, vor etwa 56 Millionen Jahren, wurde es sogar noch wärmer. Unter den nördlichen Kontinenten begann sich Magma zu sammeln, das pilzförmig nach oben drängte. Dabei sickerte es durch die Erdkruste und röstete das Gestein. Wie ein Verbrennungsmotor setzte diese Aktivi-

tät Billionen Tonnen Kohlenstoffdioxid frei, das die Atmosphäre innerhalb von höchstens 200000 Jahren um fünf bis acht Grad Celsius erwärmte. Niemals danach war es auf der Erde wieder so heiß.

Die rasche Erderwärmung, das Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum, war eine weitere Hürde, welche die Säugetiere überwinden mussten. Doch anders als nach dem Asteroideneinschlag zehn Millionen Jahre zuvor starben diesmal nur sehr wenige Arten aus. Stattdessen begannen die Tiere zu wandern und folgten den Landkorridoren, die sich mit der Erwärmung zu den hohen Breitengraden öffneten. Manche der Migrantinnen verfügten über neue Merkmale, insbesondere über ein viel größeres Gehirn. Primaten bekamen Finger- und Zehennägel und konnten so besser im Geäst der Bäume klettern, Paarhufer entwickelten die Sprungbeinrolle im Knöchelgelenk, die rascheres Laufen erlaubte, und die Hufe der Unpaarhufer vergrößerten sich und ermöglichten so einen schnellen Galopp.

Die moderneren Säugetiere schwärmten über die inzwischen mit stabilen Landbrücken verbundenen Kontinente Nordamerika, Europa und Asien aus und verdrängten die archaischen Placentalia. Condylarthra, Taeniodonta, Pantodontia und Triisodontidae überlebten die gewaltige Wandlungswelle nicht und mussten nach kurzer Zeit abtreten.

Südlich des Äquators, wo wir kaum Säugerfossilien aus der Kreide und dem Paläozän kennen, verlief die Geschichte anders. Sowohl Afrika als auch Südamerika bildeten Inselkontinente, die in ihrer Isolation ganz eigene Placentalia erzeugten: Elefanten nebst deren Verwandte in Afrika, Faultiere und Gürteltiere in Südamerika. Die beiden anderen Unterklassen konnten sich ebenfalls im Süden halten. Kloakentiere wie das Schnabeltier und die Ameisenigel fanden Zuflucht in Australien und Neuguinea, wo es heute nur noch fünf Arten gibt. Die Beuteltiere starben auf den nördlichen Kontinenten aus; einige konnten sich aber nach Südamerika und mit einem anschließenden Sprung über die Antarktis nach Australien retten, wo sie sich zu Kängurus und Koalas entwickelten. Die Familie der Beutelratten mit den Opossums kehrte später als Einwanderer nach Amerika zurück.

Doch die Zukunft gehörte den Plazentatieren. Schon bald, als die Erwärmung nachließ, schwangen sich einige von ihnen durch die Bäume, andere erhoben sich mit ledrigen Flügeln in die Lüfte, und manche tauschten Arme gegen Flossen und wuchsen zu Kolossen des Meeres heran. In der Folge entstand die heutige reiche Vielfalt der Plazentatiere – einschließlich uns Menschen. ◀

QUELLEN

Bertrand, O.C. et al.: Brawn before brains in placental mammals after the end-cretaceous extinction. *Science* 376, 2022

Funston, G.F. et al.: The origin of placental mammal life histories. *Nature* 610, 2022

Shelley, S.L. et al.: Quantitative assessment of tarsal morphology illuminates locomotor behaviour in Palaeocene mammals following the end-Cretaceous mass extinction. *Proceedings of the Royal Society of London B* 288, 2021



Deutschland hat eine neue Zeitung. Berlin auch.

Mit dem neuen Tagesspiegel lesen Sie zwei Zeitungen in einer: 40 Seiten aus Deutschland und der Welt. 40 Seiten aus Berlin. Sieben Tage die Woche.

Die ausgebaute Tagesspiegel-Redaktion und über 1.000 Experten aus unserem globalen Netzwerk bieten Ihnen exklusive Informationen und Analysen.

Für die wichtigsten Zukunftsthemen wie Klima, Digitalisierung und Mobilität haben wir Spezialisten-Teams aufgebaut. Und über die Hauptstadtregion informieren wir Sie aus unserer preisgekrönten Berlin-Redaktion.

Testen Sie jetzt den neuen Tagesspiegel!
Gedruckt, digital oder beides.



Gedruckt, digital oder beides



40 Tage gratis lesen:
tagesspiegel.de/testen

ERNÄHRUNG

Fleisch vom Acker, Gemüse aus dem Tank



Für etliche Nahrungsmittel könnte es bald Ersatzprodukte aus Bioreaktoren geben. Denn es ist auf Dauer nicht tragbar, sie weiterhin so zu erzeugen wie bisher üblich – aus ökologischen wie ethischen Gründen.

» spektrum.de/artikel/2076192



Ralf Nestler ist studierter Geologe und arbeitet als Wissenschaftsjournalist im Umland von Berlin.



PLANTAGE ODER LABOR? Ein Ersatz für handelsübliches Kaffeepulver (links) lässt sich heute bereits aus den kultivierten Zellen der Kaffeepflanze herstellen (rechts).

SERIE

Nachhaltige Ernährung

Teil 1: Dezember 2022

Gesund essen, ohne die Umwelt zu zerstören
Gayathri Vaidyanathan

Teil 2: Januar 2023

Fleisch vom Acker, Gemüse aus dem Tank
Ralf Nestler

Teil 3: Februar 2023

Fischerei im Umbruch
Ellen Ruppel Shell

► Eine Kuh auf grüner Bergwiese, gackernde Hühner vor rustikalem Holzverschlag, fröhliche Kaffeepflücker: Solche Bilder kennen wir von Produktverpackungen und aus der Werbung. Sie zeigen nicht die Realität, wie den meisten klar sein dürfte. Statt auf Alpenpanoramen blicken Kühe auf graue Stallwände – dauer schwanger, um viel Milch zu liefern. Eier, vor allem die in Fertigprodukten verarbeiteten, kommen nicht von Omas Hühnerhof, sondern aus fensterlosen Baracken der Massentierhaltung. Und wer Kaffee pflückt, tut das oft für einen Hungerlohn unter miserablen Arbeitsbedingungen.

Immer mehr Menschen stören sich an diesen Widersprüchen. Manche verzichten vollständig auf tierische Produkte, andere suchen nach Alternativen, die ihnen aus ethischer und ökologischer Sicht tragbarer erscheinen. In der sich ändernden Nachfrage steckt gewaltiges ökonomisches Potenzial: Laut einer Analyse der Boston Consulting Group (BCG) werden im Jahr 2035 voraussichtlich mehr als zehn Prozent der bisher von Tieren gelieferten Nahrungsproteine aus alternativen Quellen stammen. Das entspricht einem Marktvolumen von konservativ geschätzt 290 Milliarden Dollar.

Das prominenteste Beispiel – Fleisch aus dem Labor – greifen Medien zwar häufig auf, hat aber bis zur Massenmarktreife noch einen langen Weg vor sich. Weiter ist die Entwicklung von Fleischalternativen aus Pflanzen. Laut BCG-Analyse könnten viele pflanzenbasierte Protein-erzeugnisse bereits im Jahr 2023 mit ihren tierischen Vorbildern gleichziehen, was Preis, Geschmack und Textur angeht. Auf gutem Weg sehen die BCG-Experten auch Lebensmittel aus Bioreaktoren: Milchproteine etwa, die von genetisch veränderten Mikroorganismen erzeugt werden. Sie lassen sich zu Molkereiprodukten verarbeiten, für die keine einzige Kuh gemolken werden muss. Voraussichtlich ab 2025 werden sie echte Milch in vielen Bereichen ersetzen.

Milchprodukte ohne Milch

Zu den Unternehmen, die hier aktiv sind, gehört Formo mit Standorten in Berlin und im Rheinland. Das Start-up möchte Käse auf den Markt bringen, ohne dafür Kuhmilch zu verwenden. »Wir erzeugen Milchproteine mit Hilfe von Mikroorganismen«, erklärt Sandra Wilde, die als leitende Forscherin bei der Firma arbeitet. Die Formo-Wissenschaftler fügen den genetischen Bauplan der gewünschten Eiweiße in das Erbgut von Hefezellen, Bakterien oder Pilzen ein. Die veränderten Mikroorganismen wachsen dann in einem Kulturmedium unter Kohlenhydrat- und Wärmezufuhr, wo sie sich vermehren und die Proteine herstellen. Im Idealfall geben sie die Moleküle nach außen ab, so dass diese in der wässrigen Lösung schwimmen. Mit verschiedenen Methoden, beispielsweise Zentrifugieren, trennen die Forscher dann das Eiweiß von den Zellen und anderen Bestandteilen.

Nun beginnt die Arbeit der Fachleute für Lebensmitteltechnologie. Sie bringen die Milchproteine mit Fett und Wasser zusammen, um daraus Nahrungsmittel zu machen. »Es gibt 1000 verschiedene Käsesorten und diverse

Methoden ihrer Herstellung«, sagt Wilde. Ungereifte Sorten wie Ricotta, Mozzarella oder Feta hat Formo nach eigenen Angaben bereits synthetisch hergestellt. Jetzt möchte sich das Unternehmen an gereifte wie Camembert wagen.

Im Detail sind viele Fragen zu klären, bis dabei Käse in handelsüblichen Mengen entstehen kann. Das beginnt mit der Auswahl geeigneter Mikrobenstämme, geht weiter über das Optimieren der enzymatischen Umwandlung, die Reinigung und Verarbeitung der gewonnenen Milchproteine bis hin zur Käseproduktion. Und das nicht länger in einem Laborumfeld mit Tischgeräten, sondern in Edelstahl tanks, die viele tausend Liter fassen. Dort müssen die im Labormaßstab entwickelten Prozesse ebenfalls funktionieren, um industriell nutzbar zu sein. Allein das Rühren der Kulturlösung in solch großen Behältern ist eine Wissenschaft für sich, denn Nährstoffe, Zellen und



KÄSE OHNE KUH
Dieses Milcheiweiß
haben modifizierte
Mikroorganismen
erzeugt.

Wärme müssen gut verteilt sein, um definierte und optimierte Wachstumsbedingungen zu schaffen.

»Für die Produktion in größerem Maßstab arbeiten wir zunächst mit Kooperationspartnern zusammen, die die nötige Infrastruktur haben«, schildert Wilde, »später soll es eine eigene Pilotanlage geben.« Letztere werde wie eine Mischung aus Molkerei und Brauerei aussehen, mit großen, doppelwandigen Stahltanks, in denen warmes Wasser zirkuliert, um die Mikrobekultur zu temperieren. Als Nährstoff für die Mikroorganismen setzen die Formo-Mitarbeiter derzeit Zucker ein. Langfristig wollen sie auf Biomasse umsteigen, die anderswo übrig bleibt und daher nicht so teuer ist: Pressrückstände aus der Frucht- saftgewinnung zum Beispiel.

»Wir möchten nicht nur die kleine Nische der Veganer ansprechen«, legt Wilde dar, »sondern all jene erreichen, die Tierprodukte zu sich nehmen, aber offen für Alternativen sind, wenn diese genauso gut schmecken.« Aus Marktforschungsstudien gehe hervor, dass viele Menschen ihren Konsum tierischer Produkte deutlich reduzieren möchten – aus ökologischen und ethischen Gründen. Käse, hergestellt ohne Kuhmilch, kann dabei helfen, meint die Wissenschaftlerin und nennt Zahlen: bis zu 90 Prozent weniger Treibhausgasemissionen und 86 Prozent weniger Landnutzung, verglichen mit der herkömmlichen Erzeugung von Molkereiprodukten.

Man solle sie nicht falsch verstehen, betont Wilde. Sie komme selbst vom Land und kenne die Agrarwirtschaft gut. »Ich halte nichts davon, sie pauschal zu verurteilen, aber ich meine, sie sollte nachhaltiger arbeiten.« Was ihrer Ansicht nach etwa dadurch gelingt, dass Landwirtschaft nicht länger auf Maximalerträge getrimmt und ein Teil ihrer Produktion von »cellular agriculture« (der Herstellung tierischer und pflanzlicher Erzeugnisse in Zellkultur) übernommen wird.

Laut Umfragen, die Formo in Brasilien, USA, Großbritannien, Deutschland und Indien beauftragte, sind 80 Prozent der Menschen bereit, den mikrobiell erzeugten Käse zu probieren; 70 Prozent können sich vorstellen, ihn zu kaufen. Zwar ist bekannt, dass Befragte dazu tendieren, ein sozial erwünschtes Verhalten vorzutäuschen – man vergleiche nur Erhebungen zur Akzeptanz von Biolebensmitteln mit deren tatsächlichen Marktanteilen. Doch sind die Formo-Vertreter davon überzeugt, hinter den oben genannten Zahlen stecke echte Zustimmung. »Es geht den Menschen vor allem um Geschmack, auch die Konsistenz ist wichtig, wie die Umfragen zeigen«, sagt Wilde. »Hier können wir im Vergleich zu veganen Produkten große Lücken schließen.«

Ob das Kalkül aufgeht, wird sich zeigen. 2023 sollen erste Produkte auf Testmärkte beispielsweise in Singapur kommen. In Europa wird es länger dauern. Denn da die Milchproteine aus Fermentern statt aus dem Euter stammen, gelten sie als »Novel Food« und müssen ein umfangreiches Zulassungsverfahren bei der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (European Food Safety Authority, EFSA) durchlaufen. Demnächst will Formo den Antrag dafür einreichen.

AUF EINEN BLICK

Agrikultur versus Bioreaktor

- 1** Die derzeitige Landwirtschaft übernutzt planetare Ressourcen. Problematisch sind vor allem der Flächen- und Wasserverbrauch, der Dünger- und Pestizideinsatz und die Massentierhaltung.
- 2** Tierische und pflanzliche Lebensmittel in Bioreaktoren zu produzieren, kann den ökologischen Fußabdruck verkleinern und ethische Probleme vermeiden.
- 3** Weltweit arbeiten Forscherteams an Verfahren, um Nahrung mit Hilfe von Zellkulturen herzustellen. Doch bis zu deren Marktreife sind noch viele Fragen zu klären.

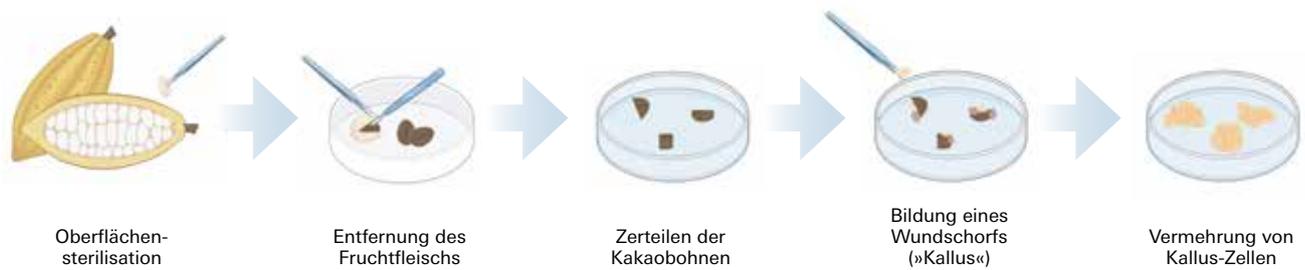
Genetisch veränderte Mikroorganismen einzuspannen, um tierische Proteine herzustellen, ist ebenso für Eiprodukte möglich. Das US-Unternehmen The Every Company (früher »Clara Foods«) ist in der Branche bekannt. Es kultiviert gentechnisch passend modifizierte Hefen in großen Behältern. Der dabei gewonnene Eiproteinersatz ist fast so klar wie Wasser, geruch- und geschmacklos und lässt sich somit vielfältig einsetzen, etwa zum Backen oder für die Zubereitung von Rührei.

Riesiges Marktpotenzial

Derzeit ist die Nachfrage nach synthetischem Eiprotein klein, doch sie könnte gewaltig wachsen: Der erwähnten BCG-Analyse zufolge wurden im Jahr 2020 weltweit mehr als eine Billion Eier verzehrt, das sind rund 150 Stück pro Person. Sollten auch nur zehn Prozent davon durch tierfreie Alternativen ersetzt werden, wie es die Analyse für das Jahr 2035 prognostiziert, ginge es immer noch um enorme Mengen – und um viele Tiere, denen die Massenhaltung erspart bliebe.

»Cellular agriculture« wird ebenso für pflanzliche Bestandteile entwickelt. Einen Überblick über entsprechende Arbeiten hat unlängst ein Team um Heiko Rischer vom Forschungszentrum VTT (Espoo, Finnland) in der Fachzeitschrift »Current Opinion in Biotechnology« gegeben. Die Gruppe forscht über verschiedene Pflanzenstoffe und hat Kaffee mittels Zellkultur hergestellt – ausschließlich im Labor. Die Forscherinnen und Forscher entnahmen Kaffeepflanzen dafür Zellen und züchteten diese in einem Nährmedium. Eine Mischung aus Mineralsalzen, Saccharose und Wachstumsregulatoren sorgte für deren Vermehrung. Die dabei gewonnene Biomasse wurde geröstet, aufgebriht und verkostet.

Rischer und sein Team taten das nur innerhalb des Instituts, da ihr Kaffeersatz ebenfalls als »Novel Food« gilt und keine Zulassung besitzt. »Selbst die interne Verkos-



SCHOKOLADE AUS DER PETRISCHALE

Zellen der Kakaopflanze lassen sich in Kulturgefäßen vermehren, ernten und anschließend zu Lebensmitteln weiterverarbeiten.

«...ung mussten wir vom Ethikrat genehmigen lassen», erzählt der Wissenschaftler. Alle haben es überstanden, und das Laborgebräu sei geschmacklich dem Kaffee aus natürlichen Bohnen sogar recht nahe gekommen. Damit ist der Beweis erbracht, dass der Ansatz grundsätzlich funktioniert.

Wofür das Ganze? Rischer erklärt es: Der gegenwärtige Kaffee Konsum sei mit etlichen Problemen verbunden. Wälder würden gerodet, um Platz für Plantagen zu schaffen; es folgten Erosion, massenhafter Dünger- und Pestizideinsatz; hinzu komme die Ausbeutung der Arbeiter und der Transport der Bohnen um die halbe Welt, der fossile Brennstoffe verbrauche und mit CO₂-Emissionen einhergehe. »Viele Konsumenten fühlen sich unwohl damit und sind bereit, Alternativen auszuprobieren.« Eine Kaffeekultur im Stahltank direkt vor Ort, vielleicht stilvoll integriert in ein Café – das könnte eine Alternative sein, glaubt der Forscher.

Das neue Herstellungsverfahren zu kommerzialisieren, sei nicht Sache seines Instituts, betont Rischer. Jedoch zeigt sich das Start-up California Cultured mit Sitz an der US-Westküste daran interessiert und hat kürzlich eine Kooperation mit dem finnischen Forschungszentrum bekannt gegeben. California Cultured möchte den Ansatz weiterentwickeln und in diverse Produkte überführen, da er das Potenzial habe, »hunderte, wenn nicht tausende Aromen« zu reproduzieren.

Flexibles Verfahren

Dementsprechend beschränken sich die Forschungen nicht nur auf Kaffee-Ersatz. »Im Grunde bieten sich alle Pflanzenerzeugnisse an – und zwar umso mehr, je problematischer ihre Herstellung aus natürlichen Gewächsen ist und je besser im Vergleich damit Zellkultur-Ansätze abschneiden.« Ein Beispiel hierfür sind begehrte Beeren, die in der Natur selten vorkommen und deshalb nur in kleinen Mengen verfügbar sind. Zu ihnen gehört die Allackerbeere (*Rubus arcticus*). Mit Hilfe von Zellkulturen lässt sich ein Substrat produzieren, das ihr in Geschmack und Nährwert vergleichbar ist, wie Rischer und sein Team 2022 in der Fachzeitschrift »Food Research International« berichtet haben.

