D € 8,20 | A € 8,20 | CH CHF 14,50 übrige Euroländer € 8,90 | E 2164 E

09 | 2026

WISSENSCHAFT.DE

BILD DER WISSENSCHAFT

Im Fokus:
Astrobiologie
Was die Farben fremder Welten über mögliches Leben verraten

Erdatmosphäre
Als Luftsauerstoff die Regie übernahm

Gabapentinoide
Zwischen Schmerztherapie und Medikamenten-Missbrauch

Franklin-Expedition
Vor 180 Jahren verschollene Seeleute identifiziert



Mega-Experimente

Größer, teurer, besser: Wie bringen Großanlagen die Wissenschaft voran?

4 190216 408205 09

BILD DER WISSENSCHAFT

PODCAST



Wissenschaftsjournalist Tim Schröder im Gespräch mit Expertinnen und Experten aus Forschung und Entwicklung zu Themen, die uns bewegen.

NEUE FOLGE

Die grüne Antarktis

Ewiges Eis am Südpol? Keineswegs! Zu Zeiten der Dinosaurier war die Antarktis komplett eisfrei. Der Geologe Johann Klages vom Alfred-Wegener-Institut erzählt, wie es dort vor Millionen von Jahren ausgesehen haben könnte – und was wir daraus für die Klimazukunft der Erde lernen.

hier.pro/Podcast

Überall, wo es Podcasts gibt:

YouTube Music, Deezer, Apple Podcasts, Amazon Music/Audible, Spotify, u. v. m.

Kathedralen der Wissenschaft



Wer einmal die Gelegenheit hat, ein großes Forschungsinstitut wie das CERN zu besichtigen, sollte sich das nicht entgehen lassen. Man bekommt zwar nicht immer alles zu sehen. Oft sind manche Teile der Anlage wegen Umbauarbeiten oder aus Gründen des Strahlenschutzes nicht für die Öffentlichkeit zugänglich. Doch die Eindrücke, die man mitnimmt, vergisst man nicht so schnell.

Es ist nicht allein die faszinierende Technik – ein schier unglaubliches, haushohes Sammelsurium aus blitzendem Stahl, Elektronik, riesigen Magneten, Schläuchen und Kabeln, dazu im Hintergrund das dumpfe Brummen der Vakuumpumpen und Ventilatoren. Am beeindruckendsten ist die Hingabe der Wissenschaftler aus aller Welt, die gemeinsam die Grenzen des Machbaren und Messbaren immer weiter verschieben. Erst die zähe, jahrelange Arbeit an Tausenden kniffeligen Details macht etwa den Bau eines neuartigen Teilchendetektors möglich. Es kann auch eine Nummer kleiner sein als der weltgrößte Teilchenbeschleuniger. Ein Blick hinter die Kulissen des Berliner Synchrotrons BESSY II bei der Langen Nacht der Wissenschaften oder beim DESY in Hamburg ist eindrucksvoll genug.

Doch sind diese teuren Riesenanlagen für den wissenschaftlichen Fortschritt notwendig? Sollte man all das Geld nicht lieber in viele kleinere Experimente investieren? Auch als Wissenschaftsjournalist macht man sich so seine Gedanken, ob man sich bei einer solchen Besichtigung nicht doch ein wenig von der Faszination für Wissenschaft und Technik blenden lässt. Unsere erfahrenen Autoren Frank Frick und Bernd Müller haben schon viele dieser Anlagen gesehen und berichten ab Seite 12 über ihre Eindrücke und Gespräche mit den Experten. Lassen Sie sich mit auf die Reise nehmen zu einigen der größten Forschungseinrichtungen Deutschlands, Europas und der Welt.

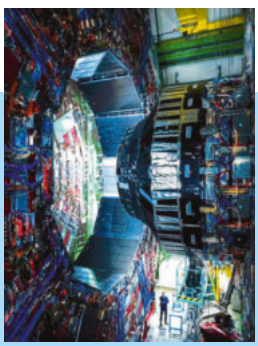
Eine inspirierende Lektüre wünscht



Dirk Eidemüller
Redakteur für Technik

Zum Titelbild

Alle paar Jahre steht eine große Revision beim CERN an. Dann werden die Teilchendetektoren, wie hier der CMS-Detektor, auseinandergebaut und grundlegend erneuert.



B. Ludewig | Jan Hosan / CERN / Fotogloria Agency

Das
Bild der Wissenschaft
Spezial



Auch als digitales Heft erhältlich!

Gesundes Gehirn

Wie funktioniert das Gedächtnis? Warum schlafen wir? Was hält fit im Kopf? Forschende nähern sich den Antworten auf zentrale Fragen zu unserem Denkorgan. Dabei schaffen sie die Grundlagen, um Erkrankungen wie Alzheimer und Parkinson zu bekämpfen.

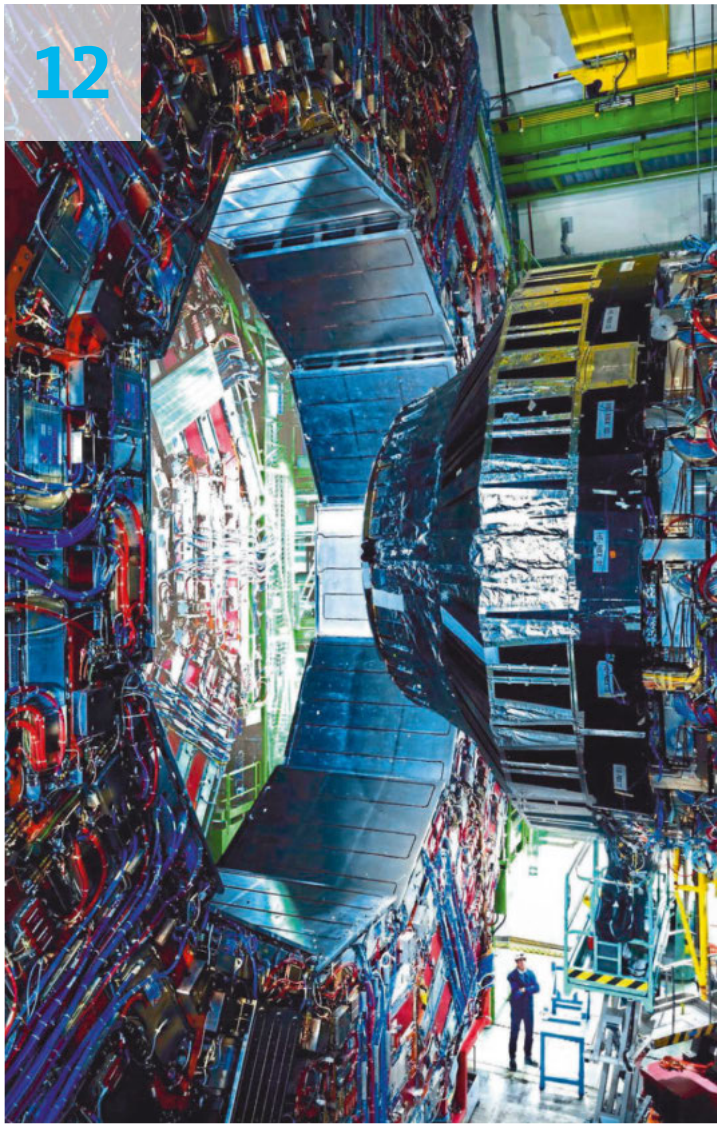
Jetzt für nur 8,20 €
online bestellen:
koninfo.de/bdw-spezial-2025

Oder direkt beim Bild der Wissenschaft Leserservice:

Bild der Wissenschaft Leserservice
Postfach 810580
70522 Stuttgart
Phone +49 711 82651-201
E-Mail bdw@zenit-presse.de

Wissenschaft in Bestform

34A2025



Titelthema

Mega-Experimente

14 Gigantomanie mit Augenmaß
Sind Großexperimente noch zeitgemäß?

16 »Wissenschaft kann eine verbindende Rolle spielen«
Interview mit Thomas Feurer, Geschäftsführer bei European XFEL

20 European XFEL
Der größte Röntgenlaser der Welt

23 PETRA IV
Eine neue Ära hochbrillanter Röntgenanalytik

24 European Spallation Source
Die führende Neutronenquelle ihrer Art

26 EBRAINS
Die digitale Infrastruktur der Hirnforschung

28 FAIR
Schwerionenbeschleuniger mit Startproblemen

30 Future Circular Collider
Ein geplanter Riesenbeschleuniger mit vagen Zielen

Teil 3 der Serie Immunsystem
40 Trickreiche Viren
Im Wettlauf mit den Krankheitserregern

Schmerzmittelmedizin
46 Risiko auf Rezept
Warum Verschreibungen trotz Suchtrisiko ansteigen

Psychiatrie
52 Im Schatten der Diagnose
Wie Partner psychische Erkrankungen gemeinsam bewältigen können

Paläobiologie
58 Eine verlorene Welt
Die Artenvielfalt während der letzten Eiszeit

Geologie
64 Als Luftsauerstoff die Regie übernahm
Die turbulente Geschichte der irdischen Atmosphäre

Archäologie
72 Verschollen im Eis
Weitere Seeleute der Franklin-Expedition identifiziert

Im Fokus: Astrobiologie
84 Die Farben fremder Welten
Leben auf Exoplaneten in ihrem Licht aufspüren

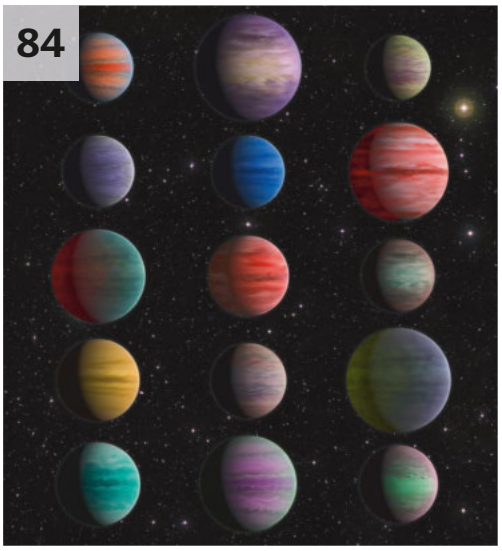
90 »Die Wahrscheinlichkeit ist nicht null«
Interview über die Suche nach außerirdischen Organismen mit der NASA-Forscherin Nancy Kiang

Titel: Jan Hosan / CERN / Fotogloria Agency

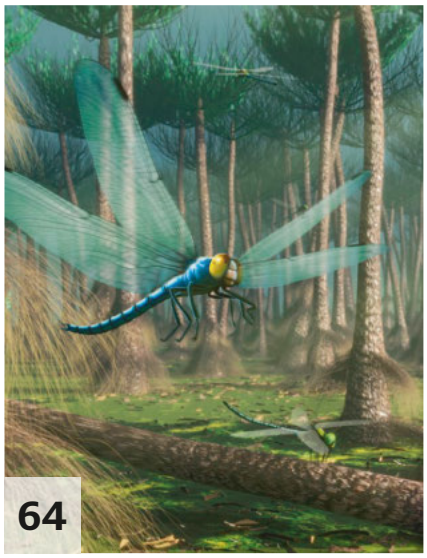




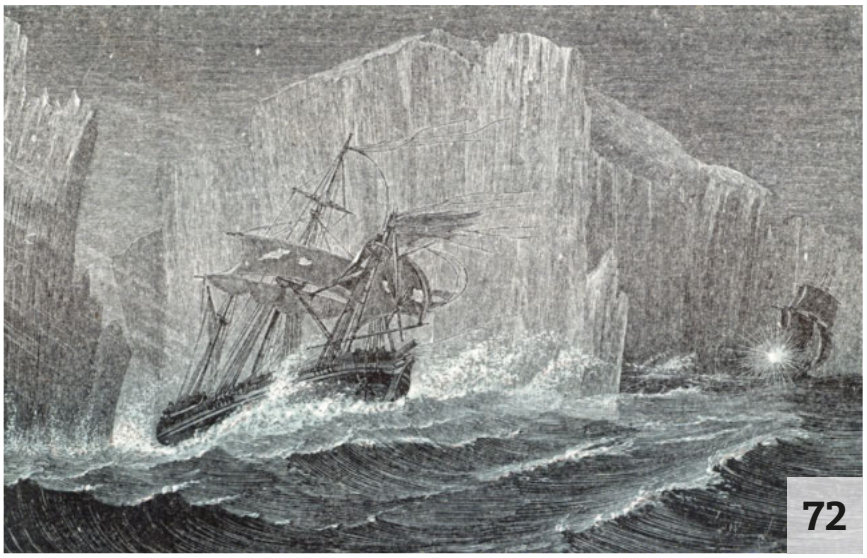
46



84



64



72

Getty Images / W. Vacharapong | Illustration: ESA / Hubble, N. Bartmann | Illustration: Science Photo Library / Garlick, Mark | Universal History Archive / Getty Images

Kolumnen & Rubriken

6 Bild des Monats

8 Magazin

34 Sabine Hossenfelders Stichproben
Quantenzustände klonen: unmöglich, aber möglich

36 TechRadar

38 Meilenstein
Roboter „Ameca“ – eine neue Ära der sozialen Robotik

45 Phänomenal
Rückwärtige Winde

56 Die Forschperspektive
Junge Wilde und alte Meister

70 Wissensbücher

82 Deutschlandkarte
Kommunal bunt

92 Die Science Busters
Heilige Wissenschaft

94 Cogito
Die Dreiviertelläufer

96 Statistik
Bücher lesen

97 Update
Händigkeit ist auch Übung

Standards

3 Editorial

78 Leserforum

98 Vorschau und Impressum

Instagram: /bildderwissenschaft
Facebook: /bildderwissenschaft
Website: www.wissenschaft.de
E-Mail: wissenschaft@konradin.de

Bild des Monats

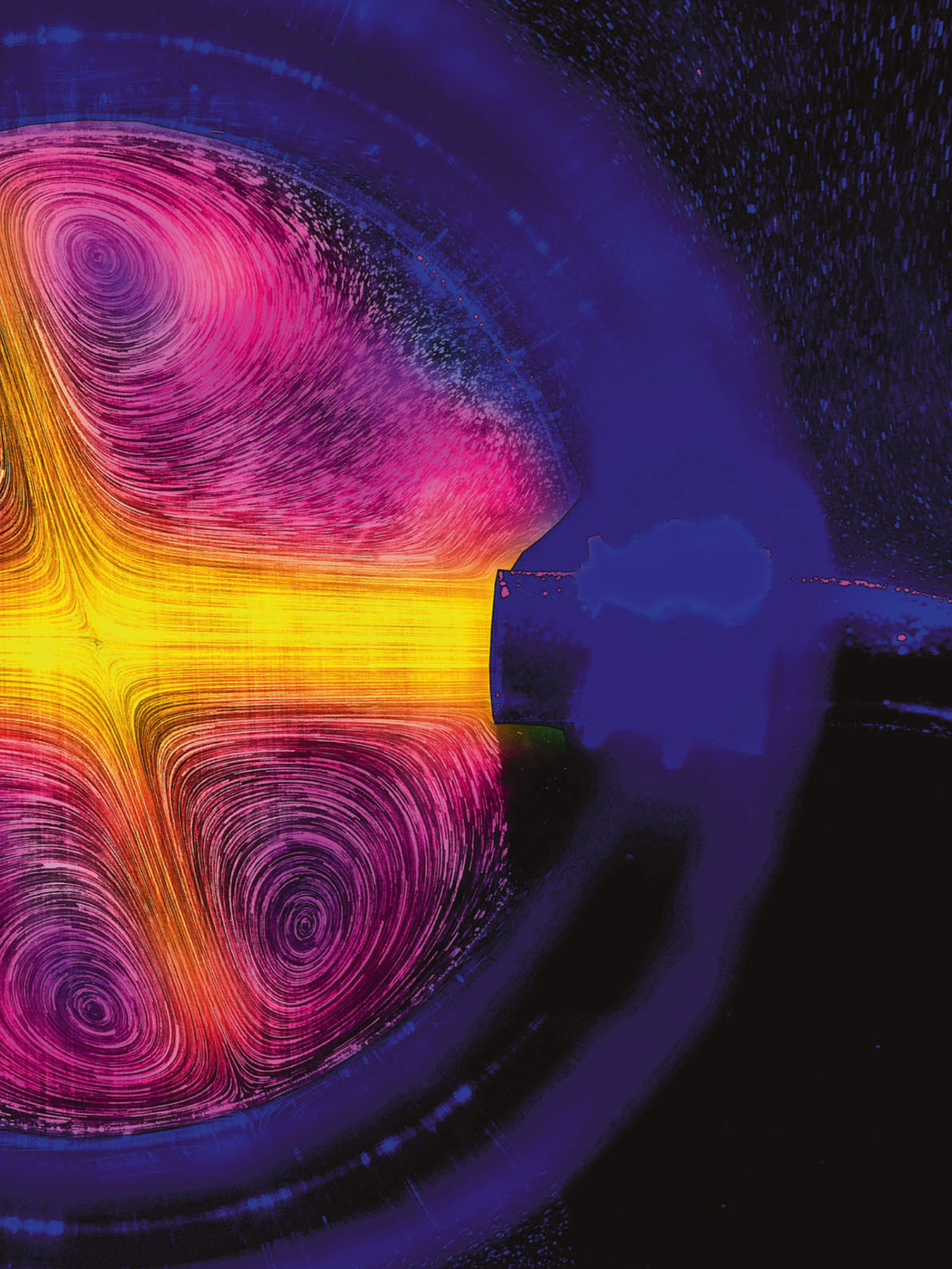
Strömungen im Sprinkler

Sprinkler, wie sie etwa bei der Bewässerung von Grünflächen zum Einsatz kommen, scheinen zunächst nur für Gärtner und Gartenbesitzer interessant zu sein. Doch eine ganz bestimmte Bauform solcher Sprinkler hat bereits vor fast 150 Jahren die Neugier von Physikern wie Ernst Mach und später Richard Feynman geweckt: Diese Ausführung des Sprinklers besteht aus einem drehbaren Kopf mit zwei seitlich abgewinkelten Düsen. Strömt Wasser aus ihnen heraus, versetzt der Rückstoß den Sprinkler in Rotation und verteilt das Wasser rundherum gleichmäßig auf dem Grün. So weit alles einleuchtend. Doch was würde passieren, wenn sich ein baugleicher Sprinkler unter Wasser befände und die Flüssigkeit nicht ausstoßen, sondern einsaugen würde? Würde er sich in die entgegengesetzte Richtung drehen oder überhaupt nicht bewegen? Beantwortet wurden diese Fragen erst kürzlich im Rahmen von zwei Forschungsarbeiten, die 2024 und 2026 von Physikern der New York University veröffentlicht wurden.

Unser Bild des Monats zeigt eines der durchgeführten Experimente, bei dem die Strömungsverläufe durch kleine Partikel im Wasser sowie gezieltes Einfärben des Bildes sichtbar gemacht werden: Die beiden Strahlen des eingesaugten Wassers fließen von links und rechts in den Sprinkler und treffen dort aufeinander – jedoch nicht genau zentral. Diese kleine Abweichung genügt, um einen Drehimpuls zu erzeugen, der den Sprinkler auch beim Einsaugen des Wassers in eine leichte Rotation versetzt. Allerdings rund 50-mal langsamer und – wie intuitiv erwartet – in entgegengesetzter Richtung im Vergleich zum normalen Betrieb.



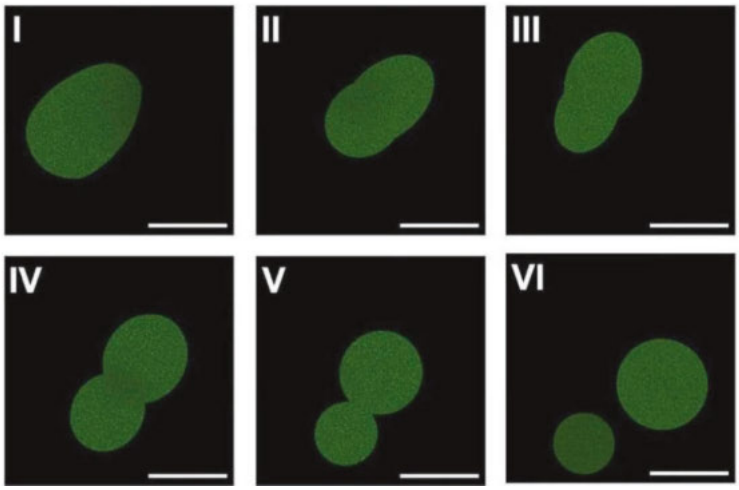
NYU's Applied Mathematics Laboratory



BIOLOGIE

Eine künstliche Zelle mit vollständigem Zellzyklus?

Es könnte ein Durchbruch für die synthetische Biologie sein: Eine Forschungsgruppe um Kate Adamala von der University of Minnesota hat eine künstlich von Menschen konstruierte Zelle vorgestellt, die angeblich erstmals mehrere Eigenschaften lebender Systeme nachahmen kann: Sie sei in der Lage, zu fressen, zu wachsen und sich zu vermehren, berichtet das Team in seiner Studie. Die sogenannte SpudCell ist aus mikrobiologischen Bausteinen aufgebaut, besitzt eine Membranhülle aus Liposomen und ein Genom mit 36 Genen auf sieben DNA-Abschnitten.



Diverse Helfermoleküle ermöglichen es der Zelle, nach den Vorgaben der Erbinformationen Proteine herzustellen. Die dafür benötigten Molekülverbindungen sowie Zucker können dem System über kleine Membranbläschen verabreicht werden. Laut den Forschenden ist es sogar gelungen, die Zelle zur Zellteilung anzuregen (siehe Bild). Insgesamt sei SpudCell damit in der Lage, einen vollständigen Zyklus aus Wachstum, DNA-Vervielfältigung und Zellteilung durchlaufen.

Allerdings: Die Studie mit diesen Aussagen wurde bislang nur auf dem Preprint-Server bioRxiv veröffentlicht sowie auf der Webseite der gemeinnützigen Forschungsorganisation Biotic, die von Kate Adamala mitgegründet wurde. Die Forschung wurde bislang also nicht von unabhängigen Fachleuten geprüft und auch nicht in einer anerkannten Fachzeitschrift publiziert. In der Fachwelt ist die Veröffentlichung daher aktuell umstritten. Der Meinung mehrerer unabhängiger Experten zufolge realisiere SpudCell keinen vollständigen, autonom ablaufenden Zellzyklus, sondern könne lediglich mehrere Abläufe dieses Zyklus imitieren. Damit wäre die Arbeit also noch ein gutes Stück weit entfernt von einer lebendigen Zelle aus dem Labor. Eine Peer-Review durch unabhängige Experten könnte in den kommenden Monaten mehr Klarheit bringen.

BIOLOGIE

Spinne fängt Ameisen mit Katapultfallen

Ameisen sind territoriale Tiere, die ihr Revier erbittert verteidigen. Als eine besonders aggressive Art gilt die Grüne Weberameise (*Oecophylla smaragdina*). Gerade auf diese Art hat sich die Ballista-Spinne (*Propostira sp.*) spezialisiert. Die erst vor Kurzem entdeckte Spinne bewohnt den Regenwald von Nordaustralien, wo sie das aggressive Territorialverhalten der Ameisen mit einer außergewöhnlichen Taktik ausnutzt: Sie nutzt eine Art Katapultfalle, die die Ameisen anlockt und direkt in ihr Netz schleudert. Dafür spannt die Jägerin klebrige Fäden von einem höher gelegenen Netz zu den Wanderrouten der Ameisen. Am unteren Ende verwebt sie die Fäden zu einer kegelförmigen Konstruktion, auf welche die wachsamen Ameisen aufmerksam werden. Sobald sich ein Insekt in den gespannten Fadenkegel verbeißt, löst sich dieser schlagartig aus seiner Verankerung und katapultiert die noch daran klebende Ameise nach oben ins Spinnennetz.



VERHALTENSFORSCHUNG

Menschen haben einen rätselhaften Linksdrall



Wenn Menschenmengen Hindernisse umgehen, eine Engstelle passieren oder sich auf Konzerten zur Musik bewegen, entstehen oft spontan geordnete Bewegungs- und Verteilungsmuster. Ein Team um Iñaki Echeverría-Huarte von der Universität Navarra in Spanien, das an solchen Fußgängerdynamiken forscht, konnte nun ein weiteres Phänomen dieser Art identifizieren.

Bei der Auswertung von Videoaufnahmen stellten die Forschenden fest: In 32 von 33 Experimenten drehten sich Menschen bevorzugt gegen den Uhrzeigersinn, wenn sie ungesteuert in einer Menschenmenge umherliefen. Um mehr über diese Neigung zum Linksdrehen herauszufinden, führte das Team weitere Tests durch. Sie ergaben, dass das Phönomen unabhängig von Gruppengröße, kultureller Prägung oder sozialer Interaktion zwischen den Personen auftritt. Auch Händigkeit und Geschlecht schienen keine Rolle zu spielen.

Die Forschenden vermuten, dass der Linksdrall auf biomechanische oder neurologische Ursachen zurückgeführt werden kann. Welche das sein können, müsse aber weiter untersucht werden. Das offenbar bei vielen Menschen tief verwurzelte Verhalten könnte aber erklären, warum beispielsweise Laufwettbewerbe in Sportstadien und auch viele Auto- und Pferderennen gegen den Uhrzeigersinn stattfinden.

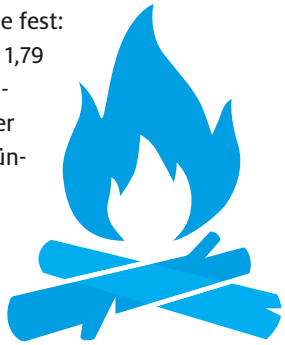
Zwei Medikamente gegen die Long-Covid-Ermüdung

Long-Covid-Patienten leiden häufig unter chronischer Erschöpfung, auch bekannt als Chronisches Fatigue Syndrom (ME/CFS). Dessen Ursachen sind noch unklar und bislang gibt es keine Heilung. Doch in einer klinischen Studie zeigte ein Team um Amitava Banerjee von der University of London nun, dass zwei gängige Arzneimittel die Symptome bei Betroffenen zumindest lindern können. Die Einnahme des Antiallergikums Amotidin/Loratadin zusammen mit dem Entzündungshemmer Colchicin führte zu einer signifikanten Verbesserung der Erschöpfungswerte, anhand derer die Forscher ME/CFS messen.

Beide Mittel unterstützen das Immunsystem. „Daher könnte es sein, dass sie die durch Long Covid gestörte Immunabwehr bessern“, sagt Banerjee. Die positive Wirkung der Medikamenten-Kombination hielt allerdings nicht über die Dauer der Einnahme hinaus an. Ein Heilmittel sind die Medikamente damit nicht. Die Resultate seien dennoch ein wichtiger Fortschritt, die Behandlung von ME/CFS zu verbessern, so die Forschenden.

Vor **1,8** Millionen Jahren

… könnten Frühmenschen bereits gelernt haben, natürlich entstandene Feuer zu nutzen. Das legen neue archäologische Erkenntnisse aus der Wonderwerk-Höhle in der südafrikanischen Kalahari-Savanne nahe. Dort hatte man fossile Überreste von Feuerstellen des *Homo erectus* entdeckt. Ein Team um Dolores Marin-Monfort von der Nationaluniversität des Südens in Argentinien hat die Funde nun per Spektralanalyse untersucht. Dabei stellten sie fest: Die Brandspuren sind bis zu 1,79 Millionen Jahre alt. Die Frühmenschen konnten das Feuer zwar noch nicht selbst entzünden, waren aber offenbar bereits damals in der Lage, die Glut natürlicher Brände zu erhalten und zu transportieren.



Kate Adamala, Adamala Lab | Pranav Joshi | Dmytro / stock.adobe.com | Illustration: oxinoxi / stock.adobe.com; Bearbeitung BDW

Diese Ausgabe bzw. ein Teil dieser Auflage enthält eine Beilage von Gabriele-Verlag Das Wort GmbH, Marktheidenfeld
PLAN INTERNATIONAL DEUTSCHLAND e.V., Hamburg, RSD Reise Service Deutschland GmbH, München
Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

ROBOTIK

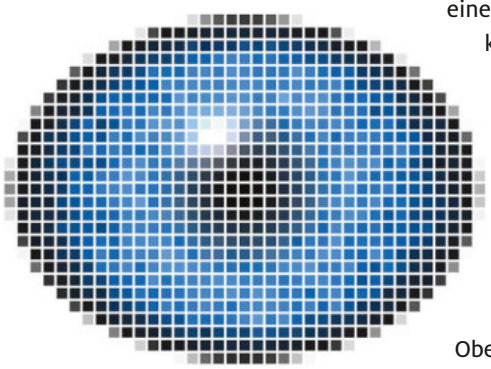
Drohne schwebt wie ein Vogel im Aufwind



Sogenannte Multikopter, die sich mit mehreren Rotoren fortbewegen, sind sehr wendig und können auf der Stelle schweben. Dafür verbrauchen sie allerdings viel Energie. Ein Team um Ghadeer Elmkaiel vom Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Tübingen hat nun eine neuartige Drohne entwickelt, die sich mit deutlich geringerem Energieaufwand in der Luft halten kann – und das ganz ohne Rotoren oder aktiven Antrieb. Die Kernelemente des rund 340 Gramm leichten Flugroboters sind vier dünne, trapezförmige Flügel, die mithilfe von kleinen Servomotoren ihre Form und Neigung flexibel verändern können. Damit kann die Drohne ähnlich wie ein Vogel gezielt thermische Aufwinde nutzen. Gesteuert werden die Flügel von einer lernfähigen Software, die die Flügelform selbstständig an die Windbedingungen anpasst. Konkrete Anwendungen finden sich laut den Forschern überall dort, wo Aufwinde existieren, etwa bei Inspektionen in Fabrikschornsteinen.

TECHNIK

Fourier-Pixel sehen und leuchten zugleich

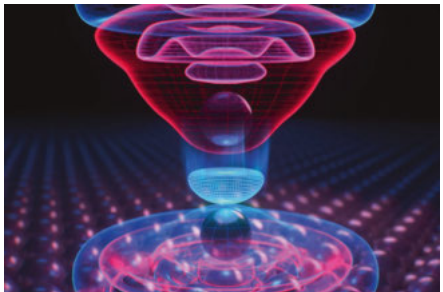


Bildpunkte, auch Pixel genannt, gibt es bislang in zwei technischen Varianten: Entweder sie strahlen Licht ab, zum Beispiel als Element eines Displays, oder sie nehmen Licht auf, wie im Bildsensor einer Digitalkamera. Ein Team um David Norris von der ETH Zürich hat nun einen Pixel konstruiert, der beide Fähigkeiten vereint. Für den „Fourier-Pixel“ verwendeten die Forscher Silber, auf dessen Oberfläche sie nanometergroße, wellenförmige Strukturen auftrugen. Diese bilden eine Art Empfangsantenne, die eine einfallende Lichtwelle in das Metall übertragen kann. Auf der Silberoberfläche breitet sich die Welle in Form von Elektronenschwingungen aus, sogenannten Plasmonen. Diese bilden ein messbares Signal, wodurch der Fourier-Pixel Licht erfassen kann. Soll stattdessen Licht abgestrahlt werden, erzeugt man zunächst die Elektronenschwingungen, deren Wellenfronten auf die eingravierten Strukturen zulaufen. Die wirken nun als Sendeantenne und strahlen die Wellen in Form von Licht ab. Die Technologie könnte in Zukunft Oberflächen ermöglichen, die gleichzeitig als Kamera und als Display funktionieren.

PHYSIK

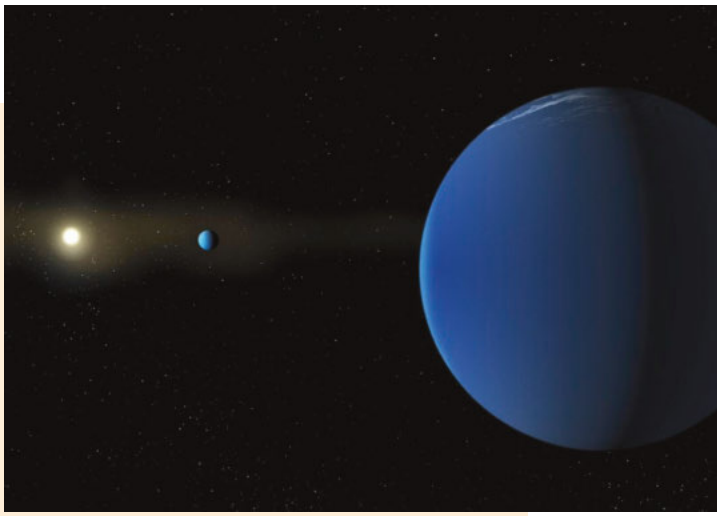
Elektronen an Raum-Zeit-Grenze beobachtet

Die Heisenbergsche Unschärferelation besagt, dass Aufenthaltsort und Impuls eines Teilchens mit einer einzelnen Messung nicht beliebig genau bestimmt werden können. Je genauer man die eine Größe misst, desto ungenauer wird die andere. Doch dieser Zusammenhang gilt nicht für alle Messgrößen: „Zwischen Zeit und Ort gibt es keine Unschärferelation“, erklären Simon Maier von der Universität Regensburg und seine Kollegen. Wie die Forschenden nun erstmals experimentell gezeigt haben, können Zeit und Raum dennoch in nichttrivialer Weise miteinander gekoppelt sein, wenn die Elektronen ultraschnellen Veränderungen ausgesetzt sind: Je genauer die Physiker in ihren Versuchen die zeitliche Auflösung einstellten, mit der sie die Elektronenbewegungen beobachteten, desto größer wurde der Bereich, an dem sich die Elektronen hätten aufhalten können. Damit bestätigen die Forschenden das bisher nur vermutete Messlimit zwischen Zeit und Raum. Ihre Ergebnisse können helfen, die Bewegungen von Elementarteilchen künftig genauer zu untersuchen.



ENTDECKT

Exoplaneten dünner als Zuckerwatte



Im Sternbild Fliegender Fisch, rund 1.100 Lichtjahre von der Erde entfernt, haben Astronomen um George Dransfield von der University of Oxford zwei Exoplaneten entdeckt, die eine geringere Dichte haben als Zuckerwatte. Die Planeten mit den Namen TOI-791b und TOI-791c kreisen um den sonnenähnlichen Stern TOI-791. Ersten Daten zufolge sind sie etwa so groß wie Jupiter, haben dabei aber nur rund ein Dreißigstel seiner Masse .

Die Wissenschaftler beobachteten den Planetenverlauf mittels des ASTEP-Teleskops in der Antarktis. Aus den Bewegungsdaten berechneten sie, dass der innere Planet TOI-191b eine Dichte von nur 0,038 Gramm pro Kubikzentimeter besitzt, der äußere Planet TOI-191c kommt auf 0,047 Gramm pro Kubikzentimeter. Zuckerwatte dagegen besitzt eine mittlere Dichte von 0,05 Gramm pro Kubikzentimeter.

Bisher ist noch unklar, wie solche Planeten entstehen. Gerade das macht die Entdeckung für die Wissenschaftler spannend. Als Nächstes planen die Astronomen, die beiden Planeten mit dem James-Webb-Teleskop zu analysieren. Dessen Spektraldaten könnten verraten, welche Gase ihre Atmosphären enthalten – und damit weitere Hinweise auf ihre Entstehung liefern.

Vier Fakten

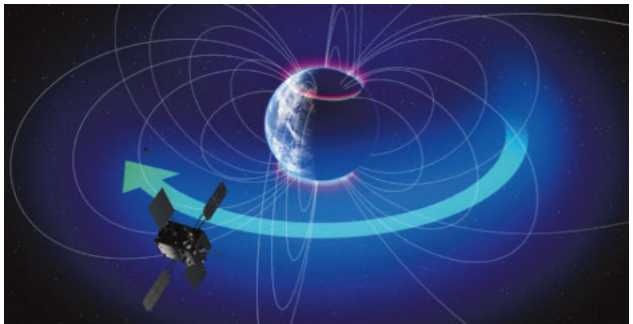
Sonnenstürme

1 Bei einer Sonneneruption schleudert unser Stern große Mengen energiereiches Plasma und Strahlung ins All. Erreichen diese Ausbrüche die Erde, ist ein Sonnensturm die Folge: Der Teilchenstrom dringt in die obere Atmosphäre ein und beeinflusst das Magnetfeld der Erde. Dabei entstehen nicht nur stärkere Polarlichter am Himmel, sondern auch die Strom- und Kommunikationsnetze auf der Erde können gestört werden.