In Arbeit ist zudem die synthetische Herstellung von Kakaobestandteilen. Den Grundstoff der Schokolade zu gewinnen, geht mit ähnlichen Problemen einher wie der Kaffeeanbau. An der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) entwickelt ein Team um Tilo Hühn und Regine Eibl eine Methode, um den Schokorohstoff im Bioreaktor zu erzeugen. Die Wissenschaftler zerteilen Kakaobohnen, worauf diese an den Wundrändern einen Schorf bilden, den so genannten Kallus. »Zellen daraus geben wir in einen Tank mit Rührwerk – zusammen mit einem Nährmedium, das Mineralstoffe, Aminosäuren und wachstumsregulierende Pflanzenhor-



KAFFEE-ALTERNATIVE
Finnische Forscher züchten Zellen der Kaffeepflanze in Nährmedien und gewinnen daraus das beliebte Getränk.



Überführen der Zellen in ein Nährmedium

Vermehrung der Zellen in Schüttelkolben

Vermehrung der Zellen im Bioreaktor

Gefriertrocknen der geernteten Zellen

Rösten und anschließendes Mischen mit Zucker und Kakaobutter

Zellkultur-Schokolade

ZHAW WAERENSVIL / FRUHWAR MOZAFARIL CREA-
TED WITH BIOREACTOR.COM

VTT TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND

mone enthält«, erläutert Hühn, der an der ZHAW das Zentrum für Lebensmittelkomposition und -prozessdesign leitet. »Nach 28 Tagen können wir die kultivierte Zellmasse ernten und daraus Schokolade machen.«

Keinesfalls sollten Kakaobauern ihrer Einkünfte beraubt werden, betont Hühn. »Aber wir als Menschheit müssen mit unseren Ressourcen verantwortungsvoller umgehen und die Wertschöpfungsnetzwerke regenerativ umgestalten.« Kakao aus Zellkulturen, die gefüttert werden mit Zuckerrüben- und Leguminosen-Extrakten aus regionalem zertifiziertem Anbau, sei aus ökologischer Sicht eindeutig günstiger als Plantagenprodukte von fernen

Kontinenten, für die großflächig Wälder weichen müssen und deren Gewinnung mit intensivem Pestizideinsatz verbunden ist.

Das Kakao-aus-dem-Tank-Verfahren der Schweizer Forscher soll so weiterentwickelt werden, dass es sich im Industriemaßstab einsetzen lässt. Hier erfolgt die Kommerzialisierung ebenso wenig durch die Hochschule, sondern durch Unternehmen. »Wir werden uns genau anschauen, unter welchen Bedingungen wir die Rechte an dem Verfahren aus der Hand geben«, sagt Hühn.

»Dabei legen wir großes Augenmerk auf das Nagoya-Protokoll.« Jener Vertrag, der 2014 in Kraft getreten ist, schafft einen völkerrechtlichen Rahmen für den Zugang zu genetischen Ressourcen und ihre Nutzung. Er sieht vor, Herkunftsländer einzubeziehen, wenn eine solche Nutzung Vorteile mit sich bringt. Konkret heißt das: »Bauern in Südamerika werden an den Einkünften beteiligt, die sich aus der Vermarktung von Zellkultur-Schokolade ergeben«, so Hühn.

Gerechte Teilhabe

Wie genau, das werde derzeit an der ZHAW diskutiert. Denkbar sei etwa, den Bauern für jedes verarbeitete Kilogramm Zellkulturmaterial den Preis zu zahlen, den sie heute für ein Kilo Kakaobohnen erhalten – vorausgesetzt, sie produzieren erwiesenermaßen nachhaltig. »Zu den Zielen dabei müssen die Wiederaufforstung und der Verzicht auf Pestizide gehören, um die Biodiversität zu erhöhen«, erklärt Hühn. Es sei freilich nicht einfach, einen gerechten Vorteilsausgleich im Sinn des Nagoya-Protokolls sicherzustellen.

Die Zeit drängt, denn an Kakao aus dem Tank arbeiten auch andere Teams und Unternehmen. Zu ihnen zählen das erwähnte US-Start-up California Cultured sowie eine Kooperation zwischen dem finnischen Schokoladenhersteller Fazer und dem Forschungszentrum VTT.

Die Forscherinnen und Forscher von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften haben längst weitere Pflanzenrohstoffe im Blick, darunter Avocadobestandteile. Der herkömmliche Anbau von Avocadopflanzen verschlingt enorm viel Wasser, was insbesondere im Mittelmeerraum zu Komplikationen führt. Die Herstellung im Bioreaktor vermeidet dieses Problem. Ganze Früchte lassen sich zwar nicht im Tank erzeugen – aber ein Brei, aus dem sich der Avocadodip Guacamole gewinnen lässt, schon. Wieder stehen am Anfang Pflan-



zenzellen, die sich in einem Nährmedium vermehren und nach vier Wochen ernten lassen. Sie können gleich weiterverarbeitet werden, indem man Gewürze hinzufügt und das Ganze mittels Hochdruckbehandlung haltbar macht.

Hühn nennt einen weiteren Vorteil des Verfahrens: »Weil die Biomasse so gut wie nie in Kontakt mit der Umwelt tritt und deshalb kaum pathogenen Keimen oder Sporenbildnern ausgesetzt ist, kommt sie sehr rein aus dem Tank.« Das mache sie zu einem sicheren Lebensmittel. Hier steht die Zulassung von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit freilich ebenfalls noch aus.

Wer innovative Lebensmittel aus Zellkulturen auf den Markt bringen will, braucht einen langen Atem: Bis zu 400 000 Euro und rund drei Jahre sind für die Zulassung eines solchen Produkts erforderlich, sagt Hühn. Zum Prozedere gehören toxikologische Tests in Form von Tierversuchen, was der Forscher kritisiert. Denn »cellular agriculture« ziele ja gerade darauf ab, Lebensmittel nachhaltig herzustellen – was das Vermeiden von Massentierhaltung und somit von Tierleid einschliesse. »Und dafür sollen Tierversuche gemacht werden?« Zumal der Wissenschaftler die Gesundheitsrisiken bei pflanzenbasierten Produkten für deutlich kleiner hält als bei tierischen Zellkulturen.

In der Tat ist die Zulassungsprozedur der europäischen Lebensmittelsicherheitsbehörde aufwändig. Viele Firmen bringen ihre Produkte deshalb in anderen Regionen auf den Markt. Singapur gilt als besonders günstiges Umfeld. Der asiatische Stadtstaat möchte seine Importe verringern und binnen zehn Jahren so weit sein, 30 Prozent seines Nahrungsmittelbedarfs durch heimische Produktion abzudecken. Proteine aus Zellkulturen gelten hierbei als wichtiger Beitrag.

Ende 2020 erhielten Chicken Nuggets der US-Firma Eat Just, die im Labor entstehen, in Singapur die Zulassung – weltweit ein Novum. Streng genommen stammen sie nur zu drei Vierteln aus Zellkulturen, der Rest setzt sich aus pflanzlichen Ersatzstoffen zusammen. Der Restaurantpreis von bis zu 17 US-Dollar pro Portion zeigt, dass die Herstellung teuer ist; vielleicht zahlt das Unternehmen sogar drauf, um eine Marktnische zu besetzen. Insider schätzen die Gesamtmenge verkaufter Eat-Just-Nuggets im Jahr 2022 auf lediglich zwei bis drei Tonnen.

Rund um den Globus arbeiten dutzende Firmen daran, mit »cultured meat« (Fleisch aus der Zellkultur) Geld zu



ZHANG WANGSHU / FRANK BRÜGER

verdienen. Das Prinzip: Einem Tier werden Stammzellen aus dem Muskelgewebe entnommen und in ein Nährmedium außerhalb des Organismus gegeben. Dort vermehren und differenzieren sie sich und bilden eine faserige Masse, die sich zu Lebensmitteln weiterverarbeiten lässt. Bisher sind auf diesem Weg nur Produkte gelungen, die an Hackfleisch erinnern und aus denen sich Nuggets oder Burger-Bratlinge machen lassen – mit passablem Geschmack, wie vielfach zu lesen. Ein tierfreies Erzeugnis, das es in Konsistenz, Textur und Mundgefühl mit einem echten Steak aufnehmen kann, gibt es derzeit nicht.

Es ist kompliziert, kultivierte Tierzellen mit dem zu versorgen, was sie zur ständigen Vermehrung benötigen: Mineralstoffe, Kohlenhydrate, Fette, spezielle Proteine, Wachstumsfaktoren, Hormone, Signalmoleküle – ein hochkomplexes Gemisch. Manchmal fügen Wissenschaftler fötales Rinderserum zu, um die Zellen zum Wachsen anzuregen. »Das Serum stammt aus Kuhfeten, die man ihren Müttern entnimmt – beispielsweise, wenn diese geschlachtet werden«, schildert Hans-Wilhelm Windhorst, Professor am Zentrum Wissenschaft und Innovation für nachhaltige Geflügelwirtschaft (WING) der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover. Er beschäftigt sich schon seit Jahren mit der Entwicklung tierfreier Nahrungsmittel. Die Gewinnung des Kälberserums passt seiner Meinung nach nicht so recht zum Bestreben, tier-

Bald könnten Erzeugnisse aus Tierzellkulturen jene aus der echten Tierhaltung einholen, was Geschmack, Textur und Preis angeht



MADE IN EUROPE
Kakaobohnen (vorn)
wachsen nur in tropisch-feuchtem Klima;
Kulturen mit Zellen dieser Pflanze hingegen auch hier zu Lande.

ZHAW WÄGERSMIL / FRANK BRÜGGER

freundliche Speisen anzubieten. »Wissenschaftler nutzen es üblicherweise nur noch bei der Entwicklung neuer Zelllinien.« Bei anderen Anwendungen ließe sich das Serum, das pro Liter mehrere tausend Euro kosten kann, heute durch alternative Medien ersetzen. Diese seien weitaus billiger, wirkten aber nicht immer so gut.

Funktioniert das mit 50000 Litern?

Windhorst sieht weitere Probleme bei Zellkulturen im Industriemaßstab. »Der Energiebedarf ist immens, die Bioreaktoren müssen dauerhaft auf 37 Grad gehalten werden.« In den USA überlegten einschlägige Firmen, die Produktion in die Halbwüsten New Mexicos oder Arizonas zu verlegen, um günstigen Solarstrom zu nutzen. Zudem träten nachteilige Skalierungseffekte auf: Die Bedingungen in kleinen Reaktoren im Labor seien streng kontrollierbar, was es erlaube, auf Antibiotika zu verzichten; unerwünschte Stoffwechselprodukte könnten mit einem dialyseähnlichen Verfahren relativ leicht aus dem Nährmedium entfernt werden. »Ob das bei einer Anlage mit 50000 Litern ebenfalls gelingt, wird in der Branche kritisch gesehen.«

Die Fachleute, die von der Boston Consulting Group befragt worden waren, kommen zu einem optimistischen Fazit. In etwa zehn Jahren, so meinen sie, könnten Erzeugnisse aus Tierzellkulturen jene aus der echten

Tierhaltung einholen, was Geschmack, Textur und Preis anbelangt. Bis 2035, so die Prognose, werde es für 90 Prozent der weltweit beliebtesten Gerichte tierfreie, schmackhafte und bezahlbare Alternativen geben – nur mit Zutaten vom Acker und aus dem Tank. Das betrifft Speisen von Entenbrust über Steak, Sushi und Pizza bis hin zu Quesadilla und Ramen.

Ob sie gekauft werden, ist eine andere Frage. Die Sorge um den Erhalt einer bewohnbaren Umwelt sowie ethische Bedenken rund um die Tierhaltung fördern die Akzeptanz entsprechender Produkte, hat eine Gruppe um den Ökonomen Ashkan Pakseresht von der Novia University of Applied Sciences (Finnland) 2022 herausgefunden. In einer Metaanalyse von 43 wissenschaftlichen Studien zeigte das Team: Ob Fleischalternativen aus Zellkulturen angenommen werden oder nicht, hängt vor allem davon ab, wie bewusst den Menschen die dahinterstehenden ökologischen Probleme sind, wie »natürlich« ihnen solche Produkte erscheinen und welche Risiken sie mit deren Verzehr verbinden. Befürchten Konsumenten eine beeinträchtigte Lebensmittelsicherheit oder empfinden sie Neophobie – die Angst vor Neuem, einschließlich unbekanntem Essen –, lehnen sie solche Erzeugnisse eher ab. Die Branche mache sich keine Illusionen, sagt Windhorst: »Es dürfte wohl eine Generation dauern, bis sich Fleischalternativen aus der Zellkultur durchgesetzt haben. Vielleicht länger, wenn die Akzeptanz der Konsumenten nicht noch deutlich zunimmt.« ◀

QUELLEN

Eibl, R. et al.: Cellular agriculture: Opportunities and challenges. Annual Review of Food Science and Technology 12, 2021

Häkkinen, S. T. et al.: Plant cell cultures as food – aspects of sustainability and safety. Plant Cell Reports 39, 2020

Pakseresht, A. et al.: Review of factors affecting consumer acceptance of cultured meat. Appetite 170, 2022

Rischer, H. et al.: Cellular agriculture – industrial biotechnology for food and materials. Current Opinion in Biotechnology 61, 2021

Young Lee, D. et al.: Review of technology and materials for the development of cultured meat. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 10.1080/10408398.2022.2063249, 2022

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



PINSTOCK / GETTY IMAGES / ISTOCK

Blitze mit Nachwirkung

In unmittelbarer Nähe eines Gewitters laufen zahlreiche chemische Prozesse ab. Viele davon beginnt man erst jetzt genauer zu verstehen.

» spektrum.de/artikel/2076195



James Mitchell Crow ist Wissenschaftsjournalist und lebt in Melbourne, Australien.

AUF EINEN BLICK

Elektrisierende Reaktionen

- 1** Ein Blitz erhitzt seine unmittelbare Umgebung kurzzeitig auf 30 000 Grad Celsius. Dabei zerreißen selbst die stabilsten Moleküle in ihre Bestandteile.
- 2** Anschließend entsteht eine Reihe reaktiver Substanzen. Sie beeinflussen die Chemie der Atmosphäre entscheidend.
- 3** Bei Forschungsflügen in und um Gewitter hat man Atomgruppierungen entdeckt, die nach gängigem Wissen dort nicht sein dürften. Möglicherweise laufen bei einem Unwetter ganz andere chemische Prozesse ab als angenommen.

Wenn Wissenschaftler das Zeug zu Hollywood-Stars haben, dann wohl die Piloten des DC-8 Earth Science Laboratory der NASA. Im Frühsommer 2012 flogen sie über den weiten Ebenen im Zentrum der USA gezielt Gewitter an – je heftiger das Unwetter, desto besser.

An Bord jedes Flugs: Chemiker und ihre Analysegeräte. Sie waren Teil der großen amerikanischen Kooperationskampagne »Deep Convective Clouds and Chemistry« und untersuchten, wie Gewitter die Chemie der Atmosphäre verändern. Die Forscher und Forscherinnen verglichen dazu die Zusammensetzung der Luft, die in ein Gewitter eintritt, mit derjenigen, die es verlässt. So wollten sie verstehen, wie starke Konvektionsströme und Blitze die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen. Sie erwarteten sich aufschlussreiche Ergebnisse, die wichtig sein würden, um die Luftverschmutzung in Städten oder die Bildung von Treibhausgasen besser zu verstehen.

»Die Piloten waren fantastisch«, erinnert sich William Brune, der als Atmosphärenchemiker an der Pennsylvania

State University forscht. Er saß als einer der wissenschaftlichen Leiter der Kampagne bei vielen Flügen mit im Cockpit und entschied, welches Gewitter es zu verfolgen galt. Die Piloten überwachten ihr Radar und umkreisten das Zentrum des Sturms, wobei sie bis zum Wolkenamboss – dem oberen Rand der Gewitterwolken – hinauf flogen. »Man darf nicht zu dicht heranfliegen, muss aber so nah wie möglich kommen, um möglichst viel von dem zu sehen, was aus dem Sturm aufsteigt«, sagt Brune. »Um diese Stürme herum- und in die Wolkenambosse hineinzufliegen, war spektakulär.«

Als ebenso spektakulär erwiesen sich die dabei gesammelten Daten. Bei mehreren Flügen entdeckte das Team in der Nähe von Gewittern verblüffend hohe Hydroxylkonzentrationen, die um Größenordnungen über allen bisherigen atmosphärischen Messungen des reaktiven Radikals lagen. Hydroxylradikale (siehe Glossar) sind das primäre Oxidationsmittel der Erdatmosphäre. Sie sind entscheidend für die Fähigkeit der Luft, sich selbst zu reinigen. Ein Jahrzehnt nach dem letzten Flug der Feldkampagne deuten die jüngsten Erkenntnisse von Brune und seinen Kollegen zu den hohen Hydroxylausschlägen nun darauf hin, dass Blitze die Chemie der Atmosphäre viel stärker beeinflussen als bisher angenommen.

Ein Blitz kann den Himmel erleuchten. Zwar ist jeder Blitz nur etwa zwei bis drei Zentimeter dick, heizt aber mit

BLITZE sind nicht nur spektakulär anzuschauen, sie setzen auch faszinierende chemische Prozesse in Gang.

seiner Energie die Umgebungsluft auf 30000 Grad Celsius auf – das ist weitaus heißer als die Oberfläche der Sonne. Dort, wo der Blitz auf den Boden trifft, kann ein direkter Einschlag ausgewachsene Bäume auseinandersprengen – und abrupt völlig andere Bedingungen schaffen, als sie dort für gewöhnlich herrschen (siehe »Starthilfe für das Leben?«, S. 58). Jeder Blitz ist auf seinem gesamten, typischerweise fünf Kilometer langen Weg durch die Luft gleich zerstörerisch: Er zerreißt jedes Molekül in seiner Nähe in einzelne Atome. Bei den meisten dieser Moleküle handelt es sich um Distickstoff (N₂) und molekularen Sauerstoff (O₂), die beiden Hauptbestandteile der Luft. Wenn die Atome abkühlen, können sie sich mit neuen Partnern verbinden.

Die Temperatur ist entscheidend

»In dem 30000 Grad heißen Blitz, den wir sehen, läuft eine ganz besondere Chemie ab«, sagt Brune. »Das wichtigste Gas, das bei zahllosen Missionen gemessen wird, ist jedem ein Begriff: Stickstoffmonoxid (NO).« Die Temperatur ist entscheidend für die NO-Produktion bei Blitzen, nicht nur in der Erhitzungsphase. Die Luft muss sich extrem schnell abkühlen, und zwar in weniger als einer Millisekunde, damit das NO im Wesentlichen gefriert. Sonst verbinden sich Stickstoffatome wieder zu N₂ und Sauerstoffatome zu O₂.

Nach dem Einschlag können die NO-Moleküle eine Reihe von Reaktionen mit anderen Sauerstoff- und Stickstoffatomen sowie -molekülen eingehen. Zwei wichtige Verbindungen, die dabei entstehen, sind Stickstoffdioxid (NO₂) und Ozon (O₃). Jeder einzelne Blitz mag global gesehen nur ein kleines Ereignis sein; da die Erde jedoch jeden Tag mehr als drei Millionen davon erlebt, kann sich ihr Einfluss summieren.

Mary Barth ist Atmosphrenchemikerin am US National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado. Sie erforscht, wie sich Gewitter auf die Ozonproduktion und -verteilung auswirken. »Am Boden kennen wir Ozon als gesundheitsschädlichen Stoff«, erklärt sie, »aber in der oberen Troposphäre, wo das Molekül in Gewittern entsteht, wirkt es als Treibhausgas.«

Gewitter können den Ozongehalt in vielfältiger Weise beeinflussen. Formaldehyd zum Beispiel, ein häufiger Bestandteil verschmutzter Luft, ist ein Ozonvorlufer. Durch die starke Konvektion kann es bei Gewittern in die Höhe gezogen werden, wie Barth erläutert. Doch da sich Formaldehyd partiell in Wolkentröpfchen auflöst, regnet ein Teil davon eher ab. Dadurch verschiebt sich das chemische Gleichgewicht.