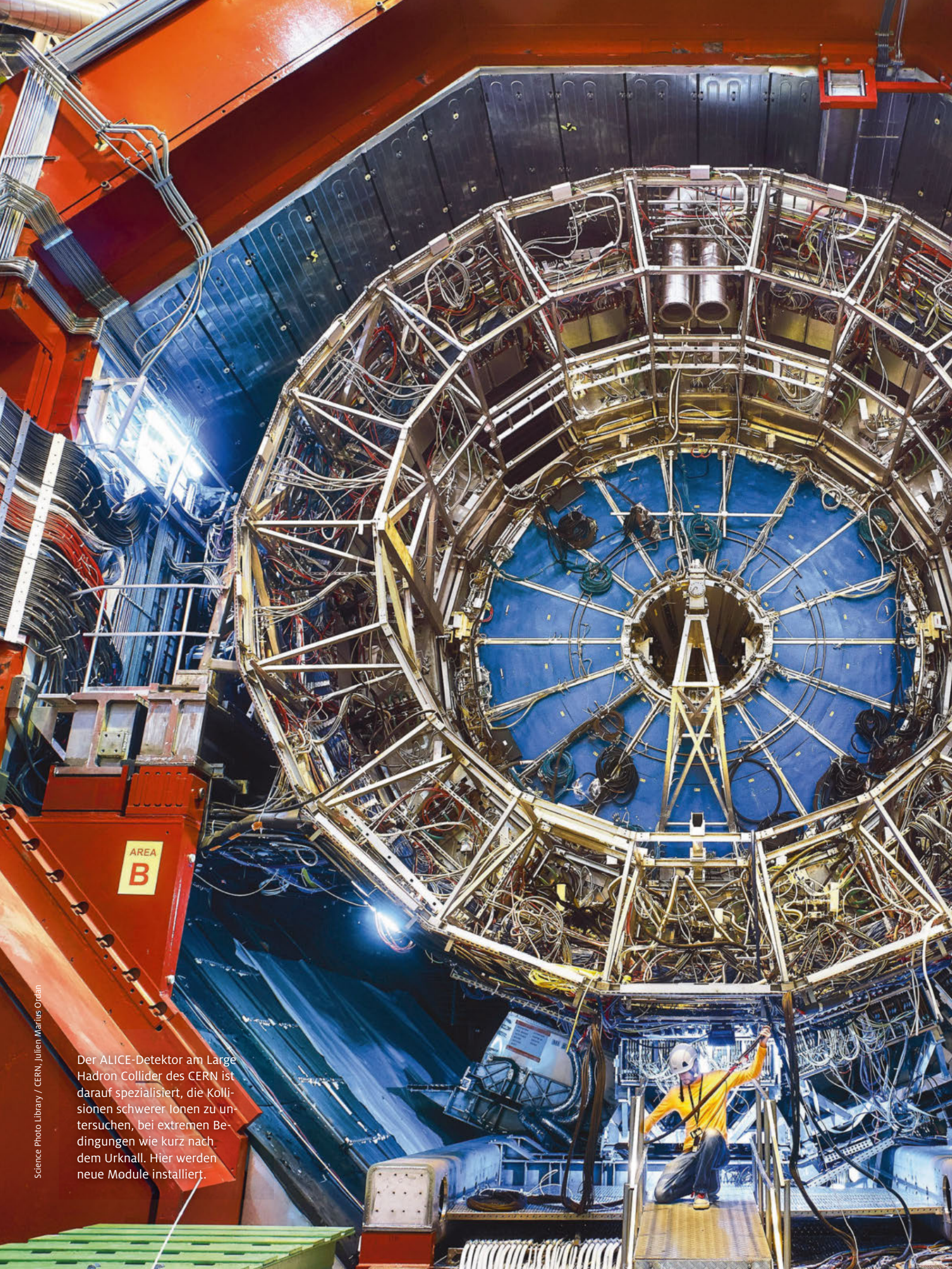
2 Wie stark ein Sonnensturm ist, lässt sich anhand des sogenannten Ringstroms erkennen: Im Erdmagentfeld, tausende Kilometer über dem Äquator, bewegen sich geladene Teilchen ständig zwischen Nord- und Südhalbkugel hin und her. Dabei driften sie zudem seitlich ab: Negativ geladene Elektronen bewegen sich ostwärts um die Erde, positiv geladene Protonen und schwerere Ionen treiben westwärts.

3 Während eines Sonnensturms wird der Ringstrom messbar stärker. Doch wie groß der Anteil solarer Teilchen im Ringstrom dabei tatsächlich ist, war bislang unklar. Einem Team um Naritoshi Kitamura von der Universität Nagoya ist es nun jedoch gelungen, diese Frage zu klären. Dazu nutzen Sie Daten des japanische Arase-Satelliten, der während eines der stärksten je gemessenen Sonnenstürme im Mai 2024 den Ringstrom durchquerte.

4 Die Daten zeigten: Die Teilchen von der Sonne trugen weit weniger zum Ringstrom bei als erwartet. Stattdessen handelte es sich bei rund 85 Prozent der Teilchen um Sauerstoff-Ionen, die aus der Ionosphäre unseres eigenen Planeten in den Ringstrom hinaufkatapultiert worden waren. Möglicherweise erklärt der hohe Anteil dieser schweren, energiereichen Ionen die starken magnetischen Störeffekte bei extremen Sonnenstürmen.

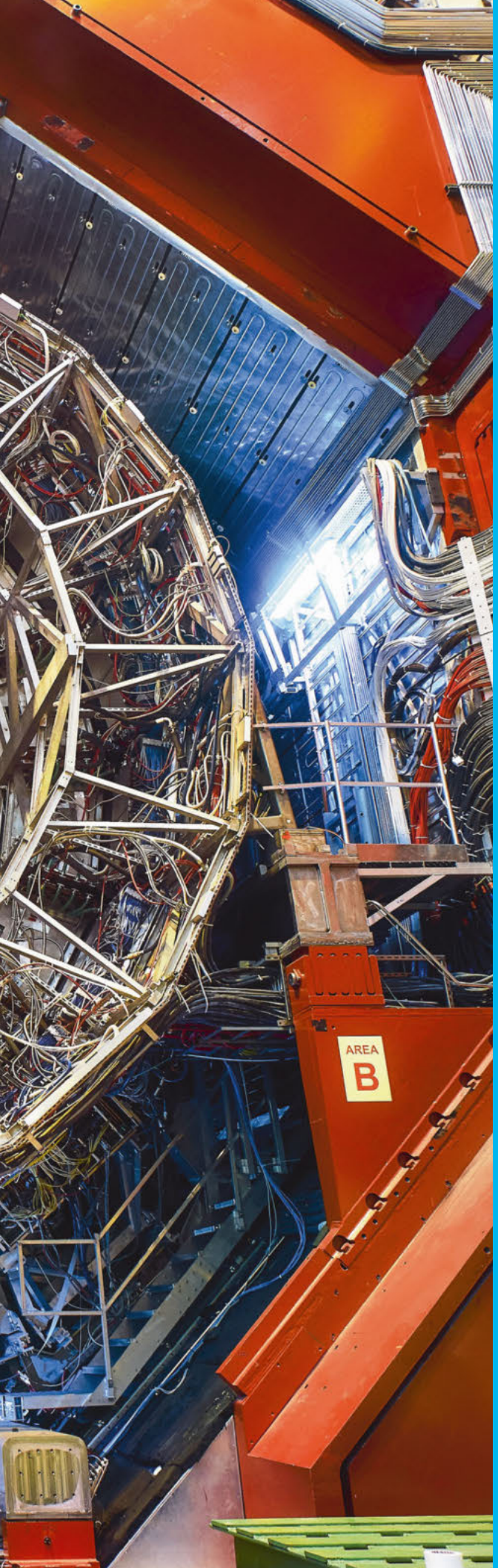


Elmkaiel et al. / npj Robotics, CC-by 4.0, MPI für Intelligente Systeme / W. Scheible | Illustration: iStock.com / rdonar | Illustration: Brad Baxley (parttowhole.com) | Illustration: NASA / Daniel Rutte | Illustration: ERG Science Team



Science Photo Library / CERN, Julien Marius Ordan

Der ALICE-Detektor am Large Hadron Collider des CERN ist darauf spezialisiert, die Kollisionen schwerer Ionen zu untersuchen, bei extremen Bedingungen wie kurz nach dem Urknall. Hier werden neue Module installiert.



Titelthema

Mega-Experimente

14 Gigantomanie mit Augenmaß
Welche Rolle spielen Großanlagen heute?

16 »Wissenschaft kann eine verbindende Rolle spielen«
Interview mit Thomas Feurer, Geschäftsführer bei European XFEL

20 European XFEL
23 PETRA IV
24 European Spallation Source
26 EBRAINS
28 FAIR
30 Future Circular Collider

Gigantomanie mit Augenmaß

Riesige Teilchenbeschleuniger und ähnliche Megaexperimente stehen immer wieder in den Schlagzeilen – auch wegen ihrer hohen Kosten. Sind solche Anlagen noch zeitgemäß?

von DIRK EIDEMÜLLER

Wissenschaftliche Großprojekte tauchen vor allem bei zwei Gelegenheiten in den Medien auf: entweder wenn ein spektakulärer Durchbruch gelungen ist – oder wenn ein Projekt ins Stocken gerät und Unsummen an Steuergeldern verschlingt. Dann steht schnell die Frage im Raum: Sind solche riesigen Forschungseinrichtungen wirklich unverzichtbar? Lassen sich mittlerweile nicht viele Ergebnisse einfach am Computer simulieren? Ganz so einfach ist es natürlich nicht. Die Wissenschaft lebt immer von einem Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment. Computersimulationen sind dabei hilfreich, ersetzen aber nicht die echten Daten aus dem Experiment. Unsere Autoren haben sich das im Detail angeschaut und geben auf den folgenden Seiten einen Überblick über die wichtigsten Großforschungsanlagen in Deutschland und Europa.

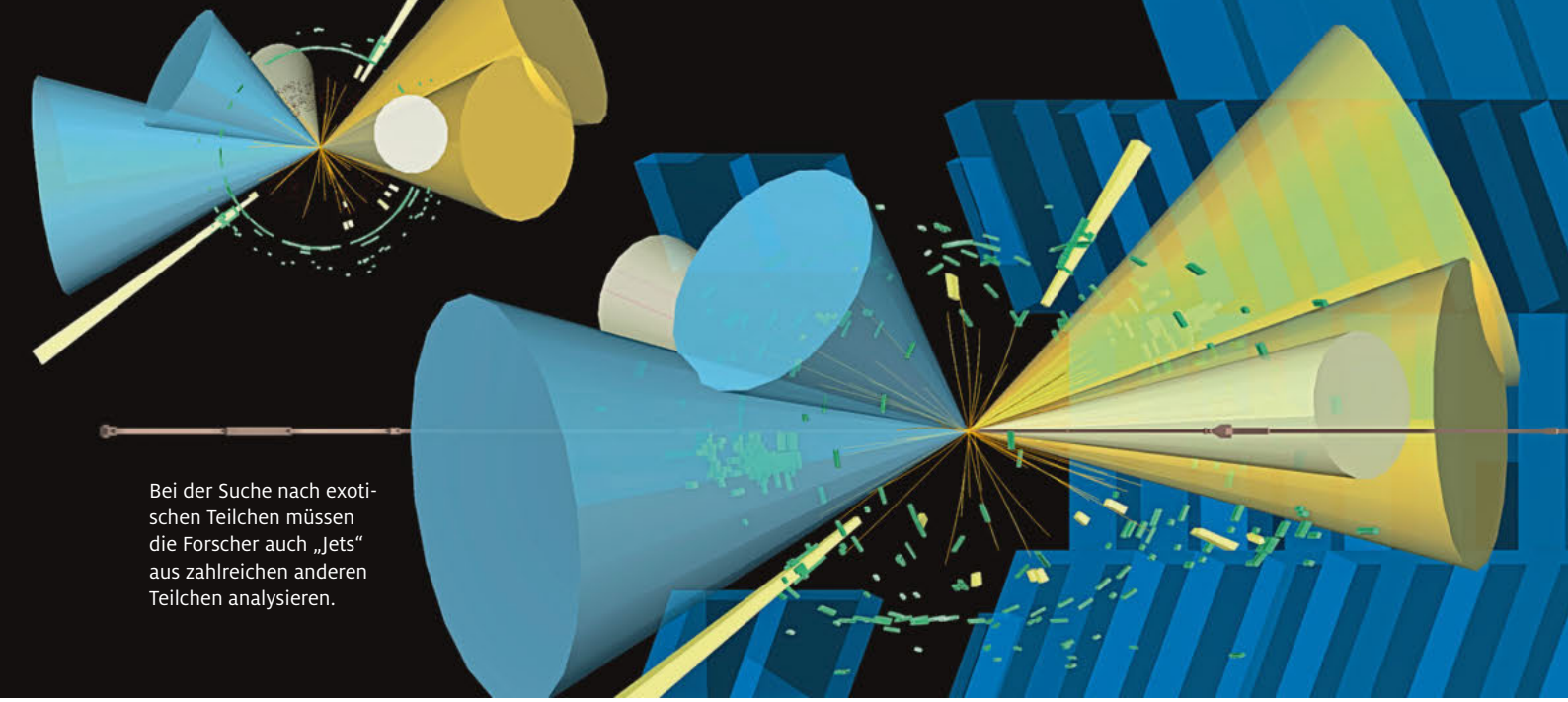
Es gibt auch in der Wissenschaft die Tendenz zum „höher, schneller, weiter", und man kann und muss die Frage stellen, ob jede Investition sinnvoll ist. Insbesondere die Teilchenphysik hat mit dem Dilemma zu kämpfen, dass mittlerweile alle von der Theorie geforderten Elementarteilchen bekannt sind. Im Jahr 2012 wurde nach jahrzehntelanger Suche endlich das Higgs-Boson gefunden. Mit diesem spektakulären Fund hat der weltgrößte Teilchenbeschleuniger, der Large Hadron Collider am CERN, seinen Hauptzweck erfüllt.

Sein vorgeschlagener Nachfolger, der Future Circular Collider, soll noch deutlich größer und teurer werden und nach völlig unbekannten Teilchen Ausschau halten. Die Hoffnung ist es, die Tür zum „Dunklen Sektor" aufzustoßen, also Hinweise auf Dunkle Materie zu finden, die im All mehr Masse ausmacht als unsere gewöhnliche Materie. Während man beim Higgs-Boson aber recht zuversichtlich war, dass man es mit dem Large Hadron Collider finden würde, ist der Bau des Future Circular Collider eine Wette mit völlig ungewissem Ausgang. Klar: Wer nichts wagt, der nichts gewinnt. Doch dieses Projekt ist durchaus umstritten, weil es große finanzielle und personelle Ressourcen bindet, die auch in der Teilchenphysik anderswo gebraucht werden.

Internationale Großprojekte

Einige Riesenprojekte tauchen auf den folgenden Seiten nicht auf, insbesondere das Fusionsexperiment ITER, die Internationale Raumstation ISS sowie Megateleskope wie das James-Webb-Weltraumteleskop. Zur Fusionskraft hatten wir erst kürzlich eine Titelgeschichte (Bild der Wissenschaft, 3/2026). Über die großen Teleskope berichten wir regelmäßig. Nur die ISS fällt aus dem Rahmen: Mit einem Gesamtbudget von weit über 100 Milliarden Euro ist sie mit Abstand teurer als alle anderen genannten Projekte – weshalb sie immer wieder hinterfragt wird. Sie ist allerdings auch vieles auf einmal: Außenposten der Menschheit im All, Technologielabor für den Sprung zum Mond oder zum Mars, Prestigeprojekt der beteiligten Nationen – und nicht zuletzt eine Wissenschaftsplattform, auf der Experimente zu ganz unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt werden.

Die ISS dient nicht nur medizinischen Untersuchungen an den Astronauten. Dort wird Pflanzenwachstum ebenso erforscht wie das Verhalten von Werkstoffen. Technische Prozesse wie das Mischen von Flüssigkeiten oder Brennprozesse lassen sich ohne störende Schwerkraft im Detail untersuchen. Dazu kommen Experimente zur Plasmaphysik oder zur kosmischen Strahlung. Vieles davon ließe sich kostengünstiger durchführen, wenn man nicht zugleich Menschen an Bord am Leben erhalten müsste – aber dann wäre es nicht die ISS.



Bei der Suche nach exotischen Teilchen müssen die Forscher auch „Jets“ aus zahlreichen anderen Teilchen analysieren.

Illustration: ATLAS Collaboration

Deutschland und Europa weit vorne

Wenn man die deutsche und europäische Forschungslandschaft mit anderen führenden Wissenschaftsnationen vergleicht, stellt man schnell fest: Wir sind in einigen wichtigen Disziplinen sehr gut aufgestellt. Der European XFEL am DESY bei Hamburg ist die beste Quelle der Welt für hochbrillante, harte Röntgenlaserstrahlung. Er liefert kurze, stroboskopartige Blitze, mit denen sich ultraschnelle mikroskopische Prozesse aufdecken lassen. Die Röntgenquelle PETRA IV, ebenfalls am DESY, wird in einigen Jahren dazustoßen und dann einen kontinuierlichen Röntgenlaserstrahl bereitstellen. Dieser ergänzt sich hervorragend mit den Eigenschaften des European XFEL und wird Hamburg für lange Zeit zur ersten Anlaufstelle für solche Experimente machen.

Auch andere Großprojekte wie der Schwerionenbeschleuniger FAIR bei Darmstadt oder die Neutronenquelle ESS im schwedischen Lund werden bei Fertigstellung einzigartige Forschungsbedingungen ermöglichen. Wissenschaftler in aller Welt bereiten jetzt schon Experimente vor, die mit diesen Anlagen möglich werden. Interessanterweise basieren all diese Anlagen, auch die Röntgen- und Neutronenquellen, auf Teilchenbeschleunigern. Diese wurden ursprünglich ersonnen, um nach den elementaren Bestandteilen unserer Materie zu suchen. Mittlerweile hat sich allerdings herausgestellt, dass man ihre Produkte – ultraschnelle Teilchen – auch für eine Vielzahl anderer Zwecke einsetzen kann. Noch vor ein paar Jahrzehnten hätten sich die Pioniere der Teilchenphysik kaum träumen lassen, dank Anlagen wie dem European XFEL etwa die Bewegungen von Elektronen bei molekularen Prozessen quasi in Zeitlupe aufschlüsseln zu können. Nicht nur das Word Wide Web ist ein Nebenprodukt der Teilchenphysik.

Ganz ohne Teilchenbeschleuniger kommt EBRAINS aus. Es soll die Hirnforschung voranbringen und ist der Nachfolger des Human Brain Project. Das hatte Kritik auf sich gezogen hatte, weil die Politik diesem Projekt viel Geld zur Verfügung gestellt hatte, um Ziele zu erreichen, die viele Forscher von Anfang an für unrealistisch hielten – was sich dann auch bewahrheitete. Man hat aber daraus gelernt und will nun vieles besser machen.

Natürlich können bei allen Großprojekten kostspielige Probleme auftreten. Nicht nur bei Flughäfen und Bahnhöfen, auch bei den ungleich komplexeren Großforschungszentren sind immer wieder mal unerwartete Verzögerungen und massive Budgetüberschreitungen möglich. Mitunter hat dabei auch ein gewisser überzogener Optimismus der Wissenschaftler eine Rolle gespielt, weil man dachte, seine bisherigen Erfahrungen einfach auf immer größere Projekte hochskalieren zu können.

Insgesamt gesehen sind wissenschaftliche Großforschungsprojekte meistens sogar erstaunlich günstig. Viel Arbeit wird von Doktoranden und jungen Wissenschaftlern im Hintergrund gestemmt – mit einer großen Portion Idealismus und langen Arbeitstagen. Dabei werden die Grenzen der Technik immer weiter verschoben. Meistens geschieht dies Schritt für Schritt, doch hin und wieder gelingt ein großer Sprung – etwa bei der Einführung von supraleitenden Magneten. Diese haben sich mittlerweile bewährt als energieeffiziente und leistungsstarke Beschleunigerkomponenten. Diese Fortschritte strahlen auch in andere Gebiete aus, etwa in die Medizintechnik. Hochleistungs-Magnetresonanztomographen nutzen schon lange supraleitende Magnetspulen, wie sie ursprünglich aus der Teilchenphysik stammen. Manche Innovationen geschehen eben nur dort, wo man die Grenzen ständig weiter verschieben muss. ■

»Wissenschaft kann eine verbindende Rolle spielen«

Womit große Forschungsanlagen zu kämpfen haben: Wir werfen einen Blick hinter die Kulissen mit Thomas Feurer, Geschäftsführer bei European XFEL.

Das Gespräch führte FRANK FRICK



Thomas Feurer
(*1953) ist Physiker; seine Forschungsarbeit umfasst die Laserphysik, die ultraschnelle Spektroskopie von Materie sowie die Entwicklung von Instrumenten für Freie-Elektronen-Röntgenlaser. Nach seinem Studium forschte er am Massachusetts Institute of Technology, bevor er 2004 einen Ruf an die Universität Bern erhielt. Am 1. Januar 2024 übernahm Thomas Feurer den Vorsitz der Geschäftsführung der European XFEL GmbH.

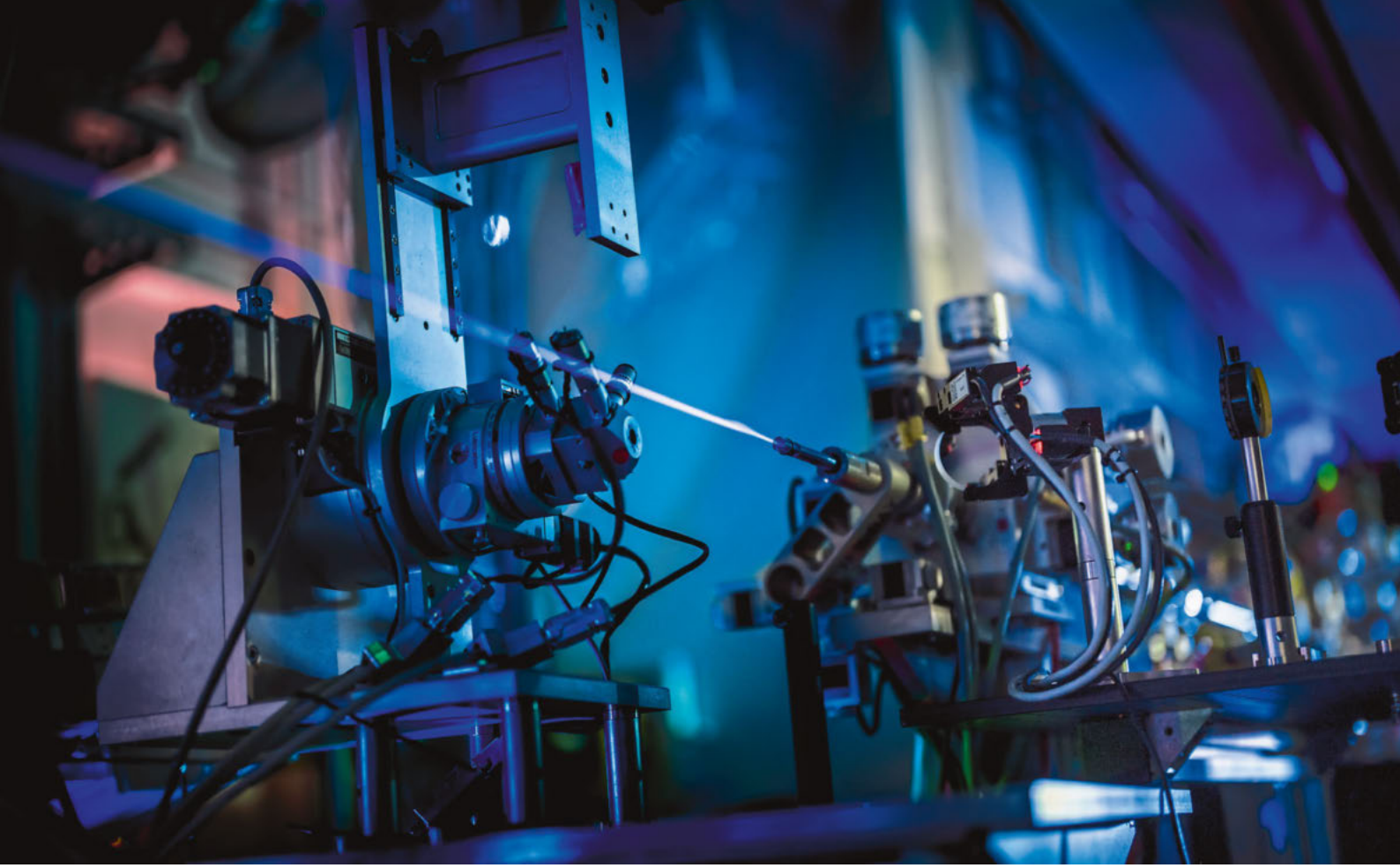
Herr Professor Feurer, lassen sich große Forschungsanlagen in zwei Typen einteilen, in Vielzweckeinrichtungen und in Megaexperimente, die ein einziges Ziel verfolgen?
Diese Unterscheidung kann man treffen. Vielzweckanlagen wie unsere werden von Forscherinnen und Forschern aus verschiedenen Disziplinen genutzt – von der Technik über die Materialforschung bis zur Biologie und Medizin. Und andererseits gibt es Anlagen, die hauptsächlich eine einzige große Frage beantworten sollen. Zum Beispiel die, ob ein bestimmtes theoretisch vorhergesagtes Teilchen in der Natur existiert. Hat eine solche Anlage das Teilchen nachgewiesen, hat die Anlage ihren Zweck erfüllt.

Und könnte geschlossen werden?
In der Regel ergeben sich weitere Fragestellungen, die dann mitunter an einer Nachfolgeanlage beantwortet werden können.

Welcher Typ von Anlagen hat es leichter, von der wissenschaftlichen Gemeinschaft unterstützt zu werden?
Beide Anlagentypen durchlaufen den gleichen Auswahlprozess. Beide müssen zeigen, welche Bedeutung sie für die Zukunft haben. Am Ende steht die Empfehlung, in welche Anlagen – ob monothematisch oder Vielzweckanlage – am ehesten investiert werden sollte. Ich bin überzeugt: Für verschiedene Fragestellungen braucht es verschiedene Modelle. Beide Anlagenarten werden deshalb auch künftig bestehen.

Am Ende entscheidet aber nicht die Wissenschaft, welche Anlage realisiert wird, sondern die Politik als Vertreterin der Gesellschaft. Welcher Anlagentyp hat es da leichter?
Die Art der Anlage spielt keine Rolle. Der Wettbewerb um die Verwirklichung von großen Forschungsanlagen ähnelt einem Fußballspiel zwischen zwei Mannschaften. Am Ende gibt es einen Gewinner und einen Verlierer. Die Regierung ist dabei so etwas wie der Schiedsrichter. Sie muss darauf achten, dass die festgelegten Regeln eingehalten werden. Ideen aus der Wissenschaft für Großforschungsanlagen müssen sich im Wettbewerb durchsetzen. Dabei müssen sie auf verschiedenen Ebenen überzeugen. Neben dem wissenschaftlichen Wert sind viele weitere Faktoren im Spiel: Was trägt eine Anlage zum Wirtschaftswachstum bei? Was leistet sie zur Ausbildung von Fachkräften? Wichtig ist, dass im Konkurrenzprozess alles fair und transparent abläuft.

Große Forschungsanlagen kosten oft Milliarden Euro. Um sie zu finanzieren und zu realisieren, schließen sich häufig viele Länder zusammen. Ist es überhaupt noch zeitgemäß und sinnvoll, große Forschungsanlagen nur national zu planen?
Grundsätzlich ja. Ich sehe die Forschungslandschaft als Pyramide. Das Fundament bilden die Arbeitsgruppen an den Universitäten, die in ihren eigenen Laboren forschen. Diese Gruppen stellen dann häufig fest: Allein kommen wir nicht weiter, denn der personelle oder finanzielle Aufwand ist zu groß. Dann schließen sie sich mit anderen Gruppen zusammen, in Deutschland etwa in Sonderforschungsbereichen. In anderen Ländern gibt es Entsprechendes. Wenn sogar diese Zusammenschlüsse nicht ausreichen, kommt man um Großforschungsanlagen nicht herum. Je nach Forschungsgebiet können diese Anlagen sehr unterschiedlich aussehen. Reichen selbst die nationalen Mittel nicht aus, dann kommen internationale Forschungsanlagen ins Spiel. Sie bilden die Spitze der Pyramide. Man kann keinen Baustein aus dieser Pyramide



Am European XFEL gibt es den stärksten Röntgenlaserstrahl der Welt. Mit ihm eröffnen sich ganz neue Forschungsmöglichkeiten. Hier wird der Strahl sichtbar, weil er Stickstoffatome in der Luft zum Leuchten anregt.

herausnehmen. Denn auch die großen internationalen Forschungsanlagen brauchen die nationalen Zentren als Zulieferer. Diese Pyramidenstruktur ist historisch gewachsen und es gibt gute Gründe, warum sie existiert.

Ab welcher finanziellen Größenordnung ist eine Anlage national nicht mehr zu stemmen?
Das hängt vom politischen Konsens in den einzelnen Ländern ab. Die Wissenschaft erhält immer nur bestimmte Mittel. Dann muss man sehen, was man damit alles finanzieren kann. Reicht die Geldschatulle nicht aus, beginnt die Überlegung für eine internationale Anlage. Länder wie Deutschland, Frankreich und England können sich natürlich mehr an nationaler Infrastruktur leisten als kleinere europäische Staaten. Daher ist es unmöglich zu sagen, dass eine Anlage zum Beispiel ab einer Investition von einer Milliarde Euro nur noch international zu finanzieren ist.

Wenn man sich darauf geeinigt hat, dass der Bau einer bestimmten Anlage vorrangig ist, so gibt es einen weiteren Knackpunkt: die Wahl des Standorts.

Die Standortfrage ist in der Tat ein kritischer Punkt. Dabei muss vieles beachtet werden. Manche Anlagen sind vielleicht zu groß für einen existierenden Campus. Besser errichtet man sie außerhalb. Und es gibt weitere Randbedingungen: Gibt es vor Ort eine ausgewiesene Expertise, um ein solch großes Projekt umzusetzen und dabei Zeitrahmen und Budget einzuhalten? Ist die nötige Industrie vorhanden? Wenn man eine große Forschungsanlage baut, ist diese meist weltweit einzigartig. Ist vor Ort also Hochtechnologie verfügbar? Große Forschungsanlagen sind zudem Keimzellen für Technologiezentren. Hat die Region daran Interesse? Selbstverständlich geht es auch darum, wie weit ein Standort bereit ist zu investieren. Ein Standort wird sich gut überlegen: Was haben wir potenziell davon, eine solche Anlage hier bei uns zu haben? Ist es allein die Reputation oder ist es mehr? Da spielen sehr viele Faktoren eine Rolle. Am Ende setzt sich der Standort durch, der das beste Paket geschnürt hat.

Wie viel hat die Wissenschaft da mitzureden?
Ich denke, es handelt sich um eine politisch dominierte Entscheidung. Die wissenschaftliche

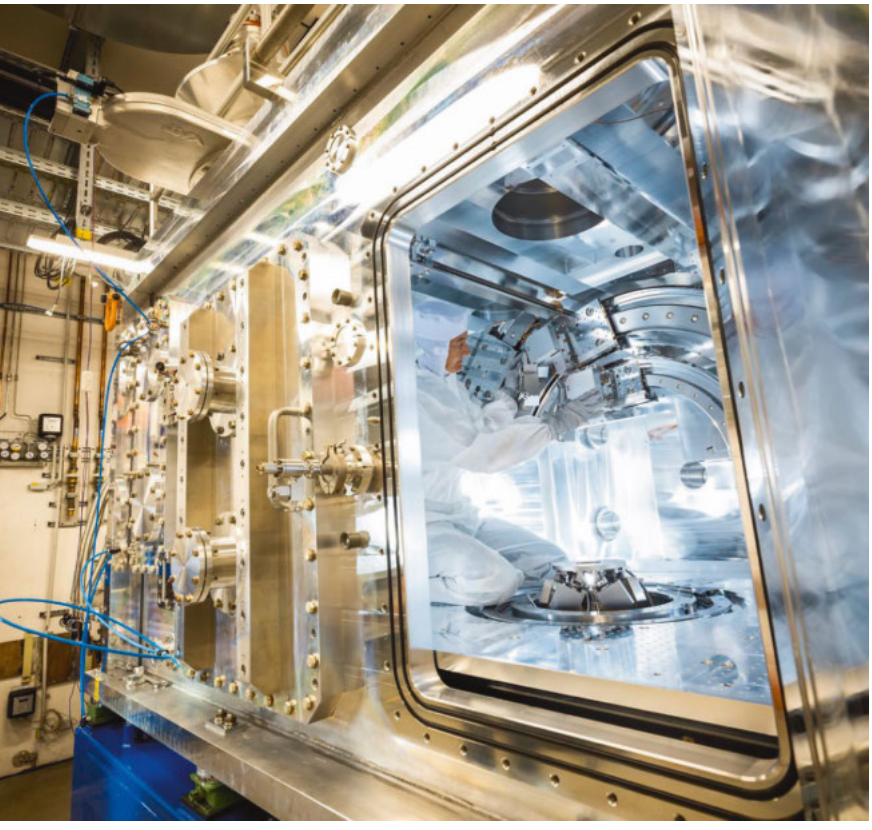
European XFEL / Jan Hosan (2)

Gemeinschaft ist international und sehr mobil: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler folgen den Anlagen.

Kommen wir vom Bau zum Betrieb einer internationalen Großforschungsanlage: Wie ist es geregelt, wer am European XFEL messen darf?
Jeder Wissenschaftler aus der ganzen Welt kann bei uns Anträge einreichen, um Strahlzeit für Messungen zu bekommen. Wir erhalten rund dreimal so viele Anträge, wie wir später an Strahlzeit vergeben können. Ein internationales Expertengremium begutachtet diese Anträge nach wissenschaftlicher Exzellenz und erstellt eine Rangliste. Wir selbst prüfen, ob sich das geplante Experiment überhaupt bei uns durchführen lässt.

Hat sich noch niemand beschwert, dass die finanziellen Anteile der einzelnen europäischen Länder am European XFEL keine Rolle spielen?
Kein Land würde sich an einer Anlage beteiligen, wenn es dort keine Wissenschaftsgemeinde gäbe, die sie nutzen möchte. Wir beobachten, wie sich diese Gemeinden entwickeln. Wenn wir beispielsweise den Eindruck haben, dass Länder benachteiligt sind, weil dort niemand weiß, wie man überzeugende Anträge schreibt, dann helfen wir. Und wenn Wissenschaftler in einem Land interessante Fragestellungen haben, es aber viel zu kompliziert finden, ein Experiment bei uns zu machen, führen wir sie durch verschiedene Maßnahmen an unsere Maschine heran. Beispielsweise integrieren wir sie zunächst in andere Teams.

Europa strebt nach mehr technologischer Unabhängigkeit etwa von China oder den USA. Nach Russland sind die Verbindungen seit dem Ukraine-Krieg ohnehin nahezu gekappt. Andererseits hat die Wissenschaft traditionell eine Vorbildfunktion für internationale Zusammenarbeit. Wie handeln Sie am European XFEL in diesem Spannungsfeld?
Wir müssen uns am vorgegebenen politischen Umfeld und an den Sanktionen orientieren. Außerdem müssen wir uns nach den Vorgaben richten, die unser Council, unser oberstes Verwaltungsgremium, beschließt. Innerhalb dieser Vorgaben versuchen wir, so offen und international zu sein, wie die Wissenschaft es von jeher war.



Diese Experimentierstation dient zur Untersuchung von Materie unter extremen Druck- und Temperaturbedingungen oder unter sehr starken elektromagnetischen Feldern. Damit lassen sich etwa die Verhältnisse tief im Innern von Exoplaneten nachstellen.

Ist das Ausloten dieser Bedingungen nicht mit einem riesigen Aufwand verbunden?
Ja, der Aufwand ist personell und finanziell erheblich. Internationale Sanktionen ändern sich regelmäßig und neue kommen hinzu, meistens als Reaktion auf die angespannte geopolitische Lage. Oft benötigen wir dann Rechtsbeistand: Betreffen uns diese Sanktionen? Und wenn ja, in welcher Form? Dazu kommen auch emotionale Herausforderungen: Bei uns arbeiten Menschen aus der ganzen Welt. Wir müssen versuchen zu verhindern, dass sich die großpolitische Lage auf unsere Arbeit überträgt und zu zwischenmenschlichen Turbulenzen führt. Es ist schwierig und mit Aufwand verbunden, in einem solchen Umfeld richtig zu handeln. Aber es geht. Wir bekommen das sehr gut hin, denke ich. Ich bin der festen Überzeugung, dass die Wissenschaft ähnlich wie der Sport eine verbindende Rolle spielen kann. Wir müssen an die Zeiten denken, die vielleicht im Moment etwas in ferner Zukunft erscheinen, aber die irgendwann wiederkommen werden – an Zeiten, in denen sich die Beziehungen hoffentlich normalisieren.

Wir versuchen, die Brückenfunktion der Wissenschaft zu pflegen, und wollen diese Rolle auch künftig spielen.

Zermürbt Sie die damit verbundene, zeitaufwendige Diplomatie und Bürokratie nicht?
Nein, überhaupt nicht. Ich sehe mich als jemanden, der den Wissenschaftlern die Möglichkeiten zur Verfügung stellt, mit denen sie forschen können – mit allem, was dazugehört. Ich freue mich, wenn am Ende die Nutzer unserer Anlage tolle wissenschaftliche Resultate in den besten Fachjournalen publizieren. Ich sage mir dann: Ich habe einen kleinen Teil dazu beigetragen. Vielleicht durch Management, durch Administration oder durch Diplomatie. Aber irgendjemand muss das machen. Und ich mache das gerne, weil ich die Resultate sehen kann.

Vor welchen Herausforderungen stehen sie als Vorsitzender der Geschäftsführung einer großen europäischen Forschungsanlage noch?
An erster Stelle steht die Herausforderung, die Maschine für die Nutzer möglichst jederzeit verfügbar zu halten. Wir haben den Plan, die Anlage an 7.500 von 8.760 Stunden eines Jahres bereitzustellen. Dazu müssen alle Zahnräder ineinandergreifen. Diese Verfügbarkeit über Jahre sicherzustellen, ist eine große Herausforderung. Die zweite Herausforderung ist es, immer fünf bis zehn Jahre in die Zukunft zu denken. Wenn wir Biologie, Chemie, Materialwissenschaften und anderen wissenschaftlichen Disziplinen helfen möchten, müssen wir wissen: Vor welchen Problemen steht die Biologie in fünf Jahren? Vor welchen Problemen stehen die Chemie oder die Materialwissenschaften in zehn Jahren? Denn wir müssen unsere Anlage und unsere Instrumente in diese Richtung entwickeln. Eine solche Entwicklung dauert lange und ist teuer. Es wäre daher fatal, wenn wir uns in die falsche Richtung entwickeln würden.

Sie waren Physik-Professor in der Schweiz, bevor Sie als Geschäftsführer zu European XFEL kamen. Was hat Sie an Ihrer jetzigen Aufgabe gereizt?
Wenn man an einer Universität arbeitet, ist man auf ein bestimmtes Thema fokussiert und versucht, möglichst schnell wissenschaftliche Resultate zu produzieren. Aber je älter ich wurde, desto mehr hat mich die breite Wissenschaft interessiert. Es wurde mir ein bisschen zu eng als Universitätsprofessor. Hier bei European XFEL habe ich die Möglichkeit, dieses Interesse auszuleben, obwohl ich sehr viel im Management unterwegs bin. Dass ich die wissenschaftliche Breite genießen und fördern darf, ist für mich sehr erfüllend. Meine Physik-Professur in der Schweiz habe ich allerdings immer noch.