Um zu verstehen, welche Rolle Ozon als Treibhausgas in der oberen Troposphäre spielt, muss man vor allem in Erfahrung bringen, wie viel NO₂ bei einem Blitzschlag entsteht. Denn dieses ist eine wichtige Quelle für Ozon: Sonnenlicht spaltet das Molekül in NO und ein Sauerstoffatom auf, das sich wiederum mit molekularem Sauerstoff (O₂) zu Ozon verbinden kann.

Die Bildung von Stickoxiden durch Blitze untersuchen Wissenschaftler seit Jahrzehnten: wie sie entstehen und

wie häufig und wie viel davon sich bei jedem Blitz bildet. Dennoch sind die Ergebnisse nach wie vor höchst schwammig: Es gibt Berichte von 32 bis 664 Mol Stickoxiden (NO_x) pro Blitz. Mary Barths Ansicht nach ist das Forschungsgebiet nach wie vor recht jung und ausbaufähig.

Die NO_x-Produktion durch Blitze genauer zu messen war daher eines der wichtigsten Ziele der Feldkampagne aus dem Jahr 2012. »Wir standen morgens auf, sprachen mit den Meteorologen, und sie teilten uns mit, in welchen Gegenden sich an diesem Tag wahrscheinlich Gewitter bilden würden«, sagt Barth. Das Team flog dann zu einem solchen Ort, nahm Luftproben und hoffte, dass sich ein Sturm aufbauen würde.

»Wenn wir ein Unwetter fanden, waren wir sehr aufgeregt. Die Leute verfolgten die Daten am Computer, noch während sie aufgezeichnet wurden«, erzählt die Wissenschaftlerin. Einmal wurde das Flugzeug sogar von einem Blitz getroffen, das Loch kurzerhand mit Klebeband geflickt.

Die NO_x-Messungen des Teams engten die früheren Ergebnisse auf einen mittleren Bereich ein, nämlich zwischen 142 und 291 Mol NO_x pro Blitz. Es ist nach wie vor schwierig vorherzubestimmen, wie viele Stickoxide

Glossar

Koronaentladung: elektrische Entladung, die mit einem Leuchtphnomen einhergeht (lateinisch: corona = Strahlenkranz). Koronaentladungen in der Atmosphäre (»Elmsfeuer«) beobachtet man etwa an Schiffsmasten.

Radikal: Atom oder Molekül mit ungepaartem Elektron (unten als Punkt dargestellt).

Hydroxylradikal (OH) $\text{H}-\dot{\text{O}}$

Ozon (O₃) $\text{O}=\text{O}^{\oplus}=\text{O}^{\ominus} \longleftrightarrow \text{O}^{\ominus}=\text{O}^{\oplus}=\text{O}$

Lachgas/Distickstoffmonoxid (N₂O) $\text{N}=\text{N}^{\oplus}-\text{O}^{\ominus} \longleftrightarrow \text{N}^{\oplus}=\text{N}-\text{O}^{\ominus}$

Stickstoffmonoxid (NO) $\dot{\text{N}}=\text{O} \longleftrightarrow \text{N}^{\ominus}=\text{O}^{\oplus}$

Stickstoffdioxid (NO₂) $\text{O}=\text{N}^{\oplus}=\text{O} \longleftrightarrow \text{O}=\text{N}^{\oplus}-\text{O}^{\ominus}$

Stickoxide (NO_x)

Der Doppelpfeil zeigt an, dass die Struktur ständig zwischen den beiden Formen hin- und herwechselt beziehungsweise dazwischen liegt.



FLIEGENDES LABOR Für ihre Kampagne nutzten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein Forschungsflugzeug der NASA (links). Es enthält verschiedene Instrumente, um die Atmosphäre in und um Gewitterwolken zu untersuchen (unten).

ein bestimmter Sturm ausstößt, und die Vorgänge genau in Computermodellen zu erfassen, um atmosphärische Prozesse zu simulieren. »Manchmal habe ich das Gefühl, dass jeder Sturm individuell ist. Aber wir haben trotzdem einige Anhaltspunkte gewonnen«, sagt Barth. Blitzen eine durchschnittliche NO_x -Produktion zuzuordnen, ist demnach möglicherweise zu kurz gedacht. Die Wissenschaftlerin vermutet, dass die Menge der Stickoxide mit der Länge des Blitzes korreliert. Außerdem gehen laut den Ergebnissen ihrer Forschungsgruppe in einem Gewitter Blitze häufiger nieder, wenn sie kürzer sind.

Ein heftiges Sommergewitter kann ein kathartisches Ereignis sein. Wenn die Blitzshow vorbei ist und der Regen aufhört, wirkt die Welt oft wie neugeboren und die Luft wie reingewaschen. Das kommt nicht von ungefähr: Das durch den Blitz entstandene NO setzt eine Kaskade von Reaktionen in Gang. In der Folge bildet sich nicht nur mehr Ozon, sondern ebenso das wichtigste oxidative Reinigungsmittel der Atmosphäre: Hydroxylradikale. Sie reagieren mit diversen schädlichen Gasmolekülen, etwa dem Treibhausgas Methan oder Verkehrs- und Industrieabgasen, oxidieren sie und machen sie besser wasserlöslich, so dass sie schließlich abregnen.

Das Hydroxylradikal beeinflusst die Lebensdauer zahlreicher Verbindungen in der Atmosphäre stark, gleichgültig, ob sie natürlicherweise dort vorhanden sind oder vom Menschen ausgestoßen wurden. Das haben Wissenschaftler erstmals in den 1970er Jahren herausgefunden. »Eine Zeit lang war es erste Priorität, den Hydroxylgehalt zu ermitteln«, erinnert sich William Brune. »In der Atmosphäre sind nur etwa einige zehn Hydroxylradikale pro Billionen Teilchen vorhanden. Ihre Konzentration ist also sehr schwer zu messen, und vieles kann die Messung verfälschen.«

Auf der Jagd nach Hydroxylradikalen

Letztendlich wurden zwei Methoden entwickelt, um den Hydroxylgehalt in der Luft genau zu bestimmen. Bei der einen lässt man das Hydroxylradikal mit isotopisch markiertem Schwefeldioxid (SO_2) reagieren, so dass isotopisch markierte Schwefelsäure entsteht. Diese wird im Massenspektrometer ionisiert und nachgewiesen. »Es ist sehr bizarr, aber es funktioniert«, sagt Brune über das Verfahren. Er selbst verwendet eine andere Methode, die sich zu Nutze macht, dass Hydroxylradikale UV-Licht bestimmter Wellenlängen auf charakteristische Weise absorbieren und als Fluoreszenz wieder abstrahlen. Dabei führen die Wissenschaftler Luft durch ein kleines Loch in ein Analysegerät und beschließen sie dort mit einem



Laser, der auf eine dieser Absorptionen abgestimmt ist. Der Trick liegt im Timing. »Die Lichtstreuung an den Luftmolekülen würde die Fluoreszenz des Hydroxylradikals millionenfach überlagern. Daher verwenden wir einen Detektor, den wir sehr schnell ein- und ausschalten können«, erläutert Brune. »Wir schalten ihn während des Laserpulses aus, warten 100 Nanosekunden und schalten ihn dann wieder ein, um den letzten Teil der Hydroxylfluoreszenz zu erfassen.«

Heute verstehen Fachleute recht gut, wo in der Atmosphäre sich Hydroxylradikale bilden. »Ich habe atmosphärische Hydroxylkonzentrationen in 16 Flugzeugeinsätzen und wahrscheinlich zwei Dutzend Missionen von Türmen aus untersucht, über Städten, Wäldern, Wüsten und ländlichen Gebieten. In vielen Umgebungen wissen wir ziemlich genau, wie sich der Stoff verhält«, resümiert der Experte.

Basierend auf diesem Verständnis war der Mittelpunkt eines Blitzschlags nicht gerade der Ort, an dem die Forscher das spezielle Molekül erwarteten. Wie Brune erklärt, würde das Radikal die extreme Hitze schlicht nicht überleben: »Jedes OH-Radikal würde innerhalb von Mikrosekunden verbraucht. Es könnte nicht nach draußen gelangen und etwas bewirken. Es ist verschwunden, bevor wir es nachweisen können.«

Dagegen erwarteten die Fachleute eine indirekte Hydroxylproduktion durch die Kaskade von Reaktionen, die



MASA (ISS016E-27426)

GEWAGTE MANÖVER Das Forschungsteam steuerte gezielt Gewitter an, um mehr über die Bildung von Stickoxiden und Hydroxylradikalen zu erfahren.

einsetzt, nachdem sich durch den Blitz NO gebildet hat. Und doch zeigte das Messinstrument zur laserinduzierten Fluoreszenz an Bord des Flugzeugs in der Feldkampagne immer wieder unerklärliche Spitzen an Hydroxyl an – um Größenordnungen höher als alle bisher beobachteten Mengen von Hydroxylradikalen in der Atmosphäre.

»Nach einem Flug sprach ich immer mit meinen Kollegen im hinteren Teil des Flugzeugs, die unsere Instrumente bedienen«, erzählt Brune. Sie berichteten von ihren Beobachtungen: »Wir haben diese riesigen OH-Signale gesehen, als wir in den Wolken waren, und wir wissen nicht wirklich, was sie bedeuten.« Zu der Zeit konzentrierte sich das Team jedoch auf die Hauptmessaufgaben der Mission und wollte die seltsamen Hydroxylergebnisse daher später untersuchen. »Aber wir haben sie uns nie wieder angesehen – bis vor ein paar Jahren, als ich im Sommer aus einer Laune heraus einen Blick darauf warf. Ich verwendete einige neue Analysetechniken, die wir entwickelt hatten, sah mir die Signale an und dachte: »Oha, die sind echt!«

Brune glich die Zeitpunkte der Hydroxylspitzen mit Daten eines US-weiten Netzwerks ab und konnte einige davon eindeutig mit Blitzen in Verbindung bringen. Manche Spitzen folgten wiederum unmittelbar auf Blitze, die auf den Aufnahmen der vorderen Bordkamera des Flugzeugs zu sehen waren. Etwa ein Drittel der detektierten Hydroxylspitzen konnte der Forscher aber nicht mit einem Blitz in Zusammenhang bringen.

Um die Beobachtungen zu verstehen, gingen die Wissenschaftler also zurück ins Labor und generierten dort künstliche Blitze. »Wir sahen, dass wir auf diese

Weise mit Funken und Ähnlichem viele OH-Radikale herstellen konnten«, erzählt Brune. Eine entscheidende Entdeckung: Wenn die Blitzanlage so weit heruntergeregelt war, dass kein sichtbarer Funke entstand, wiesen sie sehr viele OH-Radikale nach.

Die Fachleute folgerten daraus, dass sich die detektierten OH-Radikale in einem Bereich um den Funken herum bilden, und zwar durch Entladungen, die nicht heiß sind. »In diesen Entladungen außerhalb des heißen Blitzkanals ist genügend Energie vorhanden, um Wassermoleküle aufzuspalten. Das sind die Hydroxylteilchen, die wir sehen«, resümiert Brune. »Man kann sich leicht vorstellen, dass in den Wolken an vielen Stellen alle möglichen Arten von Ladungstrennungen und kleinen Entladungen stattfinden. Eine ganze Reihe von ihnen muss die OH-Spezies produzieren.«

Unsichtbare Blitze

Legt man die Messungen des Teams zu Grunde, so könnten unsichtbare Blitze bis zu 16 Prozent des globalen atmosphärischen Hydroxylgehalts erzeugen. Das sei ein sehr interessantes Beobachtungsergebnis, sagt Francisco Gordillo-Vázquez vom Instituto de Astrofísica de Andalucía in Spanien. Er führt in seinem Labor derzeit Experimente durch, um die Ergebnisse von Brunas Team zu reproduzieren. »Bislang ging man davon aus, dass diese Oxidanzien indirekt über die Bildung von NO entstehen. Dass sie sich direkt bilden, verändert jetzt die Perspektive.«

Die nicht sichtbaren Blitze sind nur eines von mehreren kürzlich entdeckten elektrischen Phänomenen, die in und um Gewitter herum entstehen und die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen. Bereits in den 1920er Jahren hatte der schottische Nobelpreisträger Charles Wilson spekuliert, dass hoch oben in der Atmosphäre, wo die Luft weniger dicht ist und ein lokales elektrisches Feld leichter zusammenbrechen kann, leuchtende elektrische Entladun-

gen auftreten können. Man nennt sie Sprites, nach dem englischen Wort für Kobold. Doch erst 1989 wurden zwei Sprites zufällig über einem großen Gewitter im Mittleren Westen der USA aufgezeichnet.

Später zeigte sich, dass Sprites mitunter bis in gut 90 Kilometer Höhe reichen, bis an die Basis der Ionosphäre. Laut Gordillo-Vázquez lassen sich die Entladungen in der oberen Atmosphäre als der fehlende Teil im globalen Stromkreis betrachten, der die Troposphäre mit der Ionosphäre verbindet.

Erklären solche transienten leuchtenden Ereignisse in der oberen Atmosphäre (TLEs) möglicherweise eine andere rätselhafte Beobachtung der Atmosphärenchemie? »Seit den späten 1960er Jahren gibt es von Zeit zu Zeit Berichte, dass in der Nähe von Gewittern plötzlich die Ozonkonzentration steigt«, sagt der Forscher. Die gemeldeten Beobachtungen passten nicht mit dem Wissen zusammen, wonach das Gas indirekt über das vom Blitz erzeugte NO und die darauf folgenden chemischen Reaktionen entsteht. »Man spekulierte, dass die erhöhten Ozonwerte auf die Blitze selbst zurückzuführen sein könnten.«

Normale Blitze produzieren nicht direkt signifikante Mengen an Ozon. Aber könnten die hohen Ozonkonzentrationen in den beobachteten Bereichen eine unmittelbare Folge der seltsamen Leuchtphänomene sein? Während ein Blitz eine sehr heiße elektrische Entladung ist, wird die Energie im starken elektrischen Feld eines TLE

kalt abgegeben. »Das ist der Schlüssel zum Verständnis ihrer chemischen Persönlichkeit«, ist Gordillo-Vázquez überzeugt. Im Labor produzieren solche kalten »Koronaentladungen« (siehe Glossar) direkt erhebliche Mengen an Ozon und Lachgas (N_2O). Letzteres gilt als das dritt wichtigste Treibhausgas nach CO_2 und Methan.

Heute ist es möglich, TLEs aus der Luft zu beobachten. Dadurch ist es wesentlich einfacher geworden, sie zu untersuchen. Die Forschungsgruppe des Atmosphärenwissenschaftlers ist an einer Weltraummission namens Atmosphere Space Interaction Monitor (ASIM) beteiligt, einem Instrumentarium, das seit April 2018 auf der Internationalen Raumstation installiert ist. Wie sich erwiesen hat, erkennt ASIM leuchtende Koronaentladungen in Gewitterwolken sehr gut. »ASIM hat es uns zum ersten Mal ermöglicht, die Art der in Gewitterwolken auftretenden Koronaentladungen zu verstehen und aufzuzeichnen, wo und wie häufig sie vorkommen«, ordnet der Forscher das Projekt ein.

Mit ASIM lässt sich zwar nicht messen, welche chemischen Stoffe bei den kalten atmosphärischen Entladungen erzeugt werden. Doch es hat gezeigt, dass die fremdartig wirkenden elektrischen Ereignisse weit verbreitet sind. Daher könnten sie eine bedeutende natürliche Quelle für Treibhausgase darstellen, wenn ihre Chemie jener der im Labor erzeugten Koronaentladungen entspricht. Die Frage, wie wichtig dieser Beitrag zum chemischen Haushalt solcher Gase in der Atmosphäre ist, muss



Ein Geschenk, das ankommt!

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

Spektrum.de/aktion/gutscheine



Starhilfe für das Leben?

Blitze beeinflussen nicht nur die Chemie der Atmosphäre. Wo sie einschlagen, verändern sie mitunter auch die chemische Zusammensetzung der Erde. Möglicherweise war das entscheidend für die Entstehung des Lebens.

Als Benjamin Hess, heute Doktorand an der Yale University in New Haven, USA, noch am Wheaton College in Illinois studierte, wandte sich eine Familie aus einer Nachbarstadt an die geologische Abteilung. Ein Blitz war in ihren Rasen eingeschlagen und hatte im Boden ein glasartiges Material hinterlassen, das man Fulgurit nennt. Nachdem es ausgegraben worden war, machte Hess es zu seinem Forschungsprojekt. »Ich habe es aufgeschnitten und wusste buchstäblich nicht, was ich finden würde«, erzählt er.

Hess untersuchte die Probe mittels Raman-Spektroskopie sowie Rasterelektronenmikroskopie und stellte fest, dass der Fulgurit ein Mineral namens Schreibersit enthielt. Darin liegt Phosphor in einer stark reduzierten Form (als Phosphid) an Eisen gebunden vor. Er ist wasserlöslich und steht für chemische Reaktionen zur Verfügung – im Gegensatz zum unlöslichen Phosphat, als das er normalerweise vorliegt.

Den Berechnungen des Teams zufolge könnte der durch Blitze erzeugte reduzierte Phosphor auf der frühen Erde entscheidend für die Entstehung von Leben gewesen sein, indem er die Bildung phosphorhaltiger Biomoleküle wie DNA, RNA, Phospholipiden und ATP ermöglichte.

Seit den berühmten Studien von Stanley Miller und Harold Urey in den 1950er Jahren werden Blitze oft als mögliche Auslöser für die Bildung biologisch wichtiger Verbindungen auf der Uerde

angeführt. »Frühe Erdumgebungen und Gesteine in der Erde im Allgemeinen enthalten so viel Sauerstoff, dass wichtige Elemente wie Phosphor an ihn gebunden sind«, sagt Hess. »Aber wenn man einen Blitz ins Spiel bringt, der die Materie sofort auf tausende Grad Celsius erhitzt, werden alle diese Bindungen aufgebrochen. Ein Element wie Phosphor kann sich dann beispielsweise an Eisen binden – wie im Schreibersit –, wodurch es plötzlich frei reagieren und andere Moleküle bilden kann.«

Da Schreibersit häufig in bestimmten Meteoritentypen zu finden ist, lautete eine Theorie, dass reduzierter Phosphor auf der Uerde extraterrestrischen Ursprungs war. Hess' Ergebnissen zufolge könnten Blitze aber eine ebenso bedeutende Quelle für das Element gewesen sein, zumal die Meteoriteneinschläge mit der Entwicklung des Sonnensystems seltener wurden.

man laut Gordillo-Vázquez allerdings erst noch klären. Eine neue Generation von Satelliten zur Überwachung der Luftqualität soll sich bald auf den Weg in eine geostationäre Umlaufbahn über den USA, Europa und Asien machen. Die Daten aus ihren Messungen könnten das Puzzle vervollständigen.