Wirklich? Wann haben Sie denn dafür Zeit?
Sonntags (lacht).

Welche wissenschaftlichen Durchbrüche am European XFEL erhoffen Sie sich in Zukunft?
Unsere Anlage produziert extrem brillantes Röntgenlicht. Damit kann man sich auf atomarer Skala alles Mögliche in der Natur anschauen, sei es ein biologisches Objekt, ein neues Material oder eine chemische Katalyse. Blickt man zurück, so gibt es kein einziges Gebiet, das so viele Nobelpreise hervorgebracht hat wie die Forschung mit Röntgenlicht. Ich bin sicher, dass es in dieser Tradition weitergehen wird: Es wird Nobelpreise in Chemie, Medizin und Biologie geben, die nur dadurch zustande kommen, dass es Anlagen wie unsere gibt. Auf welchem Gebiet der nächste Nobelpreis kommen wird – das vorherzusagen, käme allerdings einem Lotteriespiel gleich.



An dieser Verstärkerstation bringt ein spezielles Medium ultrakurze Laserpulse auf höchste Intensitäten. Damit lassen sich extreme Materialzustände erzeugen, die der Röntgenlaser dann sichtbar macht.

European XFEL / Jan Hosan (2)

European XFEL: Einblick in ein Technikwunder



Nach rund neun Jahren Betrieb pausierte der größte Röntgenlaser der Welt 2025 erstmals länger für Wartung und Upgrade – eine einzigartige Gelegenheit, die ganze Anlage zu erkunden.

von FRANK FRICK

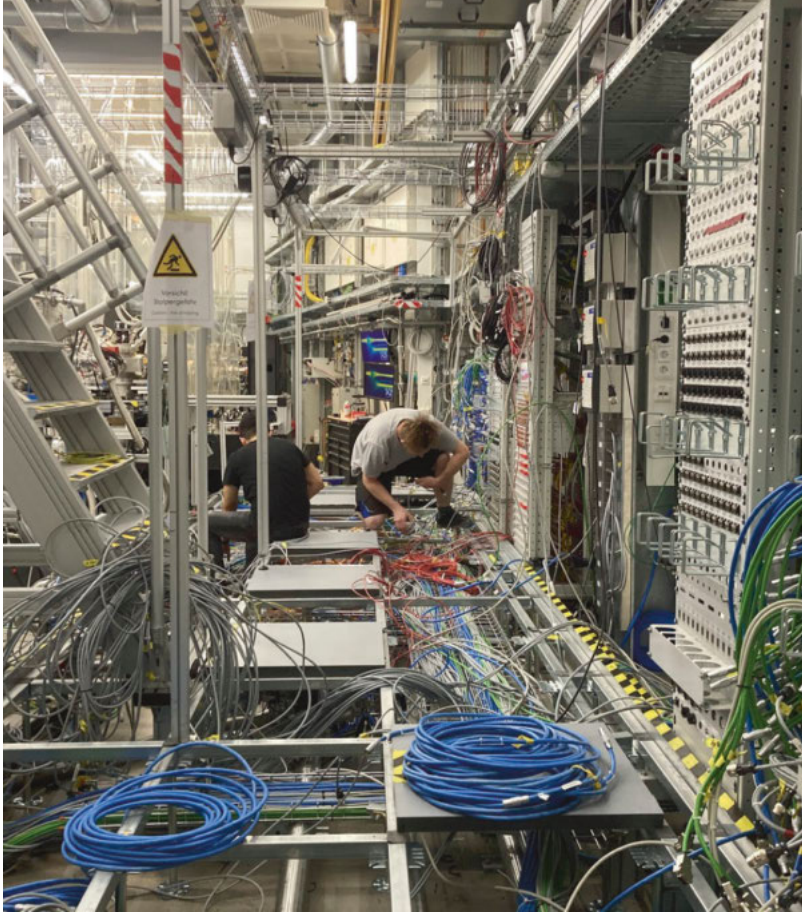
Oben Wiese – unten eine Riesenmaschine. Auf dem 150.000 Quadratmeter großen Areal des European XFEL in Schenefeld, Schleswig-Holstein, sind die Gebäude weit verstreut. Am Eingang steht das Lighthouse-Erlebniszentrum. Es zeigt Besuchern ein Modell der 3,4 Kilometer langen unterirdischen Anlage, die in Hamburg-Bahrenfeld beginnt und in Schenefeld endet. In die Tunnel der Anlage dürfen Besucher nicht hinab – dort wären sie gesundheitsgefährdender Röntgenstrahlung ausgesetzt. Mit den extrem intensiven Laserblitzen im Röntgenbereich lassen sich atomare Details von Viren erkennen, chemische Reaktionen filmen oder auch Vorgänge tief im Inneren von Planeten nachvollziehen. Acht Jahre und über 1,2 Milliarden Euro waren nötig, um die Anlage zu errichten. Neben Deutschland sind elf europäische Partnerländer beteiligt und betreiben sie über die European XFEL GmbH. Das „XFEL“ steht für „X-Ray Free-Electron Laser“, also einen Röntgenlaser, dessen Strahlung mithilfe freier Elektronen aus einem Teilchenbeschleuniger gewonnen wird.

Thomas Feurer, Vorsitzender der Geschäftsführung, deutet im Modell auf den Bereich, der im Original rund zwei Kilometer vom Anfang der Anlage entfernt liegt. „Ab hier produzieren deutsche Elektronen europäische Photonen“, scherzt der Schweizer. Für die Erzeugung und Beschleunigung der Elektronenpakete ist das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) zuständig. Speziell geformte Hohlräume, die Resonatoren, treiben die Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Flüssiges Helium kühlt die Resonatoren aus dem Metall Niob auf minus 271 Grad Celsius. Niob wird bei dieser extrem niedrigen Temperatur supraleitend und verliert seinen elektrischen Widerstand. So überträgt sich fast die gesamte eingespeiste Energie auf die Elektronen.

Die Photonen, also die Röntgenstrahlen, sind dagegen Sache des European XFEL. Sie entstehen, wenn die Elektronen durch periodische Anordnungen von Permanentmagneten rasen. Diese sogenannten Undulatoren zwingen die Elektronen auf einen Slalomkurs und bringen sie dazu, Röntgenlicht auszusenden.

Von Juli bis Dezember 2025 warteten Techniker und Wissenschaftler die Anlage und rüsteten sie auf. Der Elektronenbeschleuniger taute zum ersten Mal nach neun Jahren bis zur Raumtemperatur auf. Kurz bevor der Beschleuniger wieder langsam abgekühlt wurde, durfte ich mit einer Journalistengruppe etwas Außergewöhnliches tun und in den Tunnel einfahren, zunächst an dessen Anfang unter dem DESY-Campus. Bei Stillstand ist die Anlage unter Einhaltung strenger Strahlenschutzvorschriften begehbar. Schon der Blick vom Injektionsgebäude in einen fast 30 Meter tiefen Schacht beeindruckt: Von hier aus sind die vier unterirdischen Stockwerke zu erkennen, in denen Hilfsanlagen wie Kühl- und Hochspannungstechnik untergebracht sind. Über einen zweiten Schacht ließ ein Kransystem gerade neue Komponenten hinab.





In der gelben Röhre befindet sich der Elektronenbeschleuniger. Die Energie der Elektronen wird anschließend in Röntgenlaserpulse umgewandelt. Rechts sind einige Instrumente mitsamt Ausleseelektronik zu sehen.

European XFEL / Heiner Müller-Elsner | European XFEL

Tunnel voller Technik

Der unterirdische Raum mit der Elektronenquelle, dem Injektor, ist vollgestopft mit Röhren, Ventilen, Flanschen, Kästen, Spulen, Kabeln und Geräten. Wie kann hier ein Mensch den Überblick behalten? Die Kathode, welche die Elektronen freisetzt, wenn sie der Lichtblitz eines Lasers trifft, ist erstaunlich klein und geht im Gewirr fast unter. In der sechsmonatigen Betriebspause bauten Techniker eine bessere Elektronenquelle ein. Diese ermöglicht es, die Zahl der Elektronenpakete – und damit die Zahl der Röntgenblitze – von 27.000 auf 36.000 pro Sekunde zu steigern. Außerdem tauschten Experten Pumpen, Filter und Steuereinheiten im Kühlsystem der Anlage aus, erneuerten Heliumventile und ersetzten Spiegel, die von der intensiven Röntgenstrahlung verschlissen waren.

Im Tunnel mussten wir einen Selbstretter mitführen – ein Atemschutzgerät für die Flucht. Bei einem Brand kämen wir nur so gesund aus dem langen Tunnel. Wir gingen an knallgelb lackierten röhrenförmigen Beschleunigermodulen entlang. In ihrem Inneren stecken die Resonatoren. Die Module haben einen Durchmesser von rund 1,3 Metern und sind 12 Meter lang. Bis zum Ende der Beschleunigerstrecke gibt es 116 solcher Module, sagte unser fachkundiger Begleiter vom DESY. Wir drehten weit vorher um – am zweiten Bunchkompressor. Diese Bauteile verdichten und verkürzen die fast lichtschnellen Elektronenpakete auf nur 50 Mikrometer. Das entspricht einer Dauer von rund 170 Billiardstel Sekunden.

Am nächsten Tag betraten wir einen der Tunnelarme vom Ende in Schenefeld her. Hier fliegen die Photonen durch Röhren von wenigen Zentimetern Durchmesser. Die Trennung vom Elektronenstrahl erfolgt weiter vorn in Richtung Hamburg. Wir sahen die Undulatoren: mehrere Meter lange massive Module. Ihre Form erinnerte mich an eine überdimensionierte Nähmaschine. Äußerlich verriet nichts, dass im Inneren Tausende exakt positionierte Magnete stecken. Die Betriebspause diente auch der Vorbereitung auf supraleitende Undulatoren. Mit dieser neuen Generation soll die Energie der schnellen Elektronen noch effizienter in Röntgenblitze umgewandelt werden, und zwar mit deutlich kürzeren Wellenlängen.

Nach der Umkehr erreichten wir die Stelle, an der die Photonenblitze durch ein Rohr in einer massiven Betonwand in die unterirdische Experimentierhalle gelangen. Dort verlor ich angesichts der vielen Räume, die unser Begleiter vom XFEL „Experimentierhütten“ nennt, rasch den Überblick. Jede von ihnen ist dicht gepackt mit Apparaturen und Elektronik. Obwohl ich schon viele Labore gesehen habe, ließ mich die Vielfalt und Komplexität dieser Einrichtungen fast ehrfürchtig staunen. Später las ich nach: Die Halle enthält sieben Stationen, jeweils einer Undulator-Lichtquelle zugeordnet. Denn die Unter-



An dieser Experimentierstation lassen sich freie Atome und Moleküle untersuchen, aber auch Nanocluster aus bis zu einigen Tausend Atomen.

suchung ultraschneller Vorgänge verlangt Röntgenlicht mit anderen Eigenschaften als etwa die Untersuchung des atomgenauen Aufbaus biologischer Moleküle.

2025 beschäftigte European XFEL 627 Mitarbeiter aus 68 Nationen. Dazu kommen Wissenschaftler aus aller Welt, im Jahr 2024 etwa mehr als 1.200. Die Nachfrage nach Messzeit ist stets weitaus größer als das Angebot. Andererseits haben allein die Wartungs- und Installationsarbeiten 2025 rund 10 Millionen Euro verschlungen.

Lohnt sich der enorme Aufwand?

Von 2021 bis 2025 haben Wissenschaftler dank European XFEL im Schnitt 160 wissenschaftliche Artikel pro Jahr in begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht. Diese Angabe hilft allerdings kaum bei der Antwort. Wäre sie entscheidend, stünden die XFEL-Betreiber schlecht da. Beispielsweise publiziert das Leibniz-Institut für Katalyse LIKAT in Rostock etwa doppelt so viele Studien. Dabei kostet sein Unterhalt pro Jahr rund 28 Millionen Euro, während das Jahresbudget des European XFEL rund 140 Millionen Euro beträgt – von den viel höheren Investitionskosten ganz zu schweigen.

Auch die Messung, wie oft andere Forscher die Ergebnisse des European XFEL in ihren eigenen Fachartikeln zitieren, führt nicht weiter. Zu unterschiedlich sind die Publikations- und Zitationsgewohnheiten in verschiedenen Fachgebieten. Und gerade in der Grundlagenforschung dauert es oft Jahrzehnte, bis die praktische Tragweite einer Erkenntnis sichtbar wird.

Entscheidend ist vielmehr, ob die teure Forschungsmaschine die Wissenschaft über ihre bisherigen Grenzen hinausführt. Hinweise dafür gibt es einige. Ein Beispiel aus dem Juli 2026: Ein Forschungsteam konnte mithilfe der XFEL-Röntgenblitze und einer neuen Methode beobachten, wie ein Molekül nach der Absorption von Licht innerhalb von Pikosekunden – Billionstel Sekunden – Energie umverteilte. Die Forscher richteten ihr Interesse besonders auf das bisher weitgehend unerforschte Zusammenspiel zwischen der Anregung der Elektronen und der Bewegung der Atomkerne. Wenn etwa ein Atom von einem Lichtblitz getroffen wird, reagiert es sehr viel stärker auf die Bewegung seiner Nachbaratome. Diese Methode könnte helfen, etwa die Lichtempfindlichkeit von DNA und Energieflüsse in lichtabsorbierenden Materialien besser zu verstehen. „Genau dafür wurde der European XFEL gebaut: um chemische Veränderungen dort zu beobachten, wo sie beginnen – an bestimmten atomaren Stellen und auf ihrer natürlichen Zeitskala“, sagt Daniel Rivas, einer der beteiligten Forscher.

Ein zweites Beispiel aus diesem Jahr: Ein internationales Team wies eine bislang unbekannte Form von superionischem Wasser nach. Dieses entsteht bei Temperaturen von mehreren Tausend Grad Celsius und einem Druck von Millionen Atmosphären. Es leitet sehr gut elektrischen Strom, wobei Wasserstoffionen frei durch ein festes Gitter aus Sauerstoffionen wandern. Das Forscherteam konnte Details des atomaren Aufbaus des superionischen Wassers klären, was bei früheren Experimenten nie gelungen war. Diese Ergebnisse sind möglicherweise ein Schlüssel zur Erforschung von Eisriesen wie Uranus und Neptun mitsamt ihren ungewöhnlichen Magnetfeldern. Diese und viele andere Fragen lassen sich nur mit einem leistungsstarken Röntgenlaser beantworten. ■

European XFEL / Jan Hosan

PETRA IV: Röntgenlicht am Limit

Es klingt nach einem simplen Upgrade: von PETRA III zu PETRA IV. Doch das Forschungszentrum DESY verspricht nichts weniger als eine „Entdeckungsmaschine“ und „eine neue Ära der Röntgenanalytik“ – dank einer 500-mal höheren Brillanz des Röntgenstrahls.

von FRANK FRICK

Früher nannten Wissenschaft und Fördergeber solche Anlagen wie die geplante Röntgenlichtquelle PETRA IV schlicht Großgeräte. Heute gelten sie als Forschungsinfrastruktur. Damit sind hohe Planungs-, Bau- und Betriebskosten und langfristige Weichenstellungen verbunden. Deshalb führte das Bundesforschungsministerium ein mehrstufiges Verfahren durch, um 35 Vorschläge nach ihrer Bedeutung zu bewerten. Mit veranschlagten Baukosten von rund 1,8 Milliarden Euro schaffte es PETRA IV in die Endauswahl, und im März 2026 empfahl der Wissenschaftsrat die baldige Umsetzung von drei Vorhaben, darunter PETRA IV.

Ab 2032 soll die Anlage mithilfe eines Synchrotrons – eines ringförmigen Elektronenbeschleunigers – hochbrillantes Röntgenlicht erzeugen. Die Ziffer IV steht dabei für die vierte Generation solcher Synchrotron-Röntgenquellen. Das ist nicht einfach eine von vielen Ausbaustufen, sondern steht für den Sprung an die Grenze des physikalisch Möglichen. Gut ein Dutzend solcher ultimativen Anlagen sind weltweit in Planung oder laufen bereits. PETRA IV wird nach Fertigstellung zu den leistungsstärksten gehören.

Damit lassen sich kleinste Strukturen, etwa in Batterien oder im Gehirn, dreidimensional und mit bisher unerreichter Detailgenauigkeit abbilden. Außerdem kann die Anlage schnelle zeitliche Veränderungen in der Nanowelt abbilden. Daher bezeichnen DESY und der Wissenschaftsrat PETRA IV bereits als „ultimatives 4D-Röntgenmikroskop“: 3D plus die Dimension Zeit. Die Anwendungen reichen von Energie und klimaneutraler Mobilität über Biotechnologie und Umwelt bis hin zur Informations- und Quantentechnologie.

Der Beschleunigerring von PETRA IV soll mit 2,3 Kilometern Umfang genauso groß bleiben wie der des Vorläufers PETRA III. Doch DESY plant, das Innenleben komplett zu erneuern. Dadurch verbessert sich die erzielte Auflösung um den Faktor 100 und die Brillanz des Strahls sogar 500-fach. Statt der bisherigen Elektromagnete sollen 4.000 Permanentmagnete die Elektronen noch präziser auf ihrer Kreisbahn halten. DESY will eine konventionelle Elektronenquelle einbauen, aber zusätzlich einen neuartigen Injektor testen. Ein Laser-Plasma-Beschleuniger könnte die Elektronen direkt in den Speicherring einspeisen und so die klassische Vorbeschleunigerkette ersetzen. Ultrakurze, extrem intensive Laserpulse erzeugen in einem Gasplasma sehr starke Beschleunigungsfelder und bringen so Elektronen auf engem Raum auf hohe Energien. Ein solcher Injektor würde Platz sparen und den Energieverbrauch der Anlage senken, muss aber seine Praxistauglichkeit erst noch beweisen.



So soll die Experimentierhalle von PETRA IV nach Fertigstellung aussehen. Dort wird es Röntgenlicht herausragender Qualität geben.

Visualisierung: Science Communication Lab für DESY

Der Wissenschaftsrat sieht in PETRA IV auch eine Chance, Deutschlands Innovationskraft zu fördern. Eine DESY-Broschüre betont die Bedeutung technologischer Unabhängigkeit: Europäische Unternehmen lassen Mikrochips oft im Ausland fertigen – günstig, aber anfällig für Spionage. Klassische Prüfverfahren sind laut DESY zu aufwendig, doch PETRA IV kann Chips schnell Schicht für Schicht durchleuchten: ein Standortvorteil für Unternehmen sowie Behörden mit Sicherheitsaufgaben. ■

European Spallation Source: Gedrosselt, aber konkurrenzlos



2027 soll die stärkste Neutronenquelle der Welt endlich in Betrieb gehen – wegen Geldmangels vorerst mit gedrosselter Leistung, aber mit einer Brillanz wie keine zweite. Und klimaneutral.

von BERND MÜLLER

Neutronen sind ungewöhnliche Boten. Weil sie keine elektrische Ladung tragen, dringen sie tief in Materie ein. Auf die richtige Geschwindigkeit abgebremst, passt ihre Wellenlänge genau zum Abstand der Atome im Kristallgitter. Dadurch können sie enthüllen, wo die Atome sitzen, wie sie sich bewegen und welche magnetischen Strukturen das Material aufweist. Das macht Neutronen zum unverzichtbaren Werkzeug der Materialforschung, von der Batterieentwicklung über die Strukturbiologie bis hin zur Suche nach neuen Magneten. Wer Neutronen in großer Zahl braucht, war in Europa bisher auf eine Handvoll überlasteter Quellen angewiesen. Das ändert sich bald: Im schwedischen Lund entsteht mit der European Spallation Source (ESS) die stärkste Neutronenquelle ihrer Art weltweit.

Normalerweise gewinnt man Neutronen aus Kernspaltungsprozessen in Forschungsreaktoren. Bei Spallationsquellen kommt stattdessen ein Teilchenbeschleuniger zum Einsatz, der Protonen auf ein Zielmaterial schießt, wobei Neutronen freigesetzt werden.

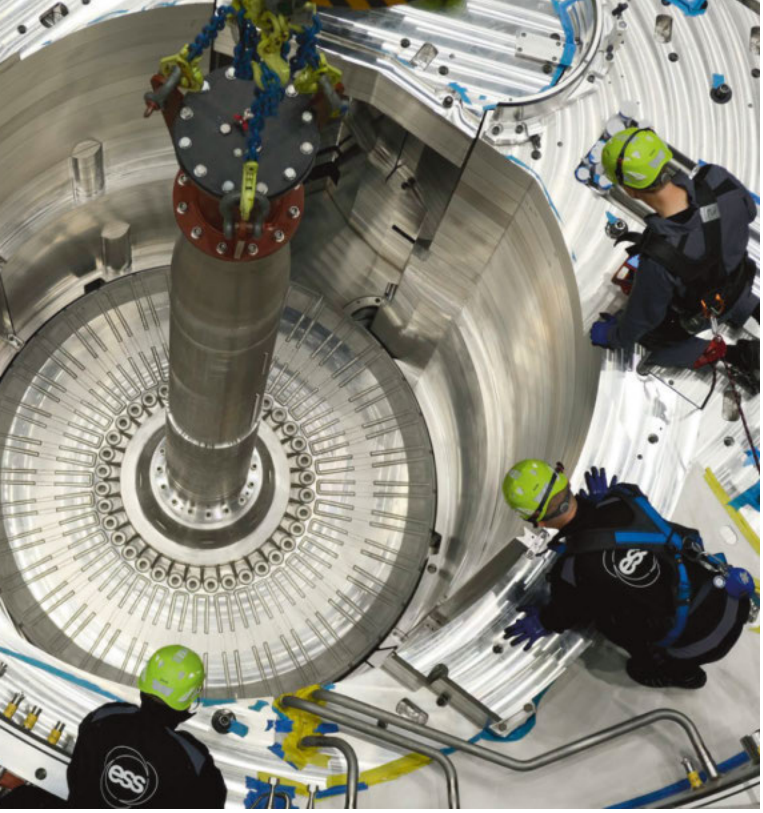
Wie bei vielen solchen Projekten in letzter Zeit, hat auch die ESS die gesteckten Ziele für Bauzeit und Kosten verfehlt – wenn auch vergleichsweise moderat. Zu den ursprünglich veranschlagten 1,84 Milliarden Euro für den Bau und 810 Millionen Euro für den anfänglichen Betrieb kamen im Laufe der Jahre einige Zusatzkosten hinzu. Die Coronapandemie aber auch eine zu optimistische Planung verzögerten den Zeitplan um zwei Jahre und verursachten Mehrkosten von 278 Millionen Euro – getragen von allen Mitgliedsstaaten. Deshalb hat man 2021 einen neuen Zeitplan aufgestellt, der die Inbetriebnahme für 2027 vorsieht. Von den jüngsten geopolitischen Spannungen sei man aber nur indirekt betroffen, heißt es von der ESS. Zum Beispiel wegen der Preisexplosion für Mikrochips infolge des Booms bei KI-Rechenzentren sowie wegen steigender Kosten für das Kühlmittel Helium aufgrund der Spannungen am Persischen Golf.

Verzögerung durch Zwischenfall

Dann kam es Ende 2025 zu einem Zwischenfall bei der ESS. An diesem Tag fiel der Strom aus und damit eine Wasserpumpe, die den Moderator auf Temperatur hält. Dieses zentrale Teil der Anlage bremst die schnellen Neutronen durch Zusammenstöße mit Wasserstoffatomen bis auf wenige Millielektronenvolt herunter. Das gibt ihnen genau die richtige Wellenlänge, um in atomare Prozesse hineinzuschauen. Weil der Wasserkreislauf ausfiel, vereiste der Moderator und sprengte ihn. Derzeit baut das Forschungszentrum Jülich einen Ersatz.

Der neue Moderator soll sogar bessere Eigenschaften haben als der Vorgänger. Das ist den Forschenden hochwillkommen. Denn aus Kostengründen soll der 600 Meter lange Teilchenbeschleuniger, der Protonen auf das Target-Rad schießt, anfänglich nur mit zwei Megawatt betrieben werden anstatt mit fünf Megawatt.

Die Beschleunigermodule sind zwar alle vorhanden, aber für die Hochfrequenzröhren, welche die erforderliche Radiofrequenz erzeugen, fehlt derzeit das Geld. Simulationen machen jedoch Hoffnung, dass der 2-Megawatt-Beschleuniger mit dem neuen Moderator so viele Neutronen liefert wie das ursprüngliche 5-Megawatt-Konzept.







Das „Target Wheel“ (links) ist ein Meisterwerk der Technik. Es besteht aus Wolfram und muss gut gekühlt werden. Die Protonen aus dem Beschleuniger (oben) prallen auf dieses Rad und erzeugen dabei die Neutronen. Der Moderator (rechts) bremst die freigesetzten Neutronen dann stark ab.

Ob zwei oder fünf Megawatt: Immer wieder muss Generaldirektor Helmut Schober die Frage beantworten, ob diese Leistung nicht sowieso zu gering sei. Auf dem Papier scheint die ESS dem Forschungsreaktor am Institut Laue-Langevin in Grenoble hoffnungslos unterlegen. Der leistet 50 Megawatt und ist damit Weltspitze bei der Neutronenproduktion. Doch das ist ein Vergleich von Äpfeln mit Birnen. Der Reaktor liefert einen kontinuierlichen Neutronenstrahl, die ESS erzeugt dagegen Neutronenpulse: 14 Pulse pro Sekunde à 3 Millisekunden Dauer. Trotz geringerer Gesamtleistung ist die Brillanz dadurch höher – im Endausbau bis zu zwei Größenordnungen.

Besser oder schlechter gibt es bei Neutronenquellen ohnehin nicht. Jede Quelle hat ihre Vor- und Nachteile und findet ihre Nutzerschaft. Die großen Neutronenquellen in Europa am ILL in Grenoble, die Spallationsquelle am Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz sowie ISIS am Rutherford Appleton Laboratory im britischen Didcot sind weit überlastet, die ESS wird also dringend gebraucht. Hinzu kommt, dass der Forschungsreaktor FRM II in Garching seit Jahren wegen mehrerer Defekte außer Betrieb ist.

„Wir sind auch Konkurrenten“, sagt Schober, „aber Europa ist führend, weil wir in einem Netzwerk denken, wo die Neutronenquellen, Forschungsinstitute und Hochschulen an einem Strang ziehen.“ Wissenschaftler aus mehr als 60 Nationalitäten werden an der ESS forschen. Der wahre Fortschritt erfolge ohnehin nicht nur bei den Quellen, sondern bei den Instrumenten, wo die Experimente laufen. Die erlauben es unter anderem, Materialproben unter Druck oder extreme Temperaturen zu setzen und so neue Erkenntnisse zu gewinnen. Und der Einzug von KI beschleunigt die Datenanalyse enorm.

Führende Neutronenquelle ihrer Art

Nachhaltigkeit auch in der Forschung

Mehrere Länder hatten sich um die ESS beworben. Dass Schweden und Dänemark das Rennen gemacht haben, liegt auch an einem überzeugenden Umweltkonzept. Die gesamte Anlage benötigt eine elektrische Leistung von etwa 30 Megawatt, damit kann man eine Kleinstadt versorgen. Einen Kühlturm sucht man allerdings vergeblich. Der Löwenanteil der Abwärme gelangt in das Netz des lokalen Fernwärmeanbieters und die Abwärme aus dem Rechenzentrum heizt die umliegenden Gebäude. Und weil in Schweden der Strom zu 95 Prozent aus CO_2-freien Quellen stammt, darf sich die ESS mit dem Label „klimaneutral“ schmücken. „Das ist ein zukunftsweisendes Konzept“, findet Schober, „und hat sicherlich geholfen, die ESS nach Lund zu holen.“

Die ESS soll mehr als 40 Jahre ihren Dienst tun und laufend verbessert werden. Für Helmut Schober ist im Herbst 2026 Schluss – zumindest als Direktor in Lund. Der 64-Jährige geht dann noch einmal für zwei Jahre nach Grenoble, wo er sich als Doktorand die ersten Sporen in der Neutronenforschung verdient hat – und dann in den Ruhestand. Für die Neutronenforschung beginnt dann aber ein neues Kapitel. ■

Ulrika Hammarlund / ESS (2) | Forschungszentrum Jülich / Yannick Beßler

EBRAINS: Das Gehirn aus der Cloud

EBRAINS ist eine über ganz Europa verteilte digitale Forschungsinfrastruktur für die Hirnforschung. Was als Datenplattform begann, hilft heute Chirurgen bei Epilepsie-Operationen, liefert die Referenz für die KI-gestützte Tumordiagnose und hat nebenbei eine erfolgreiche Computerfirma hervorgebracht.

von BERND MÜLLER

Große Projekte in der Wissenschaft brauchen große Maschinen: Das stimmt vielleicht in der Physik, nicht jedoch in der Hirnforschung. Die Forschungsinfrastruktur EBRAINS ist nahezu unsichtbar. Die für Wissenschaftler und Mediziner offen zugängliche Plattform besteht aus einem Verbund aus Höchstleistungsrechnern, Datenbanken und Software, verteilt über ganz Europa. Sie bietet Hirnforschern eine gemeinsame Arbeitsumgebung. Hervorgegangen ist EBRAINS aus dem Human Brain Project.

Katrin Amunts hat das Human Brain Project von 2016 bis 2023 als wissenschaftliche Direktorin geleitet und ist heute Co-Geschäftsführerin von EBRAINS. Sie hält EBRAINS dennoch für ein Großprojekt: „Anders als etwa am CERN, wo alle zu einem Beschleuniger kommen, ist die neurowissenschaftliche Gemeinschaft heterogen und über den Kontinent verstreut. Genau für sie ist die Infrastruktur gedacht."

Dass am Ende die Infrastruktur im Mittelpunkt steht, war 2013 nicht ausgemacht. Das Human Brain Project startete als eines von zwei Flagship-Projekten der EU mit einer Fördersumme von 607 Millionen Euro. Von Anfang an gab es eine Debatte über die wissenschaftliche Ausrichtung. Die eine Schule wollte das Gehirn von unten verstehen, von der einzelnen Zelle und ihren Verbindungen aus, hochskaliert bis zur Funktion des gesamten Organs. Ihr Werkzeug war die Simulation. Die andere, prominent vertreten durch den Kognitionsforscher Stanislas Dehaene, hielt dagegen, dass man vom Verhalten und vom Denken kommen müsse. „Diese beiden Welten sind hart aufeinandergeprallt", erinnert sich Amunts. Heute sei Konsens, dass das eine ohne das andere nicht funktioniere. Moderne Simulationen verknüpfen die zelluläre Ebene mit der Ebene ganzer Netzwerke.

Größter Profiteur ist die Medizin. Der Kölner Forscher Andreas Horn nutzt das anatomische Hirnmodell BigBrain, um bei Parkinson-Patienten die tiefe Hirnstimulation zu verbessern. Die Elektrode, die den Tremor unterdrücken soll, muss exakt sitzen. Ein Millimeter zu weit, und die Wirkung ist null oder es treten Nebenwirkungen auf. BigBrain hilft, genau die richtige Stelle zu treffen.

Digitaler Zwilling des Gehirns

Noch weiter geht der Virtual Brain Twin, maßgeblich von Viktor Jirsa in Marseille entwickelt. Bei Epilepsie-Patienten, deren Anfälle sich von einem Herd aus über das ganze Gehirn ausbreiten, ist oft eine Operation die einzige Option. Der Chirurg steht dabei vor einem Dilemma: einerseits möglichst viel Gewebe entfernen, um Anfälle zu unterbinden, und andererseits möglichst wenig, um Gesundes zu schonen. Der digitale Zwilling wird mit den Bildgebungs- und Messdaten des Patienten gefüttert und sagt vorher, welche Region sich am besten entfernen lässt. In Frankreich läuft dazu eine erste klinische Studie mit über 400 Patienten an 38 Kliniken. Die Ergebnisse werden in den kommenden Monaten erwartet.



Wie nützlich eine offene Plattform wie EBRAINS sein kann, belegt ein Vorhaben von Wiener Forschern, die weder am Human Brain Project noch an EBRAINS beteiligt waren. Sie haben ihren Tumorzell-Atlas in die Plattform integriert. Der Atlas verzeichnet mehr als 3.100 Schnitte mit zahlreichen Typen von Hirntumoren in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Er dient damit als Referenz, um neue Gewebeproben mithilfe Künstlicher Intelligenz zu klassifizieren.

Inzwischen ist daraus eine Datensammlung geworden, mit der sich Tumordaten aus China, den USA und Europa vergleichen lassen. „Das ist ein sehr schönes und mutmachendes Beispiel", sagt Amunts. Über Daten und ihren Austausch habe man am Anfang kaum sprechen können, ohne dass die Zuhörer das todlangweilig fanden. Heute seien genau das die entscheidenden Elemente einer KI-gestützten Wissenschaft.

Rechnen wie die grauen Zellen

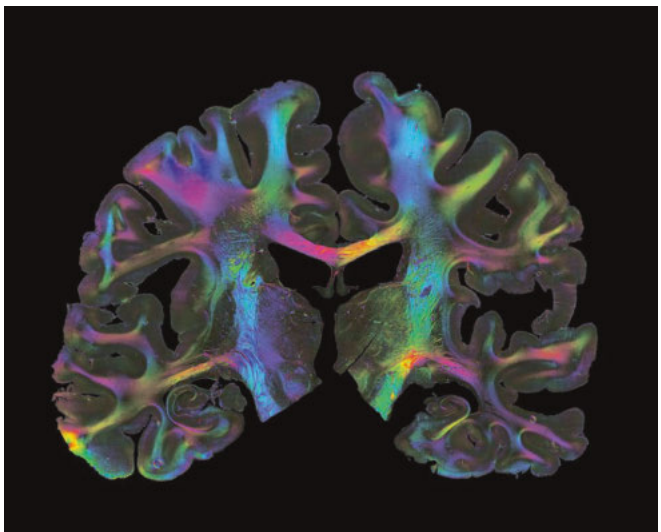
Ein zweiter Strang, der weit über die Neurowissenschaft hinausreicht, ist das neuromorphe Rechnen, bei dem Rechenschritte nach dem Vorbild des Gehirns nicht digital, sondern analog vonstattengehen. Von Anfang an dabei war BrainScaleS, das die elektrischen Signale echter Nervenzellen auf großen Chip-Wafern nachbildet. Einen alternativen Weg geht SpiNNaker, bei dem die Schaltkreise nach dem Vorbild des Gehirns aufgebaut sind und über kurze Signalspitzen kommunizieren. Aus ihm ging 2023 die Firma SpiNNcloud hervor, die in Energiewirtschaft, Städteplanung und Automobilindustrie tätig ist. Für Amunts ist das ein Musterfall dafür, wie aus dem Co-Design von Forschern und Entwicklern etwas entsteht, das die Grundlagenforschung weit hinter sich lässt.

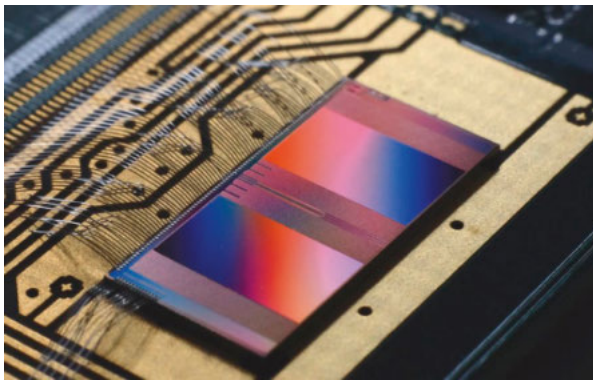
Über allem schwebt das Buzzword Künstliche Intelligenz. EBRAINS müsse „AI native" werden, fordert die Geschäftsführerin. Das hat zwei Seiten. Die Neurowissenschaft nutzt KI längst, um Bilder auszuwerten und Gehirne dreidimensional zu rekonstruieren. Umgekehrt ist das Gehirn selbst ein lehrreiches Vorbild: Mit 20 bis 30 Watt leistet es Dinge, an denen heutige Großrechner noch scheitern. Wer versteht, wie es organisiert ist, könnte auch bessere künstliche Netze bauen.

Im internationalen Vergleich sieht Amunts Europa in einer starken Position, gerade weil hier qualitativ hochwertige Daten in einer nicht profitorientierten Infrastruktur zusammenkommen. Die Dynamik der amerikanischen Techkonzerne und die massiven Investitionen Chinas lassen sich finanziell kaum kontern. Umso wichtiger sei es, die eigenen Stärken zu nutzen.

Bei aller Begeisterung mahnt Katrin Amunts auch zur Vorsicht. An der Schnittstelle von Hirnforschung, Technologie und Datenverarbeitung sieht sie erhebliches Missbrauchspotenzial, vom Neuro-Enhancement bis hin zur gezielten Beeinflussung über soziale Medien durch ein besseres Verständnis von kognitiven Prozessen. Offene Daten seien ein Wert für die Wissenschaft, ständen aber zugleich Unternehmen zur Verfügung, die sie instrumentalisieren könnten. Ihr Wunsch für die nächsten zehn Jahre ist deshalb weniger wissenschaftlich als gesellschaftlich: „Die Tiefen der Hirnorganisation besser zu erfassen, um daraus einen echten Nutzen für den Menschen zu schaffen." ■









EBRAINS sorgt dafür, dass Wissenschaftler aus ganz unterschiedlichen Forschungsbereichen ihre Daten austauschen können (links). Mit polarisiertem Licht kann man sichtbar machen, wie das Hirn „verdrahtet" ist (unten). Das lässt sich nutzen, um sogenannte neuromorphe Computerchips, wie hier von BrainScaleS (rechts oben), zu entwickeln, die das menschliche Gehirn nachahmen. Für Simulationen kommen Supercomputer wie der Jülicher JUPITER (rechts unten) zum Einsatz.

Aix-Marseille University | Markus Axer and Katrin Amunts, Forschungszentrum Juelich | Universität Heidelberg | Forschungszentrum Jülich / Ralf-Uwe Limbach

FAIR: Die Last mit den schweren Atomkernen



Zeitplan überschritten, Budgetgrenzen mehrfach gerissen und zuletzt noch ein Brand: FAIR ist das Sorgenkind der europäischen Kernphysik. Nun steht die Wundermaschine am GSI in Darmstadt endlich kurz vor der Vollendung – mit abgespecktem Forschungsprogramm, aber trotzdem weltweit einzigartigen Möglichkeiten.

von BERND MÜLLER

Erst hatte man kein Glück, dann kam auch noch Pech dazu. Am 5. Februar 2026 gab es einen Kurzschluss in der Hochspannungsversorgung des Linearbeschleunigers UNILAC am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GSI. Mehrere Hochfrequenzgeneratoren gingen in Flammen auf – und damit die Hoffnung auf einen fristgerechten Start des deutschen Prestigeprojekts FAIR. Denn der neue Ringbeschleuniger wird mit schweren Ionen aus dem UNILAC gefüttert. Schon vorher stand das Vorhaben in Darmstadt unter keinem guten Stern, der Termin für die Eröffnung war mehrfach verschoben worden. Statt wie geplant 2009 startete der Bau erst 2017. Der Brand war nur ein weiteres Hindernis auf dem steinigen Weg zum neuen Vorzeigebeschleuniger.

Einzigartiges Projekt mit Startproblemen

FAIR ist weltweit einzigartig. Das Herz der Anlage, das Supraleitende Schwerionen-Synchrotron SIS100, wird exotische Atomkerne und schwere Ionen produzieren, darunter Kerne mit einem extremen Verhältnis von Neutronen zu Protonen. Zum Beispiel Helium-8: Dieses leichte Nuklid hat zwei Protonen und sechs Neutronen, vier mehr als die stabile Variante.

Neutronenfutter für Atomkerne

Schwerere Kerne wie Gold oder Blei können sogar Dutzende Neutronen „zu viel“ haben. Solche Kerne zerfallen normalerweise in Bruchteilen von Sekunden. Aber nicht in Supernovae und Neutronensternen. Dort futtern sich die Atomkerne immer weitere Neutronen an und erzeugen exotische Materie. Wie das genau abläuft, weiß bisher niemand. FAIR wird Tausende Reaktionswege nachstellen und so herausfinden, wie dieser Neutronenspeck aufwächst.

Eines der Flaggschiff-Experimente von FAIR heißt CBM (Compressed Baryonic Matter). Dort wollen die Physiker extrem dichte Materie wie in einem Neutronenstern erzeugen. Dazu schießt der Beschleuniger Goldkerne auf ein Goldtarget. Kein Wunder also, dass Astronomen auf die Ergebnisse von FAIR heiß sind. Die können sie mit Messungen von Lichtsignalen und Gravitationswellen aus den Tiefen des Alls abgleichen und so ihre Theorien auf ein sicheres Fundament stellen.

Nicht nur Astronomen werden künftig einen Stopp in Darmstadt machen. SIS100 wird Teilchen mit Energien von zehn Gigaelektronenvolt pro Nukleon erzeugen, was der kosmischen Strahlung entspricht, der Astronauten auf dem Weg zum Mars ausgesetzt sind. Und künftige Fusionsreaktoren brauchen Materialien, die dem Teilchenbombardement aus dem Plasma standhalten. Mit Ionen aus FAIR kann man diesen Beschuss nachbilden.

Reibungsverluste im Management

Um alle diese Forschungsfragen zu beantworten, reicht das Geld nach heutigem Stand nicht aus. Ursache sei Missmanagement in der Anfangsphase vor gut zehn Jahren, meinen Kritiker. Thomas Nilsson, seit eineinhalb Jahren wissenschaftlicher Geschäftsführer von FAIR, möchte seine Vorgänger nicht kritisieren. „Das Projekt war nicht korrekt aufgesetzt“, sagt er. Nilsson hat die glei-





Die supraleitenden Magnete im SIS100-Tunnel (links) sollen die fast lichtschnellen Teilchen auf Bahn halten. Der UNILAC-Injektor (rechts) sorgt für die Anfangsbeschleunigung.

che Rolle auch beim gastgebenden GSI inne. In dieser Doppelfunktion sieht der schwedische Experimentalphysiker die Lösung der anfänglichen Probleme. Zu Beginn gab es zwei Geschäftsführungen – für FAIR und für GSI – mit jeweils zwei Geschäftsführern und wohl erheblichen Reibungsverlusten.

Die Kostensteigerung von ursprünglich 1,357 auf nun wohl 3,4 Milliarden Euro geht aber nicht allein auf das Konto des Managements. 2020 kam die Pandemie dazwischen, dann Russlands Krieg in der Ukraine. Russland ist in der Erforschung schwerer Ionen Weltspitze und sollte die supraleitenden Magnete für das Synchrotron liefern. Zwar ist das Land immer noch einer der neun Gesellschafter bei FAIR, die Zusammenarbeit wurde aber auf Eis gelegt. Unter Hochdruck hat das Management Ersatzlieferanten gefunden, das Startdatum verschob sich damit auf Ende 2027.

Für die beim Brand zerstörten Hochfrequenzgeneratoren gibt es keine so schnelle Lösung. Für eine Neuanschaffung fehlt schlicht das Geld. Also hat man kurzerhand die wissenschaftlichen Ziele umdefiniert, wie schon mehrfach in dem Projekt, wenn das Geld knapp wurde.

Nachschlag gesucht

Stand heute sieht der Plan so aus: Ende 2027 startet die Early Science Phase mit einem Rumpfprogramm. Der Supraleitende Fragment-Separator Super-FRS produziert exotische Atomkerne. Ende 2028 startet First Science mit dem Ringbeschleuniger SIS100. Bis dahin betätigt sich Thomas Nilsson als Inkasso-Experte. Einige Gesellschafter sind mit ihren Zahlungen im Rückstand. Gelingt es ihm, das Geld einzutreiben, kann die Phase First Science Plus starten, voraussichtlich 2029. Dann würde CBM in Betrieb gehen. Außerdem soll bis dahin die beim Brand beschädigte Injektorkette neu aufgebaut sein. Später ist First Science Plusplus geplant mit kleineren Ergänzungen. Dazu braucht es aber in jedem Fall einen finanziellen Nachschlag, den die Gesellschafter erbringen müssen.

Irgendwann in den 2030er-Jahren soll dann der Vollausbau stehen. Dafür gibt es einen Zeitplan, Geld hingegen noch nicht. Nilssons Nachfolger muss also viel Überzeugungsarbeit leisten. Der Vollausbau sieht den Bau von ein oder zwei Speicherringen vor, in denen exotische Ionen kreisen, bis sie zerfallen. Das erschließt neue Felder, von der Atomphysik bis zur Forschung mit Antiprotonen.

Konkurrenzlose Vielfalt

Egal, was FAIR tatsächlich leisten wird – wissenschaftlich ist das Projekt schon jetzt ein Erfolg. 3.000 Nutzer aus 50 Ländern arbeiten bereits an FAIR, um ihre Instrumente zu testen. Sie nutzen dafür zunächst die Atomkerne, die ihnen die alten Anlagen des GSI liefern. „In der Vielfalt der Möglichkeiten ist FAIR konkurrenzlos“, lobt Nilsson.

Angesichts der wackeligen Finanzierung liegt die Frage auf der Hand: Wer bezahlt was? Deutschland finanziert FAIR zu 70 Prozent, die nicht deutschen Gesellschafter den Rest. Die sollen später einen festgelegten Anteil tragen plus Nutzungsentgelte. Länder wie China oder Japan sind aber keine Gesellschafter. „Mit ihnen müssen wir die Beiträge noch abstimmen“, sagt Thomas Nilsson. Bei all den Verzögerungen ist dafür ja noch ausreichend Zeit. ■

Jan Hosan / GSI / FAIR (2)

Future Circular Collider:
Viel Geld für vage Pläne



70 Jahre lang eilte das Kernforschungszentrum bei Genf mit seinen immer größeren Teilchenbeschleunigern von Erfolg zu Erfolg. Jetzt könnte die Erfolgsgeschichte ein Ende haben. Ob der geplante 91-Kilometer-Riesenbeschleuniger FCC gebaut wird, ist ungewiss. Nicht nur die Kosten sind das Problem.

von BERND MÜLLER

Es wäre die größte Wissenschaftsmaschine, die die Menschheit je gebaut hat: ein kreisförmiger Tunnel von 91 Kilometern Umfang, 200 Meter unter dem Genfersee und französischen Weinbergen. Mit dem Future Circular Collider, kurz FCC, will das europäische Forschungslabor CERN die Erkenntnisgrenzen der Physik verschieben. Und die Budgetgrenzen. Für die veranschlagten 15,5 Milliarden Euro würde man in Deutschland schon einen Tiefbahnhof bekommen. Und das wäre nur die erste Ausbaustufe des FCC.

Im Mai 2026 hat der CERN-Rat grünes Licht gegeben. CERN-Generaldirektor Mark Thomson ist zuversichtlich: „In der Teilchenphysik-Gemeinschaft herrscht ein klarer Konsens, dass der FCC der richtige Weg ist." Eine von 1.500 Expertinnen und Experten durchgeführte Machbarkeitsstudie fiel ebenfalls positiv aus. Technische Hindernisse seien lösbar.

Während die technische Machbarkeit kaum umstritten ist, türmen sich die politischen und finanziellen Hürden. In einer zunehmend fragmentierten Welt, in der internationale Großprojekte schwerer denn je zu realisieren sind, steht das CERN vor der größten Herausforderung seiner Geschichte.

Plan B: der abgespeckte FCC

Woher das Geld kommen soll, ist die große offene Frage. Etwa die Hälfte des Budgets für die erste Phase müssten die Mitgliedsstaaten über ihre regulären Beiträge aufbringen. Thomson setzt darauf, dass die EU 2027 drei Milliarden Euro beisteuert. Einen ungewöhnlichen Beitrag gab es bereits: Im Dezember 2025 sagten private Geldgeber 860 Millionen Euro zu – für die Grundlagenforschung eine Summe in bislang ungekannter Größenordnung. Laut CERN wollen die Stiftung Breakthrough Prize des Silicon-Valley-Milliardärs Juri Milner, der Fonds Eric and Wendy Schmidt für strategische Innovation des ehemaligen Google-Vorstandsvorsitzen Eric Schmidt sowie der französische Telekommunikationsmagnat Xavier Niel Beiträge leisten. Trotzdem klafft weiter eine Lücke von über vier Milliarden Euro, die das CERN mit weiteren Spenden und Beiträgen von Nichtmitgliedsstaaten füllen möchte.

Für Marumi Kado, Direktor am Max-Planck-Institut für Physik, klingt die Herausforderung größer, als sie tatsächlich ist. „Der Großteil der 15 Milliarden Franken ist keine zusätzliche Finanzierung, das meiste davon ist bereits in den Budgets der Mitgliedsstaaten und Institutionen enthalten. Insgesamt lässt sich mit diesen Zusagen das veranschlagte Budget fast decken", so Kado.

Ohnehin soll der FCC in zwei Stufen gebaut werden, und das über mehrere Jahrzehnte. Zunächst soll in den 2040er-Jahren ein Elektron-Positron-Collider (FCC-ee) als „Higgs-Fabrik" dienen und etwa 15 Jahre lang hochpräzise Messungen am Higgs-Teilchen durchführen. In einer zweiten Phase, ab den 2070er-Jahren, würde dann ein Protonen-Collider (FCC-hh) installiert, der Kollisionsenergien von 100 Teraelektronenvolt erreichen soll – mehr als siebenmal so viel wie der heutige LHC.

Weil es unsicher ist, ob alle finanziellen Zusagen so eintreffen, hat das CERN einen Plan B in der Schublade.



So könnte der künftige Riesenbeschleuniger FCC aussehen. Doch die Kosten wären immens.

Illustration: PIXELRISE / CERN

Der abgespeckte FCC würde mit niedrigeren Energien betrieben und von vier auf zwei Detektoren abgespeckt. So ließen sich zwei Milliarden Schweizer Franken sparen. „Selbst der verkleinerte FCC ist den anderen Optionen wissenschaftlich immer noch überlegen“, verspricht Thomson.

Unberechenbare Partner

Ohne Mitgliedsstaaten von außerhalb Europas wird sich das Vorhaben kaum stemmen lassen. Einer der wichtigsten Partner ist weggebrochen: Russland, sogar im tiefsten Kalten Krieg ein zuverlässiger Mitstreiter, wurde nach dem Überfall auf die Ukraine ausgeschlossen. Ein schmerzhafter Verlust, denn das Land hatte wissenschaftlich, technisch und finanziell wichtige Beiträge geleistet.

Aus Peking kommen dagegen erfreulichere Signale. Der lange befürchtete chinesische Konkurrent – ein eigener Ringbeschleuniger von 100 Kilometern Umfang – ist vorerst vom Tisch, die Entscheidung darüber wurde auf 2030 verschoben. Stattdessen hat China signalisiert, beim FCC mitmachen zu wollen.

Auf Washington ist derzeit kein Verlass. Unter Präsident Trump wurde die Forschungsförderung mehrfach zusammengestrichen. Im Vergleich zu Künstlicher Intelligenz oder Quantentechnik rangiert die Teilchenphysik in der Gunst des Weißen Hauses weit hinten. Dabei sind die USA für das CERN alles andere als ein Randspieler: Zwar gehören sie dem Labor nicht als Mitglied an, doch mit rund 1.700 Wissenschaftlern stellen sie die größte nationale Gruppe vor Ort und haben über die Jahre immer wieder Geld in einzelne Experimente gesteckt.

Zum Bau des LHC steuerten die USA rund 531 Millionen Dollar bei, etwa 200 Millionen für Beschleunigerkomponenten, den Rest für die beiden großen Detektoren ATLAS und CMS. Auch beim aktuellen HiLumi-Umbau kommt zentrale Technik aus den USA: Amerikanische Labore bauen die neuartigen supraleitenden Fokussiermagnete aus Niob-Zinn. Doch beim FCC ist ein Engagement in ähnlicher Größenordnung bislang offen – weil die Teilchenphysik in Washington derzeit einen schweren Stand hat.

Neue Physik? Ungewiss!

Ungewohnt für CERN-Fans ist, dass es erstmals in der Geschichte Zweifel an der wissenschaftlichen Sinnhaftigkeit des Experiments gibt. Frühere Beschleuniger wie der Large Electron-Positron Collider (LEP) ab den späten 1980er-Jahren und aktuell der Large Hadron Collider (LHC) haben immer etwas gefunden, einen ganzen Zoo neuer Teilchen, die heute das Standardmodell bevölkern.

Doch seit der Jahrtausendwende wurden die Erfolgsmeldungen dünner. Das Higgs-Teilchen, das 2012 am LHC nachgewiesen wurde, war der letzte Meilenstein. Peter Higgs hatte es schon 1964 vorhergesagt. Seitdem sind alle vom Standardmodell der Teilchenphysik geforderten Elementarteilchen experimentell nachgewiesen. Und es ist völlig ungewiss, ob man mit extrem teuren Investitionen und siebenfach höherer Energie etwa Hinweise auf neue, unbekannte Teilchen finden könnte. Das würde bedeuten, dass es eine Physik jenseits des Standardmodells gibt, und könnte vielleicht erklären, was es mit der Dunklen Materie im Kosmos zu tun hat. Diese ist bislang völlig unverstanden. Es ist allerdings völlig ungewiss, ob ein riesiger Teilchenbeschleuniger wie der FCC auch nur ein kleines bisschen Licht auf die Dunkle Materie werfen kann – eine offene Wette mit sehr hohem Einsatz.

Im März 2026 wurde die Entdeckung eines neuen protonenähnlichen Teilchens mit ungewöhnlichen Bestandteilen gehypt. Trotz seiner Seltenheit ist dieses Teilchen allerdings vollständig vom Standardmodell abgedeckt. Ist es ein Zufall, dass das nur wenige Wochen vor der Sitzung des CERN-Rats zum FCC bekannt gegeben wurde?

Wirklich „neue Physik“ wie supersymmetrische Partikel oder Hinweise auf Dunkle Materie, die schon mit dem LHC versprochen wurde, ist bisher Fehlanzeige. Und dass am CERN Anfang der 1990er-Jahre das World Wide Web erfunden wurde, taugt heute nur noch als Anekdote, aber nicht als Argument für milliardenschwere Investitionen.

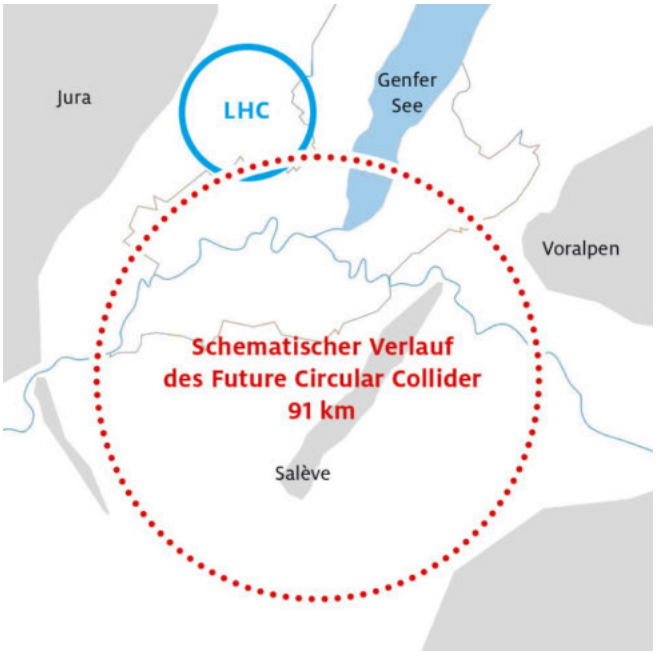
Die Teilchenphysikerin Fabiola Gianotti hält dagegen. In einem Nature-Beitrag vom Februar 2024 gab die ehemalige Generaldirektorin des CERN zwar zu, dass es derzeit an theoretischen Wegweisern fehle, sie verwies aber darauf, dass neue Instrumente die Forschung stets voranbrächten und es erlaubten, der Natur die richtigen Fragen zu stellen. Es könnte also sein, dass der FCC neue Forschungsfragen aufwirft und sogar beantwortet. Oder auch nicht. Klingt nach dem Prinzip Hoffnung.

Was, wenn der FCC wissenschaftlich hinter den Erwartungen zurückbleibt? Auch dafür hat Costas Fountas, Präsident des CERN-Rats, Argumente im Ärmel. Es stehe mehr auf dem Spiel als die Zukunft der Physik. „Es geht um die Führungsrolle in der Hochenergiephysik und um die besten fünf Prozent der Wissenschaftler, die bereit sind, überall hinzugehen, um diese Forschung zu betreiben.“

Die FCC-Machbarkeitsstudie hebt außerdem die technologischen Entwicklungen hervor, die vom Projekt ausgehen würden: Teilchenbeschleuniger könnten als Pilotprojekte für die Markteinführung neuer Technologien dienen, etwa von Hochtemperatur-Supraleitern – wie schon bei früheren Beschleunigern.

Gegenwart und Zukunft: die weltstärksten Teilchenbeschleuniger

Der derzeit größte Teilchenbeschleuniger LHC (blauer Ring) wirkt trotz seiner Dimensionen geradezu bescheiden gegenüber dem geplanten FCC (rot). Ob dieser gebaut werden kann, ist derzeit unklar. Nicht nur bei der Finanzierung sind viele Fragen offen, obwohl viele Teilchenphysiker den Bau befürworten.



Die Brücke: Der High-Luminosity LHC

Am 30. Juni 2026 ging der Large Hadron Collider für vier Jahre in die Betriebspause und wird nun zum High-Luminosity LHC (HiLumi LHC) umgebaut. Der Umbau kostet über eine Milliarde Euro. Der erneuerte Beschleuniger soll dann insgesamt zehnmal so viele Daten liefern wie der bisherige LHC. Der Trick: Man bündelt die beiden gegenläufigen Teilchenstrahlen am Kollisionspunkt enger, damit häufiger je zwei Teilchen aufeinandertreffen. Das verlangt stärkere Magnetfelder, also den Tausch zahlrei-



Das erste neuartige Strahlabschirmrohr für den HiLumi-LHC wird in eine Magnetbaugruppe eingesetzt.

cher supraleitender Magnete, und einen Ausbau der Kühlung, die diese Magnete auf knapp minus 270 Grad Celsius herunterkühlt.

Nach einer ausführlichen Testphase soll die neue Version des Beschleunigers frühestens 2029 mit den Experimenten beginnen und bis etwa 2040 laufen. Das HiLumi-Projekt war von Anfang an als Brücke gedacht: Es soll das CERN an der Spitze der wissenschaftlichen Forschung halten, während die Vorarbeiten für den FCC laufen.

Doch selbst dieses Projekt ist bereits von geopolitischen Spannungen betroffen. Wegen einer geplanten Kürzung der britischen Fördermittel für Teilchenphysik um 30 Prozent strich die Förderorganisation STFC Ende 2025 ihren Beitrag zum Upgrade des LHCb-Experiments. Ohne die britische Beteiligung müsste dieser Detektor, der die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie erforscht, seinen Betrieb voraussichtlich schon 2033 einstellen – und könnte die teuer erkaufte HiLumi-Phase gar nicht mehr nutzen. Denn ab 2033 soll der HiLumi-LHC mit voller Kraft laufen.

Und wenn man keine neuen Teilchen findet?

Ganze Physiker-Generation betroffen

Der CERN-Rat strebt eine endgültige Entscheidung für den FCC bis 2028 an. Bei einer Genehmigung könnten die Aushubarbeiten um 2033 beginnen, sodass der Future Circular Collider bis 2046 betriebsbereit wäre – kurz nachdem der High-Luminosity LHC das Ende seiner Laufzeit erreicht. Diese Kontinuität wäre auch deshalb entscheidend, um das hoch spezialisierte Personal an den Standort zu binden.

In den nächsten zwei Jahren entscheidet sich also, ob der FCC die Hochenergiephysik in die Zukunft führt oder ob die lange Ära der europäischen Teilchenphysik nun von einer chinesischen Führungsrolle abgelöst wird. Dem CERN war schließlich etwas geglückt, das in vielen Bereichen der Wissenschaft und Technologie sonst in umgekehrter Richtung läuft: Die jahrzehntelange dominierende Stellung der USA in der Teilchenphysik zu brechen und selbst zur weltweit führenden Anlaufstelle für hochtalentierte Wissenschaftler zu werden. Die Entscheidung hat Auswirkungen auf eine ganze Generation von jungen Physikern, die gerade an den Unis studieren. Falls das CERN die Finanzierung sichern und das Projekt starten könne, werde es eine neue Generation von Teilchenphysikern nach Genf locken, verspricht Thomson.

Diejenigen, die heute die Entscheidungen bezüglich des FCC treffen, werden die Fertigstellung des gesamten Projekts wahrscheinlich nicht mehr in aktiver Rolle miterleben. Marumi Kado vom Max-Planck-Institut für Physik betont: „Deshalb werden viele junge Wissenschaftler bewusst schon in einem frühen Stadium in die Planung einbezogen.“ ■

BDW-Grafik / Ricardo Rio Ribero Martins; Quelle: CERN | Florence Elizabeth Thompson / CERN

Quantenzustände klonen: unmöglich, aber möglich

Wenn ich nachts nicht schlafen kann, mache ich mir gern Gedanken darüber, was in der Serie Star Trek mit Captain Kirk passiert, während Ingenieur Scotty ihn mit dem Transporter vom Raumschiff Enterprise auf einen fremden Planeten beamt. Konzeptionell gibt es hierfür zwei grundlegende Möglichkeiten: Entweder der Transporter verwandelt die Materie, aus der Kirks Körper besteht, in reine Information, sendet diese Information an den neuen Ort und setzt den Körper dort wieder zusammen. Oder der Transporter erstellt lediglich einen extrem detaillierten Scan von Kirks Körper und erschafft anhand der Scandaten am Zielort einen komplett neuen Kirk, der eine exakte Kopie des alten ist.



Sabine Hossenfelders **STICHPROBEN**

„Wissenschaft ohne Kauderwelsch: so einfach wie möglich, aber nicht einfacher. Kein Hype und keine Scheu vor unangenehmen Wahrheiten." Mit diesem Grundsatz hat sich Sabine Hossenfelder als Wissenschaftskommunikatorin international einen Namen gemacht. Die promovierte Physikerin betreibt einen YouTube-Kanal mit derzeit 1,7 Millionen Abonnenten.

Egal, welche Variante man wählt: Damit nach dem Beamen nicht plötzlich zwei Kirks vorhanden sind – das Original auf der Enterprise und die Kopie auf dem Planeten –, muss das Original bei dem Vorgang vernichtet werden. Da kommt es also gerade recht, dass in der Quantenphysik ohnehin das sogenannte „No-Cloning-Theorem" gilt. Es besagt, dass man einen Quantenzustand nicht kopieren kann, ohne das Original zu zerstören. Der springende Punkt ist dabei nun, dass auf mikroskopischer Ebene letztlich alles aus Quanteninformationen besteht – einschließlich Ihnen und mir. Und Kirk. Nach dem Theorem kann es also ohnehin immer nur einen einzigen echten Kirk geben.

Doch nun berichtet eine Gruppe von Physikern um Koji Yamaguchi auf dem Preprint-Server arXiv, dass sie einen Weg um das No-Cloning-Theorem herum gefunden hat. Entgegen unserer bisherigen Annahmen können Quanteninformation demnach doch perfekt kopiert werden. Haben sich Physiker also ein halbes Jahrhundert lang geirrt? Und wird dies Quantencomputer endlich praxistauglich machen? Schauen wir uns das mal an.

Die Theorie des Theorems

Das No-Cloning-Theorem ist wahrscheinlich eines der grundlegendsten Theoreme der Quantenphysik. Es wurde erstmals Anfang der 1980er-Jahre bewiesen. In der Geschichte der Quantenphysik ist es also gewissermaßen ein Nachzügler. Und wie bereits erwähnt, besagt es, dass es unmöglich ist, eine identische, unabhängige Kopie eines unbekannten Quantenzustands zu erzeugen.

Warum das so ist, lässt sich eigentlich recht einfach zeigen – zumindest „einfach" im Vergleich zu vielen anderen Formelschlachten in der Physik. Man muss dazu nur wissen, dass in der Quantenphysik alles durch Wellenfunktionen beschrieben wird. Sie geben an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich ein Teilchen an einem bestimmten Ort im Raum befindet. Für unser Beispiel nehmen wir zwei solcher Wellenfunktionen und nennen sie schlicht A und B.

Nehmen wir nun an, Sie wollen wissen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich ein Teilchen mit der Wellenfunktion A tatsächlich verhält, als hätte es die Wellenfunktion B. Zugegeben, das klingt etwas rätselhaft. Was bedeutet es, dass sich eine Wellenfunktion wie eine andere Wellenfunktion verhält? Stellen Sie sich dazu Folgendes vor: Sie suchen auf dem Parkplatz des Autoverleihers nach Ihrem Mietauto, Sie haben aber keinen blassen Schimmer, wo es steht. Die Wellenfunktion A für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Autos ist demnach über den gesamten Parkplatz ausgedehnt. Und nun möchten Sie wissen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Auto zufällig auf dem Parkplatz direkt neben Ihnen steht – was durch die Wellenfunktion B beschrieben wird. Physiker können die Lösung berechnen, indem sie das Quadrat des Produkts dieser



Illustration: erstellt mithilfe der Adobe-Firefly-KI

Wellenfunktionen bilden. Keine Sorge, was genau das heißt und wie das geht, ist an dieser Stelle egal.

Zurück zum No-Cloning-Theorem: Wenn man eine Wellenfunktion klonen wollte, bräuchte man eine Art Klonapparat. In diesen würde man die Wellenfunktion A hineingeben sowie gleichzeitig einen Platzhalter „0“ für die Kopie, die man produzieren möchte. Also: A und 0 gehen hinein. Das ursprüngliche A und das kopierte A kommen heraus. Damit die Klonmaschine nach den Regeln der Quantenphysik funktioniert, müssten beim Vorgang des Klonens die vorhandenen Wahrscheinlichkeiten erhalten bleiben.

Doch das verursacht ein Problem, sobald wir eine zweite Wellenfunktion B hinzunehmen. Also: B und 0 gehen hinein. Das ursprüngliche B und das kopierte B kommen raus. Diese Operation muss nun alle Wahrscheinlichkeiten erhalten – insbesondere die Wahrscheinlichkeit, dass A und 0 genauso erscheint wie B und 0. Außerdem müssen nach dem Klonen A und A genauso erscheinen wie B und B. Letztlich erhält man daraus die Bedingung, dass der Betrag des Produkts von A und B äquivalent zum Quadrat des Produkts von A und B sein müsste. Für die meisten Zustände trifft das jedoch schlicht nicht zu. Also kann die Klonmaschine nicht existieren.

Verschlüsseltes Kopieren

Die Autoren des neuen Papers sagen jedoch, dass es dafür einen eleganten Ausweg gibt. Sie zeigen, dass man – entgegen dem, was wir die ganze Zeit angenommen haben – tatsächlich perfekte Kopien eines unbekannten Quantenzustands herstellen kann, etwa eines Quantenbits, wie es in Quantencomputern genutzt wird. Man muss dazu lediglich sicherstellen, dass immer nur eine der Kopien ausgelesen werden kann. Dies kann erreicht werden, indem beide Kopien simultan verschlüsselt werden. Und dieser Kniff ist nicht nur eine theoretische, mathematische Spielerei: Die Forschenden haben tatsächlich gezeigt, dass dies auf einem IBM-Quantencomputer mit etwa 150 Qubits in der Praxis funktioniert.

Um das klarzustellen: Koji Yamaguchi und sein Team haben keinen Fehler im No-Cloning-Theorem gefunden. Vielmehr haben sie sowohl mathematisch als auch experimentell gezeigt, dass der Lehrsatz tatsächlich nicht so stark einschränkend ist, wie wir dachten. Nun könnte man natürlich vermuten, dass die Ergebnisse einfach auf Pfusch beim Experiment oder mathematische Stümperei zurückzuführen sind. Doch aus meiner Sicht leisten sich die Forschenden hier keine Schwächen und erfüllen alle meine Kriterien für eine gelungene Publikation: gute Mathematik, gutes Experiment, gute Interpretation. Sabine ist einverstanden.

Was bedeutet das? Erstens bedeutet es, dass wir überdenken müssen, was wir über Quanteninformation zu wissen glaubten. Und zweitens könnte es praktische Anwendungen für die Entwicklung besserer Quantencomputer haben: Ein Forschungsschwerpunkt liegt hierbei darauf, Rechenfehler zu vermeiden, die sich aus der fundamentalen Funktionsweise dieser Geräte ergeben. Die naheliegendste Lösung dafür bestünde darin, mehrere Kopien der Quantenzustände anzulegen und mit allen Kopien dieselben Berechnungen auszuführen. Aufgrund des No-Cloning-Theorems funktioniert das jedoch nicht einfach so. Möglicherweise könnte die Arbeit von Yamaguchi und seinem Team langfristig zu besseren Algorithmen für Quantencomputer führen, sodass wir sie früher sinnvoll nutzen können, als wir erwartet haben.

Und vielleicht steckt in den neuen Erkenntnissen auch noch eine weitere Lektion, die ich in analoger Form auch von meinem Steuerberater gelernt habe: Wenn man die Regeln nur präzise genug befolgt, kann man genau das tun, von dem einem gesagt wurde, dass man es nicht tun kann.

Das Video zum Thema (in englischer Sprache) finden Sie hier: **a.kon2.de/26091**

TechRadar

Jeden Monat Aktuelles aus Forschung und Entwicklung:
Neue Methoden, innovative Materialien und effiziente Lösungen

Testkit für maßgeschneiderten Biokunststoff

Gelatine ist ein vielseitig anwendbares Material und eine Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen. Ähnlich wie bei der Herstellung von Plastik lassen sich dessen Materialeigenschaften wie Härte oder Form durch das Beimischen weiterer Stoffe entsprechend anpassen. Häufig ist es für Firmen aber zu aufwendig, das Biomaterial für ihre Produkte selbst zu testen. Forscher vom Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB haben daher nun Reaktoren entwickelt, worin sich Bemusterungsproben qualitativ hochwertiger Biokunststoffe aus Gelatine fertigen lassen.



Diese ermöglichen es, die Materialeigenschaften der Gelatine zu modifizieren und gleichzeitig die währenddessen ablaufenden Reaktionen zu überwachen. Das Testkit erfasst selbstständig relevante Reaktionsparameter wie die Temperatur, den pH-Wert oder die Menge zudosierter Stoffe. Dadurch laufen Reaktionen möglichst kontrolliert ab, und der Biokunststoff lässt sich mit einer konstanten Qualität herstellen. Den Forschern gelang es, 100 Gramm modifizierte Gelatine zu fertigen, ausreichend für Bemusterungen und Produkttests. Die Reaktoren werden nun Unternehmen bereitgestellt, um das alternative Biopolymer evaluieren zu können, ohne dabei eigene Entwicklungsprozesse aufbauen zu müssen.

GELATINE FÜR DIE INDUSTRIE

Gelatine kommt nicht bloß bei der Lebensmittelproduktion für die Formfestigkeit von Gummibärchen, Sahne und Co. zum Einsatz. Auch andere Industriebranchen nutzen das aus Proteinen bestehende Biopolymer, meistens als Kunststoff, zur Beschichtung, aber auch als Trägermaterial für andere Stoffe. In der Pharmazie verwendet man Gelatine für die Herstellung von Kapseln. Beim Geigenbau lässt sie sich als Beschichtung auf das Holz auftragen. Und in der Medizin kann sie als Hydrogel dabei helfen, Entzündungen zu reduzieren und Verletzungen schneller zu heilen. Der Biokunststoff besitzt entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Kunststoffen; er ist biologisch abbaubar und oft auch essbar.

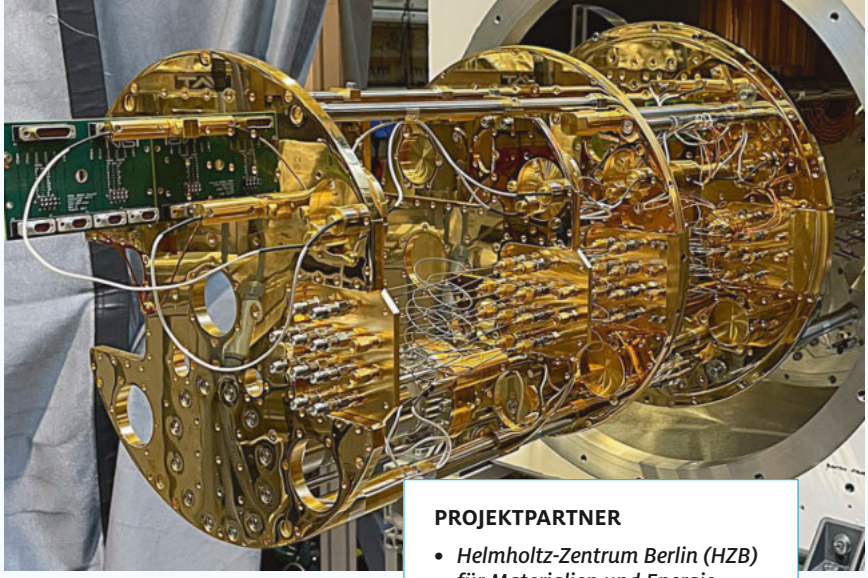
Stickstoffrückgewinnung in Kläranlagen

Um Gewässer künftig noch besser vor Verschmutzung zu schützen, müssen Kläranlagen nach einer neuen EU-Richtlinie ab August 2027 rund 40 Prozent mehr Stickstoff und 50 Prozent mehr Phosphor aus kommunalem Abwasser entfernen als bisher. Forschende der Universität Ulm testen deshalb gemeinsam mit dem Zweckverband Klärwerk Steinhäule in Neu-Ulm eine Pilotanlage, die Ammonium gezielt aus dem Abwasser entfernt und den enthaltenen Stickstoff zurückgewinnt. Dafür wird Ammoniak mithilfe von Wasserdampf aus dem ammoniumhaltigen Prozesswasser des Klärschlamms abgetrennt und zu konzentriertem Ammoniakwasser aufbereitet – ein Verfahren, das Dampfstrippung bezeichnet wird. Im gereinigten Abwasser verbleibt nur ein geringer Rest, der anschließend biologisch entfernt wird. Das gewonnene Ammoniakwasser lässt sich als Rohstoff weiterverwenden, etwa zur Abtrennung von CO_2 aus industriellen Abgasen. Die seit Mai 2026 laufende Pilotanlage soll nun zeigen, ob sich das Verfahren im großtechnischen Maßstab für kommunale Kläranlagen einsetzen lässt.

PROJEKTPARTNER

- *Universität Ulm*
- *Zweckverband Klärwerk Steinhäule*
- *Iludest GmbH*

Hochempfindliches Röntgenspektrometer geht in Betrieb



An der Forschungsanlage BESSY II in Berlin ist europaweit das erste Messinstrument in Betrieb gegangen, mit dem sich ultradünne Proben mit Röntgenstrahlen analysieren lassen. Die Inbetriebnahme des Geräts erweitert die Grundlagenforschung an Materialien, die nur wenige Atomlagen dick sind. Entwickelt wurde das Röntgenspektrometer vom HZB, dem MPI für Chemische Energiekonversion in Mülheim an der Ruhr sowie dem NIST in den USA.

Der supraleitende TES-Array-Photonendetektor ist in der Lage, Lichtteilchen bis zu 1000-mal effizienter zu messen als herkömmliche Röntgenspektroskope. Diese Effizienz ermöglicht es, hauchdünne Materialien wie das zweidimensionale Graphen genauer zu untersuchen.

Weltweit existierten bislang fünf dieser hochpräzisen Messgeräte: vier davon in den USA und eines in Japan.

Herkömmliche Techniken der Röntgenspektralanalyse sind deutlich weniger empfindlich. Damit bei einer Messung mit konventionellem Gerät genügend Photonen zur Analyse gesammelt werden, müssen die Proben ausreichend dick beziehungsweise dicht sein. Daher war es an BESSY II bisher nicht möglich, atomare Monoschichten, andere Nanostrukturen oder Moleküle in Lösungen per Röntgenspektroskopie zu untersuchen. Das neue Gerät bietet nun tiefere Einblicke in die Chemie einzelner Moleküle und macht es möglich, die elektronischen Eigenschaften von ultradünnen Materialien weiter zu erforschen. Bei der Röntgenspektroskopie bestrahlen Forscher Materialproben mit Röntgenlicht, welches zum Beispiel an einer Synchrotronanlage wie BESSY II entsteht. Die Proben absorbieren die Röntgenstrahlen und senden darauf selbst Licht aus. Aus dessen Spektrum lassen sich fundamentale Erkenntnisse über die Proben gewinnen.