Mehr Daten würden Brune ebenfalls dabei helfen, seine Schätzungen über die globale Bedeutung der Hydroxylproduktion durch unsichtbare Blitze zu präzisieren. »Wir haben sieben Gewitterambosse durchflogen, mehr Daten haben wir nicht«, sagt er. »Wenn man das Ganze richtig angehen wollte, müsste man die Flüge mit einem Flugzeug wiederholen, das viel mehr Instrumente an Bord hat, um elektrische Felder, Ladungen und Ladungstrennungen zu messen.« Außerdem sollte man weitere Gewitter untersuchen, auch tropische, in denen die meisten Blitze auftreten. »Das ist möglich, aber diese Mission muss leider warten.«

Wirklich lohnen würde es sich Mary Barths Ansicht nach, die neuen Instrumente in eines der Flugzeuge einzubauen, die direkt in ein Gewitter hineinfliegen können, nicht nur drumherum. »Die meiste Zeit sehen wir uns die Substanzen in der Luft vor und nach dem Gewitter an. Darüber, was dazwischen passiert, muss man

seine eigenen Schlüsse ziehen«, sagt sie und ergänzt: »Ich würde gern etwas über die chemische Zusammensetzung im Inneren des Gewitters erfahren, und zwar durch eine Feldkampagne mit einem Flugzeug, das direkt durch den Sturm fliegt.«

QUELLEN

Brune, W. H. et al.: Extreme oxidant amounts produced by lightning in storm clouds. *Science* 273, 2021

Hess, B. L. et al.: Lightning strikes as a major facilitator of prebiotic phosphorus reduction on early earth. *Nature Communications* 12, 2021

Pollack, I. B. et al.: Airborne quantification of upper tropospheric NO_x production from lightning in deep convective storms over the United States Great Plains. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, 2016

Soler, S. et al.: Blue optical observations of narrow bipolar events by ASIM suggest corona streamer activity in thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125, 2020

Nutzung genehmigt von der Royal Society of Chemistry aus »Chemistry World« (<https://www.chemistryworld.com/features/a-lightning-burst-of-chemistry/4015883.article>)

Stiller Ort zum Sternegucken

Das Weltraumteleskop JWST ist zu einem Punkt im Sonnensystem gereist, wo es sich optimal vor störender Strahlung von dessen Himmelskörpern verstecken kann.

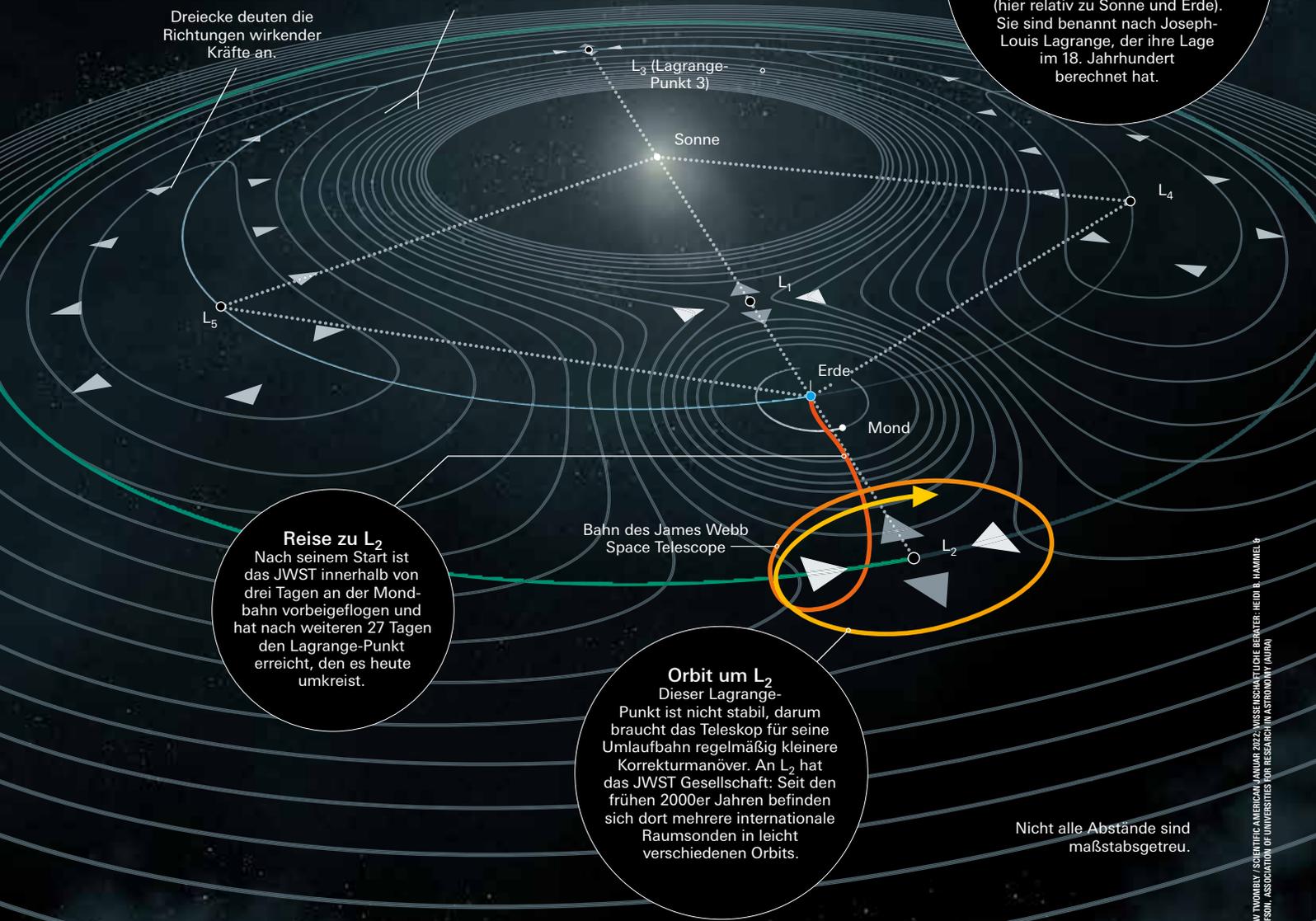
Text: Clara Moskowitz, Grafik: Matthew Twombly

Das rund zehn Milliarden US-Dollar teure James Webb Space Telescope (JWST) ist das technisch komplexeste Weltraumteleskop der Raumfahrtgeschichte. Es untersucht das All im Infrarotlicht und erfasst dabei Strahlung, deren Wellenlängen im Lauf der Expansion des Universums gestreckt wurden. Auf diese Weise kann es weit in dessen Vergangenheit zurückblicken. Dazu muss es allerdings all die Wärmestrahlung abschirmen, die ständig von heißen Himmelskörpern einprasselt. Am 1,5 Millionen Kilometer entfernten »Lagrange-Punkt 2« (L_2) weisen die Anziehungskräfte von Sonne und Erde stets in die gleiche Richtung. Das ermöglicht der Sonde eine Umlaufbahn, bei der sich beide Himmelskörper jederzeit auf der anderen Seite eines großen Sonnenschildes befinden. Dieses hält die Strahlung von Sonne, Erde und Mond von den empfindlichen Instrumenten fern. So lässt sich die abgewandte Seite auf mehr als -230 Grad Celsius abkühlen.

Was ist ein Lagrange-Punkt?
 Im Sonnensystem gibt es fünf Orte, an denen sich die Anziehungskräfte zweier Himmelskörper auf ein im Vergleich vernachlässigbar leichtes Objekt (wie eine Raumsonde) gerade so ausgleichen, dass Letzteres immer an der gleichen Position bleibt (hier relativ zu Sonne und Erde). Sie sind benannt nach Joseph-Louis Lagrange, der ihre Lage im 18. Jahrhundert berechnet hat.

In einem Konturdiagramm tritt entlang der durchgezogenen Linien immer der gleiche Wert auf. Die Kräfte werden dort stärker, wo zwei Linien sich näherkommen.

Dreiecke deuten die Richtungen wirkender Kräfte an.



Reise zu L_2
 Nach seinem Start ist das JWST innerhalb von drei Tagen an der Mondbahn vorbeigeflogen und hat nach weiteren 27 Tagen den Lagrange-Punkt erreicht, den es heute umkreist.

Orbit um L_2
 Dieser Lagrange-Punkt ist nicht stabil, darum braucht das Teleskop für seine Umlaufbahn regelmäßig kleinere Korrekturmanöver. An L_2 hat das JWST Gesellschaft: Seit den frühen 2000er Jahren befinden sich dort mehrere internationale Raumsonden in leicht verschiedenen Orbits.

Nicht alle Abstände sind maßstabsgetreu.

QUANTENKOSMOLOGIE

Grenzen von Raum und Zeit

Sowohl bei Schwarzen Löchern als auch beim Universum als Ganzes gibt es Regionen, in die wir nicht blicken können. Mathematische Ähnlichkeiten zwischen diesen Strukturen könnten helfen, beide besser zu verstehen.

► spektrum.de/artikel/2076198



Edgar Shaghoulian ist theoretischer Physiker an der University of California in Santa Cruz, wo er sich mit Schwarzen Löchern und ihrer Bedeutung für die Quantenkosmologie beschäftigt.



HORIZONTE Die jenseitigen Bereiche von Schwarzen Löchern und des erreichbaren Universums könnten eng miteinander verwoben sein.

SERIE

Schwarze Löcher

Teil 1: Dezember 2022
Inselhopping über den Ereignishorizont
Ahmed Almheiri

Teil 2: Januar 2023
Grenzen von Raum und Zeit
Edgar Shaghoulain

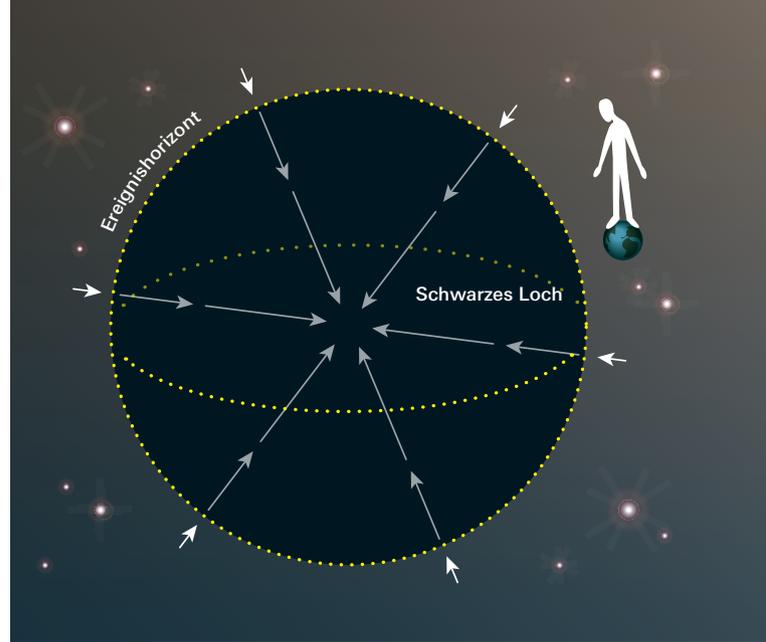
Teil 3: Februar 2023
Der dunkle Kern der Milchstraße
Seth Fletcher
Galaktische Getriebe
Thomas Lewton

▶ Woher kommt das Universum? Und wie entwickelt es sich in Zukunft weiter? Die Suche nach Antworten auf diese grundsätzlichen Fragen führt uns auf zwei sehr unterschiedliche Skalen: einerseits kosmische Größenordnungen, andererseits die Quantenebene, also die Welt der Atome und Atomkerne.

Für viele Dinge im Weltraum reicht die klassische Kosmologie aus. Sie wird von der Gravitation dominiert und gehorcht den von Einstein aufgestellten Regeln der allgemeinen Relativitätstheorie. Das Reich der Quanten spielt hier keine Rolle. Aber bei manchen Aspekten des Universums ist die Physik der kleinen Skalen nicht vernachlässigbar. In den ersten Augenblicken seiner Entstehung war das Weltall zum Beispiel nicht größer als ein Atom. Diese Epoche lässt sich nur mit einer Quantentheorie der Schwerkraft verstehen, mit der man alle Aspekte der Realität beschreiben könnte – sowohl das um ein Atom kreisende Elektron als auch die Bewegung der Erde um die Sonne. Die Entwicklung so einer Theorie ist das Ziel der Quantenkosmologie.

Die Quantenkosmologie ist nichts für schwache Nerven. Sie ist der Wilde Westen der theoretischen Physik und hat schon viele ehrgeizige Menschen angezogen und enttäuscht. Doch dieses Mal scheint es anders zu sein. 2019 haben Durchbrüche beim Verständnis Schwarzer Löcher – Systeme, bei denen Quantenmechanik und Schwerkraft gleichermaßen wichtig werden – bei der Suche nach Antworten geholfen. Den frisch gefassten Optimismus auf dem Feld habe ich beim Besuch einer virtuellen Konferenz spüren können. Bei einer Diskussionsrunde hatte ich nur mit spärlichem Besuch gerechnet, stattdessen waren bei der Veranstaltung viele der Koryphäen auf dem Gebiet anwesend und strotzten nur so vor Ideen und Motivation.

Es gibt durchaus Anhaltspunkte für einen Zusammenhang zwischen Schwarzen Löchern und unserem Universum als Ganzes. Beide besitzen »Ereignishorizonte«. Das



AUSWEGLOS Ab einem gewissen Abstand reißt ein Schwarzes Loch selbst Licht an sich. Ein außenstehender Beobachter kann daher nichts jenseits des Ereignishorizonts sehen.

sind Grenzen, jenseits derer beispielsweise zwei dadurch getrennte Menschen jede Möglichkeit verlieren, miteinander zu kommunizieren.

Ein Schwarzes Loch zieht alles in seinem Umfeld so stark an, dass selbst Licht irgendwann nicht mehr seiner Gravitationswirkung entkommen kann. So entsteht ein kugelförmiger Ereignishorizont um das Zentrum (siehe »Ausweglos«).

Auch unser Universum hat einen Ereignishorizont. Die Tatsache hängt mit einer verblüffenden und später mit dem Physik-Nobelpreis gewürdigten Entdeckung von 1998 zusammen, laut der sich der Weltraum nicht nur ausdehnt, sondern seine Expansion sich sogar beschleunigt. Die unbekannte Ursache dafür heißt Dunkle Energie. Sie hält das Licht ebenfalls zurück: Im Verlauf der Ausdehnung streben weit entfernte Regionen so rasant fort, dass irgendwann nicht einmal mehr das Licht schnell genug ist, um die Streckung des Raums zu überwinden. Das führt zu einem kugelförmigen kosmologischen Ereignishorizont, der uns umgibt und alles jenseits einer gewissen Distanz im Dunkeln lässt.

Eine Frage des Standpunkts

Es gibt jedoch einen entscheidenden Unterschied zwischen dem kosmologischen Ereignishorizont und demjenigen eines Schwarzen Lochs. In einem Schwarzen Loch kollabiert die Raumzeit auf einen einzigen Punkt hin, die Singularität. Im Universum dehnt sich der Raum gleichmäßig aus, wie die Oberfläche eines aufgeblasenen Luftballons. Deswegen sind Lebewesen in anderen Galaxien von ihren eigenen subjektiven Ereignishorizonten umgeben.

Unser derzeitiger kosmologischer Ereignishorizont ist etwa 16 Milliarden Lichtjahre entfernt (siehe »Aussichtslos«). Solange die Beschleunigung durch die Dunkle

AUF EINEN BLICK

Nachricht aus dem Jenseits

- 1** Laut neuen Erkenntnissen dürfte Information, die scheinbar in einem Schwarzen Loch eingesperrt ist, durch Quanteneffekte nach außen dringen.
- 2** Im expandierenden Kosmos gibt es ebenfalls Bereiche, aus denen uns grundsätzlich keine Signale erreichen. Effekte wie beim Schwarzen Loch könnten trotzdem Einblicke ermöglichen.
- 3** Beide Arten von Ereignishorizonten lassen sich mathematisch verknüpfen – zumindest in Modelluniversen. Eine Übertragung auf das reale All soll eine Theorie der Quantengravitation liefern.

Energie anhält, kann uns Licht, das heute jenseits dieses Abstands ausgesendet wird, niemals erreichen. Verwirrenderweise gibt es in der Kosmologie außerdem einen Partikel- oder Beobachtungshorizont, der oft ebenfalls als kosmologischer Horizont bezeichnet wird. Damit ist die Distanz von rund 46 Milliarden Lichtjahren gemeint, bis zu der sich das im frühen Universum ausgestrahlte Licht insgesamt bewegen konnte.

Die Ähnlichkeiten zwischen Schwarzen Löchern und unserem Universum enden hier nicht. 1974 hat Stephen Hawking bewiesen, dass Schwarze Löcher wegen quantenmechanischer Effekte Teilchen aussenden. Mit dieser Emission, der »Hawking-Strahlung«, lässt sich ihnen eine Temperatur zurechnen, und sie sorgt dafür, dass die Gebilde letztendlich verdampfen. Kosmologische Horizonte haben auf Grund eines sehr ähnlichen Phänomens ebenfalls eine Temperatur und senden Materie und Strahlung aus.

Hawkings Entdeckung warf ein ernstes Problem auf: Wenn Schwarze Löcher verschwinden, könnte das auch mit den Informationen passieren, die in ihnen stecken. Das aber widerspricht den Regeln der Quantenmechanik. Bei der Lösung dieses als Informationsparadoxon bekannt gewordenen Rätsels gab es neuerdings dramatische Fortschritte (siehe »Spektrum« Dezember 2022, S. 12). Es sieht nun so aus, als würden mittels der Hawking-Strahlung die Informationen tatsächlich aus dem Inneren eines Schwarzen Lochs abgerufen werden.

Die Entdeckung hat der Quantenkosmologie frischen Schwung verliehen. Die mathematischen Ähnlichkeiten zwischen Schwarzen Löchern und kosmologischen Horizonten haben viele aus der theoretischen Physik lange glauben lassen, dass wir Letztere nicht begreifen können, ohne Erstere zu verstehen. Jetzt verfügen wir über neue Werkzeuge, die es erlauben, das Zusammenspiel von Gravitation und Quantenmechanik am Ereignishorizont Schwarzer Löcher besser nachzuvollziehen.

Ein Teil der jüngsten Durchbrüche beim Informationsparadoxon geht auf eine Idee zurück, die als holografisches Prinzip bezeichnet wird. Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht und Leonard Susskind von der Stanford University haben sie in den 1990er Jahren entwickelt. Das holografische Prinzip besagt, dass eine Theorie der Quantengravitation für Schwarze Löcher nicht in den gewohnten drei Raumdimensionen formuliert werden sollte, sondern nur in zweien. Das Hauptargument für den Ansatz: Die Entropie eines Schwarzen Lochs – ein Maß für die enthaltene Information – ist proportional zur zweidimensionalen Fläche seines Ereignishorizonts (siehe »Das holografische Prinzip«).

Das ist bei Systemen, die wir aus dem Alltag kennen, völlig anders. So hängt beispielsweise bei einem Behälter mit Gas die Entropie von dessen dreidimensionalem Volumen ab. Schließlich kann man an jedem Punkt des Raums im Inneren etwas platzieren, das Information trägt. Wenn das Volumen wächst, nimmt die Entropie zu. Doch bei Schwarzen Löchern ist das nicht so. Wegen der extremen Raumkrümmung kann das Volumen zunehmen,

ohne dass sich das auf die Entropie auswirkt. Diese verhält sich vielmehr so, als würde sie von nur zwei Raumdimensionen abhängen, was einer Fläche entspricht.

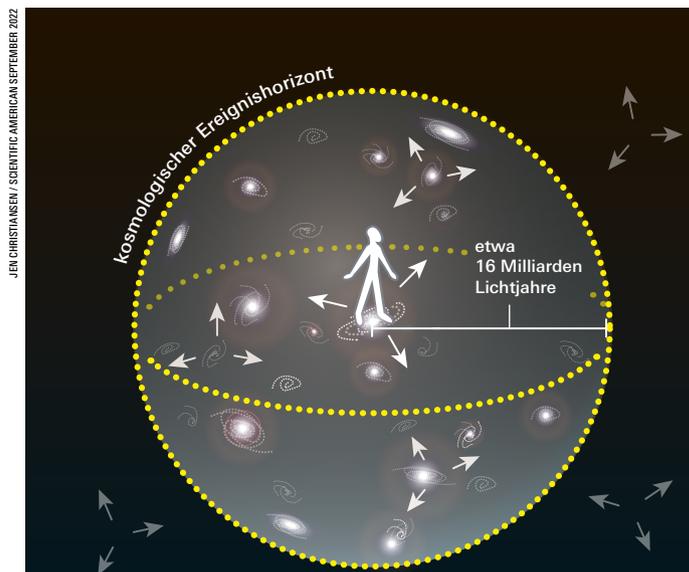
Die Vorstellung, der Raum sei nicht wirklich dreidimensional, leuchtet vom Grundgedanken her durchaus ein. Eine der Dimensionen könnte ein emergentes Phänomen sein, das heißt, sie ergäbe sich aus tieferen Zusammenhängen und wäre damit nicht explizit in den Naturgesetzen verankert. Laut dem holografischen Prinzip macht es zumindest hinsichtlich der Entropie keinen Unterschied, ob man eine Quantengravitation im Umfeld eines Schwarzen Lochs formuliert oder ob man ein reines Quantensystem ohne Schwerkraft betrachtet.

Vom Modell zum realen Kosmos

Einer der aufregendsten Aspekte der Fortschritte bei der Lösung des Informationsparadoxons ist, dass nun das holografische Prinzip allgemeiner anwendbar erscheint als zuvor. Bisher funktionierte es nämlich nur in einem Modelluniversum, das sich von unserem realen stark unterscheidet. Mittlerweile können die Techniken in Situationen eingesetzt werden, die unserem Universum ähnlicher sind. Die Art, wie die Information im Inneren des Schwarzen Lochs in der Hawking-Strahlung codiert wird, ist bei den oben erwähnten Berechnungen von 2019 mathematisch analog dazu, wie ein System mit Gravitation nach dem holografischen Prinzip in weniger Dimensionen und ohne Gravitation übersetzt wird. Solche Entwicklungen eröffnen Wege zum Verständnis des holografischen Prinzips in der echten Welt.

Eine bemerkenswerte Tatsache über kosmologische Horizonte ist, dass sie ebenfalls eine Entropie haben, die durch dieselbe Formel gegeben ist wie bei Schwarzen Löchern. Wie man das physikalisch interpretieren soll, ist jedoch weit weniger klar. Viele von uns hoffen, durch die Anwendung der neuen Techniken das Geheimnis zu lüften. Sollte es sich mit der Entropie so verhalten wie bei Schwarzen Löchern, sollte sie also eine Art Maß für die maximal vorhandene Information sein, dann hätten wir zum Beispiel

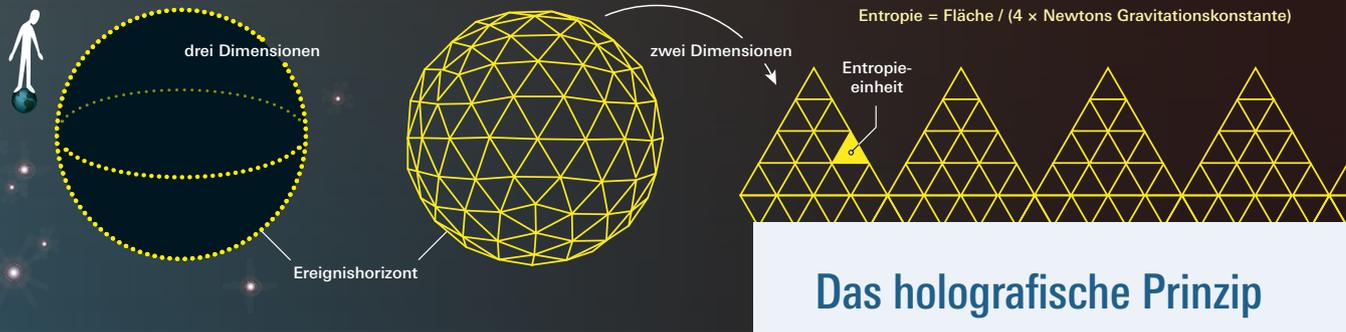
AUSSICHTSLOS Licht aus extremen Weiten des expandierenden Kosmos erreicht uns nie.



Der Ereignishorizont umhüllt ein kugelförmiges Volumen.

Er lässt sich als Fläche beschreiben.

Kennt man die Fläche, kann man die Entropie des Schwarzen Lochs berechnen.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2022

Das holografische Prinzip

Eine Theorie der Quantengravitation, die Schwarze Löcher beschreiben könnte, braucht manchen Modellen zufolge nicht alle drei Dimensionen, aus denen das Volumen des Raums besteht. Vielmehr reichen dazu zwei Dimensionen aus. Das liegt an der Entropie, einem Maß dafür, wie viele Informationen im Schwarzen Loch stecken. Sie hängt nicht vom Volumen ab, das der Ereignishorizont einschließt, sondern von dessen Oberfläche.

eine Grenze dafür, wie viel Material es in unserem Universum geben kann.

Die jüngsten Fortschritte beim Informationsparadoxon legen nahe, dass wir, wenn wir die gesamte Strahlung eines verdampfenden Schwarzen Lochs registrieren, auf alle Informationen zugreifen können, die in sein Inneres gefallen sind. Eine der wichtigsten konzeptionellen Fragen ist, ob dasselbe mit kosmologischen Ereignishorizonten möglich ist. Können wir Einblicke in das erhaschen, was jenseits des erreichbaren Teils des Universums liegt, indem wir seine Strahlung auffangen? Oder gibt es eine andere Option, den Horizont zu überwinden? Dann läge der größte Teil unseres gewaltigen Weltraums nicht für immer im Dunkeln.

Bei den Versuchen, Antworten auf solche Fragen zu finden, löst man sich normalerweise sozusagen aus dem Universum heraus und tut so, als würde man es von außen betrachten. Dieses vereinfachende Vorgehen ähnelt der mathematischen Behandlung eines Schwarzen Lochs, bei dem man den Beobachter und das System sauber trennen kann, indem man beide einfach weit voneinander entfernt platziert. Vor unserem kosmologischen Horizont scheint es allerdings kein Entkommen zu geben; er umgibt uns und bewegt sich bei jedem Positionswechsel mit. Das erschwert das Problem erheblich. Wenn wir unsere neuen Werkzeuge aus der Erforschung Schwarzer Löcher auf die Probleme der Kosmologie anwenden wollen, müssen wir einen Weg finden, den kosmischen Horizont von außen zu betrachten.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, so eine Vogelperspektive zu konstruieren. Eine besteht darin, ein hypothetisches Universum zu Hilfe zu nehmen, das quantenmechanisch mit unserem verschränkt ist. Dann untersucht man, ob man von dort aus auf diejenigen Informationen in unserem Kosmos zugreifen kann, die sich jenseits des Horizonts befinden.

Das habe ich gemeinsam mit Thomas Hartman und Yikun Jiang von der Cornell University versucht. Wir haben anhand solcher Szenarien demonstriert, dass man auf die gleiche Weise an Informationen von der anderen Seite des kosmologischen Ereignishorizonts gelangen kann wie bei einem Schwarzen Loch. Eine weitere Arbeit von Yiming Chen von der Princeton University, Victor Gorbenko von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne und Juan Maldacena vom Institute for

Advanced Study in Princeton brachte ähnliche Ergebnisse hervor.

Solche Analysen haben allerdings alle einen schwer wiegenden Mangel: Das dabei verwendete Modelluniversum kontrahiert, anstatt zu expandieren. Derlei Strukturen sind im Rahmen der Quantenkosmologie viel einfacher zu beschreiben. Es ist nicht ganz klar, warum das so ist. Es hängt wohl damit zusammen, dass wir uns auch das Innere eines Schwarzen Lochs als ein Weltall vorstellen können, in dem sich alles immer dichter drängt.

Selbst in diesen vereinfachten Situationen stellen sich einige verwirrende Fragen. So lassen sich mehrere gleichzeitige Außenansichten konstruieren, von denen aus man Zugang zu den Informationen im kontrahierenden Universum hat. Das bedeutet aber, dass mehrere Personen auf dieselbe Information zugreifen und sie unabhängig voneinander manipulieren können. Das jedoch ist im Rahmen der Quantenmechanik verboten. Die Theorie untersagt nicht nur die Zerstörung von Informationen, sondern durch das »No-Cloning-Theorem« auch ihre Vervielfältigung. Die verschiedenen gleichberechtigten Beobachter scheinen dagegen zu verstoßen.

In einem Schwarzen Loch ist das kein Problem, denn trotz vieler möglicher Außenstehender können keine zwei von ihnen unabhängig dieselbe Information im Inneren ablesen. Das hängt damit zusammen, dass es nur ein Schwarzes Loch und somit nur einen Ereignishorizont gibt. In einer sich ausdehnenden Raumzeit sehen unterschiedliche Beobachter jedoch individuell abweichende Horizonte. Das habe ich im April 2022 gemeinsam mit Adam Levine vom Massachusetts Institute of Technology näher untersucht. Wir vermuten, dass sich diese Inkonsistenz mit denselben Techniken vermeiden lässt, die im

Zusammenhang mit Schwarzen Löchern verwendet werden.

Das ultimative Ziel ist es freilich, auf Außenseiterperspektiven, kontrahierende Universen und sonstige Vereinfachungen zu verzichten. Wir wollen eine vollständige Quantentheorie des realen expandierenden Universums, und zwar aus unserer Sicht inmitten des Ganzen. Viele räumen einer holografischen Beschreibung die besten Chancen ein, also einer Theorie, die weniger als die üblichen drei Raumdimensionen verwendet.

Auf zwei Wegen könnten wir das erreichen. Die erste Strategie setzt auf Werkzeuge aus der Stringtheorie. Diese führt die Elementarteilchen auf schwingende Strukturen zurück, so genannte Strings. Die Theorie liefert unter den richtigen Umständen eine holografische Behandlung bestimmter Horizonte Schwarzer Löcher. Vielleicht klappt dasselbe für den kosmologischen Horizont. Obwohl viel Arbeit in diesen Ansatz gesteckt wurde, hat er noch kein vollständiges Bild für ein expandierendes Universum wie das unsere ergeben.

Theorien auf Basis von Theorien

Die andere Möglichkeit auf der Suche nach einer holografischen Beschreibung ist es, sich genauer anzuschauen, welche Eigenschaften ein solches Modell haben sollte. Das Vorgehen entspricht dem wissenschaftlichen Standard: Auf der Grundlage von Beobachtungen konstruiert man eine Hypothese, mit der sich sowohl die Daten reproduzieren als auch neue Vorhersagen machen lassen. In diesem Fall sind die Daten jedoch ebenfalls theoretisch. Es sind die Dinge, die wir sogar ohne ein vollständiges Bild zuverlässig berechnen können, so wie wir die Flugbahn eines Balls ohne die Quantenmechanik bestimmen.

Dazu erheben wir verschiedene Werte im Rahmen der klassischen Kosmologie. Nach Bedarf würzen wir das vielleicht mit einer kleinen Prise Quantenmechanik, aber wir vermeiden dabei Situationen, in denen Quanten- und Gravitationseffekte gleichermaßen wichtig sind. Daraus ergeben sich unsere theoretischen Daten, zum Beispiel die Hawking-Strahlung. Eine vollständige, exakte Quantenkosmologie sollte in der Lage sein, diese Daten zu reproduzieren, so wie die Quantenmechanik im Prinzip die Flugbahn eines Balls liefern kann (wenn auch auf viel kompliziertere Weise als die klassische Mechanik).

Bei der Gewinnung der theoretischen Daten hat sich beispielsweise Dionysios Anninos vom King's College London hervorgetan. Er arbeitet seit mehr als einem Jahrzehnt daran, holografische Beschreibungen in Modelle für die Raumzeit zu überführen. Auch andere nehmen an dem Unterfangen teil, darunter der Princeton-Theoretiker Edward Witten, der sich schon lange mit der Quantengravitation und der Stringtheorie befasst. Mit seinem Institutskollegen Venkatesa Chandrasekaran sowie Roberto Longo von der Universität Tor Vergata in Rom und Geoffrey Penington von der University of California in Berkeley hat er untersucht, wie sich die Verbindung zwischen einem Beobachter und dem kosmologischen Horizont auf die mathematische Beschreibung auswirkt.

Besonders ehrgeizige Versuche wagen sich an Situationen, bei denen sich Quantenmechanik und Schwerkraft gleichermaßen stark auswirken. In solchen Fällen braucht es zwangsläufig einige zusätzliche Regeln oder Vermutungen über das Verhalten einer vollständigen Theorie. Laut einer populären Hypothese kommt es auf die Menge und das Muster der Verschränkungen zwischen den einzelnen Bestandteilen an. Susskind und ich haben unterschiedliche Vorschläge zu konkreten Herangehensweisen entwickelt. In Hunderten von E-Mails stritten wir uns im Verlauf der Pandemie unablässig darüber, welche Strategie sinnvoller sei. Ideen zur Berechnung der theoretischen Daten kamen auch von der Stringtheoretikerin Eva Silverstein von der Stanford University.

Die Rolle der Verschränkung in der Quantenkosmologie ist noch nicht geklärt. Das zu tun, wäre ein wichtiger Schritt in Richtung einer holografischen Beschreibung. Das Fach braucht dringend eine solche konkrete Theorie, damit wir ihre Vorhersagen mit der Fülle der inzwischen gesammelten theoretischen Daten vergleichen können. Ohne so eine Berechenbarkeit ist die Situation ähnlich unbefriedigend, wie wenn man das Periodensystem anhand der Eigenschaften der Elemente zusammenstellen würde, ohne die Quantenmechanik zur Erklärung der Muster heranziehen zu können.

In der Physik haben sich Menschen oft der Kosmologie zugewandt, kurz nachdem sie etwas Neues über Schwarze Löcher erfahren haben. Die Abstecker endeten immer wieder mit Ernüchterung und der Erkenntnis, dass wir noch viel mehr lernen müssen. Vielleicht leisten nun endlich die vertieften Erkenntnisse über Schwarze Löcher und das große weltweite Interesse an der Quantenkosmologie den entscheidenden Beitrag dazu, die Geschichte zu einem erfolgreichen Ende zu führen. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / OORKA

QUELLEN

- Chandrasekaran, V. et al.:** An algebra of observables for de Sitter space. ArXiv 2206.10780, 2022
- Chen, Y. et al.:** Bra-ket wormholes in gravitationally prepared states. Journal of High Energy Physics 2021, 2021
- Hartman, T. et al.:** Islands in cosmology. Journal of High Energy Physics 2020, 2020
- Levine, A., Shaghoulian, E.:** Encoding beyond cosmological horizons in de Sitter JT gravity. ArXiv 2204.08503, 2022

ASTROPHYSIK

Seltsame kosmische Strahlungspulse

Immer wieder ereignen sich rätselhafte Ausbrüche von Radiostrahlung am Himmel. Das Phänomen ist noch nicht lange bekannt, doch inzwischen läuft die Ursachenforschung mit spezialisierten Teleskopen auf Hochtouren.

» spektrum.de/artikel/2076201



Adam Mann ist Wissenschaftsjournalist im kalifornischen Oakland und schreibt vor allem über Physik und Astronomie.

GEWALTIGER BLITZ Ein Ausbruch von Radiostrahlung (hier eine Illustration) setzt in kürzester Zeit unvorstellbare Mengen an Energie gebündelt frei.

AUF EINEN BLICK

Intergalaktische Funkfeuer

- 1** Radioblitzte dauern nur Millisekunden, mit ihnen geben ferne Galaxien aber Unmengen von Radiostrahlung ab. Zuletzt wurden dank neuer Teleskope viele solche Ereignisse aufgezeichnet.
- 2** Manche Quellen senden wiederholt Licht zu uns, andere nur einmal. Dahinter könnten verschiedene Mechanismen stecken. In Verdacht stehen vor allem stark magnetisierte Sternüberreste.
- 3** Die faszinierenden Phänomene rücken zunehmend in den Fokus der Astronomie – auch, weil sich damit kosmische Strukturen vermessen lassen.

2001 zeichnete ein australisches Radioteleskop einen kurzen Moment lang das Signal einer gewaltigen Explosion auf, die sich wohl weit jenseits der Milchstraße ereignet hat. Allerdings fiel das zunächst niemandem auf. Erst Jahre später durchforstete ein Team um Duncan Lorimer von der West Virginia University in Morgantown die Archivdaten und entdeckte den Strahlenausbruch, einen »Fast Radio Burst« (FRB). Lorimer war klar: Der FRB schleuderte in wenigen tausendstel Sekunden so viel Energie ins All wie die Sonne in einem Monat.

Heute ist bekannt, dass sich Ähnliches täglich mindestens hunderte Male überall am Himmel ereignet. Das Phänomen gehört mittlerweile zu den am intensivsten erforschten Vorgängen in der Astrophysik. Zwar ist vieles rund um die Radioblitzte weiterhin rätselhaft, zu Beginn der 2020er Jahre hat sich jedoch ein klareres Bild ergeben. »Wir sind dem Verständnis einiger FRBs näher gekommen«, resümiert Ziggy Pleunis von der University

of Toronto. »Aber unterdessen haben neue Entdeckungen auf dem Gebiet zu weiteren Fragen geführt.«

So identifizierten drei verschiedene Forschungsgruppen im April 2020 eine intensive Radiostrahlung, die von einem Magnetar in der Milchstraße ausging (siehe »Spektrum« Februar 2021, S. 28). Magnetare sind eine spezielle Art von Neutronensternen (den Überresten massereicher Sterne) und besitzen ein extrem starkes Magnetfeld. Die Gebilde waren bereits zuvor ein heißer Kandidat für die Quelle von FRBs. Doch bei den wenigen Dutzend bekannten Exemplaren in unserer Galaxis wurden noch nie Ausbrüche beobachtet, die den Phänomenen ähneln. Das änderte sich 2020 mit dem Aufspüren des kurzen und gewaltigen Radioblitzes von einem Magnetar mit der Bezeichnung SGR 1935+2154. »Das war ein großer Moment für das ganze Untersuchungsgebiet«, meint Kenzie Nimmo von der Universität Amsterdam. »Er hat alle Zweifel ausgeräumt, dass zumindest einige FRBs von Magnetaren stammen.«

Indes ist umstritten, wie genau ein Magnetar einen FRB erzeugen kann. Die meisten Hypothesen gehen von einer heftigen Erschütterung der Oberfläche aus, angestoßen von verdrillten, reißenenden und sich wieder verbindenden Magnetfeldlinien. Solche Sternbeben könnten den Blitz entweder direkt hervorbringen oder aber indirekt, indem sie Material in der Umgebung anstoßen, aufheizen und in helles Plasma umwandeln.



CHIME-RADIOTELESKOP Das kanadische Gerät besteht aus vier halbzylinderförmigen Reflektoren. Sie haben keine beweglichen Teile, sondern scannen den Nachthimmel mit der Drehung der Erde nach Strahlungsquellen ab. Dabei fängt CHIME zahlreiche Radioblitz ein.

Mehrere Teleskope registrierten einen Impuls aus Röntgenlicht kurz nach dem Radiosignal von SGR 1935+2154. Es gibt also wohl diverse komplizierte Begleiterscheinungen. »Spielt sich das alles auf der Oberfläche des Sterns ab, in der Magnetosphäre oder im weiteren Umfeld des Magnetars?«, formuliert Emily Petroff von der Universität Amsterdam eine der zentralen Fragen. »Darüber besteht noch keine Einigkeit.« Ohnehin sind FRBs bezüglich Helligkeit, Dauer und anderer Eigenschaften verschieden. Darum wird ein einzelner beobachteter Mechanismus sie kaum alle erklären.

Zwei Arten von Radioblitzen

Im Sommer 2021 vervierfachte sich auf einen Schlag die Zahl der bekannten FRBs. Das Team des Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) in British Columbia veröffentlichte eine Liste von 536 FRBs, die das Teleskop in seinem ersten Betriebsjahr eingefangen hatte (siehe »Spektrum« September 2021, S. 25). Zuvor war bereits bekannt gewesen, dass es zwei Arten von Radioblitzen gibt: »Repeater«, die wiederholt auftauchen, sowie vereinzelte Ereignisse. Laut den Daten von CHIME unterscheiden sich die beiden hinsichtlich ihrer physikalischen Merkmale, und Repeater kommen offenbar seltener vor.