PROJEKTPARTNER

- *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) für Materialien und Energie*
- *Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion (MPI CEC)*
- *National Institute of Standards and Technology (NIST), USA*

Grüner Kalk durch CO_2-Recycling

Die Herstellung von Kalk für die Baustoffindustrie ist energie- und emissionsintensiv. Beim Brennen von Kalkstein wird CO_2 direkt aus dem Rohstoff freigesetzt, sodass die Abgase aus Kalkwerken häufig einen CO_2-Anteil von mehr als 40 Prozent aufweisen. Forschende des Fraunhofer-Instituts für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) haben deshalb ein Verfahren entwickelt, das einen Membranreaktor mit einem abgedichteten elektrischen Ofen kombiniert. Das Verfahren folgt dem Prinzip der Carbon Capture and Utilization (CCU): Statt das abgeschiedene CO_2 in die Atmosphäre abzugeben, wird es als Rohstoff weiterverwertet. Der entscheidende Schritt läuft dabei im Reaktor ab: Mithilfe von grünem Wasserstoff wird das CO_2 in Methan umgewandelt. Anschließend wird das Methan durch Pyrolyse in Wasserstoff und elementaren Kohlenstoff zerlegt. Während der Wasserstoff in den Prozess zurückgeführt wird, kann der Kohlenstoff beispielsweise in der chemischen Industrie oder als Düngemittelzusatz in der Landwirtschaft genutzt werden.



PROJEKTPARTNER

- *Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)*
- *HySON – Institut für Angewandte Wasserstoffforschung Sonnenberg gGmbH*
- *Johann Bergmann GmbH & Co*

Fraunhofer IGB | Régis Decker / HZB | Timo Lutz / Team für Industriefotografie

Roboter „Ameca“

Sein Blick lässt uns nicht los

Der Moment der Begegnung fasziniert: Ameca blinzelt, runzelt die Stirn, hebt die Augenbrauen und ein Lächeln umspielt die Mundwinkel. Die Bewegungen wirken vertraut, beinahe menschlich. Er reagiert auf sein Umfeld und führt nahezu ohne Verzögerung Gespräche mit herantretenden Personen. Zwar erinnert die silbrig-graue Oberfläche daran, dass das Gegenüber eine Maschine ist. Doch die gesamte Interaktion ist so überzeugend, dass man den 2021 von der britischen Firma Engineered Arts vorgestellten Roboter als einen aktiven sozialen Akteur wahrnimmt. Mit Ameca rückte die Vision einer Maschine, die dem Menschen nicht nur dient, sondern ihm auf Augenhöhe begegnet, erstmals in greifbare Nähe: ein Meilenstein der Entwicklung sozialer Roboter.

Ein Jahrhundert der Robotik

Die Geschichte der Robotik begann nüchtern. Nachdem der Begriff „Roboter“ in den 1920er-Jahren geprägt worden war, hielten vier Jahrzehnte später Industrieroboter Einzug in Fertigungshallen. Präzise und unermüdlich schweißten, montierten und lackierten sie, immer isoliert und fernab von jeder sozialen Interaktion. In Forschungslaboren entwickelte sich in den folgenden Jahrzehnten eine andere Perspektive. Dort entstanden Prototypen, die darauf programmiert waren, soziale Signale zu erkennen und auf Sprache, Gestik und Mimik zu reagieren. In den 1990er-Jahren wurde aus der Mensch-Roboter-Interaktion ein eigenes Forschungsfeld. Psychologie, Informatik und Ingenieurwissenschaften arbeiteten zunehmend zusammen.

Ameca ist ein sichtbares Ergebnis dieser Entwicklung. Siebzehn Servomotoren im Gesichtsbereich ermöglichen subtile Bewegungen von Stirn, Augenbrauen, Augenlidern, Wangen und Lippen. Im Zusammenspiel erzeugen die Motoren Gesichtsausdrücke von bemerkenswerter Komplexität. Dadurch verschwimmt erstmals die Grenze zwischen mechanischer Imitation und emotional wirkender Kommunikation. Künstliche Intelligenz analysiert Gespräche in Echtzeit und die Anbindung an ChatGPT ermöglicht natürliche Dialoge. Entscheidend ist dabei weniger die reine Sprachfähigkeit als die physische Präsenz. Kameras in den Augen führen zu direktem Blickkontakt und verstärken die Illusion echter Aufmerksamkeit. Damit unterscheidet sich der Roboter eindeutig von rein virtuellen Assistenten. Trotz der verblüffend menschlichen Mimik bleibt er von der Hüfte abwärts unbeweglich und damit körperlich stark eingeschränkt.

Als Forschungsplattform ist Ameca kein abgeschlossenes System, denn die modulare Konstruktion erlaubt kontinuierliche Verbesserungen. Die Hersteller verstehen den Roboter als Werkzeug, um die Reaktion auf künstliche Gesichter zu untersuchen. So soll etwa wissenschaftlich erforscht werden, welche mimischen Signale Vertrauen fördern und wie sich nonverbale Kommunikationsformen gestalten lassen, ohne als manipulativ wahrgenommen zu werden.

Am Rand des unheimlichen Tals

Ein zentrales Phänomen bei humanoiden Robotern ist das „Uncanny Valley“, das unheimliche Tal. Der japanische Forscher Masahiro Mori beschrieb 1970, dass menschenähnliche Objekte zunächst Sympathie auslösen, bei zu großer Ähnlichkeit jedoch Unbehagen erzeugen können. Ameca bewegt sich bewusst am Rand dieses Tals: menschenähnlich genug, um eine emotionale Reaktion auszulösen, und zugleich maschinell genug, um keine unheimliche Täuschung zu

Deutsches Museum
NÜRNBERG

Das Deutsche Museum Nürnberg – Das Zukunftsmuseum – widmet sich seit 2021 Zukunftstechnologien und ihren möglichen Folgen. Fünf Ausstellungsbereiche, ein Forum und Labore laden zum Staunen, Mitmachen und Nachdenken über die Welt von morgen ein.

erzeugen. Er bleibt erkennbar eine Maschine und gewinnt dadurch an Akzeptanz.

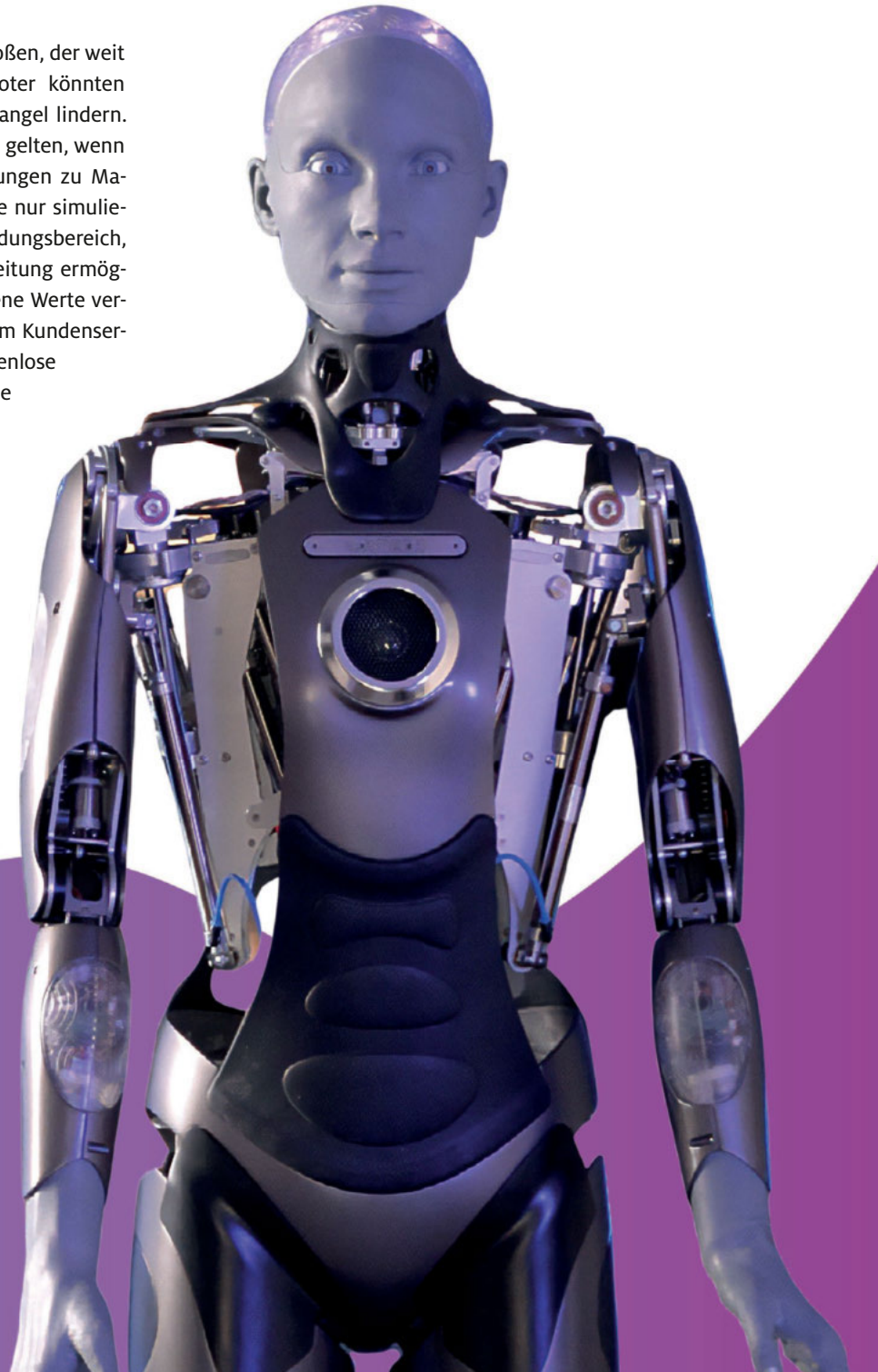
Kulturell knüpft Ameca an eine lange Tradition an. Seit Jahrhunderten erzählen Mythen und später die Science-Fiction von künstlichen Menschen. Die Figuren spiegeln Hoffnungen und Ängste zugleich. Anders als seine fiktionalen Vorbilder ist Ameca kein autonomes Wesen mit eigenem Bewusstsein: Der Roboter bleibt in unserer Wahrnehmung ein technisches System, gesteuert durch Code und Sensorik. Doch die äußere Erscheinung fordert uns heraus, über Verantwortung und Gestaltung nachzudenken.

Ein Blick in die Zukunft

Gesellschaftlich wird damit ein Diskurs angestoßen, der weit über Technik hinausreicht. Humanoide Roboter könnten beispielsweise in der Pflege den Fachkräftemangel lindern. Offen bleibt jedoch, welche ethischen Grenzen gelten, wenn pflegebedürftige Menschen emotionale Bindungen zu Maschinen entwickeln, die Empathie und Gefühle nur simulieren. Ein ähnliches Dilemma zeigt sich im Bildungsbereich, wo soziale Roboter individualisierte Lernbegleitung ermöglichen könnten: Es bleibt zweifelhaft, ob sie jene Werte vermitteln können, die sie selbst nicht besitzen. Im Kundenservice versprechen humanoide Systeme grenzenlose Geduld und ständige Verfügbarkeit. Doch die gesteigerte Effizienz hat ihren Preis. Sie ersetzen menschliche Arbeitskräfte, während die gesellschaftlichen Folgen dieses Wandels noch weitgehend offen sind.

Während technische Entwicklungen schnell voranschreiten, hinken rechtliche Rahmenbedingungen und ethische Leitlinien hinterher. Ameca ist Realität und keine Science-Fiction mehr. Die Herausforderung liegt in der Gesellschaft: Welche Rolle sollen soziale Roboter in Zukunft spielen? Wo unterstützen sie sinnvoll, wo schaden sie? Ob die Maschinen eines Tages selbstverständlich zum Alltag gehören, bleibt abzuwarten. Aber Ameca ist schon heute Ausgangspunkt einer wichtigen Zukunftsdebatte über das Zusammenleben von Mensch und Maschine.

Jana Grasser
Kuratorin für die Themenbereiche Arbeit und Alltag und System Stadt am Deutschen Museum Nürnberg



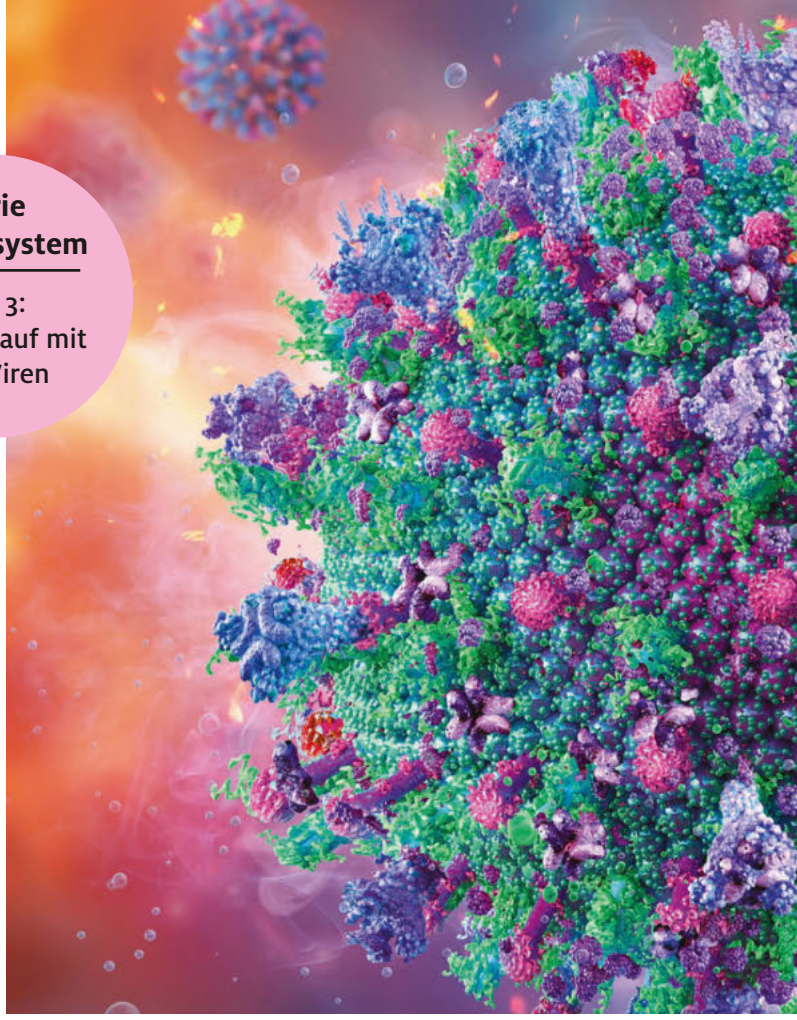
Deutsches Museum Nürnberg / Boris Brackrock

Ameca läutete 2021 eine neue Ära der sozialen Robotik ein und stellt dabei viele Vorgänger in den Schatten.

Serie Immunsystem

Teil 3: Im Wettlauf mit den Viren

Trick-reiche Viren



Wie Retroviren unser Erbgut hacken, sich Influenzaviren neu erfinden und Bakteriophagen zur Antibiotika-Alternative werden könnten.

von KRISTINA HOPFENSPERGER

Viren drangsalieren Menschen schon lange. Den ältesten direkten Nachweis von Menschen infizierenden Viren haben Forschende der Universität São Paulo in über 50.000 Jahre alten Neandertaler-Knochen entdeckt. Sie fanden Hinweise auf drei Virusgruppen, die moderne Menschen heute noch infizieren: Adeno-, Herpes- und Papillomaviren.

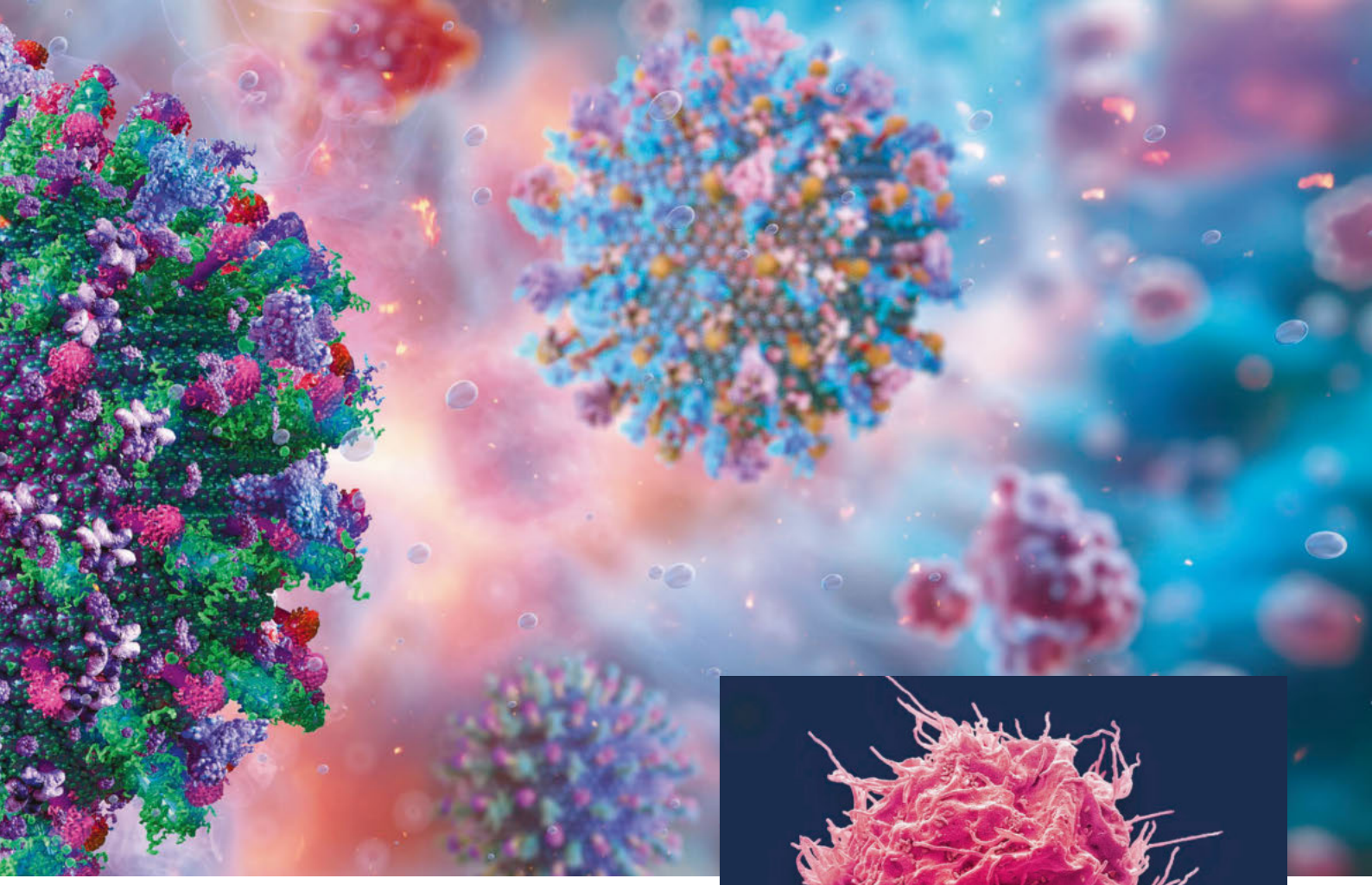
Heute wissen wir: Es gibt Millionen verschiedene Viren. Sie unterscheiden sich in ihrem Aussehen, ihrem bevorzugten Wirt und dem Krankheitsbild, das sie auslösen. Trotzdem haben alle Viren einige Eigenschaften gemeinsam: Viren sind infektiöse intrazelluläre Parasiten. Sie können sich nicht selbstständig vermehren, sondern benötigen dafür eine geeignete Wirtszelle. Grob gesagt sind Viren nur eine Kapsel, die das Virus-Erbgut enthält. Manche Viren umgibt zusätzlich eine Hülle, die aus der Zellmembran der Wirtszelle besteht.

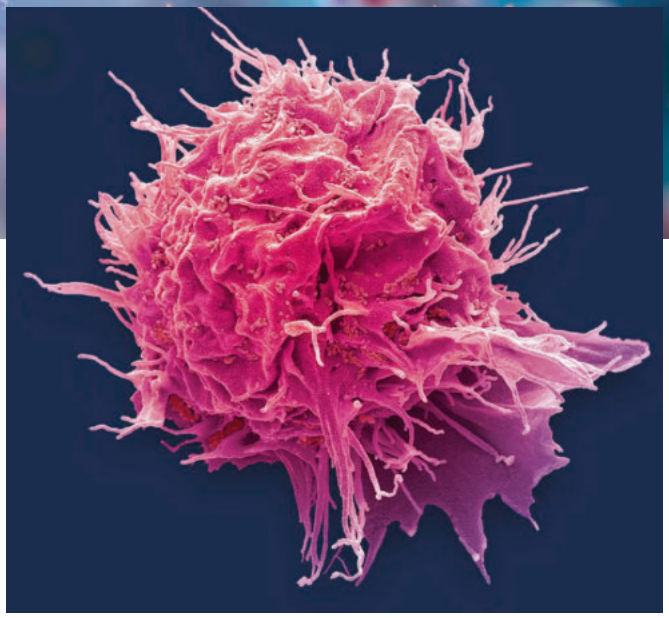
Ein Virus ähnelt einem USB-Stick mit Code. Er enthält die nötigen Informationen. Das Programm wird jedoch erst ausgeführt, wenn er in einen PC gesteckt wird. Das „Virus-Programm“ startet also erst, sobald das Virus sein Erbgut in eine Zelle einschleust. Die Zelle liest dann das Erbgut ab und stellt zahlreiche Kopien der codierten viralen Proteine her. Diese lagern sich selbstständig zu „Nachkommen-Viren“ zusammen. Sie werden freigesetzt und schleusen ihr Erbgut in die nächste Zelle. Der Kreislauf beginnt erneut.

Um sich zu vermehren, müssen Viren also die Proteinproduktion der Zelle unterwandern. Als Bauanleitung dient doppelsträngige DNA. Da sich die DNA im Zellkern befindet, die Proteine jedoch außerhalb hergestellt werden, entsteht zunächst eine einzelsträngige Boten-RNA (engl. „messenger“, mRNA) als Vorlage. Der Großteil der sogenannten DNA-Viren bringt sein eigenes Erbgut in Form von doppelsträngiger DNA mit. Zunächst entsteht die mRNA-Vorlage, sie wird abgelesen, und virale Proteine werden produziert. Zu den bekanntesten DNA-Viren zählen Herpes-, Pocken- und Papillomaviren.

Manche Viren sind jedoch in der Hinsicht einzigartig, dass sie nicht nur DNA, sondern auch RNA als Erbgut verwenden können. Die meisten RNA-Viren enthalten Erbgut in Form eines RNA-Einzelstrangs. Er wird entweder direkt als mRNA verwendet, weil er bereits in der richtigen Leserichtung vorliegt, oder muss noch von einem Enzym, das die Viren selbst mitbringen, umgeschrieben werden. Zu den RNA-Viren gehören beispielsweise Corona-, Hanta-, Ebola- und Influenzaviren.

Eine Besonderheit sind Retroviren wie das Humane Immundefizienz-Virus (HIV). HIV bringt ebenfalls RNA-Erbgut mit. Mithilfe eines Enzyms, das nur in Retroviren





Das Virus *Varicella zoster* (Illustration) ist ein DNA-Virus der Gruppe der Herpesviren und verursacht bei Erstinfektion Windpocken. Solche Herpesviren befallen unter anderem T-Zellen (kleines Bild, eingefärbte Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme).

vorkommt, hebelt HIV jedoch die natürliche Abfolge von der DNA über die mRNA zum Protein aus. Es wandelt sein RNA-Erbgut in DNA um und baut diese ins menschliche Erbgut ein. Dieser Mechanismus ist einer der Hauptgründe, warum HIV-Infektionen heute zwar gut behandelbar, aber nicht heilbar sind.

Die meisten Viren sind nur zwischen 20 und 300 Nanometer groß, also bis zu 100-mal kleiner als Bakterien und circa 10.000-mal kleiner als ein Stecknadelkopf. Ihre Entdeckung war eine Herausforderung. Robert Koch reinigte Ende des 19. Jahrhunderts mithilfe von Filtern Bakterien aus Patientenproben auf. 1898 beschrieb der Niederländer Martinus Beijerinck dann Erreger, die durch diese Filter gehen. Er nannte sie „ultrafiltrierbare Viren“. Den Begriff „Virus“ leitete er vom lateinischen Wort für „Gift“ ab.

Immunsystem bekämpft infizierte Zellen

Viren sind überall. Wir atmen sie ein. Wir essen sie. Wir interagieren mit Oberflächen oder anderen Menschen und schmieren uns die Viren anschließend in Nase oder Mund. Klingt eklig, ist aber normal. Die meisten Viren beeinträchtigen unsere Gesundheit nicht. Nur ein kleiner Teil kann uns infizieren. Dann bekämpft unser Immunsystem Viren sehr effektiv.

Das Immunsystem wird grob in zwei Teile unterteilt: das angeborene und das adaptive Immunsystem. Das angeborene Immunsystem nutzt lösliche Botenstoffe, sogenannte Interferone, um Viren zu bekämpfen. Infizierte Zellen setzen diese Botenstoffe frei, um ihre „Nachbarn“ zu warnen. Interferon-α triggert etwa einen antiviralen Zustand, der in der frühen Phase der Infektion die Virusausbreitung eindämmt.

Aber wie erkennt die Zelle, dass sie infiziert ist? Sie nutzt intrazelluläre Rezeptoren als „Sinnesorgane“. Diese

Corona Borealis / stock.adobe.com | Science Photo Library / Gschmeissner, Steve

erkennen spezifische Muster, die nur in Krankheitserregern vorkommen, und schlagen Alarm. Bei Viren triggert vor allem deren Erbgut. Denn Viren sind schlechte Fälscher. Ihr Erbgut ist der zellulären DNA oder RNA zwar ähnlich, ist aber nicht identisch. Das Erbgut von RNA-Viren trägt beispielsweise oft drei Phosphatgruppen, die in zellulärer RNA nicht frei zugänglich sind. Im Alarmfall setzt die Zelle Interferon-α frei. Zusätzlich produziert sie weitere Botenstoffe, um Immunzellen anzulocken.

Zunächst erscheinen die Zellen des angeborenen Immunsystems. Zu ihnen gehören die Fresszellen, die so viele Erreger wie möglich verschlingen. Wenn Viren sich jedoch im Inneren infizierter Zellen erst einmal versteckt haben, sind sie für Fresszellen unerreichbar. Natürliche Killerzellen (NK) wiederum spüren Viren selbst dort auf. Deshalb spielen sie bei deren Bekämpfung eine besonders wichtige Rolle.

Um herauszufinden, ob eine Zelle infiziert ist, tastet die NK-Zelle die Körperzelle ab. Dieser Prozess ähnelt einer Verkehrskontrolle. Die Körperzelle kann jedoch nicht einfach das Autofenster herunterkurbeln, um die NK-Zelle in ihr Inneres blicken zu lassen. Stattdessen kehrt die Körperzelle ihr Inneres nach außen. Die Zelle belädt Spezialproteine im Inneren zufällig mit Proteinbruchstücken und transportiert diese an die Oberfläche. Einmal beladen, hält jedes Spezialprotein sein Bruchstück hoch, damit es alle gut sehen können. Ist eine Körperzelle infiziert, werden so auch Virusbruchstücke präsentiert. Streng kontrolliert die NK-Zelle die Proteine der Körperzelle. Da! Ein Virusbruchstück. Die Immunzelle zieht die infizierte Zelle sofort aus dem Verkehr, bevor diese weitere Viren freisetzen kann.

Einige Viren sind schlau. Sie entfernen Präsentationsproteine von der Oberfläche infizierter Zellen, um sich zu „tarnen“. Aber NK-Zellen sind schlauer. Sie werden nicht nur durch Virusbruchstücke getriggert, sondern erkennen auch, wenn eine Zelle insgesamt verdächtig wenige Präsentationsproteine auf ihrer Oberfläche hat. Da ist doch etwas faul! Die NK-Zelle tötet diese Körperzellen vorsichtshalber ebenfalls.

Die wichtigsten Zellen des adaptiven Immunsystems heißen T- und B-Zellen. Killer-T-Zellen patrouillieren – ähnlich wie NK-Zellen – durch den Körper. Sie überprüfen, ob sie Präsentationsproteine finden, die mit Virusbruchstücken beladen sind. Wenn ja, töten sie die infizierten Zellen. B-Zellen dagegen produzieren Antikörper und geben diese ins Blut ab. Antikörper können Viren direkt unschädlich machen, indem sie verhindern, dass sie in Körperzellen eindringen. Außerdem können sie mehrere Viren zu größeren „Klumpen“ verkleben, sodass Fresszellen sie leichter verschlingen können.

Evolutionärer Wettlauf mit Grippe-Viren

Wenn unser Immunsystem so viele Wege gefunden hat, um Viren zu bekämpfen, warum werden wir dann noch krank? Die Antwort ist: Viren sind Meister darin, unser Immunsystem zu manipulieren, um ihm zu entgehen. Es ist ein ständiger Wettlauf. Das Immunsystem entwickelt sich zwar durch Evolution weiter, aber viel langsamer als Viren, die bei jedem Vermehrungszyklus mutieren und neue Virusvarianten hervorbringen. In seltenen Fällen verändern Mutationen die Spezifität eines Virus für einen bestimmten Wirt und ermöglichen, dass tierische Viren auf andere Tiere oder den Menschen überspringen.

Das beobachten Forschende zum Beispiel bei Influenza-Viren: Seit 30 Jahren verbreiten sich hoch ansteckende

Viren vs. Bakterien

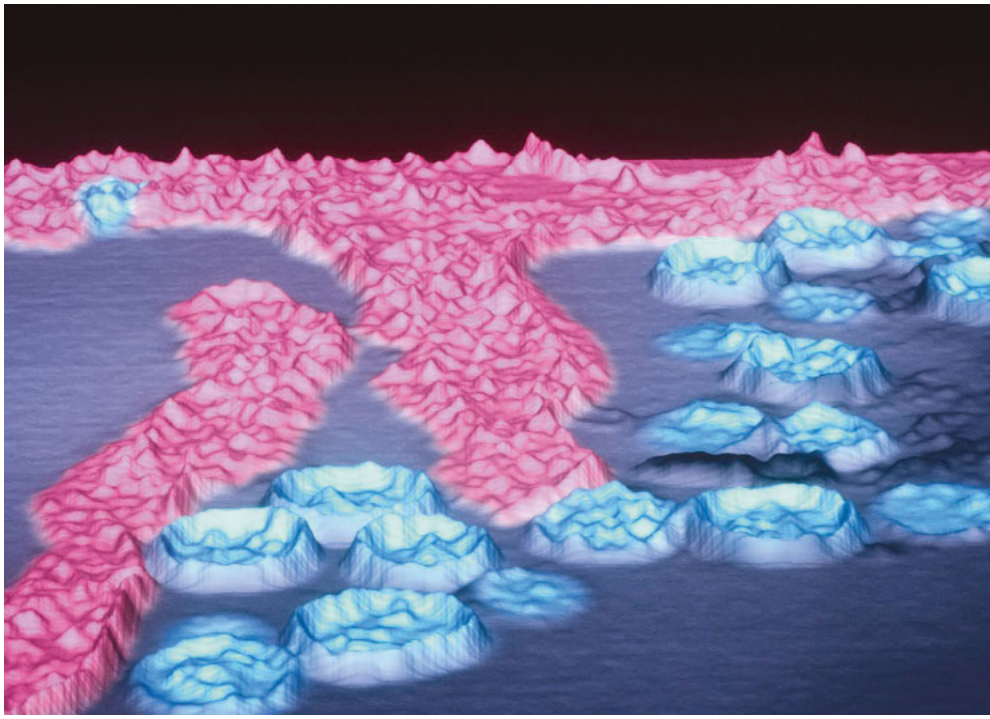
Sowohl Viren als auch Bakterien können uns krank machen. Darüber hinaus haben diese Krankheitserreger jedoch wenig gemeinsam.

Bakterien sind Lebewesen, die aus einer einzelnen Zelle bestehen. Sie besitzen eine Zellwand und Ribosomen, aber keinen Zellkern und keine Zellorganellen. Bakterien haben einen eigenen Stoffwechsel und benötigen Nahrung. Sie vermehren sich, indem sie sich teilen. Bakterien sind zu klein, um sie mit dem bloßen Auge zu sehen.

Viren sind dagegen nicht lebendig. Sie bestehen nur aus einer Hülle, die das Virus-Erbgut enthält. Viren haben keinen Stoffwechsel und benötigen deshalb auch keine Nahrung. Sie beuten Wirtszellen aus, um sich zu vermehren. Viren sind sogar noch kleiner als Bakterien.

Wichtig zu wissen ist, dass **Antibiotika** nur bei Infektionen helfen, die durch Bakterien verursacht werden. Denn die meisten Antibiotika zerstören entweder gezielt die Zellwand von Bakterien und töten diese so direkt oder sie blockieren deren Stoffwechsel. Da Viren weder Zellwand noch Stoffwechsel haben, sind Antibiotika gegen sie absolut unwirksam. Da Bakterien bei falscher Anwendung resistent gegen Antibiotika werden können, sollten diese sorgsam eingesetzt werden. Es sollte daher unbedingt vor der Einnahme beim Arzt abgeklärt werden, ob wirklich eine bakterielle Infektion vorliegt.

Zur Bekämpfung von Viren gibt es ebenfalls spezifische Medikamente. Die sogenannten **Virostatika** hemmen gezielt deren Vermehrung. Ein bekanntes Beispiel ist Aciclovir, das die Vermehrung von Herpesviren hemmt.



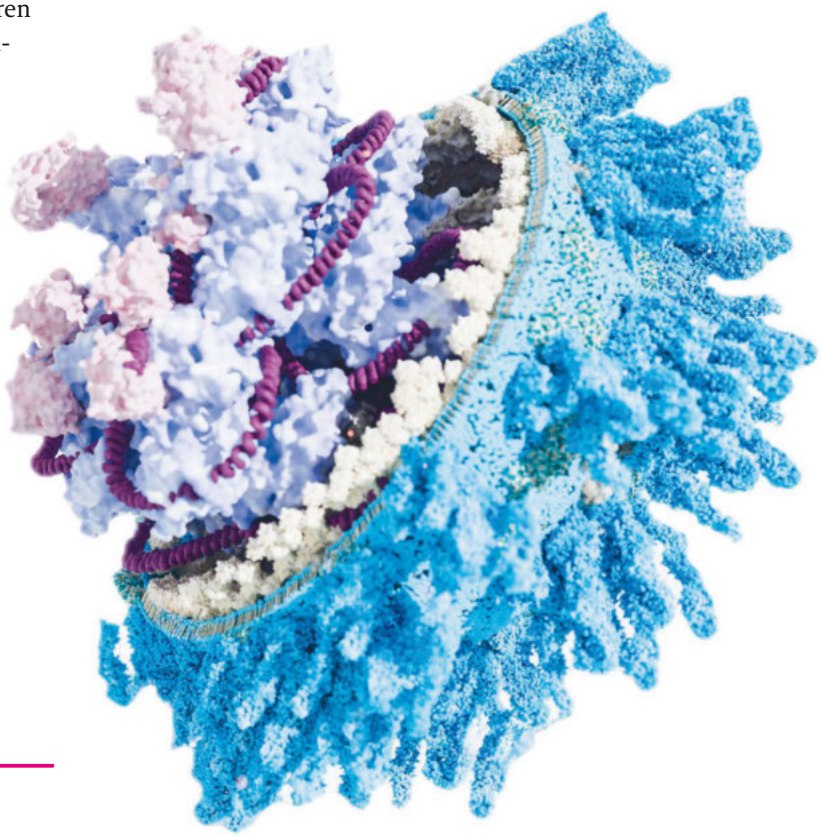
Hantaviren (blau eingefärbt in der Transmissionselektronenmikroskop-Aufnahme) treten an der Oberfläche einer befallenen Nierenzelle aus, um andere Zellen zu befallen.

Vogelgrippe-Viren. Immer wieder springen die Viren von Vögeln auf Säugetiere über. 2024 hat sich das Vogelgrippe-Virus H5N1 auf eine Milchkuh in Texas übertragen. Dieser Texas-Virusstamm infizierte über kontaminiertes Melkgeschirr und Viehtransporte Tausende Rinder in 20 US-Bundesstaaten. „Aus meiner Sicht wurde leider erst sehr spät begonnen, die Verbreitung des Virus einzudämmen“, sagt Martin Beer, der Vizepräsident des Friedrich-Loeffler-Instituts, dem Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit. „Sobald sich Vogelgrippe-Viren unkontrolliert in Säugetieren verbreiten, besteht das Risiko, dass sie sich an ihren neuen Wirt anpassen. Da wir Menschen auch Säugetiere sind, steigt damit meist auch unser Risiko“, erklärt der Virologe.

Eine Besonderheit von Influenza-Viren ist, dass ihr Erbgut segmentiert, also in acht Stücke unterteilt ist. Sobald sich ein Wirt gleichzeitig mit zwei verschiedenen Influenza-Viren infiziert, „würfeln“ die Viren ihr Erbgut neu zusammen. So entstehen völlig neue Influenz-Virus-Kombinationen. Kreuzen sich an Tiere angepasste Viren mit bereits an den Menschen angepassten Viren, können neue für den Menschen infektiösere Influenza-Viren entstehen.

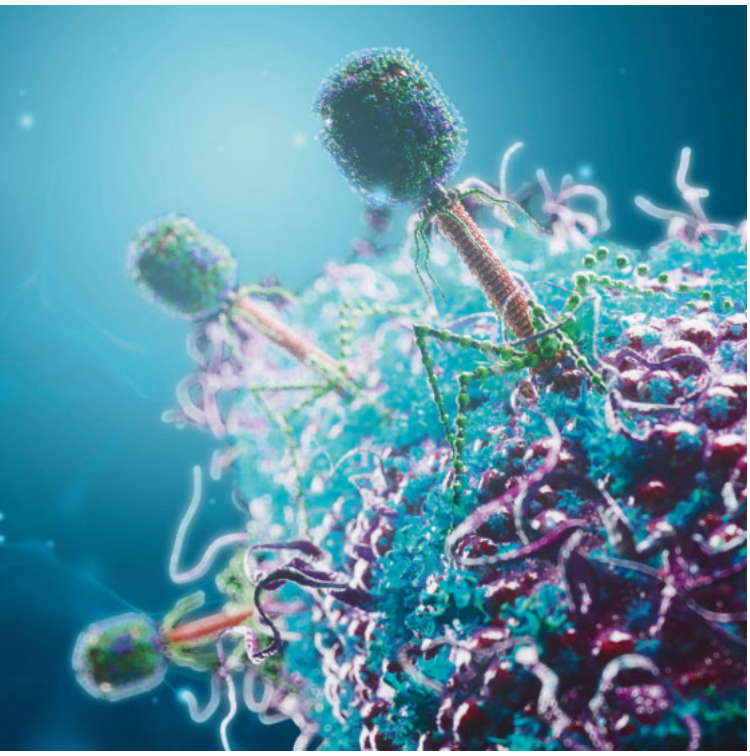
Die gute Nachricht ist, dass unser Immunsystem Influenza-Viren bereits kennt. Gemeinsam mit Forschenden aus Köln haben Beer und sein Team nachgewiesen, dass selbst gesunde Personen Antikörper im Blut haben, die auch die H5N1-Texasvariante binden. Der Körper bildet sie vermutlich nach einer Infektion mit zirkulierenden H1N1-Grippe-Viren oder nach der saisonalen Impfung. Dies könnte auch ein Grund sein, warum die Krankheitsverläufe H5N1-infizierter Farmer in den USA meist mild ausfielen. In der EU sind außerdem bereits erste Impfstoffe gegen H5N1 zugelassen.

Forschende versuchen, hoch ansteckende Viren mit Pandemiepotenzial möglichst engmaschig zu überwa-



H5N1, der Erreger der Vogelgrippe, gehört zu den Influenza-Viren. Um die Proteinproduktion der Wirtszelle zu unterwandern, nutzt dieser Erreger RNA (violette Helixstruktur in der Illustration) als Vorlage.

Science Photo Library / Science Source | catalin / stock.adobe.com



Bakteriophagen docken an die Oberfläche eines Bakteriums an und töten es.

chen und Vorbereitungen zu treffen. Für bekannte Viren werden diagnostische Tests sowie Impfungen entwickelt und regelmäßig an kursierende Virusvarianten angepasst. Trotzdem lässt sich schwer vorhersehen, welches Virus wann die nächste Pandemie auslösen könnte.

Entscheidend ist zum Beispiel, ob und wie ein Virus von Mensch zu Mensch übertragen wird. Die H5N1-Texasvariante war hierzu zum Beispiel nicht in der Lage. Auch Hantaviren tun sich damit schwer. Sie können es aber schaffen, wie die Andes-Virusvariante beim Ausbruch auf dem Kreuzfahrtschiff MV Hondius kürzlich gezeigt hat. Für die Übertragung des Andes-Virus von Mensch zu Mensch braucht es einen engen und andauernden körperlichen Kontakt, beispielsweise im Haushalt oder bei der Pflege. Es verhält sich daher nicht wie SARS-CoV-2 und breitet sich nicht über flüchtige Alltagskontakte aus. Hinzu kommt, dass Infizierte erst ansteckend sind, sobald sie Symptome entwickeln oder kurz davor. Durch Abstand halten, Kontaktmanagement, Quarantäne und Schutzkleidung bei engem Kontakt lässt sich das Andes-Virus daher leichter kontrollieren, als es bei SARS-CoV-2 der Fall war.

Viren als Werkzeug

Obwohl der Mensch den Großteil seiner Geschichte unter Viruserkrankungen litt, begann er – wenn auch unwissentlich – ebenfalls sehr früh damit, Viren für sich zu nutzen. Im 17. Jahrhundert züchteten Bauern in Holland zum Beispiel Tulpen mit wunderschönen Mustern, indem sie das sogenannte Tulpenmosaik-Virus verbreiteten.

Heute werden Viren auch als Medizin erforscht. Bakteriophagen sind Viren, die Bakterien infizieren und zukünftig als Antibiotika-Alternative dienen könnten. In der Forschungsgruppe zur Prävention mikrobieller Erkrankungen am Helmholtz Zentrum München untersucht Mohammadali Khan Mirzaei deshalb, welche Phagen antibiotikaresistente Bakterien töten. Die Forschenden mixen individuelle „Phagen-Cocktails“ für Patienten. „Wir kombinieren Phagen, die Bakterien auf unterschiedliche Weise töten, um zu vermeiden, dass die Bakterien auch gegen die Phagen resistent werden“, erklärt der Virologe.

Die Therapie ist in Deutschland noch nicht zugelassen. Forschende und Ärzte dürfen nur Patienten behandeln, für die es keine Alternative gibt. Einzelnen Patienten konnten die Forschenden bereits helfen. In einer ersten klinischen Studie zu personalisierter Bakteriophagen-Therapie am Queen Astrid Military Hospital in Brüssel ließen sich bei 61,3 Prozent der Infektionen die Zielbakterien ausrotten. Da die Entwicklung individueller Therapien oft Monate dauert, möchte Khan Mirzaei eine „Phagen-Bibliothek“ zur Behandlung wichtiger Erreger anlegen. Zunächst mussten die Forschenden jedoch lernen, die Phagen über längere Zeit haltbar zu machen. Am besten lassen sich Phagen laut neuester Erkenntnis schockgefroren und bei minus 80 Grad Celsius lagern. In weiteren Experimenten untersuchen Khan Mirzaei und sein Team, wie die Phagen am effektivsten verabreicht werden können. Bis Phagen klinische Routine werden, gilt es also, noch einige wissenschaftliche und regulatorische Herausforderungen zu bewältigen. ■



KRISTINA HOPFENSPERGER ist promovierte Virologin und freie Wissenschaftsjournalistin. Sie fasziniert, wie trickreich Viren das menschliche Immunsystem manipulieren.

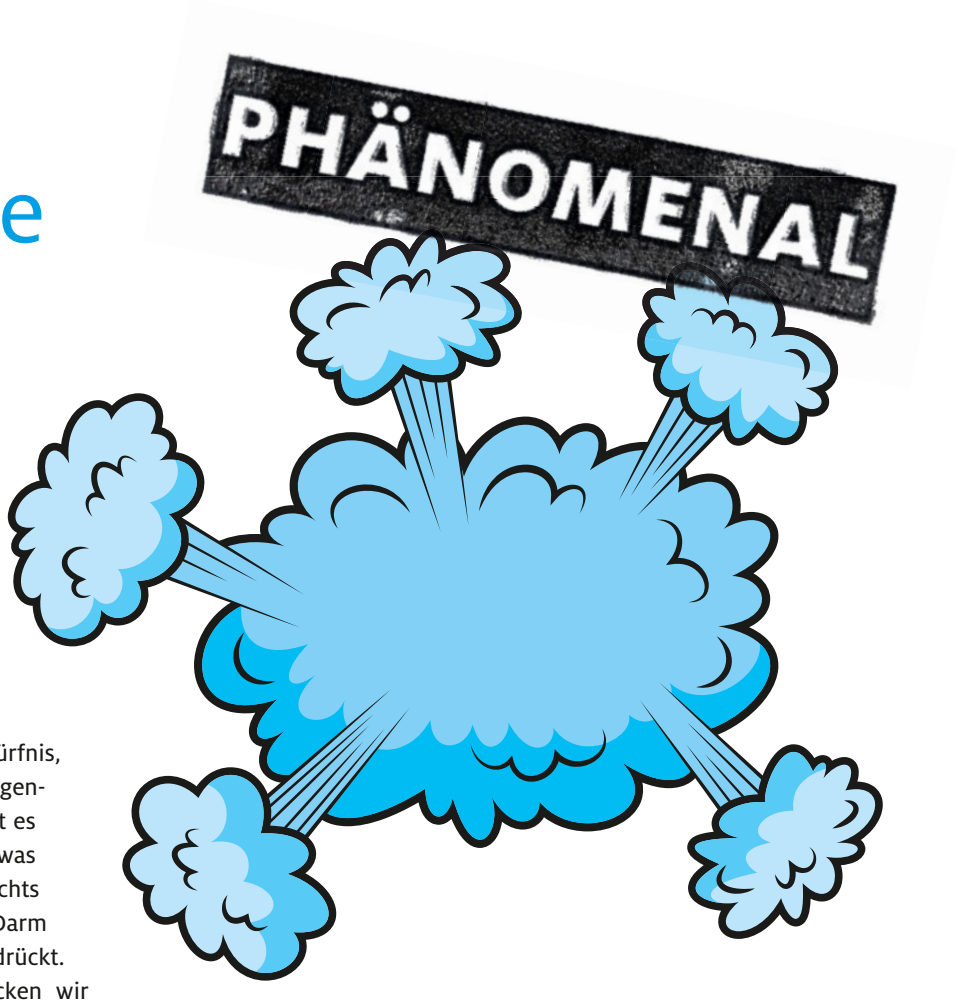
Serie Immunsystem

Teil 1: Das Immungedächtnis (08|26)
Teil 2: Abwehr in Aktion (08|26)
Teil 3: Im Wettlauf mit den Viren (09|26)
Teil 4: Autoimmunerkrankungen und Asthma (10|26)
Teil 5: Infektionen vorbeugen (11|26)

iStock.com / MARHARYTA MARKO

Rückwärtige Winde

Wie es kommt, dass wir manchmal Luft ablassen müssen, erklärt Dr. med. Jürgen Brater.



Wir alle haben das schon erlebt: Wir haben üppig gegessen, haben uns reichlich schmackhaftes Gemüse munden lassen, und kurz darauf fängt es im Bauch an zu rumoren. Wir fühlen uns wie aufgeblasen und haben das dringende Bedürfnis, „Dampf abzulassen“. Wenn die ganze Angelegenheit nur nicht so peinlich wäre! Dabei handelt es sich um einen ganz normalen Vorgang, und was uns da gerade so plagt, ist zum größten Teil nichts anderes als Luft. Luft, die sich in unserem Darm ausbreitet und dabei auf dessen Wände drückt. Denn wenn wir essen oder trinken, schlucken wir immer auch ein bisschen Luft mit, und zwar mit jedem Bissen etwa zwei bis drei Milliliter. Besonders ausgeprägt geschieht das, wenn wir im Stress sind und die Mahlzeit hastig in uns hineinschlingen.

Daneben entsteht im Darm Gas während des Verdauungsprozesses, wenn Bakterien dort die Nahrungsmittel abbauen. Von diesen Darmgasen – etwa 70 Prozent stammen vom Luftschlucken und nur 30 Prozent aus der Verdauung – diffundiert ein großer Teil über die Dünndarmwand ins Blut, mit dem die Gase weiter zur Lunge transportiert werden. Von dort aus atmen wir sie schlicht ab, das heißt, wir pusten sie ins Freie. Das klingt zwar höchst unappetitlich, aber das Dünndarmgas wird tatsächlich mit der Atemluft ausgeschieden.

Haben wir nun etwas gegessen, das bei der Verdauung erheblich mehr Gas produziert, als das Blut abtransportieren kann, muss dieses zwangsläufig auf anderem Weg ausgeschieden werden. Besonders ausgeprägt ist das nach einer Mahlzeit mit reichlich Hülsenfrüchten wie Bohnen und Erbsen oder mit diversen Krautarten. Aber auch bei einer tiefgreifenden Umstellung der Ernährung, etwa auf ballaststoffreiche Vollwertkost, kann vorübergehend eine ganze Menge Gas entstehen. Und das verursacht früher oder später das bekannte Druckgefühl, das man gemeinhin als „Blähungen“ bezeichnet und das uns zwingt, das Gas über den natürlichen Darmausgang herauszublasen. Bei einem gesunden Menschen ist das jeden Tag im Durchschnitt etwas mehr als ein halber Liter. In der Regel in etwa 15 Portionen zu je 40 Millilitern. Allerdings schwankt die Menge je nach Art der Nahrung ganz erheblich.

Und warum stinkt die Aktion manchmal so unangenehm? Fakt ist nämlich, dass das Gas, das sich im Darm ansammelt, grundsätzlich erst mal nach gar nichts riecht, besteht es doch größtenteils aus Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan und damit aus vollkommen geruchlosen Zutaten. Das spezielle Aroma fügen erst Bakterien im Dickdarm hinzu, die beim Zersetzen bestimmter Nahrungsbestandteile, die im Dünndarm nicht verdaut werden konnten, übel riechende Produkte erzeugen: unter anderem Indol, Skatol und Mercaptan und ganz besonders Schwefelwasserstoff, der auch faulen Eiern ihr ganz spezielles Aroma verleiht. Und das verräterische Brummen davor? Das kann entstehen, wenn das unter Druck stehende Gas die zarten Hautläppchen, die den Darmausgang umgeben, in Schwingungen versetzt – vergleichbar mit einem Luftballon, aus dem man ruckartig die Luft herauslässt.

Risiko auf Rezept



Pregabalin und Gabapentin können abhängig machen. Trotzdem steigen die Verschreibungen in Deutschland seit mehr als 20 Jahren kontinuierlich. Warum? Eine Datenrecherche.

von SIGRID MÄRZ und SALOME BERBLINGER

Im Januar 2026 hat die britische Arzneimittelbehörde Warnhinweise in Beipackzetteln und auf Verpackungen verschiedener Medikamente verschärft. Laut der Behörde vermittelten die bisherigen Informationen „das Ausmaß der bekannten Risiken von Sucht, Abhängigkeit, Entzug und Toleranz“ nur unzureichend. Zwei der betroffenen Wirkstoffe waren Pregabalin und Gabapentin.

Die Britische Rundfunkanstalt BBC titelte: „Pregabalin ist der am häufigsten genannte Wirkstoff bei medikamentenbedingten Todesfällen in Nordirland“. Und dem US-amerikanischen Wallstreet Journal war Gabapentin bereits im Dezember 2025 eine lange Reportage wert. Die Überschrift: „Die verborgenen Risiken des beliebtesten verschreibungspflichtigen Schmerzmittels in den USA“.

Weltweit gehören beide Wirkstoffe zu den am häufigsten verschriebenen Schmerzmitteln. Der aktuelle Arzneimittel-Atlas setzt Pregabalin und Gabapentin in Deutschland auf die Plätze 3 und 4, hinter Metamizol-Natrium (besser bekannt unter dem Handelsnamen Novalgin) und dem Opioid-Antidot-Duo Tilidin-Naloxon. Und: Vor allem für Pregabalin steigen die Verschreibungszahlen seit 20 Jahren massiv. Zählten die Krankenversicherer 2005 noch 580.000 Verordnungen, waren es 2024 mehr als zehnmal so viele. Das entspricht rund 160 Millionen Tagesdosen.

Pregabalin und Gabapentin gehören zur Wirkstoffgruppe der Gabapentinoide. Strukturell ähneln sie dem Neurotransmitter GABA (Gamma-Aminobuttersäure), binden aber nicht an dessen Rezeptoren. Stattdessen lagern sich Gabapentinoide an spannungsabhängige Kalziumkanäle auf den Nervenzellen an, was wiederum die Ausschüttung von GABA-Gegenspielern – Neurotransmitter wie Glutamat und Noradrenalin – hemmt. Damit wirken Gabapentinoide wie auch GABA selbst krampflösend, entspannend und angstlösend.

„Gabapentinoide sind Antiepileptika und wurden ursprünglich vor allem für eine bestimmte Form, fokale epileptische Anfälle, zugelassen“, sagt Tom Bschor. Der Facharzt für Psychiatrie und Psychotherapie hat als Mitglied der Arzneimittelkommission der deutschen Ärzteschaft (AkdÄ) am Leitfaden „Schädlicher Gebrauch



Schmerzmittel aus der Wirkstoffgruppe der Gabapentinoide sind Segen und Fluch zugleich: Während sie für manche Menschen wirksam Beschwerden lindern, nutzen andere die Medikamente missbräuchlich.

Getty Images / W. Vacharapong | BDW-Grafik

und Abhängigkeit von Medikamenten“ mitgearbeitet. Die Publikation aus dem Jahr 2022 beleuchtet auch Gabapentinoide.

Bschor ergänzt, dass schon kurz nach der Markteinführung die Zulassung zur Behandlung neuropathischer Schmerzen hinzugekommen sei. Die treten beispielsweise bei Diabetes auf, denn ein dauerhaft hoher Blutzuckerspiegel schädigt Nerven. Betroffene klagen über brennende Schmerzen oder quälendes Kribbeln in den Beinen. „Und Diabetes ist eine Volkskrankheit, die Zahlen steigen seit Jahren“, sagt der Psychiater.

Speziell bei Pregabalin erweiterten die Aufsichtsbehörden die Zulassung außerdem um die Behandlung generalisierter Angststörungen. Betroffene leiden aufgrund diffuser, schwer kontrollierbarer Ängste unter einer massiven Beeinträchtigung ihres Alltags. „Man kann sich vorstellen, dass die angstlösende Wirkung von Pregabalin auch für andere Angsterkrankungen genutzt wird“, ist Bschor sicher und meint damit zum Beispiel Panikattacken sowie Phobien, bei denen Menschen sich vor bestimmten Orten, Dingen oder Situationen fürchten.

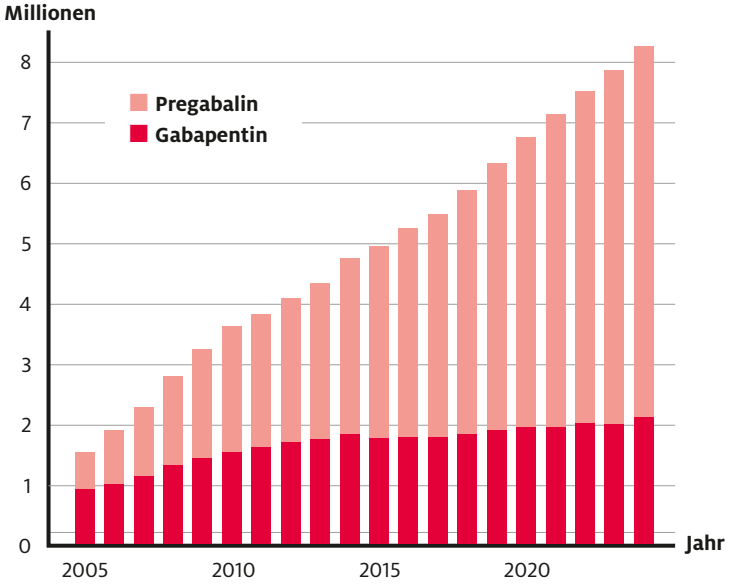
Off-Label-Use erklärt Anstieg zum Teil

Wenn Medikamente abseits der eigentlichen Zulassung eingesetzt werden, sprechen Fachleute von einem Off-Label-Use. Die AkdÄ sieht in der Anwendung von Gabapentinoiden bei nicht neuropathischen Schmerzen und psychiatrischen Störungen – wie bipolaren Störungen – eine Erklärung für den Anstieg der Verschreibungen. Laut einer Analyse von Krankenversichertendaten aus dem Jahr 2019 wurden nur bei gut einem Viertel der Personen, die Gabapentinoide erhielten, neuropathische Schmerzen diagnostiziert. Bei knapp zwölf Prozent der Verschreibungen lag gar keine zugelassene Diagnose vor.

Pregabalin wirkt schneller als Gabapentin, was diesen jüngeren der beiden Wirkstoffe interessanter für Anwendungen macht, bei denen eine schnelle Linderung von Beschwerden erwünscht ist. Und auch hier spielen erneut Off-Label-Anwendungen eine Rolle. „Für Angststörungen sind zum Beispiel selektive Serotonin-Wiederaufnahmehemmer zugelassen“, sagt Sven Speerforck, stellvertretender Direktor der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie des Universitätsklinikums Leipzig. Diese Wirkstoffe sind vor allem als Antidepressiva bekannt. Ihre angstlösende Wirkung

Immer mehr Verschreibungen

Pregabalin und Gabapentin gehören weltweit zu den am häufigsten verschriebenen Schmerzmitteln. Insbesondere für Pregabalin nehmen die Verschreibungen auch in Deutschland seit 20 Jahren massiv zu.



Quelle: Daten der Verschreibungszahlen der gesetzlichen Krankenversicherungen, zur Verfügung gestellt von WIdO.

setzt allerdings mitunter erst einige Wochen nach dem Beginn einer regelmäßigen Einnahme ein. Ärzte greifen deshalb zu Alternativen, die schnellere Erfolge versprechen, weiß Speerforck, „vor allem bei Patienten, bei denen die Angst so allumfassend ist, dass sie kaum handlungsfähig sind." In solchen Fällen sei Pregabalin ein wichtiges Medikament.

Natürlich kenne man die Kehrseite der Gabapentinoide, sagt Speerforck. Wichtig sei deshalb in jedem Fall eine umfassende Aufklärung über mögliche Nebenwirkungen und das Abhängigkeitsrisiko. „Man muss die Leute aufmerksam begleiten und einschreiten, wenn sie zum Beispiel selbstständig die Dosis steigern", sagt er. Denn Gewöhnungseffekte gebe es. „Wir stehen diesen Medikamenten nicht mehr so unkritisch gegenüber wie vielleicht noch vor zehn Jahren."

Therapie oder Partyrausch?

Dass vor allem Pregabalin in den vergangenen Jahren als suchtgefährdend – und im Zusammenhang mit Drogenmissbrauch – auffiel, liegt an der unterschiedlichen Pharmakokinetik der beiden Wirkstoffe: Gabapentin wird über einen Transporter im Dünndarm aufgenommen, der bereits bei niedrigen Dosen gesättigt ist. Wenn man mehr Wirkstoff zu sich nimmt, erreicht er also nicht die Blutbahn und das Gehirn, sondern wird einfach wieder über die Nieren ausgeschieden. Anders bei Pregabalin: Die Substanz erreicht das Blut über konzentrationsabhängige Aminosäuretransporter, und der Serumspiegel steigt mit der zugeführten Dosis. Hohe Dosen von Pregabalin führen zu einem Rauschzustand.

Das wissen auch die Drug Scouts, ein Projekt der Drogenhilfe Leipzig. Sozialarbeiter und Ehrenamtliche informieren auf Partys und Festivals, wie der Konsum von psychoaktiven Substanzen risikoärmer erfolgen kann. Pregabalin ist seltener ein Thema, aber dennoch kennen einige Menschen in der Partyszene auch diese Substanz. „Konsumenten berichteten von einer beruhigenden, dämpfenden Wirkung bis hin zur Euphorie", sagt Leon Jäger, einer der Projektleiter der Drug Scouts.

Dafür braucht es aber mehr als die empfohlene therapeutische Tagesdosis von maximal 600 Milligramm Pregabalin. „Wenn wir über einen sogenannten Freizeitdrogenkonsum sprechen, liegen die Dosen teilweise mehr als zehnfach über der empfohlenen Maximaldosis", sagt Jäger. Mit Freizeitgebrauch meint der Sozialpädagoge den Drogenkonsum auf Partys. Die Gründe dafür seien unterschiedlich: „Beispielsweise, um nach einer stressigen Woche abzuschalten, lange beim Tanzen durchhalten zu können oder einfacher mit Menschen in Kontakt zu kommen." Am Montag geht es dann wieder zur Arbeit, zur Schule, in den Ausbildungsbetrieb. Die meisten Menschen sind nicht psychisch oder körperlich abhängig von den Substanzen.

Aber wie kommen Partygänger an so viele Tabletten? Das sei nicht so einfach zu beantworten, die Bezugsquellen seien häufig unbekannt, sagt Jäger. Denkbar sei auch für Pregabalin der illegale Markt, dort würden unterschiedlichste Substanzen angeboten.

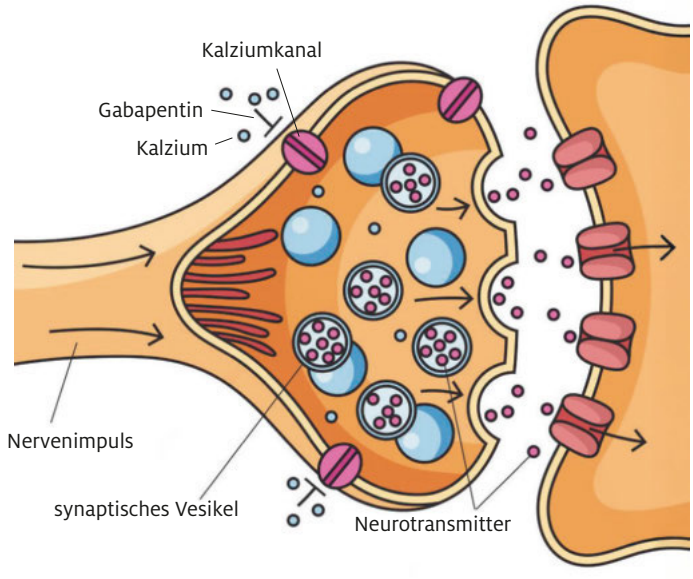
Risiken und Nebenwirkungen

Dosen von 6.000 Milligramm Pregabalin und mehr bergen schon allein unkontrollierbare Risiken einer Vergiftung mit Symptomen wie Verwirrtheit, Übelkeit und Erbrechen. Noch gefährlicher wird es, wenn Personen verschiedene Substanzen mischen: Alkohol, Aufputschmittel wie Ecstasy, Benzodiazepine, Opioide. Wie genau welche Substanzen wechselwirken und wie sich ihre Wirkungen eventuell gegenseitig verstärken, ist für Laien nicht kalkulierbar. Es drohen Halluzinationen, Herzrhythmusstörungen, Krampfanfälle – und im schlimmsten Fall Atemstillstand und Tod.

Polytoxikomanie lautet der Fachbegriff für den riskanten Mischkonsum verschiedener Substanzen. Und Pregabalin wie auch Gabapentin spielen dabei eine Rolle. Abhängige setzen Pregabalin sogar gezielt ein, um beispielsweise die Wirkung von anderen Drogen zu verstär-

Wie Gabapentinoide wirken

Gabapentin und Pregabalin blockieren Kalziumkanäle auf den Nervenzellen und verringern damit die Freisetzung von erregenden Neurotransmittern wie Glutamat. Die Nervenimpulse werden gedämpft, Schmerzen gelindert.



ken. Denn das Gabapentinoid ist auch auf dem Schwarzmarkt einfacher und günstiger zu kaufen als beispielsweise das synthetische Opioid Fentanyl.

Fachleute sehen darin den Grund, warum Gabapentinoide immer wieder im Zusammenhang mit Todesfällen auffallen. Verschiedene Untersuchungen, etwa aus rechtsmedizinischen Instituten und Gefängnissen, fanden bei Drogentoten in Deutschland seit den 2010er-Jahren vermehrt Pregabalin als Beikonsum.

Eine Auswertung medikamentenbedingter Todesfälle in England zwischen 2004 und 2020 zeigte: Neun von zehn Gestorbenen hatten neben Gabapentinoiden auch Opioide im Blut. Nur bei zwei der insgesamt gezählten 3.051 Todesfälle galten Gabapentin und Pregabalin als ursächlich für den Tod. US-amerikanische Giftnotrufzentralen dokumentierten zwischen 2012 und 2022 rund 124.000 Meldungen im Zusammenhang mit Gabapentinoiden. Ein Fünftel der Betroffenen kämpfte mit „schwerwiegenden medizinischen Folgen“, 96 Personen starben.



Tabletten mit dem Wirkstoff Pregabalin werden immer häufiger als Drogen gedealt. Im Bild: Razzia in der U-Bahn-Haltestelle am Kottbusser Tor in Berlin.

Wie sich Vergiftungsmeldungen mit Pregabalin in Deutschland entwickeln, lässt ein Blick auf Daten des Giftnotrufs der Berliner Charité erahnen: Im Jahr 2013 zählte die Klinik 16 Meldungen, 2025 waren es 421. In sieben von zehn Fällen nahmen die Personen Pregabalin absichtlich, um sich zu berauschen oder gar um sich selbst zu schaden. Knapp die Hälfte der Vergiftungsmeldungen betrafen Pregabalin allein, also ohne dass weitere Substanzen eingenommen wurden.

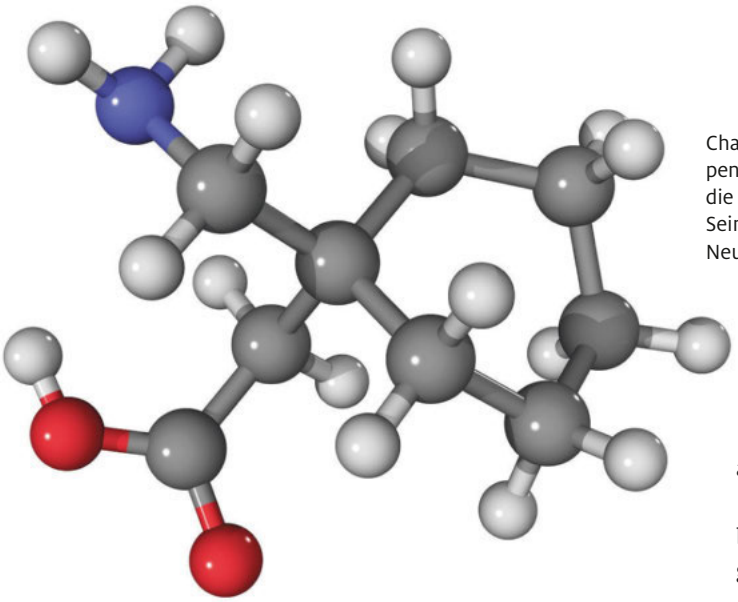
Pregabalin verstärkt die Wirkung anderer Drogen

Aber selbst, wenn Gabapentinoide therapiekonform eingenommen werden, sprich in korrekter Dosis und unter kontrollierten Bedingungen, gibt es Risiken. Bekannte Nebenwirkungen der Gabapentinoide sind Schläfrigkeit und Schwindel, bei Pregabalin zudem Kopfschmerzen.

Die US-amerikanische Arzneimittelbehörde zählte zwischen 2004 und 2023 mehr als 174.000 sogenannte unerwünschte Ereignisse, also Nebenwirkungen der Gabapentinoid-Einnahme. Knapp ein Viertel der Meldungen umfasste psychiatrische Störungen wie Angstzustände und Suizidgedanken. US-amerikanische Forschende bringen Gabapentin außerdem in Zusammenhang mit einem erhöhten Risiko für kognitiven Verfall und Demenz. Die Studie dazu erschien im Oktober 2025 im Fachmagazin Regional Anesthesia & Pain Medicine.

Auch die Europäische Arzneimittel-Agentur (EMA) sammelt in der Datenbank EudraVigilance Meldungen zu Nebenwirkungen. Bild der Wissenschaft hat Anfang Januar 2026 entsprechende Daten für Deutschland angefragt. Bis Redaktionsschluss schaffte es die Behörde nicht, zu liefern. Über das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) erhielten wir Auszüge der Gesamtdaten: Seit der Zulassung von Gabapentin 1994 zählte die EMA 824 Meldungen schwerwiegender Nebenwirkungen im Zusammenhang mit dem Wirkstoff, seit der Zulassung 2004 waren es bei Pregabalin 3.028. Schwerwiegende Nebenwirkungen beschreiben Fälle, die einen Klinikaufenthalt nötig machen, zu einer

Illustration: Oleksandr Pokusai / stock.adobe.com | picture alliance / dpa / Bernd von Jutrczenka



Charakteristisch für das Gabapentin-Molekül $C_9H_{17}NO_2$ ist die Cyclohexan-Grundstruktur. Sein Aufbau ähnelt dem des Neurotransmitters GABA.

bleibenden Beeinträchtigung oder zu lebensbedrohlichen Zuständen bis hin zum Tod führen. Bei Pregabalin waren die häufigsten mit knapp einem Fünftel der gemeldeten Fälle Nebenwirkungen, die unter Störungen des Nervensystems zusammengefasst sind. Zwischen 2004 und 2024 starben 116 Menschen unter der Behandlung mit Pregabalin, für Gabapentin zählten die Behörden seit der Zulassung 51 Todesfälle.

Jedoch: Die Meldungen bilden nur sogenannte Verdachtsfälle ab, keine kausalen Zusammenhänge. So beschreibt es auch ein BfArM-Sprecher: „Die Angabe ‚Todesfälle' bedeutet nicht zwingend, dass eine oder mehrere der in einer Meldung beschriebenen Nebenwirkungen unmittelbar ursächlich für den tödlichen Verlauf waren." Vielmehr sei dokumentiert, dass in diesen Fällen die Patientin oder der Patient verstorben ist. „Hierzu können auch andere Ursachen ganz oder teilweise beigetragen haben."

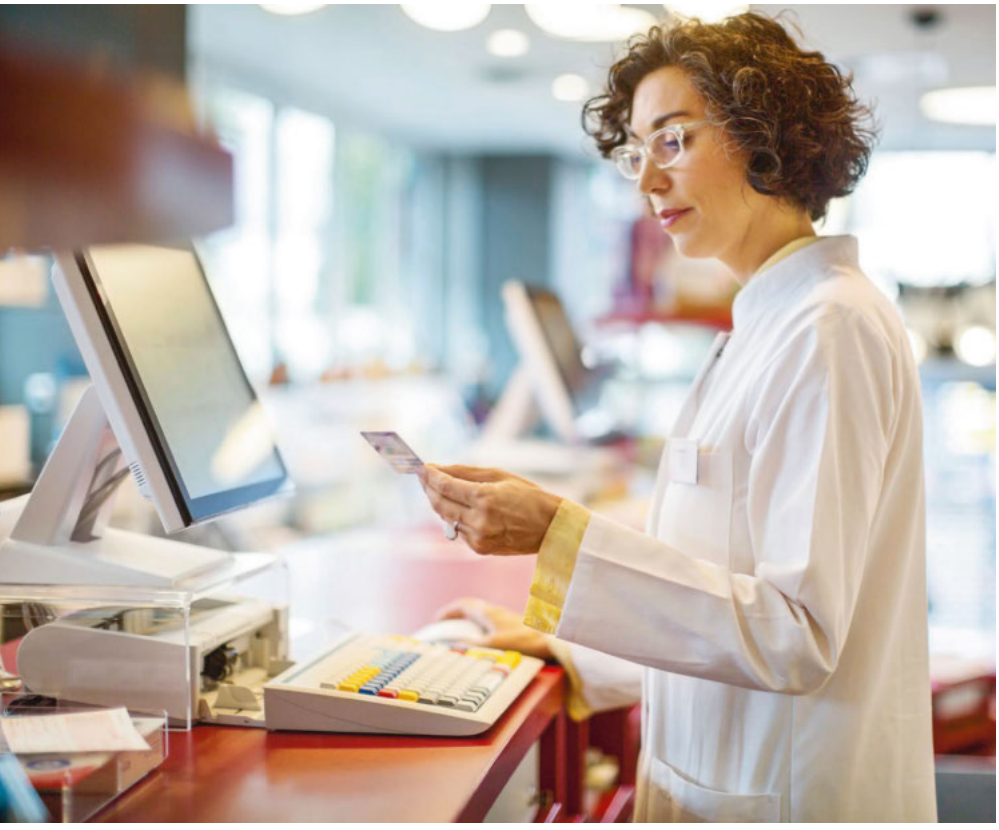
Heißt also, wie auch bei den Meldungen zum Missbrauch der Gabapentinoide: Möglicherweise waren Pregabalin und Gabapentin nicht die einzigen Substanzen, die die Menschen nahmen; möglicherweise litten sie unter Erkrankungen, die als eigentliche Ursache für den Tod gelten. Die Daten können dies nicht darstellen. Und dementsprechend bleiben viele Fragen offen. Zu viele – zumindest einige Länder sehen das so.

Schutz vor Missbrauch

Frankreich etwa verschärfte in den vergangenen Jahren die Verschreibungsregeln für Gabapentinoide, Ärzte nutzen seit 2021 fälschungssichere Rezepte. Patienten können ihre Pregabalin-Verschreibung nur noch in Monatsdosen einlösen und maximal fünfmal verlängern. Großbritannien wiederum stufte Gabapentin und Pregabalin 2019 als kontrollierte Substanzen der Klasse C ein – und damit als Drogen mit potenziellem Missbrauch. Dort stehen sie in einer Reihe mit Lachgas, anabolen Steroiden und Diazepam.

Wäre mit all diesem Wissen auch in Deutschland eine Einstufung der Gabapentinoide nach dem Betäubungsmittelgesetz (BtMG) ratsam? Dabei gelten zum Schutz vor Medikamentenmissbrauch strengere Regeln bei der Verschreibung: Dank der fortlaufenden Nummer kann ein Rezept etwa zweifelsfrei dem ausstellenden Arzt zugeordnet werden. BtM-Rezepte sind außerdem nur acht Tage lang gültig.