Im Durchschnitt dauern die Lichtblitze von Repeatern länger, und sie strahlen ihr Licht in einem engeren Frequenzbereich ab. Offen ist, ob die Ungleichheiten von individuell verschiedenen Ursachen herrühren oder von sonstigen Eigenarten wie dem Alter oder dem Ort der Quelle. Die Situation ähnelt einem früheren Rätsel um eine andere Klasse von kosmischen Explosionen, die Gammastrahlenausbrüche. Von den 1990er Jahren an wurde klar, dass sie bei drei andersartigen Vorgängen entstehen. Analog lassen sich FRBs möglicherweise ebenfalls in getrennte Populationen mit eigenen Entstehungsgeschichten unterteilen.

Der CHIME-Katalog enthält eine große Anzahl von FRBs aus einer Vielzahl von Galaxien. Das lässt die Verbindung zu Magnetaren weniger eindeutig erscheinen, denn diese kommen fast ausschließlich in Regionen mit massereichen, kurzlebigen Sternen vor. CHIME wurde jedoch oft in ruhigeren Galaxien fündig, in denen kaum neue Sterne entstehen. »Magnetare können einen Teil der FRBs erklären, das ist unstrittig«, kommentiert Shami Chatterjee von der Cornell University in Ithaca. »Aber alle? Mit ziemlicher Sicherheit nicht.«

Eine Veröffentlichung vom Februar 2022 hat das untermauert. Mit einem internationalen Radioteleskop-Netzwerk bestimmte ein Team mit äußerster Präzision die Himmelskoordinaten eines sich wiederholenden Ausbruchs. Ursprünglich war das Objekt mit der Bezeichnung FRB 20200120E der nahe gelegenen Spiralgalaxie M81 zugerechnet worden. Doch die hauptsächlich in Europa und Asien stationierten, miteinander verschalteten Antennen zoomten genauer hinein. Anscheinend befindet sich der Repeater in einer Ansammlung aus dicht gepackten Sternen, die als Kugelsternhaufen bezeichnet wird. Solche Gebilde beherbergen viele Milliarden Jahre alte Objekte. Theoretisch sollten sich Magnetare allerdings bereits 10000 Jahre nach ihrer Entstehung allmählich in ruhigere Neutronensterne verwandeln. Der Harvard-Astrophysiker Mohammadtaher Safarzadeh hält die Entdeckung für einen Wendepunkt: »Was auch immer die Ursache für das Signal ist, sie hat wahrscheinlich das gleiche Alter wie der Kugelsternhaufen und ist definitiv kein Magnetar.«

Von Zeit zu Zeit jedoch könnte ein Magnetar aus der Verschmelzung zweier älterer Neutronensterne hervorgehen, gibt der Theoretiker Bing Zhang von der University of Nevada in Las Vegas zu bedenken. Das könnte das Vorkommen in einem Kugelsternhaufen erklären. Aber solch ein Vorgang ist bisher rein hypothetisch, und niemand weiß genau, wie oft das passieren würde oder wie lange die entstehenden Magnetare aktiv blieben.

Ein weiterer Außenseiter verkompliziert das Bild: FRB 20180916B, auch R3 genannt, weil es sich um den dritten jemals entdeckten Repeater handelt. Ursprünglich wurde R3 einer Region zugerechnet, die in der Nähe des Zentrums einer etwa eine halbe Milliarde Lichtjahre

entfernten Spiralgalaxie liegt. Hier tummeln sich viele junge Sterne. Doch später stellte sich heraus, dass er sich in den ruhigeren Außenbezirken befindet. Darüber hinaus kommt es lediglich während eines vier- bis fünftägigen Aktivitätsfensters, das sich alle etwa 16 Tage öffnet, zu einer Serie von Ausbrüchen. Sonst herrscht Stille.

Die merkwürdige Regelmäßigkeit bei R3 sorgt in der Fachwelt für Kopfzerbrechen. Eine mögliche Erklärung ist ein Magnetar, dessen kreiselnde Drehachse in wechselnde Richtungen deutet. Manchmal würden seine Explosionen also auf die Erde und manchmal von ihr weg zeigen. Eine alternative Hypothese geht von einem Objekt aus, das ein zweites Gebilde umkreist, etwa ein Schwarzes Loch. Dann würde eine Scheibe aus hineinstürzender Materie den Partner umgeben und die Strahlung zyklisch verdecken. Und dann gibt es sogar die Vermutung, dass es sich um ein Paar umeinandertanzender Neutronensterne handelt, deren Magnetosphären periodisch miteinander wechselwirken. Dadurch entstünde regelmäßig so etwas wie ein elektromagnetischer Resonator. »Gerade die zahlreichen Möglichkeiten machen das Forschungsfeld so spannend«, meint Chatterjee.

Mit genaueren Ortungen zu einer Karte des Kosmos

Dabei sind viele wichtige Fragen völlig offen. Handelt es sich beispielsweise bei den sich nicht wiederholenden FRBs wirklich um einmalige Ereignisse, oder haben wir die Quellen nur nicht lange genug beobachtet? Der Magnetar in unserer Galaxis scheint heute recht ruhig zu sein, aber wie aktiv war er früher? Welche weiteren exotischen Szenarien könnten solche Signale erzeugen? Ständig werden neue Beobachtungen und Hypothesen publiziert.

Unterdessen richtet die CHIME-Kollaboration eine Reihe kleinerer Teleskope im weiteren Umkreis der Hauptantennen ein. Sie lassen eine Triangulation zu, mittels der sich dann FRBs deutlich präziser orten lassen werden. In einigen Jahren sollen so die genauen Positionen hunderter oder sogar tausender Ereignisse katalogisiert sein. Das wird nicht nur viele Fragen zu den Radioblitzern klären, sondern darüber hinaus überhaupt eine bessere Vermessung des Kosmos ermöglichen.

Ursprünglich rührt das Wissen um den extragalaktischen Charakter von FRBs nämlich daher, dass ihr Licht auf solch großen Strecken im intergalaktischen Medium einer »Dispersion« unterworfen ist, die sich in ihrem Spektrum ablesen lässt. Das heißt, höhere Frequenzen kommen einige Millisekunden vor den niedrigeren an. Das gibt Aufschluss über die Materie, die von den Radiowellen auf ihrem Weg durch den Weltraum durchlaufen wurde. Denn vermutlich befinden sich über das sichtbare Gas und den Staub in Sternen und Galaxien hinaus dazwischen noch reichlich unsichtbare Teilchen. Mittels einer Hand voll FRBs und anhand der Dispersion gelangen 2020 bereits Abschätzungen, wie viel davon auf dem Pfad des Lichts von den Quellen der Radioblitzte bis zu uns liegt. Die Mengen entsprechen recht genau der theoretischen Erwartung.

Mit einer größeren Zahl von FRBs ließe sich die Materie im gesamten Universum kartieren. In einigen Fällen ist das Licht stark polarisiert; das bedeutet, die Wellen wurden während des Flugs durch Magnetfelder in gewisse Richtungen gedreht. Daraus lassen sich möglicherweise Informationen über die Felder in anderen Galaxien oder im dazwischen befindlichen Weltraum gewinnen.

Unterdessen bleibt das Rätsel um den Ursprung der FRBs bestehen. »Ich rechne fest damit, innerhalb des nächsten Jahrzehnts ein oder zwei weitere Überraschungen zu erleben – vergleichbar mit dem Magnetar aus unserer Galaxis, von dem wir nicht einmal wussten, dass wir danach suchen sollten«, zeigt sich Petroff zuversichtlich. »Solche Funde werden uns entscheidend voranbringen.«

Falls einige sich nicht wiederholende FRBs tatsächlich vom Zusammenstoß von Neutronensternen herrühren, würde ein derartiger Vorgang Gravitationswellen erzeugen. Sollten ein Radioteleskop und eines der weltweiten Gravitationswellen-Observatorien gleichzeitig etwas Entsprechendes beobachten, erhielte die Hypothese Gewicht. Und wenn eine Kollision einen Magnetar hervorbringt – formt sich dann im Lauf der Zeit nach dem ersten, heftigen Ereignis daraus ein Repeater, der immer wieder als Quelle weiterer Radioblitzte in Erscheinung tritt?

In Anbetracht der rasanten jüngsten Entwicklungen dürfte es in den kommenden Jahren noch mehr faszinierende Erkenntnisse rund um Radioblitzte geben. In jedem Fall gibt sich Lorimer optimistisch: »Sobald man denkt, alles beruhigt sich etwas, bricht plötzlich wieder ein Jahr voller bemerkenswerter Entdeckungen an.« ◀

QUELLEN

Bochenek, C.D. et al.: A fast radio burst associated with a Galactic magnetar. *Nature* 587, 2020

Kirsten, F. et al.: A repeating fast radio burst source in a globular cluster. *Nature* 602, 2022

Macquart, J.-P. et al.: A census of baryons in the Universe from localized fast radio bursts. *Nature* 581, 2020

Marcote, B. et al.: A repeating fast radio burst source localized to a nearby spiral galaxy. *Nature* 577, 2020

The CHIME/FRB Collaboration: A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar. *Nature* 587, 2020

Mehr Wissen auf Spektrum.de

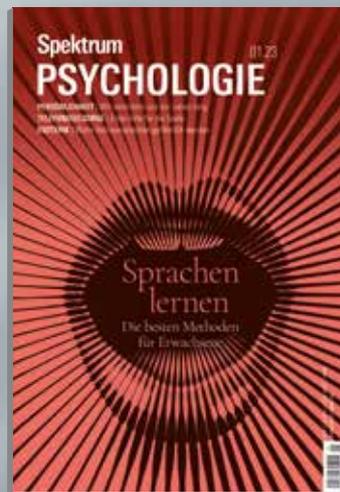
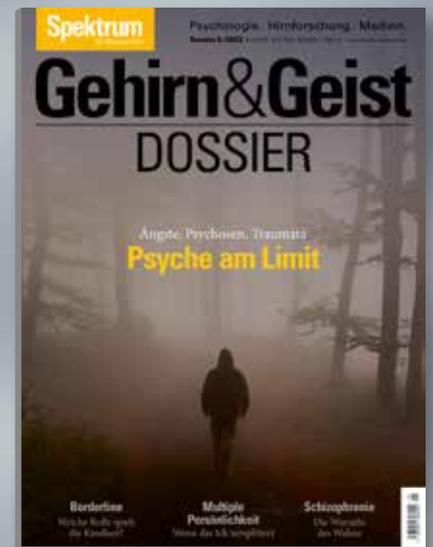
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/kosmologie](https://www.spektrum.de/t/kosmologie)



YURIY MAZUR / STOCK.ADOBE.COM

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)

Überlichtschnelle Blitze

Nichts ist schneller als das Licht. Allerdings nur unter bestimmten Bedingungen. Und wenn die Lichtgeschwindigkeit doch einmal überschritten wird, freut das ganz besonders die Fachleute aus der Astronomie.

► spektrum.de/artikel/2076204

Die Lichtgeschwindigkeit beträgt exakt 299 792,458 Kilometer pro Sekunde – im Vakuum. Und nur die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist die absolute Obergrenze im Universum. Wenn sich Licht durch ein Medium bewegt, ist es langsamer und kann überholt werden. Was dann passiert, erklärt die Frank-Tamm-Formel:

$$\frac{dE}{dx d\omega} = \frac{e^2}{4\pi} \mu(\omega) \omega \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right)$$

Sie ist nach den russischen Physikern Ilya Frank und Igor Tamm benannt und beschreibt, wie viel Energie E ein Teilchen pro Längeneinheit x und pro Frequenzeinheit ω ausstrahlt.

Bewegen sich geladene Teilchen schneller als das Licht, entsteht die so genannte Tscherenkow-Strahlung. Die Frank-Tamm-Formel hängt dabei von der Ladung e und der Geschwindigkeit v der Partikel ab, genauso wie vom Brechungsindex n und der magnetischen Durchlässigkeit μ des umgebenden Mediums.

Man kann sich das Phänomen ein bisschen wie den Überschallknall eines Flugzeugs vorstellen, das mit mehr als Schallgeschwindigkeit fliegt. Trifft ein geladenes Teilchen auf ein Material, dann werden die Atome des Mediums polarisiert und senden Strahlung aus. Wenn sich das durchfliegende Teilchen langsam bewegt, haben die Lichtwellen Zeit, miteinander zu interferieren, und löschen sich gegenseitig aus. Bei überlichtschnellen Partikeln funktioniert das aber nicht mehr – und es entsteht Tscherenkow-Strahlung.

Die lässt sich sogar direkt beobachten, zum Beispiel als blaues Leuchten in den Abklingbecken von Kernkraftwerken. Die radioaktiven Brennele-

mente setzen Elektronen frei, die im Kühlwasser schneller als das Licht sein können.

Doch Tscherenkow-Strahlung wird auch auf natürlichem Weg erzeugt: Kosmische Strahlung aus dem Weltall löst in der Erdatmosphäre kernphysikalische Reaktionen aus, wodurch Schauer von Teilchen entstehen, die sich mitunter überlichtschnell bewegen. Sie erzeugen »Tscherenkow-Blitze«, die man zwar nicht mit dem bloßen Auge sehen, aber mit geeigneten Teleskopen detektieren kann.

Für die Astronomie ist das ein Glücksfall. Denn der hochenergetische Anteil der kosmischen Strahlung, der diese Blitze auslöst, stammt meist von weit entfernten Objekten, etwa den aktiven Zentren ferner Galaxien, der Umgebung Schwarzer Löcher, von Supernova-Explosionen oder Pulsaren – allesamt extrem interessante Forschungsobjekte für Astronomen. Für die kosmische Strahlung ist die Erdatmosphäre aber undurchlässig. Um sie direkt zu beobachten, muss man Gammateleskope ins Weltall schicken. Wie jede Art von Weltraumteleskop sind auch diese Missionen komplex und teuer.

Mit Tscherenkow-Teleskopen kann man jedoch vom Erdboden aus das Licht detektieren, das die kosmische Gammastrahlung durch das Auftreffen auf die Atmosphäre auslöst. Aus der Richtung und Energie der Blitze lässt sich auf die Herkunft der ursprünglichen kosmischen Strahlung schließen.

Bei ihrer Suche nach Möglichkeiten, das unermessliche Universum zu beobachten, muss die Astronomie zwangsläufig kreativ werden. Die Überlichtgeschwindigkeitsastronomie der Tscherenkow-Teleskope gehört zu ihren bisher besten Einfällen.



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

ARCHÄOLOGIE

Graben auf dem Pulverfass

Seit einigen Jahren bringen Archäologen in Jerusalem ihre Methoden und Forschungsansätze auf den neuesten Stand. Aber Religion und Politik liefern dort immer wieder Konfliktstoff. Denn meist sollen die Funde helfen, Israels Anrecht auf das Land in der Levante zu untermauern.

» spektrum.de/artikel/2076207



Andrew Lawler ist Redakteur beim Magazin »Archaeology« und schreibt für »Science«.



DAS ALTE JERUSALEM

In der Stadt befinden sich bedeutende heilige Stätten des Judentums, des Islam und des Christentums – darunter die Klagemauer, der Felsendom und die Grabeskirche.

AUF EINEN BLICK

Das biblische Jahrtausend

- 1** Grabungen in Jerusalem sollten seit dem 19. Jahrhundert vor allem die in den Heiligen Schriften geschilderte Ereignisgeschichte beweisen.
- 2** Mit der Gründung Israels 1948 nahm auch die Politik Einfluss: Archäologische Funde galten als Belege für das Existenzrecht des jüdischen Staats.
- 3** Zunehmend werden zwar moderne Methoden wie Geomagnetik oder die ^{14}C -Datierung genutzt. Doch nach wie vor liegt der Fokus auf der jüdischen Vergangenheit.

Im Herbst 2021 sorgte eine 2700 Jahre alte Latrine weltweit für Schlagzeilen. Nicht etwa weil sie besonders raffiniert konstruiert wurde, sondern weil sie in Jerusalem zu Tage gekommen war, der Heiligen Stadt dreier Weltreligionen, dem Brennpunkt des Nahostkonflikts. Aktuell laufen ein Dutzend oder mehr Grabungsprojekte in der expandierenden Metropole. Kein anderer Ort erregt mit archäologischen Funden so viel Aufmerksamkeit in den Medien – egal wie alltäglich die Entdeckungen auch sein mögen. Allein eine antike Latrine in Jerusalem vermag die Fantasie von Millionen Menschen zu beflügeln.

Seit den 1830er Jahren strömten Schatzsucher, religiöse Schwärmer und Gelehrte nach Jerusalem. Auf der Suche nach Gräbern und Reichtümern legten sie die Grundlagen der Biblischen Archäologie – des einzigen Forschungszweigs, der mit der Absicht entstanden war, die Heiligen Schriften mit den Werkzeugen der Wissenschaft zu belegen und so den christlichen Glauben zu stärken. Inzwischen treiben weniger Frömmigkeit oder Schätze die Forscher und Forscherinnen an, sie halten jedoch immer noch die Bibel für eine legitime und authentische Quelle.

Dieser Ansatz ist Segen und Fluch zugleich. Denn trotz mehr als anderthalb Jahrhunderten Forschung gibt es eklatante Wissenslücken über die Anfangszeit der Stadt, aber vor allem über die späteren, nicht biblischen Phasen unter persischer, hellenistischer und arabischer Herrschaft. Ebenso wirft der Alltag der einstigen Bewohner noch viele Fragen auf. Wie war es um deren Gesundheit bestellt, was aßen sie, mit wem in der Welt des Altertums knüpften sie Kontakte?

Für ihre Untersuchungen zogen die Fachleute oft nur hebräische Schriften heran und ließen dabei moderne Methoden außer Acht. So setzen sie erst seit jüngster Zeit die Radiokohlenstoffdatierung ein, die anderswo längst zum Standardrepertoire der Archäologie zählt. Jerusalems Ausgräber haben lange zeitaufwändige Arbeiten gescheut, etwa antike Müllhaufen auszugraben, um so das Alltagsleben vor Jahrtausenden zu erhellen.

Palästinenser dürfen nicht graben

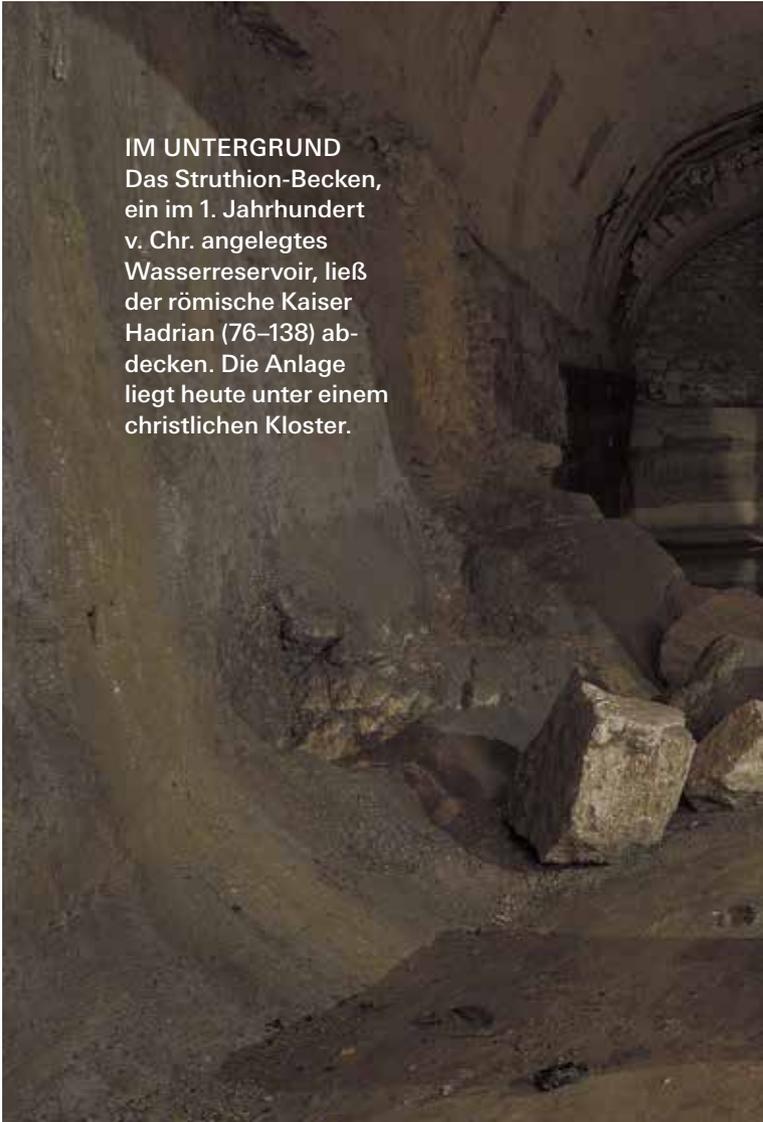
Inzwischen versuchen die Jerusalemer Wissenschaftler gleichzuziehen, indem sie neue Analysemethoden nutzen. Doch in einer Stadt, in der zwei Bevölkerungsgruppen mit drei Religionen in einem brüchigen Frieden leben, bleibt auch die Archäologie nicht neutral. Alle Ausgrabungen stehen unter der Aufsicht der israelischen Altertumsbehörde, die Ausländern nur selten Grabungslizenzen erteilt und palästinensischen Teams überhaupt keine. Fundamentalistische Christen und Juden spenden reichlich Geld für aufwändige Forschungskampagnen. Die dabei gemachten archäologischen Funde kommen der israelischen Regierung gelegen, sofern sie den Anspruch des Staats auf die Heilige Stadt untermauern.