Sven Speerforck berichtet aus der Praxis. Die Klinik für Psychia-

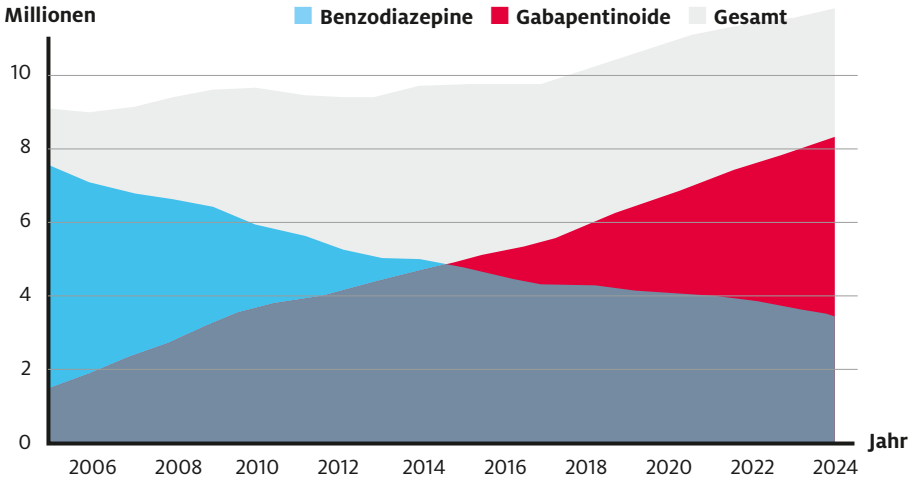


Gabapentin und Pregabalin sind in Deutschland zwar verschreibungspflichtig, unterliegen aber nicht den strengeren Regeln des Betäubungsmittelgesetzes.

trie in Leipzig behandelt rund 1.000 Patienten pro Jahr stationär, 200 davon seien Suchterkrankte. „Vielleicht die Hälfte oder ein Drittel von diesen Patienten konsumiert neben Opioiden auch Pregabalin. Nicht mal ein Fall pro Jahr ist dabei, bei dem es ausschließlich um Pregabalin geht." Solche Patienten sehe er wirklich sehr selten. Häufiger hingegen solche, die mit multiplen Abhängigkeiten kämpfen. Auch Tom Bschor beschwichtigt: „Nach jetzigem Kenntnisstand bleiben 98 Prozent der Patienten bei der verordneten Dosis", sagt er. Missbrauch und Sucht träten in aller Regel bei Menschen auf, die weitere Abhängigkeiten haben. „Eine Diabetes-Patientin kommt nicht auf die Idee: Heute probiere ich einfach mal die drei- oder vierfache Dosis."

Schmerzstillende Wirkstoffgruppen

Während die Anzahl der Verschreibungen von Benzodiazepinen kontinuierlich sinkt, steigt die der Gabapentinoide. In der Summe wurden 2024 mehr der Medikamente als noch 2005 verschrieben.



Quelle: Daten der Verschreibungszahlen der gesetzlichen Krankenversicherungen, zur Verfügung gestellt von WIdO.

Mit Blick auf das Risiko einer Abhängigkeit gebe es dringlichere Probleme, etwa bei den Benzodiazepinen, ist Bschor überzeugt. Erste Benzodiazepine kamen in den 1960er-Jahren auf den Markt. Mehr als 20 Jahre erlebten die Psychopharmaka einen wahren Hype. Dann gerieten sie wegen ihres hohen Suchtpotenzials in Verruf. Doch auch noch im Jahr 2015 galten bis zu 1,6 Millionen Personen als benzodiazepinabhängig. Bekannte Benzodiazepine sind beispielsweise Diazepam (Valium) und Lorazepam (Tavor). Heute unterliegen alle Benzodiazepine in Deutschland theoretisch dem Betäubungsmittelgesetz. Allerdings sind sie in handelsüblichen Dosierungen praktisch davon ausgenommen. So darf zum Beispiel Lorazepam mit bis zu 2,5 Milligramm pro Tablette auch über ein „normales" Rezept verschrieben werden. Es dient als Beruhigungsmittel bei akuten Panikattacken.

Die Verschreibungszahlen der Benzodiazepine fallen zwar ebenso kontinuierlich, wie die der Gabapentinoide steigen, in der Summe stiegen die Verordnungen beider schmerzstillenden Wirkstoffgruppen seit 2005 allerdings um fast ein Viertel. Das Risiko einer Sucht ist bei den Benzodiazepinen höher, deshalb fallen die rückläufigen Zahlen der Verschreibungen dieses Medikaments dennoch ins Gewicht. Hier würde eine verschärfte BtMG-Pflicht laut Bschor mehr bewirken als bei den Gabapentinoiden.

Die Fachleute sind sich einig: Bei korrekter Dosierung und kontrollierter Einnahme seien Gabapentinoide sicher. Und sie sehen bisher auch keine vergleichbare Situation wie in den USA, in denen seit vielen Jahren die sogenannte Opioidkrise tobt. Bis zu 80.000 Menschen sterben jährlich an Opioid-Überdosierungen. Für Deutschland – mit rund einem Viertel der Bevölkerungszahl der USA – zählte der Bundesdrogenbeauftragte im Jahr 2024 insgesamt 2.137 drogenbedingte Todesfälle, für alle Substanzen zusammen. Die Zahlen steigen zwar seit gut zehn Jahren, von einer Epidemie sei man dennoch weit entfernt, sagen die Mediziner.

Damit das auch so bleibt, empfehlen die Fachleute, Pregabalin und Gabapentin wirklich nur zu verschreiben, wenn es dafür einen medizinischen Grund gibt. Wichtig sei eine ausführliche Befragung der Person, ob es in der Vergangenheit Erfahrungen mit Beruhigungsmitteln oder Drogenmissbrauch gab. Ärzte müssten ihre Patienten zudem aufmerksam begleiten, um Anzeichen einer Gewöhnung zu erkennen, zum Beispiel wenn diese selbstständig die Dosis erhöhen, wiederholt Rezepte anfordern, verschiedene Ärzte aufsuchen oder über ständig neue Symptome klagen, für die es keine medizinische Diagnose gibt.

Außerdem könne es manchmal helfen statt des scheinbar unkomplizierten, schnelleren einen längeren, aber sicheren Weg zu wählen. Vor allem bei Angststörungen kann eine Verhaltenstherapie Erfolge bringen, wenn nötig mit Unterstützung durch Antidepressiva, die weniger suchtgefährdend sind. ■



SIGRID MÄRZ
ist promovierte Zellbiologin. Als freie Wissenschaftsjournalistin schreibt sie über Medizin, Gesundheit und Forschung.

Illustration: picture alliance / Science Photo Library / LAGUNA DESIGN | Getty Images / Luis Alvarez | BDW-Grafik

Im Schatten der Diagnose

Psychische Störungen schränken Betroffene massiv in ihrem Alltag ein – und auch deren Partnerinnen und Partner leiden. Wie können Paare die Belastung gemeinsam bewältigen?

von DANIELA LUKAßEN-HELD



Mit einer Diagnose wie Depression verändert sich das Miteinander in einer Beziehung – und häufig auch die Rollenverteilung.

Depressionen, Schizophrenie, Angststörungen – mehr als eine Milliarde Menschen weltweit sind von psychischen Erkrankungen betroffen. Das entspricht rund 14 Prozent der Weltbevölkerung, wie aus dem aktuellen Mental Health Atlas der Weltgesundheitsorganisation WHO hervorgeht. Erkrankte sind dabei nicht nur Patientinnen und Patienten. Sie sind Ehepartner, Lebensgefährten, Eltern oder Kinder. Die Grundfesten einer Beziehung: sich gegenseitig unterstützen, füreinander da sein, sich auffangen und stärken – erkrankt der Partner oder die Partnerin psychisch, gerät diese Beziehungsdynamik vielfach aus den Fugen.

Unter einem großen Leidensdruck steht dann oft nicht nur der Betroffene selbst. Partnerinnen und Partner psychisch erkrankter Menschen entwickeln häufiger Symptome wie Stress, Angst oder Depressionen. „Das Risiko steigt mit der Schwere der Erkrankung des betroffenen Familienmitglieds“, erklärt Sabine Herpertz, Ärztliche Direktorin der Klinik für Allgemeine Psychiatrie am Universitätsklinikum Heidelberg. „Besonders bei schweren Erkrankungen wie Schizophrenie ist das Risiko für Stress beim Partner deutlich erhöht.“ Begründet sei das etwa in den Symptomen der psychischen Störung, vor allem den Kommunikationsschwierigkeiten der Erkrankten. Herpertz beruft sich auf eine Studie, die dazu 2025 im Fachjournal Medicine erschienen ist. Übernimmt eine Person dauerhaft Haushalt und familiäre Verantwortung allein, kann auch das belasten.

Guy Bodenmann, Leiter des Lehrstuhls für Klinische Psychologie mit den Schwerpunkten Kinder/Jugendliche und Paare/Familien an der Universität Zürich, beschäftigt sich ebenfalls seit Jahren mit den Auswirkungen psychischer Erkrankungen auf Paarbeziehungen. „Psychische Erkrankungen betreffen selten nur die Person mit der klinischen Diagnose. In einer Partnerschaft verändern sie fast immer das gemeinsame Leben, den Alltag, das emotionale Miteinander und häufig auch die Sexualität. Eine psychische Störung wirft einen Schatten auf die gesamte Beziehung“, sagt er.

Nach Bodenmann hat eine psychische Erkrankung vor allem Auswirkungen auf die Rollenverteilung innerhalb der Partnerschaft: Der Partner ohne Diagnose übernimmt zunehmend Aufgaben, schont den Erkrankten und versucht, Belastungen auszugleichen. Das sei zwar gut gemeint, könne jedoch unbeabsichtigt dazu beitragen, dass Abhängigkeiten wachsen und das Gefühl eigener Selbstwirksamkeit beim erkrankten Menschen weiter abnimmt. Diese Dynamik könne die Partnerschaft zusätzlich belasten.

Die Krankheit als Trennungsgrund

Das Eheversprechen „In guten wie in schlechten Zeiten“ wird durch eine psychische Erkrankung oft auf eine harte Probe gestellt. Wie stark Krankheiten tatsächlich das Risiko einer Trennung beeinflussen, haben italienische Wissenschaftler um Daniele Vignoli von der Universität Florenz untersucht. Sie analysierten Partnerschaften von Menschen ab 50 Jahren aus verschiedenen europäischen Ländern.

„Das wichtigste Ergebnis ist, dass schlechte Gesundheit zwar eine Rolle spielt, die Auswirkungen aber in absoluten Zahlen relativ gering sind. Scheidungen im höheren Alter sind nach wie vor selten, selbst wenn ein Partner krank ist“, sagt Vignoli. „Allerdings beobachten wir ein klares Muster: Wenn ein Partner unter schlechter körperlicher Gesundheit, starken Einschränkungen seiner Aktivität oder Depressionen leidet, steigt das Risiko einer Trennung im Vergleich zu Paaren, bei denen beide Partner gesund sind. Dies stützt die Annahme, dass Gesundheitsprobleme Beziehungen belasten können, insbesondere wenn sie eine langfristige Anpassung innerhalb der Partnerschaft erfordern.“

Geschlechtsspezifische Unterschiede erkannte das Team in Assoziation mit der Art der Erkrankung. Bei körperlichen Erkrankungen steigt das Trennungsrisiko vor allem dann, wenn Frauen betroffen sind und ihre männlichen Partner gesund bleiben. Die Forschenden gehen davon aus, dass dies auf geschlechtsspezifische Betreuungsrollen und Erwartungen zurückzuführen ist – insbesondere in den von ihnen untersuchten älteren Generationen, in denen Frauen in Paarbeziehungen noch immer häufiger Sorgearbeit übernehmen.

Depressionen hingegen erhöhen das Risiko für eine Trennung unabhängig davon, welcher Partner erkrankt ist. Vignoli erklärt: „Depressionen wirken sich auf die emotionale Verfügbarkeit, die Kommunikation und die gegenseitige Unterstützung aus. Diese Herausforderungen können die Qualität der Beziehung unabhängig vom Geschlecht beeinträchtigen.“ Eine gute Nachricht gibt es jedoch, wie Vignoli betont: Die überwiegende Mehrheit der Paare bleibt auch im Krankheitsfall zusammen. „Gesundheitsprobleme erhöhen das Risiko einer Trennung geringfügig, sind jedoch nicht ausschlaggebend dafür. Viele Paare zeigen angesichts einer Krankheit eine bemerkenswerte Widerstandsfähigkeit.“

Ein Punkt, den auch Bodenmann hervorhebt. Er erklärt: „Wenn es gelingt, die psychische Störung als gemeinsame Herausforderung zu begreifen, können Paare auch weiterhin verbunden bleiben oder sogar gemeinsam wachsen.“ Aus seiner Sicht sollte die Erkrankung deshalb nicht ausschließlich als individuelles Problem verstanden werden. Zwar werde die Diagnose nur bei einer Person gestellt, die Folgen beträfen jedoch immer beide Partner. Entscheidend sei deshalb, die Belastung als Team anzugehen und gemeinsame Bewältigungsstra-

Illustration: erstellt mithilfe der Adobe-Firefly-KI



Ist der Partner psychisch krank, kann das die Beziehung aus der Balance bringen. Psychologen empfehlen, sich rechtzeitig therapeutische Hilfe zu holen.

tegien zu entwickeln. „Es zeigt sich, dass das Miteinander stärkere positive Effekte hat als die Unterstützung oder die Übernahme von Tätigkeiten zur Entlastung“, sagt Bodenmann.

Krank und krank gesellt sich gern?

Eines scheint vor dem Hintergrund der psychischen Erkrankung eines Partners besonders relevant: Stabilität. Stabilität im Miteinander und Stabilität, was etwa die psychische Verfassung des nicht erkrankten Partners betrifft. Gleichzeitig zeigt die Forschung ein auffälliges Muster: Menschen mit psychischen Erkrankungen leben häufiger mit Partnerinnen oder Partnern zusammen, die ebenfalls psychisch erkrankt sind. Das beschreibt eine Studie, veröffentlicht 2025 in Nature Human Behaviour. Ob beide Partner bereits zu Beginn der Beziehung psychisch erkrankt waren oder sich die Erkrankungen erst im Verlauf entwickelten, bleibt allerdings offen. Als mögliche Erklärung diskutieren die Forschenden die sogenannte assortative Partnerwahl – also die Tendenz, Menschen mit ähnlichen Eigenschaften als Partner auszuwählen.

Die Psychiaterin Herpertz verweist außerdem auf eine aktuelle Kohortenstudie. Laut Studienautorin Anne Sofie Tegner Anker von der Universität Kopenhagen treten psychische Erkrankungen in manchen Familien häufiger auf als in anderen. 70 Prozent der Personen, die selbst diagnostiziert wurden, hatten ein Familienmitglied, das ebenfalls betroffen ist. Hier sind nicht nur Partner, sondern auch Geschwister, Eltern und Kinder gemeint. Dabei müssen Angehörige keineswegs dieselbe Diagnose haben. Auch unterschiedliche psychische Erkrankungen kommen innerhalb einer Familie häufiger gemeinsam vor. Als mögliche Gründe nennt Tegner Anker die genetische Veranlagung, ähnliche Erfahrungen im familiären Umfeld sowie die Belastung durch das psychisch erkrankte Familienmitglied.

Wird zunächst nur der psychisch erkrankte Mensch behandelt, sollte dann auch etwa die Partnerin oder der Partner regelmäßig einbezogen werden. „Er oder sie hat dann die Möglichkeit, sich einzubringen und von den eigenen Belastungen und Erfahrungen zu berichten, damit beide voneinander wissen und beide gemeinsam in die Kraft zurückgeführt werden können“, sagt Bodenmann. „Gerade hier liegt ein blinder Fleck. Die heilende und regenerative Kraft einer Partnerschaft wird in der Behandlung psychischer Erkrankungen noch immer zu wenig berücksichtigt.“

Bodenmann empfiehlt, therapeutische Hilfe spätestens dann in Anspruch zu nehmen, wenn Paare den Kreislauf aus Belastung, Rückzug und Erschöpfung aus eigener Kraft nicht mehr durchbrechen können. Warnzeichen seien Hoffnungslosigkeit, zunehmende emotionale Distanz oder anhaltende Konflikte. Der richtige Ansprechpartner ist hier zunächst der Hausarzt. Aber auch in Selbsthilfegruppen oder Onlineforen finden Angehörige psychisch erkrankter Menschen Hilfe. Infos gibt es etwa auf den Internetseiten der Deutschen Depressionshilfe.

Dabei zeigt die Forschung auch die präventive Bedeutung stabiler Beziehungen: Menschen, die allein leben, erkranken häufiger an Depressionen als Menschen in einer Partnerschaft. So herausfordernd eine psychische Erkrankung für das gemeinsame Leben auch ist und so sehr sie die Beziehungsdynamik ins Wanken bringt: Den meisten Paaren gelingt es dennoch, diese Herausforderungen gemeinsam anzunehmen und zu meistern. ■

Illustration: erstellt mithilfe der Adobe-Firefly-KI

BILD DER
WISSENSCHAFT

Wissen und Welt
Technik und Zukunft
Leben und Mensch

Seit 1964 begleitet Bild der Wissenschaft die Forschung bei ihrem Streben nach neuen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, nützlichen Technologien oder Fortschritten in der Medizin.

Die letzten 60 Jahre waren eine bewegte Zeit, doch die nächsten Jahrzehnte werden sicher nicht weniger aufregend. Mit Bild der Wissenschaft stehen Sie dabei auf der Seite der Wissenschaft, erfahren die Fakten und lesen, mit welchen Perspektiven und Lösungen die Forscherinnen und Forscher den Herausforderungen ihrer Zeit begegnen.

Wählen Sie Ihr passendes Abo-Angebot und lesen Sie Bild der Wissenschaft gedruckt oder digital als BDW+.



Artikel aus dem Heft jederzeit online lesen

Print

Jahres-Abo
Bild der Wissenschaft-Magazin

+ 14 Ausgaben inkl. 2 Themenhefte
+ Lieferung frei Haus und pünktlich zum Erscheinungstermin
+ Prämie Ihrer Wahl bei Abschluss

139,10€ / Jahr

wissenschaft.de/abo/print

Print

Flex-Abo
Bild der Wissenschaft-Magazin

+ Lieferung frei Haus und pünktlich zum Erscheinungstermin
+ flexible Laufzeit, monatlich kündbar

11,90€ / Monat

wissenschaft.de/abo/print

Digital + Print

Kombi-Abo
Magazin und BDW+



+ alle Vorteile des BDW Flex-Abos
+ **alle BDW-Artikel online lesen, großes Magazinartikelarchiv und immer die neueste Ausgabe als PDF**
+ monatlich kündbar

Kombi-Abo **4 Wochen kostenlos** testen

12,90€ / Monat

wissenschaft.de/abo/print

Junge Wilde und alte Meister

Die Wissenschaft liebt ihre Wunderkinder. James Watson entschlüsselte im Alter von 24 Jahren zusammen mit dem 36-jährigen Francis Crick die DNA-Doppelhelix, Georges Köhler entwickelte vor seinem 29. Geburtstag die Methode zur Herstellung monoklonaler Antikörper, Frederick Banting isolierte Insulin mit Anfang 20. Alle bekamen Nobelpreise. Mit dieser Stichprobe könnte man meinen, dass wirklich große Ideen nur von den Jungen kommen.

Zwei aktuelle Studien legen nahe, dass da tatsächlich etwas dran sein könnte. In der ersten, die kürzlich im Fachmagazin Science veröffentlicht wurde, kommen Haochuan Cui von der University of Pittsburgh und seine Kollegen nach Analyse der Publikationsdaten von mehr als zwölf Millionen Forschenden zu einem einfachen Ergebnis: Mit zunehmendem Alter sinkt die Wahrscheinlichkeit, wirklich disruptive Arbeiten zu veröffentlichen – Forschung also, die etablierte Paradigmen erschüttert, statt sie nur weiter auszubauen. Die zweite Studie, die von Mahdee Mushfique Kamal und Raiyan Abdul Baten auf dem Preprint-Server arXiv veröffentlicht wurde und rund 28 Millionen Publikationen aus fünf Jahrzehnten analysierte, stützt dieses Ergebnis: Teams mit vielen Forschungsfrischlingen produzieren besonders häufig Arbeiten, die als disruptiv gelten können.



Die **FORSCH-PERSPEKTIVE**

RALF NEUMANN ist Chefredakteur und Mitherausgeber des „Laborjournal“, das für seinen kritischen Blick auf die biologisch-medizinische Forschung bekannt ist. Zuvor forschte er über die Lichtsteuerung des Pflanzenwachstums.

Auch hier könnte man also folgern: Wer frischen Wind will, sollte Leute rekrutieren, die noch nicht allzu sehr vom Wissenschaftsbetrieb domestiziert wurden. Beide Studien beschreiben dabei erstaunlich ähnliche Mechanismen. Ältere Forschende zitieren häufiger ältere Literatur und bewegen sich zunehmend innerhalb jenes intellektuellen Koordinatensystems, das sie über Jahrzehnte selbst mit aufgebaut haben. Jüngere Forschende greifen dagegen häufiger auf weniger etablierte Quellen zurück, verknüpfen entferntere Fachgebiete und erzeugen so ungewöhnliche Querverbindungen.

Disruptiv trotz Erfahrung

Das wirkt zunächst befremdlich. Schließlich galt Erfahrung jahrzehntelang als hohe wissenschaftliche Tugend. Und jetzt soll genau diese Erfahrung dafür sorgen, dass geistige Leitplanken zu eng gezogen werden? So einfach liegt der Fall sicher nicht. Schließlich kennt die Wissenschaftsgeschichte genügend Gegenbeispiele. Robert Furchgott entdeckte jenseits der 60, dass das Gas Stickstoffmonoxid als zentraler Blutdruckregulator wirkt. Oswald Avery war fast 70, als er zeigte, dass DNA und nicht Protein der Träger der Erbinformation ist. Beide Erkenntnisse zählen zu den wirklich disruptiven Momenten der modernen Biomedizin.

Anders Albert Einstein. Als junger Mann revolutionierte er die Physik mit ungezügelter Radikalität. Im Alter hingegen sperrte er sich vehement gegen die Konsequenzen der Quantenmechanik. Aus dem Revolutionär war ein Verteidiger der Ordnung geworden, die er einst selbst erschüttert hatte.

Das Problem liegt vermutlich ohnehin weniger im Alter selbst als im System. Wissenschaft belohnt mit zunehmender Karriere vor allem Stabilität in Form von Reputation, Netzwerken und Fördermitteleingang. Wer jahrzehntelang erfolgreich war, hat selten Anreize, die eigenen Grundannahmen radikal infrage zu stellen. Und wer gelernt hat, wie „gute“ Förderanträge, Hypothesen und Veröffentlichungen aussehen, entwickelt oft ein feines Gespür dafür, was zu riskant sein könnte, um es zu versuchen.

Ganz anders die Frischlinge. Oft wissen sie schlichtweg noch nicht, welche Ideen womöglich unrealistisch sind. Furchtlos stolpern sie über disziplinäre Grenzen, kombinieren Dinge, für die man bislang keinen gemeinsamen Nenner sah, und stellen infrage, was eigentlich als geklärt galt. Gerade weil sie unerfahren sind.

Die zweitgenannte Studie geht aber noch weiter und kommt dabei zu einem differenzierteren Fazit: Laut deren Analyse wird es besonders dann produktiv, wenn junge Forschende mit Wissenschaftlern zusammenarbeiten, die bereits Disruptives geleistet haben. Offenbar reicht reine jugendliche Unbekümmertheit nicht aus. Vielmehr entsteht Innovation am ehesten dort, wo Regelbruch und Erfahrung mit kontrolliertem Risiko aufeinanderprallen. Wo ein Senior bereits Disruptives geliefert hat, können die wilden Ideen der Jungen möglicherweise leichter sprießen. Und die erfahrenen Senioren können besser einschätzen, welche davon zu Großem führen könnten – und bei welchen der Fehlschlag vorprogrammiert wäre.

Vorsichtige Forschungsförderung

Das Dumme an alledem ist, dass die Realität des modernen Wissenschaftssystems eine solche Risikodynamik eher unterdrückt. Fördermittelgeber bevorzugen „realistische" Projekte, Gutachter lieben Mainstream-Kompatibilität, und Karrieren hängen weiterhin an möglichst langen Publikationslisten. Forschungsideen mit hohem Ergebnisrisiko gelten zwar rhetorisch als Innovationstreiber, werden aber praktisch oft zum Förderhindernis. Wer die etablierten Pfade verlässt, bekommt schnell das Etikett „nicht ausreichend validiert" verpasst. Eine ausreichende Validierung kann allerdings nur innerhalb bekannter Denkgrenzen funktionieren.

Als Folge davon produziert Wissenschaft immer häufiger solide Anschlussarbeiten statt wirklich verstörend neue Ideen. Man optimiert lieber bestehende Denkgebäude, statt die Statik infrage zu stellen. Das Ergebnis ist paradox: Zunehmend wird „fehlende Disruption" oder „notwendige Innovation" beklagt – gleichzeitig aber zementiert das System Karrierepfade, die vor allem jene belohnen, die möglichst früh lernen, wie man nicht aneckt. Dabei zeigen nicht erst die beiden Studien: Je schneller jemand in die wissenschaftliche Kultur integriert wird, desto schwerer scheint es zu werden, diese Kultur positiv zu irritieren. Als Ergebnis bleibt eine Forschungswelt, die zwar laut nach Revolution ruft, praktisch aber evolutionäre Trippelschritte verwaltet.

Was wäre die Lösung? Eine Verklärung jugendlicher Genialität wohl kaum. Niemand möchte eine Wissenschaft, die maßgeblich aus hyperaktiven 28-Jährigen besteht, die ständig ihre Theorien wechseln und damit immer wieder den Laborhaushalt ruinieren. Genauso unerquicklich wäre allerdings ein System, das Innovation nur noch als möglichst risikoarme Variation bereits akzeptierter Ideen versteht.

> Innovation entsteht, wo sich Regelbruch und Erfahrung treffen

Wahrscheinlich braucht Forschung genau jene Mischung, die beide Studien nahelegen: die Ungeduld der Jungen und die Skepsis der Alten. Die einen bringen produktive Irritation hinein, die anderen verhindern, dass jede wilde Idee sofort zur neuen Weltformel erklärt wird. Die einen wissen noch nicht genau, was als unmöglich gilt – und die anderen haben schon oft genug erlebt, warum manches scheitert.

Doch beide brauchen dafür dasselbe: ein System, das ihnen die Risikobereitschaft nicht von vornherein austreibt. Die Jungen, Watson, Köhler und Banting, konnten ins Risiko gehen. Die Alten, Furchgott und Avery, offenbar auch. Vielleicht entscheidet also weniger das Alter über Disruption – sondern eher, wie viel Scheitern den Forschenden, ob jung oder alt, noch zugestanden wird.





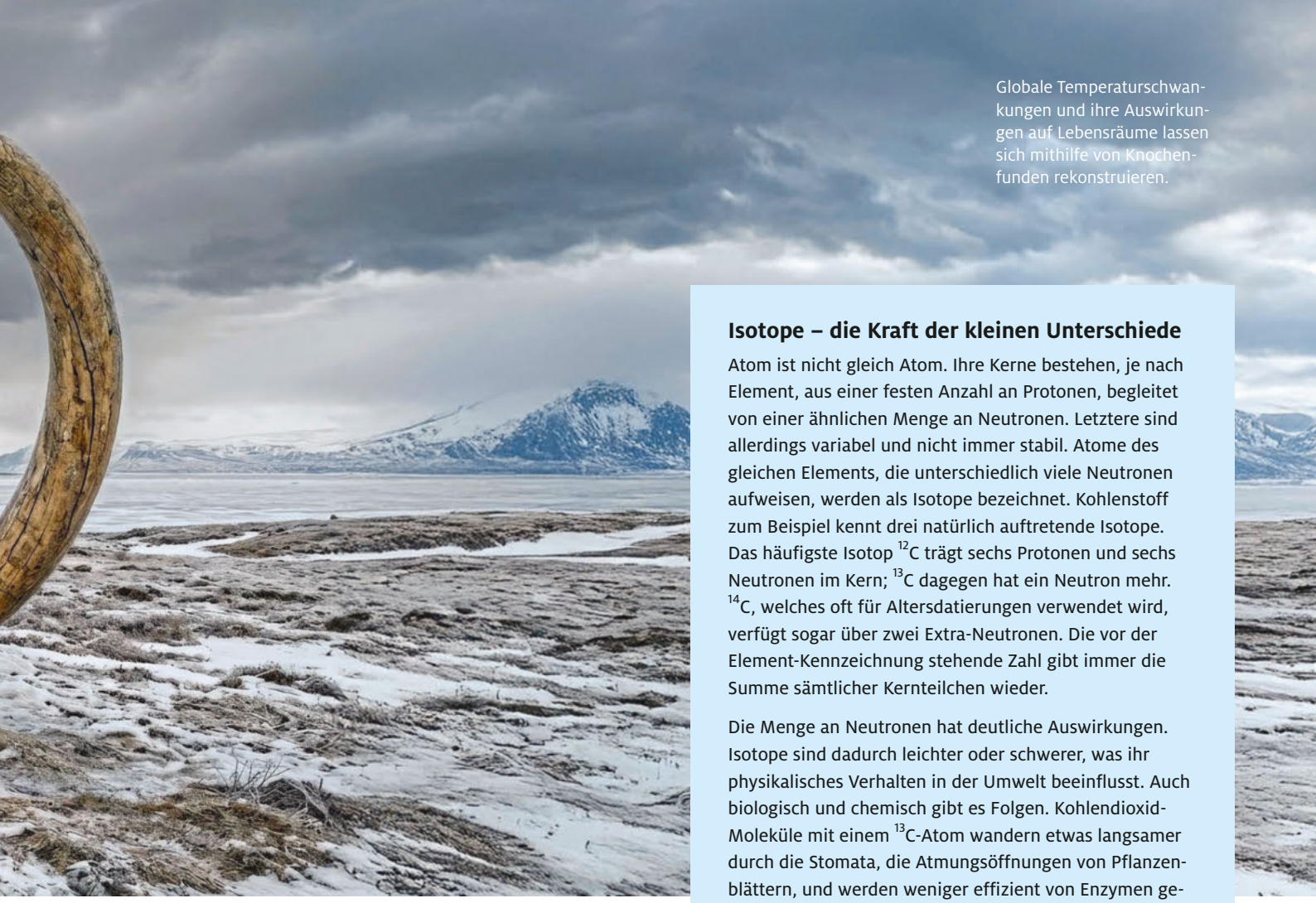
Eine verlorene Welt

Am Ende der letzten Eiszeit geriet in Europa ein ganzes Ökosystem ins Wanken. Mithilfe der Isotopenanalyse können Tübinger Forschende die vergangene Artenvielfalt studieren.

von KURT DE SWAAF

Süddeutschland vor etwa 19.000 Jahren: Auch wer hier aufgewachsen ist, würde die Gegend als Zeitreisender wohl nicht wiedererkennen. Dort, wo später der Bodensee entstehen wird, ragt noch immer der Rheingletscher mehrere Hundert Meter in die Höhe. Die Ebenen sind karg und baumlos, die Alpen zu großen Teilen von Eispanzern überzogen. Mammuts und Rentiere ziehen durch die schier endlos wirkenden Einöden, im Boden wuseln Lemminge herum. Und gelegentlich taucht auch *Homo sapiens* wieder auf: Die Steinzeitmenschen wurden von der letzten, extrem kalten Phase des Weichsel-Würm-Glazials aus Mitteleuropa vertrieben. Jetzt kehren die Zweibeiner langsam zurück, denn zu essen finden sie hier genug.

Das ganze Gebiet zwischen Schwarzwald und Böhmerwald war damals Teil eines riesigen und wahrhaft einzigartigen Ökosystems. „Mammuts und andere große Tiere waren überall, dazu gibt es keinen Vergleich“, erklärt die Paläobiologin Dorothée Drucker von der Universität Tübingen. Das offene Grasland lieferte einer Vielzahl von Pflanzenfressern reichlich Nahrung, und die wiederum dienten allerlei Karnivoren als Speise. Fachleute haben den Lebensraum nach ihrem imposantesten Bewohner benannt: die Mammutsteppe. Sie erstreckte sich einst



Globale Temperaturschwankungen und ihre Auswirkungen auf Lebensräume lassen sich mithilfe von Knochenfunden rekonstruieren.

Coosh448 / stock.adobe.com

Isotope – die Kraft der kleinen Unterschiede

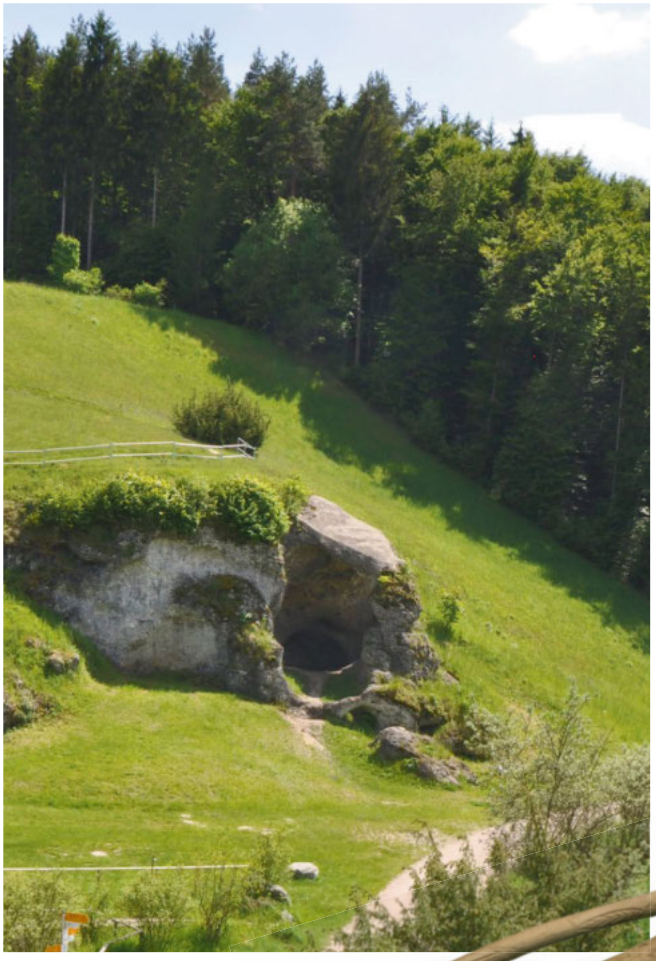
Atom ist nicht gleich Atom. Ihre Kerne bestehen, je nach Element, aus einer festen Anzahl an Protonen, begleitet von einer ähnlichen Menge an Neutronen. Letztere sind allerdings variabel und nicht immer stabil. Atome des gleichen Elements, die unterschiedlich viele Neutronen aufweisen, werden als Isotope bezeichnet. Kohlenstoff zum Beispiel kennt drei natürlich auftretende Isotope. Das häufigste Isotop ^{12}C trägt sechs Protonen und sechs Neutronen im Kern; ^{13}C dagegen hat ein Neutron mehr. ^{14}C, welches oft für Altersdatierungen verwendet wird, verfügt sogar über zwei Extra-Neutronen. Die vor der Element-Kennzeichnung stehende Zahl gibt immer die Summe sämtlicher Kernteilchen wieder.

Die Menge an Neutronen hat deutliche Auswirkungen. Isotope sind dadurch leichter oder schwerer, was ihr physikalisches Verhalten in der Umwelt beeinflusst. Auch biologisch und chemisch gibt es Folgen. Kohlendioxid-Moleküle mit einem ^{13}C-Atom wandern etwas langsamer durch die Stomata, die Atmungsöffnungen von Pflanzenblättern, und werden weniger effizient von Enzymen gebunden wie ihre regulären Geschwister. In Kombination mit anderen leicht unterschiedlichen Effekten ergibt sich für jeden Organismus und jede Umgebung ein eigenes Isotopenprofil – individuell wie ein Fingerabdruck.

von der heute französischen Atlantikküste über Osteuropa, Sibirien und die trockengefallene Beringstraße hinweg bis weit nach Nordamerika hinein – die vermutlich größte zusammenhängende Vegetationszone der Erdgeschichte.

Drucker erforscht das Urzeitphänomen bereits seit Jahren. Die Mammutsteppe verdanke ihre Existenz verschiedenen Faktoren, berichtet die Expertin. An erster Stelle habe das Klima des vor 2,6 Millionen Jahre begonnenen Pleistozäns mit seinen Abkühlungsphasen gestanden. Während dieser Eiszeiten, von denen das Weichsel-Würm-Glazial die letzte war, wurde die Waldgrenze weit nach Süden gedrängt, wodurch Raum für großflächige Offenlandökosysteme entstand. Die Bedingungen ähnelten bis zu einem gewissen Grad denen der heutigen Tundra-Regionen, erläutert Drucker. Kälte sei prägend gewesen, aber es gab relativ wenig Niederschläge. „Viel Schnee wäre auch für Mammuts und andere Tiere ein Problem gewesen." Die Trockenheit sorgte gleichzeitig dafür, dass Böden nicht vermoorten, was die mikrobielle Aktivität gebremst und somit die Fruchtbarkeit verringert hätte. Abgesehen davon bekam die Mammutsteppe im Sommer wegen der geringen Bewölkung ziemlich viel Sonnenlicht. Der Permafrost lag deshalb tiefer unter der Erde als in der modernen Tundra, und die Vegetation gedieh besser. Letzteres auch, weil die Wachstumsperiode in südlicheren Breiten aufgrund des Sonnenstands länger anhielt. Das Ergebnis: ein üppiges Büfett für große Pflanzenfresser.

Allerdings griff diese sogenannte Megafauna wahrscheinlich auch selbst in die Gestaltung ihres Lebensraums ein, wie Drucker schildert. Die Tiere fungierten als Ökosystem-Ingenieure. Beim Wühlen und Trampeln pflügten sie die oberen Bodenschichten um. Ihre Fressaktivität und Verdauung beschleunigten den Nährstoffzyklus. Bemerkenswert ist zudem die Artenvielfalt. Neben *Mammuthus primigenius*, den Wollhaarmammuts, beherbergte die Steppe auch Wollhaarnashörner (*Coelodonta antiquitatis*), Rentiere (*Rangifer tarandus*), Moschusochsen (*Ovibos moschatus*), Wildpferde (*Equus ferus*), Saiga-Antilopen (*Saiga tatarica*) und





In der Karsthöhle am Petersberg im Brudertal (oben) fanden Forschende einen Lochstab und Rentiergeweihstangen mit Gravuren (rechts).

Steppenbisons (*Bison priscus*). Jede dieser Spezies dürfte ihre eigene ökologische Nische gehabt haben. Diese Artenvielfalt ist durchaus mit der in der heutigen afrikanischen Savanne vergleichbar.