»Die Wahrheit entspringt aus der Erde«, heißt es in dem Teil der Bibel, den Christen und Juden die Psalmen und die Muslime den Zabur nennen. Doch die Wahrheit, die Archäologen mit neuesten Analysetechniken entde-

cken, ist heute nicht weniger kompliziert als im 19. Jahrhundert. Jerusalem ist und bleibt ein heikles Terrain für die Fachleute. An diesem Ort verkeilen sich regelmäßig die Vertreter von Religion, Politik und Wissenschaft – manchmal kooperieren sie, und manchmal kollidieren sie.

Der amerikanische Altertumswissenschaftler Edward Robinson (1794–1863) begründete den biblischen Hype in den 1830er Jahren, als die moderne Archäologie ihre Anfänge nahm. Während eines Studienaufenthalts in Deutschland begegnete der gläubige Protestant Bibelkritikern, die der Heiligen Schrift mit Logik und Vernunft zu Leibe rückten. Für Robinson grenzte es an Ketzerei, die inhärente Wahrheit der alt- und neutestamentlichen Schilderungen anzuzweifeln. Er wollte mit wissenschaftlichen Methoden beweisen, dass die Bibel von Menschen, Orten und Ereignissen handelte, die wirklich existiert haben. Ausgerüstet mit Maßband, Thermometer, Teleskop und drei Kompassen machte er sich auf den Weg nach Jerusalem, wo er »unbestreitbare Denkmale jüdischen Altertums« zu finden hoffte.

Zunächst verglich Robinson moderne Namen von Dörfern, Brunnen und Bächen in der Region um Jerusalem mit entsprechenden Bezeichnungen in der Bibel. Damit wollte er belegen, dass die geografischen Angaben darin korrekt seien. Diese Vereinigung von Fakten und Glauben begeisterte die Christen im Westen. Das Buch, das er 1841 zusam-



IM UNTERGRUND
Das Struthion-Becken,
ein im 1. Jahrhundert
v. Chr. angelegtes
Wasserreservoir, ließ
der römische Kaiser
Hadrian (76–138) ab-
decken. Die Anlage
liegt heute unter einem
christlichen Kloster.

men mit seinem Mitarbeiter Eli Smith unter dem gewichtigen Titel »Palästina und die südlich angrenzenden Länder – Tagebuch einer Reise im Jahre 1838 in Bezug auf biblische Geographie« veröffentlichte, avancierte zum Verkaufsschlager. Damit legten die Männer den Grundstein für »ein ganz neues wissenschaftliches, religiöses und politisches Unternehmen im Heiligen Land«, schreibt der Biblische Archäologe und Historiker Neil Asher Silberman von der University of Massachusetts Amherst.

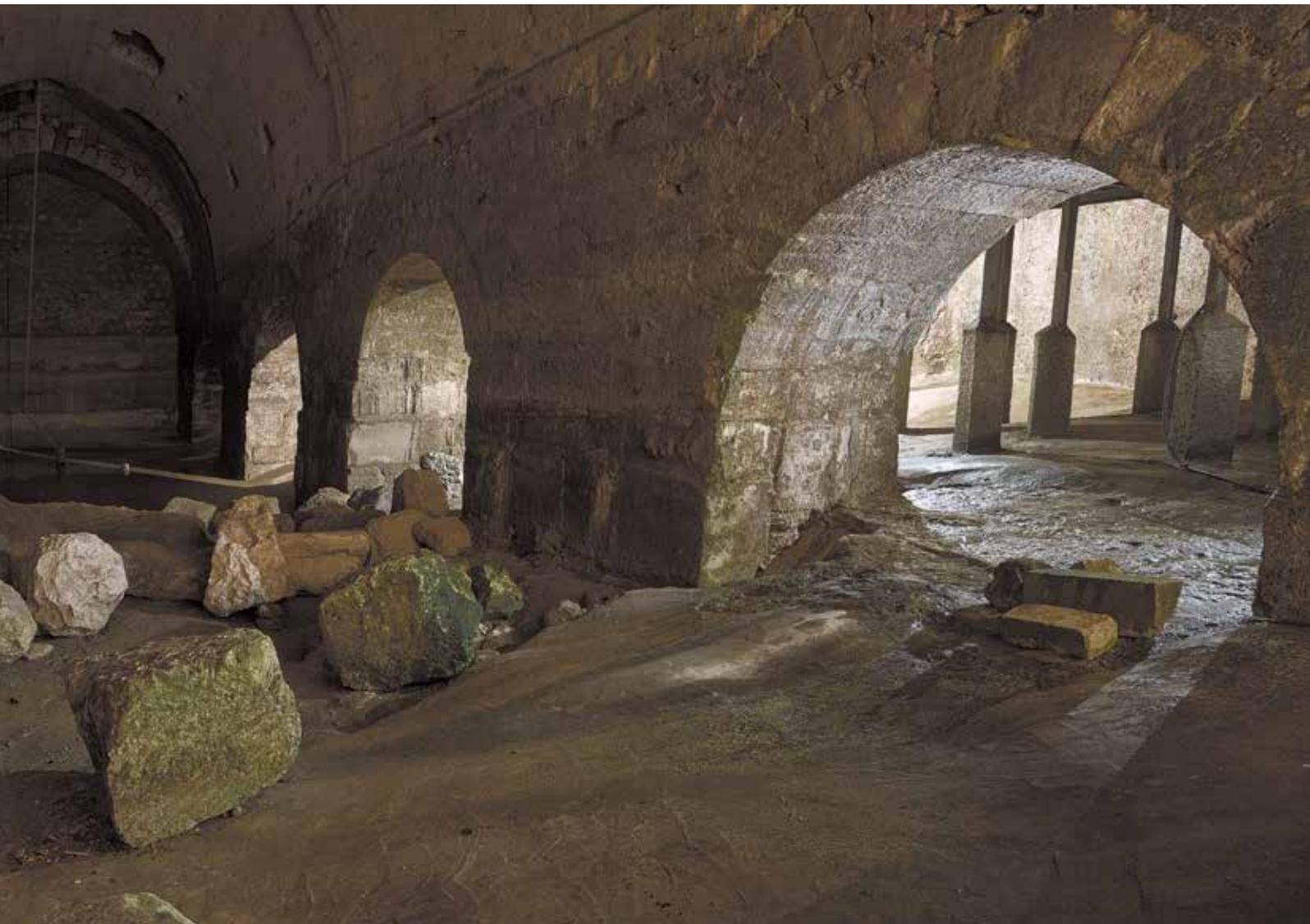
Ausgräber, Diplomaten und Spione

Doch es war ein Unternehmen, das die Machtverhältnisse im gesamten Nahen Osten neu arrangieren sollte. 1863 erteilte das Osmanische Reich, das Palästina kontrollierte, dem französischen Forscher und Senator Félicien de Saulcy (1807–1880) die erste offizielle Grabungsgenehmigung in Jerusalem. Der Sultan war aber weder an der Bibel noch an der Wissenschaft interessiert, sondern an den guten Beziehungen des Ausgräbers zu Kaiser Napoleon III. (1808–1873). Bald erhielten auch britische, deutsche und russische Teams Lizenzen – in ganz Palästina vermaßen, studierten und legten sie antike Stätten frei. Aber sie motivierte nicht die reine Wissenschaft: Die europäischen Mächte konkurrierten um Einfluss und Vorherrschaft im Osmanischen Reich, das sich damals von Osteuropa bis zum Horn von Afrika erstreckte. Mit seinen christlichen

Heiligtümern bot Jerusalem den Europäern einen leichten Zugang. Diplomaten, Militärs und Spione gehörten zum Tross der Bibelforscher, und nicht wenige von ihnen waren ebenfalls darauf erpicht, die Vergangenheit des Heiligen Landes zu erkunden – und Schätze zu finden.

Obwohl Jerusalem seit 5000 Jahren existiert, interessierten sich die westlichen Gelehrten vor allem für das »biblische Jahrtausend« – die Zeit zwischen der Ankunft der Israeliten um 1000 v. Chr. und der Zerstörung Jerusalems durch die Römer 70 n. Chr. In dieser Phase sind die meisten Schilderungen des Alten und Neuen Testaments angesiedelt. Besonderes Interesse galt den ersten Jahrhunderten der jüdischen Herrschaft. Die überwiegend protestantischen Ausgräber hatten vom Palast Davids gelesen, vom ersten Tempel Jahwes, den Salomo errichten ließ und in dessen Allerheiligstem die Bundeslade mit den Zehn Geboten aufbewahrt wurde. Den Steintafeln, die Moses vom Berg Sinai herabgebracht haben soll, sagte man übernatürliche Kräfte nach. Kurzum: In Jerusalem lagen der Wunsch nach Wissen, die Gier nach Reichtum und das Verlangen nach heiligen Objekten nahe beieinander.

Von Anfang an waren die Ausgräber mit einer schwierigen Lage konfrontiert. Viele Stätten des Vorderen Orients wuchsen allmählich in die Höhe, weil man neue Häuser auf den Grundmauern älterer errichtete. Der Vorteil für Archäologen: Siedlungsschicht folgt im Idealfall





SIMON HOFER/OLK

auf Siedlungsschicht; je tiefer man gräbt, desto älter werden die Überreste. Jerusalem allerdings wurde aus dem anstehenden Kalkstein des Judäischen Berglands errichtet. Der war beim Abbau relativ weich, härtete aber unter dem Einfluss der Witterung aus und färbte sich dabei golden – ein ideales und lange haltbares Baumaterial also, doch genau das bereitet Archäologen Probleme. Ein Stein, der einst in einer jüdischen Hauswand steckte, mag den Römern für einen Tempel getaugt haben, dessen Ruinen dann Araber für einen Bogen verwendeten, Kreuzfahrer im Mittelalter jedoch für den Bau einer Kirche plünderten. Weil kaum Holz oder andere organische Materialien verbaut wurden, lassen sich die Gebäudereste selten mit Hilfe der Dendrochronologie oder der Radiokarbonmethode datieren.

Der Kalkstein verursacht zudem technische Schwierigkeiten. Zum einen durchziehen Höhlen und Bäche den Untergrund. Zum anderen haben Jahrtausende der Bautätigkeit tonnenweise feinstes Geröll hinterlassen, das wie stabiler Fels erscheinen mag. »Der Kies brach plötzlich ein wie Wasser und begrub unsere Werkzeuge und manch-

mal auch unsere Arbeiter«, klagte ein britischer Archäologe in den 1860er Jahren. Zuletzt stürzten 2018 tonnenweise Gesteinstrümmer über einer Ausgrabung zusammen.

Und dann sind da noch Religion und Politik. Anders als Stätten wie Babylon im Irak ist Jerusalem nach wie vor eine lebendige Stadt voller Heiligtümer, die stetig einen Strom jüdischer, christlicher und muslimischer Pilger anziehen. Schon das Ausheben einer Grube kann als respektlos oder gar als aggressiver Akt gewertet werden. Das musste auch der oben erwähnte Franzose Félicien de Saulcy 1863 erfahren, als er in einem Grab arbeitete. Es gab einen Aufschrei in den jüdischen Gemeinden aller Welt. Einige Jahre später befürchteten Muslime, britische Archäologen würden die Stützmauer des Haram al-Sharif untergraben, die von Juden und Christen Tempelberg genannte Akropolis Jerusalems. Dies war nicht ganz abwegig, sprengte sich der Expeditionsleiter doch mit Schießpulver den Weg durch den Felsen. Immer wieder lösten Ausgrabungen in der Heiligen Stadt blutige Unruhen und internationale Krisen aus. Archäologie ist in Jerusalem nichts für schwache Nerven.

EINSTIGER PARKPLATZ Südlich der Altstadt haben Ausgräber Bauten aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. bis zur frühen muslimischen Zeit ein Jahrtausend später entdeckt (links). Unter dem ehemaligen Parkplatz fanden sie auch einen goldenen Ohrhring in Form eines gehörnten Tierkopfs, der aus dem 3. Jahrhundert v. Chr. stammt (unten).



SIMON MURFOLK

Am Ende des Ersten Weltkriegs übernahmen die Briten die Kontrolle über Palästina, zogen sich aber 1948 wieder zurück. Am 14. Mai jenes Jahres wurde der Staat Israel mit einer Unabhängigkeitserklärung gegründet. Seitdem kämpfen jüdische und arabische Gruppen um die Region. Die Hauptstadt des neuen Staats war zunächst Westjerusalem, während jordanische Streitkräfte Ostjerusalem im Griff hatten und damit die Altstadt sowie die meisten der antiken Stätten und Heiligtümer. Im Sechstagekrieg von 1967 eroberte Israel auch diesen Teil der Stadt und erklärte Jerusalem zur Kapitale. Bis heute betrachten die meisten Nationen jedoch den Ostteil als besetztes Gebiet.

Damals konnten jüdische Israelis erstmals den Untergrund der Stadt erforschen. Anders als Robinson und seine Nachfolger handelte es sich dabei meist um Agnostiker und Atheisten, denen es nicht darum ging, die Wahrheit religiöser Schriften zu beweisen. Allerdings waren viele von ihnen Nationalisten, die sich für die jüdische Geschichte begeisterten und die Bibel als Gründungsurkunde für ihr neues Heimatland betrachteten. Benjamin Mazar (1906–1995), ein berühmter Archäologe und Präsident der Hebräischen Universität in Jerusalem, gab 1984 in einem Interview in der Zeitschrift »Biblical Archaeology Review« unumwunden zu: »Die Biblische Archäologie war Teil des zionistischen Idealismus.«

Die Suche nach den Wurzeln Israels

Mazar und seine Kollegen stießen auf luxuriöse Villen, prächtige Alleen und sogar auf eine Fußgängerüberführung – alles aus der Zeit von Herodes dem Großen (73–4 v. Chr.) und seiner Nachfolger. Diese dem Römischen Reich hörigen Klientelkönige regierten im Jahrhundert vor und während der Zeit von Jesus. Im Jahr 70 n. Chr. hatte das gute Leben ein Ende, als sich ein Bürgerkrieg zu einem Aufstand gegen das Imperium ausweitete. Römische Legionen zerstörten Judas Hauptstadt und den zweiten Tempel des einen Gottes. Die archäologischen Befunde aus jener Epoche elektrisierten die jüdische Öffentlichkeit, da sie handfeste Beweise für die überlieferte Geschichte darstellten. »Israelische Archäologen, Profis wie Amateure, trachten nicht nur nach Wissen und Gegenständen, sondern auch nach einer Vergewisserung ihrer Wurzeln«, schrieb der Journalist und Autor Amos Elon 1971. Die Funde kamen zudem Politikern gelegen, die Israels umstrittenen Anspruch auf die gesamte Heilige Stadt damit untermauerten.

Die Palästinenser hingegen sprachen von einer Verdrehung der Wissenschaft zu politischen Zwecken. Die jüdische Vergangenheit Jerusalems werde auf Kosten der kanaanäischen, christlichen und muslimischen Geschichte bevorzugt. »Man hat uns 2000 Jahre lang in die Gefriertruhe gesteckt«, zürnt Nazmi Al Jubeh, ein palästinensischer Archäologe an der Universität Bir Zeit im Westjordanland. Die Kulturphasen nach der römischen Zerstörung würden nicht berücksichtigt – mit nur wenigen Ausnahmen: So entdeckte der israelische Archäologe Meir Ben-Dov einige beeindruckende Paläste aus dem 7. Jahrhundert n. Chr., also aus der Zeit kurz nach der Ankunft der arabischen Muslime. Auch eine bedeutende christliche Kirche byzantinischer Zeit kam zum Vorschein. Im Ganzen waren aber Ausgrabungen in Jerusalem ebenso wie die zugehörige Medienberichterstattung im Jahrzehnt nach dem Sechstagekrieg primär auf die jüdische Vergangenheit ausgerichtet.

Währenddessen hielten in Europa und Nordamerika neue Forschungsansätze und naturwissenschaftliche Methoden Einzug in die Archäologie. Das Hauptaugenmerk lag nicht mehr länger auf monumentalen Bauten, kostbaren Artefakten und den Zeugnissen längst verstorbener Könige. Vielmehr wollten Ausgräberinnen und

Ausgräber erfahren, wie die einfachen Menschen einer Kultur gelebt haben, welche Handelsrouten vergangene Gemeinschaften miteinander verbunden haben und was Änderungen in der materiellen Hinterlassenschaft über gesellschaftliche Entwicklungen verriet. Aus den Naturwissenschaften kamen dafür neuartige Techniken zur Datierung. Zudem lieferte das sorgfältige Durchsieben der Bodenschichten winzige Proben, die Aufschluss über Ernährung, Krankheiten, Handel und Rituale gaben.

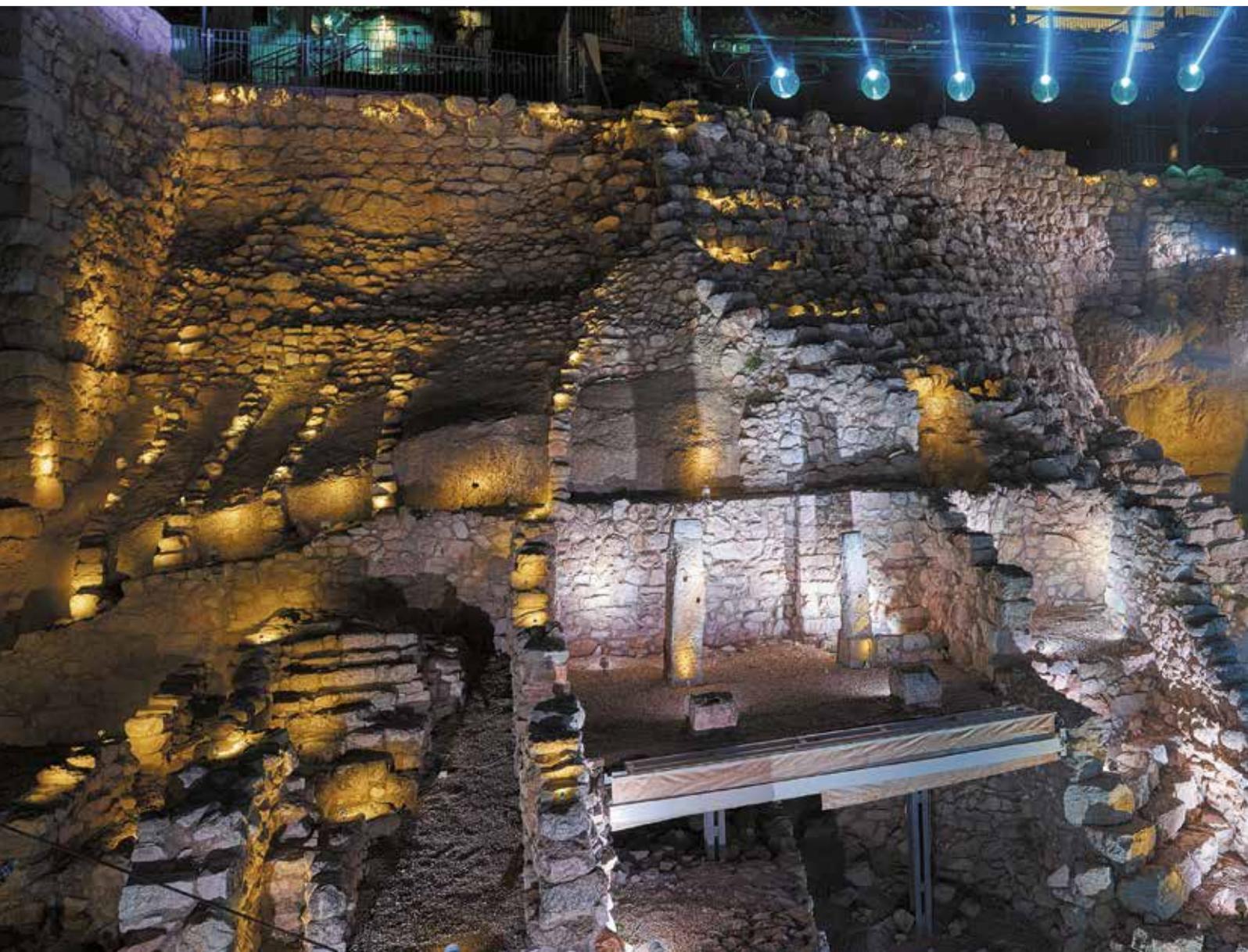
Nicht so in Jerusalem, dort blieb man konservativ. Die Suche nach Zeugnissen der Stadt Davids und Salomos hatte weiterhin Vorrang, fehlte doch nach mehr als einem Jahrhundert der Ausgrabungen immer noch jede Spur davon. Außerdem misstrauten viele den neuen Methoden. Die ¹⁴C-Datierung habe eine so große Fehlerspanne, lautete die Kritik, dass sich einem Fund ein beliebiges Alter zuschreiben lasse.

Erst der Archäologe Israel Finkelstein von der Universität Tel Aviv brachte das Lehrgebäude in den 1990er Jahren ins Wanken. Er datierte Siedlungsschichten des Heiligen Landes anhand dort gefundener griechischer Importkeramik neu und kam zu dem Schluss, die Jahreszahlen müssten um ein Jahrhundert verschoben werden.

Demnach habe man Bauten, die bislang auf 950 v. Chr. datiert wurden, erst um 850 v. Chr. errichtet. Diese korrigierte Chronologie könne laut Finkelstein »das gesamte Verständnis der Geschichte Israels verändern«. Insbesondere sei Jerusalem niemals jenes glorreiche Zentrum eines von David und Salomo regierten Königreichs gewesen. Die beiden mochten zwar gelebt haben, aber wohl eher als Stammeshäuptlinge in einer Stadt auf einem Hügel.

Wer hat die Deutungshoheit?

Diese Behauptung empörte traditionelle Ausgräber, darunter auch Mazars Enkelin, die inzwischen verstorbene Eilat Mazar (1956–2021). Wie schon Robinson in den 1830er Jahren bekämpfte sie die in ihren Augen neue Form der Ketzerei mit den Mitteln der Wissenschaft. 2005 stieß sie bei Ausgrabungen an einem Felsvorsprung südlich der Akropolis auf Baureste, die ihres Erachtens zum Palast Davids gehörten. Finkelstein und andere kritisierten ihre Datierung: Das Bauwerk stamme möglicherweise von der kanaanäischen Kultur, einem Bevölkerungskonglomerat, das am Ende des 2. Jahrtausends v. Chr. in der Levante lebte – und damit lange vor dem legendären König David.



Nur wenige Bibelarchäologen vermochte Eilat Mazar zu überzeugen, doch der Streit hatte zur Folge, dass sich in Jerusalem die Feldforschung endlich modernisierte: weg von der Interpretation biblischer Passagen hin zu einer Auseinandersetzung mit harten Daten. Ausgräber beider Lager begannen, jeden Eimer Siedlungserde genau zu durchsuchen, sie identifizierten Samen und prüften jede noch so winzige Tonscherbe, ob sie nicht Teile eines Siegels erkennen lasse, das Aufschluss über Handel und Verwaltung geben könne. An der Universität Tel Aviv entstanden auf Initiative Finkelsteins Labore, in denen sich Rückstände in Keramikgefäßen oder Proben aus antiken Latrinen analysieren lassen.

Die eingangs erwähnte Latrine lieferte so Informationen zum Alltag der Menschen Mitte des 7. Jahrhunderts v. Chr. Die Hinterlassenschaften von damals kamen beim Bau eines neuen Besucherzentrums an der Armon-Hanatziv-Promenade zu Tage. Ihre Verursacher bewohnten eine luxuriöse Villa mit ausgedehntem Garten. Das Team der Archäologin Dafna Langgut von der Universität Tel Aviv wies zahlreiche Parasiten nach, die Magenschmerzen, Durchfälle und andere Übel beschert haben dürften. Dass nicht nur die unter beengten und mangelhaften hygieni-

schen Verhältnissen lebende einfache Bevölkerung mit derlei Ungemach zu kämpfen hatte, überraschte die Forscherin zunächst. Langgut vermutet eine politische Ursache für die schlechte Gesundheit in der Jerusalemer Elite: Um 701 v. Chr. verlangten die Assyrer hohe Abgaben in Form von Naturalien. Das zwang jedermann dazu, auch auf eigentlich zu kargen Böden in der Umgebung Weintrauben und Oliven anzubauen – und mit Fäkalien zu düngen.

Ein weiteres herausragendes Projekt der neuen Archäologie in Jerusalem betrifft einen ehemaligen Parkplatz unweit jenes Bergrückens, auf dem Eilat Mazar einen Palast entdeckt haben wollte. Seit 2017 arbeiten sich die Archäologen Yuval Gadot von der Universität Tel Aviv und Yiftah Shalev von der israelischen Altertumsbehörde dort quer durch Jerusalems Geschichte, vom 6. Jahrhundert v. Chr. bis zu den Anfängen der arabisch-muslimischen Zeit ein Jahrtausend später. Unter anderem kartierten sie mittels Geomagnetik noch verborgene Strukturen wie ein großes Verwaltungsgebäude aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. Es stürzte offenbar bei einem gewaltigen Brand ein. Die Forscher vermuten: 586 v. Chr. bei der Einnahme Jerusalems durch die Babylonier.

Diesen folgten die Perser, die wiederum von Alexander dem Großen unterworfen wurden. Das macht insgesamt vier Jahrhunderte, die unter den Jerusalemer Grabungsfunden bislang nur durch eine Hand voll Scherben archäologisch dokumentiert sind. Aus den Sedimenten des zerstörten Gebäudes wurden auch winzige Fledermausknochen gesiebt: Anscheinend lag der Bau einige Zeit lang offen, bevor Menschen den Ort wieder besiedelten. Das Grabungsteam entdeckte zudem, dass die Judäer sowohl vor als auch nach der Katastrophe von 586 v. Chr. Nilfisch importierten. Die Einfuhren gingen später zurück, wahrscheinlich, weil die Kriege zwischen den hellenistischen Königreichen am Ende des 4. Jahrhunderts v. Chr. solche Handelsverbindungen unterbrachen.

Ein Alltag – anders, als es in der Bibel steht

Obwohl sich die Ausgrabung auf dem Parkplatz stark auf die biblische Zeit konzentrierte, untersuchten die Forscher dort auch eine römische sowie eine byzantinische Villa und nahmen Proben aus einer arabischen Latrine aus dem 8. Jahrhundert n. Chr. Eine derartige Detailgenauigkeit fehlte der Biblischen Archäologie bislang, denn: »Erst wenn man die Stratigrafie gut im Griff hat« – also einen genauen Überblick über die Abfolge der Besiedlung –, »kann man sich mit Ernährungsgewohnheiten und dergleichen beschäftigen«, erklärt Gadot. »Jetzt können wir ein Haus ausgraben, die Lebensweise einer Familie aufklären und ihre Verbindung zur Außenwelt verstehen.«

Was dabei herauskommt, deckt sich nicht immer mit den biblischen Texten. Die beschreiben einen Alltag, in dem sich alles um Gebet und Tempelkult drehte. Demnach galten strenge Ernährungsregeln und Tabus für Darstellungen von Tieren und Menschen. Die Parkplatzbefunde liefern jedoch ein differenzierteres Bild. Buchsbaum aus Anatolien bestätigt, dass Jerusalem einst über weit reichende Handelsbeziehungen verfügte. Ein Gefäß aus



NÄCHTLICHES SPEKTAKEL
Mit Ton- und Lichtinszenierungen will man Touristen in den Nationalpark Davidstadt locken. Die Stätte liegt in einem überwiegend arabischen Viertel von Jerusalem; eine rechtsgerichtete jüdische Organisation verwaltet den Fundort.

persischer Zeit mit dem Antlitz einer ägyptischen Gottheit wurde sogar in der Stadt selbst oder zumindest in ihrer Nähe hergestellt. Offenbar hatten sich Nichtjudäer mit eigenen Traditionen in Jerusalem niedergelassen. Auch die Ernährungstabus waren keineswegs so strikt wie in der Bibel geschildert. 2021 haben Forscherinnen und Forscher den Fund eines Schweineskeletts beschrieben, das in einem jüdischen Haus unweit der Akropolis zu Tage gekommen war. Die Ausgräber vermuten daher, dass im Herzen der Hauptstadt des Königreichs Juda nicht nur das Fleisch von Schweinen verzehrt wurde, sondern die Tiere womöglich sogar zu diesem Zweck gezüchtet wurden.

Die neue Generation der Biblischen Archäologie führt einen Großteil ihrer Forschungen in Laboren durch – mit engen Kontakten in die Welt: In den Projekten arbeiten israelische Juden gemeinsam mit amerikanischen und europäischen Studierenden. Die Archäologen kooperieren auch mit Naturwissenschaftlern des Weizmann Institute of Science in Rehovot, wo Radiokohlenstoffproben untersucht werden, um eine präzisere Chronologie von Jerusalem zu erstellen.

An den Kontroversen, die jede Ausgrabung in und um die Altstadt begleiten, ändert all dieser Fortschritt allerdings wenig. So brachten arabische Hausbesitzer das Parkplatzprojekt vor Gericht, weil neben ihren Häusern nun eine tiefe Grube klaffte. Später sollte darin das Untergeschoss eines großen Besucherzentrums errichtet werden, gebaut von einer rechtsgerichteten Organisation, die sich für die Ansiedlung weiterer Juden in Ostjerusalem einsetzt.

Keine unabhängige Forschung möglich

Gadot fordert, »dass Jerusalem genauso erforscht werden sollte wie Athen und Rom«. Doch diese antiken Städte stehen nicht im Mittelpunkt aktueller gewalttätiger Auseinandersetzungen. Mag die Wissenschaft vorangeschritten sein, Religion und Politik haben sich kaum verändert. »Kein noch so akribisches Sieben, kein Zählen von Scherben, keine Textkritik und keine DNA-Analyse kann diese Gleichung ändern«, befürchtet der Archäologe Raphael Greenberg von der Universität Tel Aviv.

Letztlich ist Forschung auch ein teures Unterfangen und damit von Geldgebern abhängig. Ein Großteil der Unterstützung für Eilat Mazars Ausgrabungen etwa kam von einem jüdischen Philanthropen aus New York und von einem staatlich nicht anerkannten christlichen College in Oklahoma.

Nach Eilat Mazars Tod im Mai 2021 übernahm Yosef Garfinkel von der Hebräischen Universität ihren biblischen Ansatz. Sechs Wochen vor ihrem Tod hat ihn Mazar an ihr Krankenbett gerufen und gebeten, die Ausgrabungen im Nationalpark Davidstadt fortzusetzen. Garfinkel hofft, bald weitergraben zu dürfen und dann die fehlenden Beweise dafür zu finden, dass Mazar tatsächlich König David auf der Spur war. Gerade hat er eine Reihe von Ausgrabungen außerhalb der Stadt abgeschlossen. Seiner Meinung nach handelte es sich dabei um Siedlungen aus der Zeit kurz nach 1000 v. Chr. »Wir haben das historische Königreich

Davids gefunden«, behauptet Garfinkel. »Es hatte befestigte Städte, Schrift und Verwaltung.« Finkelstein zeigt sich von solchen Statements unbeeindruckt. Diese Siedlungen hätten nur wenige Jahrzehnte existiert und lieferten keine direkten Aussagen über die Größe oder den Status Jerusalems. In den vergangenen Jahren hatten seine Gegner und er Meinungsverschiedenheiten über die Datierung wichtiger Stätten in und um Jerusalem auf wenige Jahrzehnte eingegrenzt, aber Garfinkels Arbeit sorgt für neuen Streit. Die Frage steht wieder im Raum: Wie sah Jerusalem aus, als das »Volk Gottes« einzog?

Finkelstein befürchtet eine Renaissance der traditionellen Biblischen Archäologie. Ihm ist daran gelegen, die Heilige Stadt in den Kontext des antiken Vorderen Orients zu stellen, statt sich um Nachweise für die etwaige Existenz alttestamentlicher Herrscher zu bemühen. »Doch die Welle konservativen Denkens wächst stetig«, sagt er. »Es ist deprimierend. Wir sind dabei, den Kampf zu verlieren.«

Um diesem Trend entgegenzuwirken, hat Finkelstein 2021 an der Universität Haifa einen neuen Studiengang für Archäologie ins Leben gerufen, der den Schwerpunkt auf Spitzenforschung, internationale Zusammenarbeit und Museumsstudien mit eigenen, zahlungskräftigen Unterstützern legen wird. »Aber natürlich«, fügt er hinzu, »geht der Kampf über die Archäologie hinaus.« Israel ist ein zunehmend polarisiertes Land – und diese Spaltung spiegelt sich in der Forschung wider. Ob die Bibel als historische Quelle taugt, ist nicht nur eine akademische Debatte, sondern Teil eines Kulturkampfes.

Die Palästinenser bleiben dabei weitgehend außen vor. Al Jubeh, der Archäologe von der Universität Bir Zeit, macht dafür nicht nur die jüdischen Zionisten verantwortlich, sondern auch vom Alten Testament überzeugte Christen wie Robinson. »Jerusalem ist die Stätte mit den weltweit meisten Ausgrabungen, aber die spiegeln lediglich die israelische Vergangenheit«, sagt Al Jubeh. »Ich glaube, dass es letztlich nur eine Geschichte gibt – die Geschichte der Wissenschaft.« Doch diese von den Konflikten der Heiligen Stadt zu trennen, ist eindeutig eine Aufgabe von biblischem Ausmaß. ◀

QUELLEN

Langgut, D.: Mid-7th century BC human parasite remains from Jerusalem. *International Journal of Paleopathology* 36, 2022

Lawler, A.: Under Jerusalem: The buried history of the world's most contested city. Doubleday, 2021

Sapir-Hen, L. et al.: Everything but the oink: On the discovery of an articulated pig in Iron Age Jerusalem and its meaning to Judahite consumption practices. *Near Eastern Archaeology* 84.2, 2021

Silberman, N. A.: Digging for god and country: Exploration, archeology and the secret struggle for the Holy Land, 1799–1917. Knopf, 1982

Vaknin, Y. et al.: The earth's magnetic field in Jerusalem during the Babylonian destruction: A unique reference for field behavior and an anchor for archaeomagnetic dating. *PLOS ONE* 15, 2020



Seit
2010

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

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

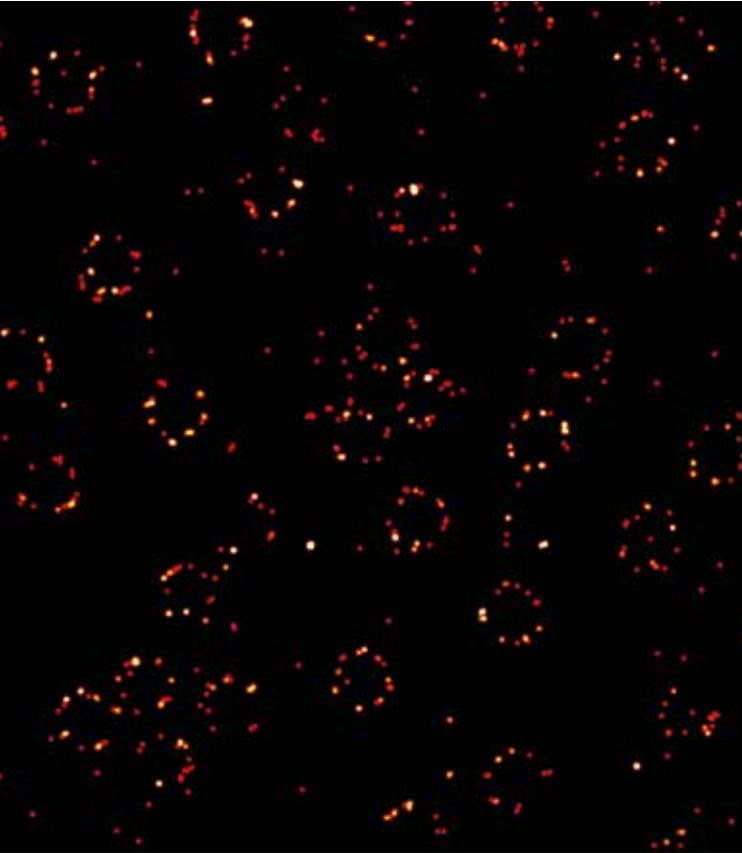
Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von



MICHAEL WEBER UND HENRIK VON DER ENDE · MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MULTIDISZIPLINÄRE NATURWISSENSCHAFTEN

Die letzte Grenze der Lichtmikroskopie

Dank einer bahnbrechenden Technik lassen sich jetzt Strukturen auf den Nanometer genau auflösen und Proteinbewegungen im Millisekundentakt verfolgen.

Toxischer Schleim

Am Ende des Perms stieg die globale Mitteltemperatur um bis zu 14 Grad Celsius. Bakterien und Algen vermehrten sich massenhaft, was die Gewässer in Todeszonen verwandelte.



ANDY MORRISON / AP PHOTO / PICTURE ALLIANCE

Fischerei im Umbruch

Schluss mit schädlichen Zuchtmethoden: Neuartige Fisch- und Muschelfarmen sollen Ökosysteme schonen und dabei mehr Erträge bringen.



MARIUS TU / GETTY IMAGES / ISTOCK

Flüssige Algorithmen

Manche physikalische Systeme besitzen dieselben Fähigkeiten wie Computer. Kann das selbst für reine Flüssigkeiten gelten?



INSTANTS / GETTY IMAGES / ISTOCK

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
die Wissenschaft
DIE WOCHE

NR. **44** 11.11.2022

- > Verborgene Welt vor den Malediven entdeckt
- > Hummeln, die mit Bällen spielen
- > Die Entdeckung der ältesten bekannten Himmelskarte

TITELTHEMA: LONG COVID

Das Rätsel um den »Brain Fog«

Gedächtnis- und Konzentrationsprobleme nach Covid-19 werden oft kleingeredet. Doch immer mehr zeigt sich, dass dieser »Brain Fog« eine klar definierte Störung des Bewusstseins ist.

KLIMAWANDEL
Fiebrige Seen

GESCHLECHTERUNTERSCHIEDE
Das Paradox der Gleichberechtigung

KUBA-KRISE
Der Tag, an dem ein Mann einen nuklearen Weltkrieg verhinderte

Alle angrenzenden Länder 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)