Aufschlussreiche Funde aus Grotten

Doch der urtümliche Garten Eden war bekanntlich nicht von Dauer. Noch vor Beginn des Holozäns, der aktuellen geologischen Epoche, machte sich eine erste globale Erwärmung bemerkbar und läutete das langsame Ende der Mammutsteppe ein. Welche Auswirkungen der Temperaturanstieg hatte, lässt sich für Süddeutschland besonders gut an Funden aus dem Brudertal bei Engen im baden-württembergischen Hegau ablesen. Die dortigen Kalkfelsen weisen drei Grotten auf: den Petersfels, das Drexlerloch und die Gnirshöhle. Alle wurden während der Steinzeit von Menschen genutzt, die im Laufe der Jahrtausende so einiges zurückließen. Forschende fanden hier verschiedene Werkzeuge, Statuetten und Schmuckstücke sowie Tierzähne und zahlreiche Knochen, zum Teil mit Schnittspuren. Das sich verengende Brudertal könnte eine natürliche Falle vor allem für Rentierherden gewesen sein, glauben Experten. Waren die Vierbeiner erst mal hineingetrieben worden, konnten die prähistorischen Jagdgesellschaften sie leichter erlegen.

Für die Wissenschaft ist die Lage ein wahrer Glücksfall. Allein am Petersfels wurden bei den bisherigen Grabungen circa anderthalb Tonnen tierische Überreste geborgen. Diese Menge lässt vermuten, dass der Ort eine zentrale Anlaufstelle war – auch wenn die kleine Höhle selbst nur wenigen Unterschlupf bot. „Die Menschen haben vor dem Petersfels wohl eine Art Zeltlager gehabt“, meint der ebenfalls an der Universität Tübingen tätige Archäozoologe Chris Baumann. Steinzeitliche Gruppen trafen sich vielleicht zur gemeinsamen Jagd, und die Beute wurde gleich an Ort und Stelle verarbeitet. Die ältesten Funde aus dem Brudertal stammen allerdings aus der Magdalénien-Epoche vor etwa 17.000 bis 13.000 Jahren. Von der deutlich früheren Aurignacien-Kultur, welche auch die berühmten Tier- und Frauenfigurinen der Schwäbischen Alb hervorbrachte, gibt es im Hegau keine Spuren.

Dank der Knochen und Zähne aus dem Brudertal lässt sich nicht nur die Artenvielfalt der süddeutschen Mammutsteppe untersuchen. Das Material ermöglicht auch Einblick in die Ökologie und den Wandel des damaligen Lebensraums. Der Schlüssel dafür sind sogenannte stabile Isotope. Solche Varianten der Atome wichtiger Elemente wie Kohlenstoff, Sauerstoff oder Stickstoff werden in unterschiedlichen Quantitäten von Tieren und Pflanzen aufgenommen und eingelagert. Über die Mengenverhältnisse entscheiden sowohl die Biologie als auch die vorherrschenden Umweltbedingungen. Chris Baumann erläutert dies am Beispiel des „schweren“ Sauerstoffisotops ^{18}O. Er und seine Kolleginnen analysieren unter anderem dessen Häufigkeit im Zahnschmelz. Regenwasser enthalte weniger ^{18}O als Grundwasser, erklärt der Forscher. „Wichtig ist also: Welches Trinkverhalten hat ein Tier?“ Deckt es seinen Wasserbedarf vorrangig aus Pfützen oder der Nahrung, zeige sich das im Sauerstoff-Isotopenprofil, ausgedrückt als $\delta^{18}O$.

Zahnschmelz im Massenspektrometer

Die anscheinend regelmäßige menschliche Nutzung von Petersfels und Gnirshöhle begann vor etwa 16.000 Jahren

und währte zunächst mehr als 2.000 Jahre lang. Just in den Zeitraum fällt auch die erste zögerliche, aber kontinuierliche Erwärmung nach der Maximalvereisung am Ende des Würm-Weichsel-Glazials. Chris Baumann, Dorothée Drucker und sechs weitere Wissenschaftlerinnen eröffnete diese Überlappung eine spannende Perspektive. Im Zahnschmelz der prähistorischen Tiere, so vermutete das Tübinger Team, könnten detaillierte Spuren des steinzeitlichen Klimawandels enthalten sein. Die Forschenden nahmen Proben aus den Backenzähnen von sieben Wildpferden und einem Auerochsen oder Bison – genauer lässt sich das bei Zahnfossilien nicht unterscheiden. Sie schickten den Schmelz durch ein Massenspektrometer und wurden tatsächlich fündig. Die Isotopen-Messwerte enthielten diverse Hinweise auf eine längst vergangene Welt.

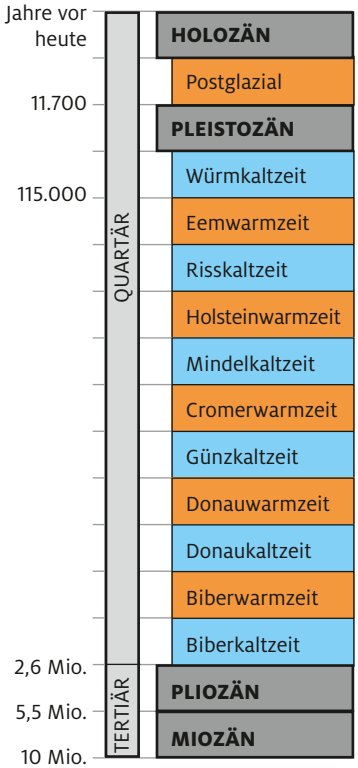
Das Besondere an dieser Studie ist die hohe zeitliche Auflösung der Daten. Bisher kam bei ähnlichen Analysen vor allem Knochenkollagen zum Einsatz. In dem Material werden anhaltend Kohlenstoff und Stickstoff eingelagert, seine Isotopenprofile sind deshalb Mittelwerte über die gesamte Lebensspanne eines Tieres. Zahnschmelz dagegen wächst und reift bei Pferden nur während der ersten fünf Jahre, in Rindergebissen sogar nur zwei Jahre lang. Dieser Prozess verläuft phasenweise: Unterschiedliche Schmelz-Zonen durchlaufen ihn zeitlich verschoben, und das schlägt sich in der Isotopenzusammensetzung nieder. Die Schichten bilden praktisch ein Archiv. So können Fachleute auch nach vielen Millennien noch jahreszeitliche Veränderungen in den Lebensbedingungen von Säugern nachvollziehen. Das gelang den Tübingern nun für das spätpleistozäne Süddeutschland.

Frühere, auf Kollagen basierende Arbeiten boten bereits erste Einblicke, doch das Team wollte ein besseres Bild des Zusammenspiels von Klima und Ökologie bekommen. Erfasst wurden nicht nur die ^{18}O-Mengenverhältnisse, sondern auch die des Kohlenstoff-Isotops ^{13}C. Letzteres nehmen Tiere über ihr Futter auf. ^{13}C hat die Neigung, sich in der Nahrungspyramide nach oben hin anzureichern. Das heißt, je höher die sogenannte trophische Stufe, auf der eine Spezies steht, desto höher sind im Allgemeinen auch ihre δ^{13}C-Werte. Pferde stehen als reine Pflanzenfresser weit unten, Raubkatzen ganz oben.

Die Würmkaltzeit in Europa

Im Pleistozän wechseln sich Warm- und Kaltzeiten ab. In der Würmkaltzeit, der letzten Kaltzeit vor dem Übergang zum Holozän, dominieren im Norden Europas Gletscher, auf dem Gebiet des heutigen Bodensees ragt der Rheingletscher in die Höhe. Dazwischen eine offene Graslandschaft mit tief liegendem Permafrost: ein idealer Lebensraum für Mammuts und andere große Pflanzenfresser.





Regierungspräsidium Freiburg / LGRB | Wikimedia Commons / Thilo Parg (CC BY-SA 3.0) | Karte: BDW-Grafik / Ricardo Rio Ribero Martins



Geowissenschaftlerin Dorothée Drucker von der Universität Tübingen extrahiert Kollagen aus einer Probe.

Detektivische Feinarbeit

Die konkrete Interpretation solcher Daten ist allerdings äußerst komplex. Belastbare Ergebnisse können nur durch Vergleiche mit bereits verifizierten Resultaten anderer Untersuchungen zustande kommen. Oft führen Expertinnen parallel auch Messungen der Stickstoff-Variante ^{15}N durch, deren Häufigkeit ebenfalls tierische Ernährungsgewohnheiten spiegelt. Isotopenanalysen erfordern viel detektivische Feinarbeit.

Die neue Tübinger Studie deckt mehrere interessante Details auf. Zum einen zeigen zwei der Pferdezähne deutlich schwankende $\delta^{18}O$-Werte. Demnach dürften diese beiden Tiere kalte Winter und relativ warme Sommer erlebt haben. $\delta^{18}O$ nimmt bei niedrigen Temperaturen ab und steigt bei höheren. Die anderen Pferde scheinen in Zeiten mit einem etwas gemäßigteren Klima zur Welt gekommen zu sein. Solche Verschiebungen sind im Verlauf von Jahrhunderten normal. Zum Vergleich bezog die Arbeitsgruppe auch einen ungefähr gleich alten Pferdezahn von einer Fundstelle in Nordwestfrankreich mit ein. Dessen $\delta^{18}O$-Signatur deutet auf noch mildere Wetterverhältnisse mit mehr Regen hin – eventuell eine Folge der Nähe zum Meer.

$\delta^{13}C$ ermöglicht ebenfalls klimatische Rückschlüsse. Sein Wert steigt mit zunehmender Trockenheit. Der Hintergrund: Gewächse von trockeneren Standorten nehmen mehr ^{13}C auf als solche, die besser mit Wasser versorgt sind. Die Mengen hängen jedoch auch von der Wuchshöhe, dem Stoffwechsel und der Familienzugehörigkeit der vorhandenen Pflanzenarten ab. All dies schlägt sich letztlich im Isotopenprofil von Herbivoren nieder.

Erkenntnisse über Essgewohnheiten

Die Pferdezähne aus dem Brudertal weisen relativ niedrige $\delta^{13}C$-Werte auf. Die Pferde hätten hauptsächlich Gräser gefressen, erklärt Chris Baumann. Ein Vergleich mit dem untersuchten rinderartigen Tier offenbart allerdings Überraschendes, denn der Bison oder Auerochse lagerte wesentlich mehr ^{13}C im Zahnschmelz ein. Baumann vermutet, dass der Wiederkäuer sich zum Teil von Flechten wie dem Rentiermoos (*Cladonia rangiferina*) ernährt haben könnte, welches besonders reich an ^{13}C ist. Und damit wäre vielleicht auch die zoologische Identität des Vierbeiners geklärt. Flechten wurden nach den bisherigen Erkenntnissen von Auerochsen verschmäht, der ausgestorbene Steppenbison dagegen hatte einen vielfältigeren Speiseplan und nutzte womöglich auch dieses Futterangebot.

Es gebe aber noch eine alternative Erklärung, meint Baumann. Der Rinderartige könnte selektiv auf



Backenzahn und Stoßzahnfragment eines Mammuts. Aus dem Zahnschmelz ziehen Forschende Rückschlüsse auf die damaligen Umweltbedingungen.

trockeneren Flächen gegrast haben, wo der Bewuchs zusätzlich ^{13}C aufnahm. Das wäre dann ein Hinweis auf sogenanntes „resource partitioning“, zu Deutsch Ressourcenaufteilung. Wenn ökologisch ähnliche Tierspezies wie die damaligen großen Pflanzenfresser auf unterschiedliche Nahrungsquellen zurückgreifen, begünstigt dies ihre Koexistenz. In der Mammutsteppe müsse der Effekt sehr ausgeprägt gewesen sein, betont Dorothée Drucker. Sonst hätte es die besagte Artenvielfalt wahrscheinlich nicht gegeben.

Die große Bedeutung der Ressourcenaufteilung legen auch andere Studien nahe. Bei spätpleistozänen Tierknochen aus Süddeutschland, Belgien, Tschechien und Sibirien zeichnet sich jede Spezies durch ihre eigenen Isotopenprofile aus. Besonders auffällig sind diesbezüglich immer wieder die Wollhaarmammuts. Deren $\delta^{15}N$-Werte liegen stets im obersten Bereich. Drucker zufolge fraßen die Rüsseltiere vermutlich viele Stauden und vor allem reife, bereits trockene Grashalme. Je älter das Gras, desto mehr ^{15}N, erklärt die Expertin. Eine ähnliche Futterpräferenz haben auch die Zebras in der heutigen afrikanischen Savanne, wo ebenfalls ein ausgeprägtes „resource partitioning“ vorherrscht.

Hinweise auf frühe Hundehaltung

Selbstverständlich bieten Isotopenanalysen nicht nur Einblicke in die Speisepläne von Herbivoren. Europäische Höhlenlöwen (*Panthera speleus*) zum Beispiel ernährten sich anscheinend vor allem von Rentieren. Spannende Ergebnisse brachten auch die Untersuchungen von 14 süddeutschen und schweizerischen Caniden-Knochen, darunter sechs Stück aus der Gnirshöhle. Die analysierten Überreste stammen sowohl von Wölfen als auch von urzeitlichen Hunden. „Wir haben da riesige Unterschiede in der Nahrung gefunden“, sagt Chris Baumann. Für Wölfe war die Megafauna offenbar die wichtigste Lebensgrundlage, etwa durch die Mammuts – sei es als Aas oder in Gestalt selbst gejagter Jungtiere. Die urzeitlichen Hunde hingegen bekamen Rentier- oder Pferdefleisch und kleinere Säuger wie Schneehasen zu fressen. Sie wurden wohl von Menschen gefüttert, die sie wahrscheinlich als Jagdhilfen und Wachtiere hielten. Die Gnirshöhle diente möglicherweise als eine Art Zwinger, meint Baumann.

Parallel durchgeführte DNA-Untersuchungen bestätigen diese Einteilung der beprobten Caniden in zwei Nischen. Jene aus der Gnirshöhle weisen allerdings eine ungewöhnlich hohe genetische Diversität auf und lassen sich nicht eindeutig Wölfen oder Hunden zuordnen. Diese Tiere dürften laut Baumann eine frühe Stufe im Domestikationsprozess darstellen. Drei weitere Exemplare aus dem nur 16 Kilometer entfernt in der Schweiz gelegenen „Kesslerloch“ zeigen ähnliche Isotopenprofile. Vielleicht war die Region nordwestlich des Bodensees sogar ein urzeitliches Zentrum der Hundezucht.



Knochen aus der Gnirshöhle lassen sich genetisch nicht eindeutig Hunden oder Wölfen zuordnen. Vermutlich handelt es sich bei ihnen um eine frühe Stufe im Domestikationsprozess von Hunden.

Wolfgang Gerber / Universität Tübingen | mauritius images / Katharina Hild / imageBROKER | Senckenberg / Baumann

Der postglaziale Klimawandel machte sich derweil immer stärker bemerkbar. Begünstigt durch die Erwärmung begann die Mammutsteppe langsam zu verbuschen, Bäume und Sträucher breiteten sich zunehmend aus. Für die Fauna hatte das einschneidende Folgen. So fanden Rentiere kaum noch Flechten und mussten auf anderes Futter umstellen, wie an ihren $\delta^{13}C$-Werten abzulesen ist. Schließlich wanderten sie komplett nach Norden aus. In die einst offenen Landschaften zogen nun waldaffinere Arten wie die Rothirsche (*Cervus elaphus*) ein. Eine Reihe weiterer kälteadaptierter Tierspezies starb währenddessen aus, darunter bekanntlich auch das Wollhaarmammut.

Ob die zotteligen Giganten der Erwärmung und den damit verbundenen ökologischen Umwälzungen zum Opfer fielen oder der zunehmenden menschlichen Präsenz, ist noch immer ungeklärt. Vermutlich war es eine Kombination mehrerer Faktoren. Der Jagddruck habe sicherlich eine Rolle gespielt, meint Dorothée Drucker. „Mammuts bedeuteten viel Fleisch, Fett und viele Rohmaterialien.“ Unsere Vorfahren konnten praktisch alles verwenden, sogar die Knochen als Stützen für ihre Zelte. Doch irgendwann brachen diese Populationen zusammen. Eine Ressource verschwand, und damit auch die von ihr erbrachten Leistungen für das Ökosystem. ■



KURT DE SWAAF hat sich schon öfter gefragt, wie Süddeutschland wohl vor über 10.000 Jahren aussah. Diese Recherche bot ihm einen Einblick.



Als Luftsauerstoff die Regie übernahm

Die Geschichte der irdischen Atmosphäre verlief turbulent. Wie kam der Sauerstoff hinein? Und wann wird er wieder verschwinden?

von THORSTEN DAMBECK

Am Ende des Karbon genannten Erdzeitalters, lange bevor Vögel oder geflügelte Saurier am Himmel flatterten, schwirrten bereits Insekten durch die Luft. Darunter war auch eine enorme Libelle: Meganeura. Sie stellte ihrer Beute wohl direkt im Flug nach, ebenso wie manche moderne Libellenart. Die Spannweite ihrer filigranen Flügel – teils über 70 Zentimeter – war derjenigen heutiger Turmfalken vergleichbar.

Erstmals waren Fossilien der riesigen Urlibelle in den Kohleminen des französischen Städtchen Commentry 1880 geborgen worden. Seitdem sind immer wieder neue Fundstellen hinzugekommen, darunter auch bei Obermoschel südlich von Bad Kreuznach in Rheinland-Pfalz.

Ein Fragment eines dort entdeckten Meganeura-Flügels wurde 2019 in einer Publikation des Mainzer naturwissenschaftlichen Archivs beschrieben. Darin stützen der Paläontologe Markus Poschmann und seine Kollegen die verbreitete Interpretation, dass der damalige Libellen-Riesenwuchs erst durch den hohen Sauerstoff-Gehalt der Karbonluft möglich wurde. Schätzungen von 30 bis 35 Prozent werden vielfach genannt. Heute erreichen mit jedem Atemzug nur 21 Prozent unsere Lungen.



Riesenlibelle Meganeura: Das Tier hatte eine Flügelspannweite von bis zu 75 Zentimetern und lebte vor 300 Millionen Jahren im Karbon. Wahrscheinlich war der Sauerstoff-Gehalt in der Erdatmosphäre damals höher als heute – eine Voraussetzung für das gigantische Wachstum solcher Insekten, die keine Lungen zum Atmen haben, sondern Tracheen.

Riesenwuchs durch Sauerstoff

Bei Insekten setzte die Versorgung mit Sauerstoff eine Obergrenze für die Körpergröße, besonders bei Arten mit hohem Energieverbrauch, heißt es in der Studie. „Deshalb lässt sich eine Korrelation des Riesenwuchses bei Urlibellen (und anderen Insekten) mit dem stark erhöhten Sauerstoff-Partialdruck im Oberkarbon und Unterperm gut erklären."

Im Oberkarbon, 323 bis 299 Millionen Jahre vor der Gegenwart, prägten ausgedehnte sumpfige Wälder viele Regionen. Daraus wurden schließlich mächtige Kohleflöze, die dem Zeitalter seinen Namen gaben. Das trockenere untere Perm, benannt nach der russischen Metropole am Westrand des Ural, dauerte bis vor 272 Millionen Jahren.

In beiden Perioden bevölkerte Anthropleura die Waldböden, vermutlich ein Urahn der heutigen Tausendfüßer. Dessen Körperlänge wird mit bis zu 2,63 Metern angegeben, sein Gewicht auf 50 Kilogramm geschätzt. Solche Urzeitwesen stehen beispielhaft für Variationen in unserer Atmosphäre, insbesondere beim molekularen Sauerstoff O_2. Dass sich dessen Gehalt in der Luft erdgeschichtlich immer wieder änderte, ist bereits lange bekannt. Neu hingegen ist, dass Prognosen zum künftigen Sauerstoff-Gehalt eher düster ausfallen: Das lebenswichtige Gas könnte schneller knapp werden als gedacht.

Geologische Zeitenwende

Doch zunächst noch weiter zurück in die Vergangenheit: Im Archaikum, also vor 2,5 bis 4,0 Milliarden Jahren, dominierte zwar ebenso wie heute der Stickstoff die damalige Luft. Methan und Kohlendioxid waren aber in deutlich höherer Konzentration vorhanden. Diese Treibhausgase könnten, trotz der damals schwächelnden Sonneneinstrahlung, ursächlich für das überwiegend eisfreie Klima gewesen sein. Spurengase waren Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Ammoniak. Hinzu kam Schwefelwasserstoff: Er verlieh der Urluft das Odeur fauler Eier – Äonen bevor die Evolution Eier hervorbrachte.

Der Unterschied zu heute: Es gab praktisch keinen freien Sauerstoff. Er konnte sich nicht dauerhaft anreichern, weil er sofort chemische Verbindungen mit reduzierenden Substanzen wie Eisen, Schwefel oder Methan einging. Die Atmosphäre war deshalb „anoxisch". Organismen – soweit vorhanden – nutzten für ihren Stoffwechsel Wege ohne das reaktionsfreudige chemische Element.

Zu einem anhaltenden Anstieg des Sauerstoffs kam es erstmals während des Großen Oxidationsereignisses, im Fachjargon GOE (Great Oxidation Event) genannt, vor etwa 2,0 bis etwa 2,4 Milliarden Jahren. Annahmen dazu gab es bereits Mitte des 19. Jahrhunderts. Der heute kaum noch bekannte belgische Chemiker Corneille Jean Koene war damals schon lange vor seinen Kollegen auf der richtigen Spur. Den Ausdruck GOE prägte erst 2002 der in Mannheim geborene US-amerikanische Geochemiker Heinrich Holland.

Im Schwefel lesen

Heute liest die Geoforschung die große Sauerstoff-Wende aus den Schwefel-Isotopen uralter Sedimente.



Fossiler Abdruck von Meganeura: Dieses gut erhaltene Relikt befindet sich im Musée Fleury in Lodève, Südfrankreich. Die Flügelspannweite beträgt 68 Zentimeter.

Illustration: Science Photo Library / Garlick, Mark | Wikimedia Commons / Didier Descouens (CC BY-SA 4.0)

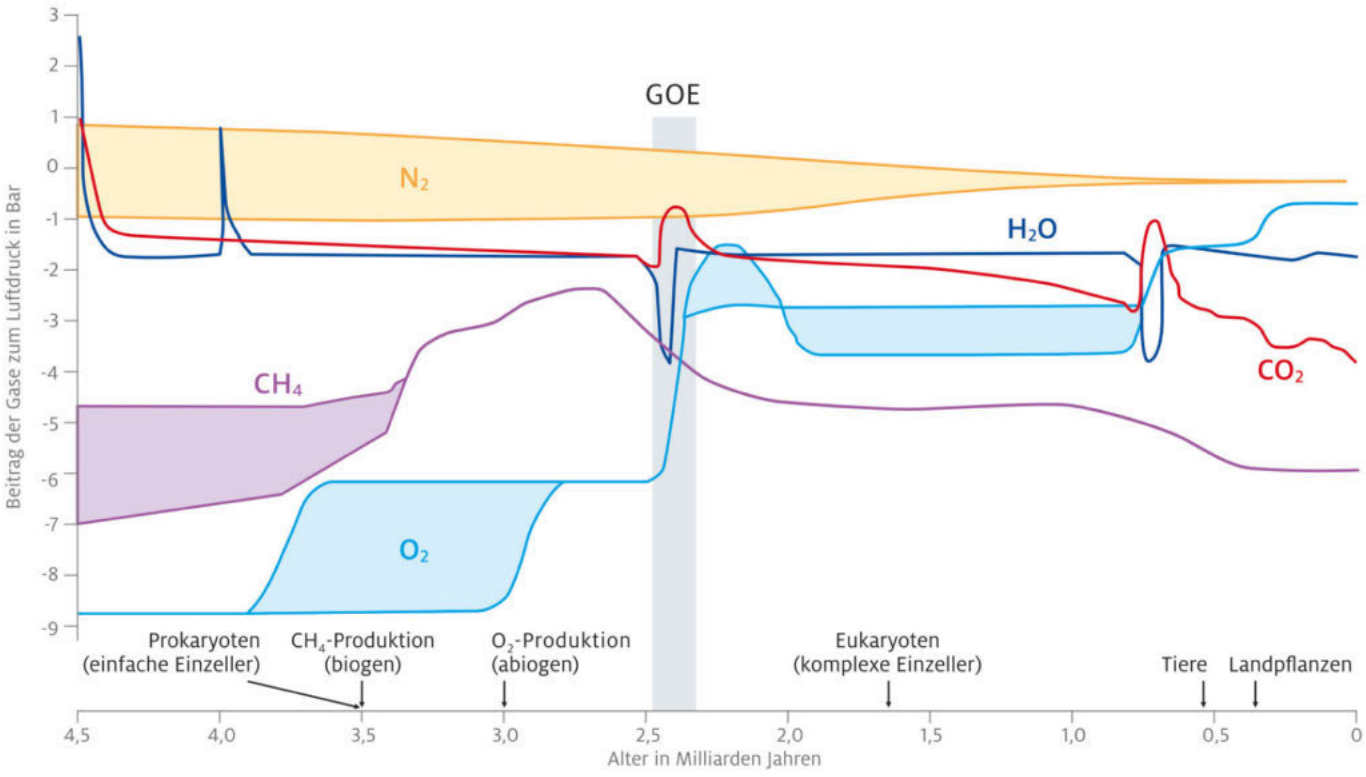
Die Entwicklung der Erdatmosphäre

Die Konzentration der Gase in der Luft hat sich in den 4,5 Milliarden Jahren der Erdgeschichte stark verändert. Die Kurven zeigen die relativen Beiträge bezogen auf den Luftdruck, die Flächen markieren dabei die Unsicherheiten. Die Lithosphäre der jungen Erde war eine einzige starre Hülle, wie heute beim Mars. Vor etwa drei Milliarden Jahren setzte die Plattentektonik ein, was die geochemischen Verhältnisse stark veränderte, auch die Anteile von Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O) und manchen Spurengasen in der Atmosphäre. Methan (CH_4) wurde wohl hauptsächlich von frühen Bakterien erzeugt, vielleicht schon vor rund 3,5 Milliarden Jahren. Molekularer Sauerstoff (O_2) entstand zunächst dadurch, dass die Ultraviolettstrahlung der Sonne H_2O und CO_2 spaltete. Zu einem deutlichen O_2-Anstieg, dem Großen Oxidationsereignis (GOE), kam es, als Cyanobakterien die Fähigkeit zur Photosynthese entwickelten und CO_2 umsetzten. Daraufhin wurde CH_4 durch Oxidation abgebaut. Weniger Methan bedeutete weniger Dunst: Die nun transparentere Luft ermöglichte eine höhere Sonneneinstrahlung auf die Meere, was die Verdunstung und somit den Wasserdampf-Gehalt erhöhte. Ein ähnlich starker Vorgang vollzog sich vor rund 700 Millionen Jahren, als unser Planet größtenteils oder ganz gefroren war („Schneeball-Erde"), hatte aber andere Ursachen.

Bei chemischen Reaktionen ändert sich nämlich das Verhältnis dieser Isotope. Fachleute wie der renommierte US-amerikanische Atmosphärenphysiker James Kasting von der Pennsylvania State University, 2022 emeritiert, nennen dies Isotopenfraktionierung.

Demnach zeigen die Gesteine vor dem GOE eine massenunabhängige Form dieser Fraktionierung, die in der sauerstoffarmen Gashülle durch die Spaltung des Schwefeldioxids (SO_2) in der Urluft durch die ultravioletten Strahlen der Sonne entstand. Die dabei erzeugten Verbindungen, beispielsweise Schwefelmonoxid (SO), konnten ihr massenunabhängiges Isotopensignal bewahren. Nach der Wende zum GOE filterte die neu entstandene Ozonschicht jedoch die UV-Strahlung. „Übersteigt die O_2-Konzentration bereits ein Hunderttausendstel des heutigen Niveaus, oxidieren die SO-Moleküle zu Sulfat", sagt Kasting.

Die Sulfate gelangten dann in das große ozeanische Sulfat-Reservoir. Dadurch wurde jegliche massenunabhängige Fraktionierung aufgehoben, noch bevor sich der Schwefel in Sedimenten ablagerte. Man kann sich dieses Reservoir als riesigen Vorrat an gelöstem Sulfat vorstellen, der wie ein chemischer Puffer wirkt und den gesamten Schwefelkreislauf stabilisiert. Zwar sind die geochemischen Prozesse, die hier berücksichtigt werden müssen, durchaus komplex. Klar ist aber: Massenunab-



hängige Schwefelsignale lassen sich kaum erklären, wenn im Archaikum atmosphärischer Sauerstoff vorhanden gewesen wäre, beschreibt Kasting den Konsens unter den Forschern.



Fels mit Bändereisenerzen aus Nordamerika: Der Gesteinsblock ist rund zwei Meter hoch, 8,5 Tonnen schwer und 2,1 Milliarden Jahre alt. Er kann im Botanischen Garten von Dresden bestaunt werden. In solchen marinen Sedimenten wechseln sich silikatreiche Schichten aus Hornstein mit eisenhaltige Lagen hauptsächlich aus Hämatit ab. Der Sauerstoff in diesem Eisenoxid könnte von Photosynthese-Aktivitäten der Ahnen der Cyanobakterien stammen.

Abfallprodukt der Photosynthese

Ebenfalls weitgehend unstrittig ist, dass urzeitliche Mikroorganismen das GOE verursachten. Ihre Photosynthese setzte Sauerstoff als Nebenprodukt frei. Solche Cyanobakterien gehören zu den ältesten bekannten Lebensformen. Sie existierten bereits im mittleren Archaikum. Sie haben keinen Zellkern, vielmehr schwimmt ihr Erbgut in einer unregelmäßig geformten Region im Zellinnern. Andere Produzenten von Sauerstoff, Algen oder Pflanzen, mussten sich die Fähigkeit zur Lichtverwertung erst im weiteren Verlauf der Evolution aneignen, indem sie Cyanobakterien in ihren Organismus integrierten.

Auch wenn es anfangs nur um geringe Sauerstoff-Mengen ging, so veränderte dies grundlegend die Chemie von Luft und Meeren und führte zum massenhaften Aussterben derjenigen Organismen, für die das neue Gas toxisch war. Langfristig gab die Wende zum Sauerstoff der Evolution eine neue Richtung. Sie bahnte auch einer viel komplexeren Welt aus Tieren und Pflanzen den Weg, die später auch die Landmassen eroberten. Deshalb markierte das GOE einen wichtigen Wendepunkt in der Erdgeschichte.

Allerdings sind viele damit verbundene Aspekte noch unklar. Wieso kam es erst lange nach dem Erscheinen der Cyanobakterien zu dem Ereignis? Auch zum Tempo des Sauerstoff-Anstiegs gibt es unterschiedliche Vorstellungen: Einige Befunde sprechen für einen relativ raschen Wandel, andere für einen langen, von Rückschlägen unterbrochenen Prozess. Ebenfalls ungeklärt ist, welches Niveau der Luftsauerstoff tatsächlich erreichte. Und schließlich geht es um die Verbindung zum Paläoklima (BDW 7/2026, „Die Fieberkurve der Erde“). Denn mehrere mit dem GOE etwa zeitgleiche Vergletscherungen der sogenannten Huronische Eiszeit werden als klimatischer Effekt des Sauerstoff-Events gedeutet. Mindestens eine davon war wohl ähnlich intensiv wie während der viel jüngeren Schneeball-Erde-Periode des Cryogeniums, die vor 720 Millionen Jahren begann (siehe BDW 7/2023, „Oasen auf der Schneeball-Erde“).

Zudem häufen sich seit Längerem Hinweise, dass es schon vor der großen Sauerstoff-Wende zu Anreicherungen des Gases kam, zu sogenannten Whiffs (deutsch: Hauch). Gemeint sind geologisch kurzzeitige O_2-Pulse in der Urluft.

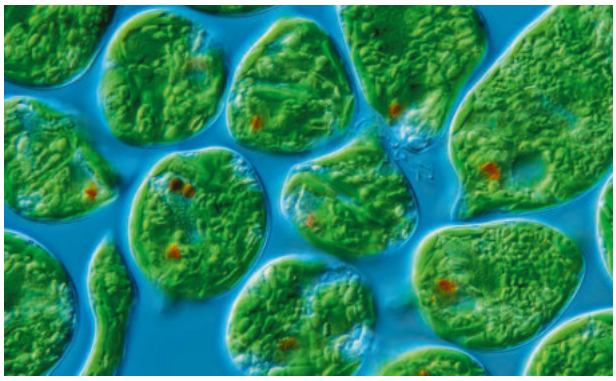
Dazu wurden auch 2025 wieder mehrere Studien publiziert. Sie thematisieren, wann und wo es auf dem Globus solche Sauerstoff-Whiffs gab. Dabei sticht die Arbeit eines internationalen Teams um Xinming Chen von der Universität in Shanghai heraus. Untersucht wurden Isotope des Metalls Thallium, die darauf schließen lassen, dass es bereits vor rund 2,65 Milliarden Jahren im Wasser direkt über dem Grund der Urmeere vorübergehende Sauerstoff-Oasen gab. Sie könnten so verbreitet gewesen sein, dass zwischenzeitlich auch eine globale O_2-Anreicherung möglich war, kommentiert Kasting, der an der Studie nicht beteiligt war.

Erdsystem am Kipppunkt

Einen neuen Dreh in die Whiff-Debatte bringt eine Studie des Teams um Yasuto Watanabe vom Nationalen Institut für Umweltstudien in Japan. Die Forscher entwickelten ein Computermodell, um die wesentlichen Veränderungen zu simulieren, die im späten Archaikum stattfanden, also vor 2,5 bis 3,0 Milliarden Jahren. Das Team erfasste die globalen Kreisläufe von Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Eisen, Sauerstoff und Kalzium. Im Fokus standen die Auswirkungen enormer vulkanischer Ereignisse, bei denen sogenannte Magmatische Großprovinzen entstanden.

Solche Regionen wurden auf allen Kontinenten und am Meeresboden identifiziert. Sie entstanden innerhalb von wenigen Millionen Jahren, als Millionen Kubikkilometer Magma empor traten oder das Gestein der Oberfläche durchdrangen. Ein bekanntes Exemplar ist der indische Dekkan Trapp; diese gewaltige Vulkanregion wird

BDW-Grafik / Karl Marx; Quelle: E. E. Stüeken u.a., Reviews in Mineralogy and Geochemistry 90, 515 (2024) | Wikimedia Commons / André Karwath – Aka (CC BY-SA 2.5)



Algen – wie hier Einzeller der Gattung Euglena – und ihre Vorfahren erzeugten schon vor Äonen gewaltige Mengen an molekularem Sauerstoff (O_2) und tun dies noch heute. Das hat die Evolution der Lebewesen auf der Erde entscheidend geprägt.

als Mitverursacher des Massensterbens diskutiert, dem unter anderem die Dinosaurier zum Opfer fielen.

Das bedeutet nicht, dass GOE ein rein vulkanisches Ereignis war. Auch Watanabe und seine Mitstreiter bezweifeln nicht die wichtige Rolle der Cyanobakterien. „Die Aktivität von Mikroorganismen im Ozean spielte eine zentrale Rolle bei der Entwicklung des atmosphärischen Sauerstoffs“, stellt der Geowissenschaftler Eiichi Tajika von der Universität Tokio klar, der an der Studie beteiligt war. „Wir gehen aber davon aus, dass dies nicht unmittelbar zu einer Anreicherung von Sauerstoff in der Atmosphäre führte, da die Menge an Nährstoffen im damaligen Ozean begrenzt war.“

So hätten niedrige Phosphatwerte die Aktivität der Cyanobakterien eingeschränkt. Es bedurfte deshalb gewaltiger geologischer Ereignisse, um die Meere mit Nährstoffen anzureichern. Dazu hätte auch eine intensive vulkanische Aktivität gehört, meint Tajika.

Die japanischen Forscher erklären den temporären Sauerstoff-Anstieg folgendermaßen: Vulkanausbrüche setzten in großem Stil Kohlendioxid frei, wodurch sich das Klima stark erwärmte. Auf den Kontinenten beschleunigte sich die Verwitterung der Gesteine, sodass über die Flüsse mehr Phosphor in die urzeitlichen Ozeane gespült wurde. Das kam einer Düngung gleich. Cyanobakterien produzierten daraufhin erheblich mehr Sauerstoff. Den Modellrechnungen zufolge geschah dies nicht gleichmäßig, sondern in Pulsen – das sind die Whiffs vor der Wende ins Sauerstoff-Zeitalter. Typischerweise dauerten diese Phasen bis zu zehn Millionen Jahre, bevor die Atmosphäre wieder in einen weitgehend sauerstofffreien Zustand zurückfiel.

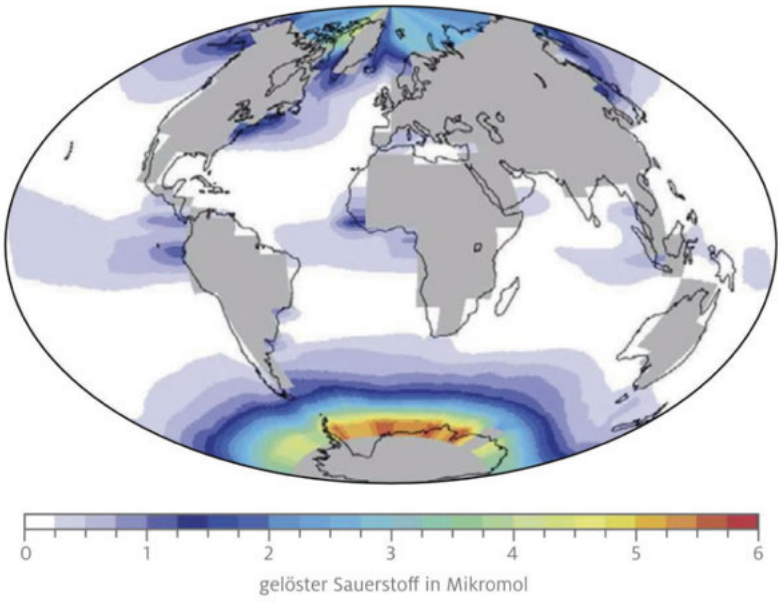
Die Forscher schlussfolgern außerdem, dass die wachsenden Kontinente im späten Archaikum die Whiffs begünstigt haben. Mit der zunehmenden Landfläche konnte nämlich auch mehr Phosphor in die Meere gelangen, sodass die Erde immer empfindlicher auf die vulkanischen Impulse reagierte. Die beobachteten Sauerstoff-Whiffs könnten somit ein Zeichen dafür gewesen sein, dass das Erdsystem bereits nah an einem Kipppunkt stand. Sie wären demnach Vorboten des endgültigen Sauerstoff-Anstiegs während des Great Oxidation Event gewesen.

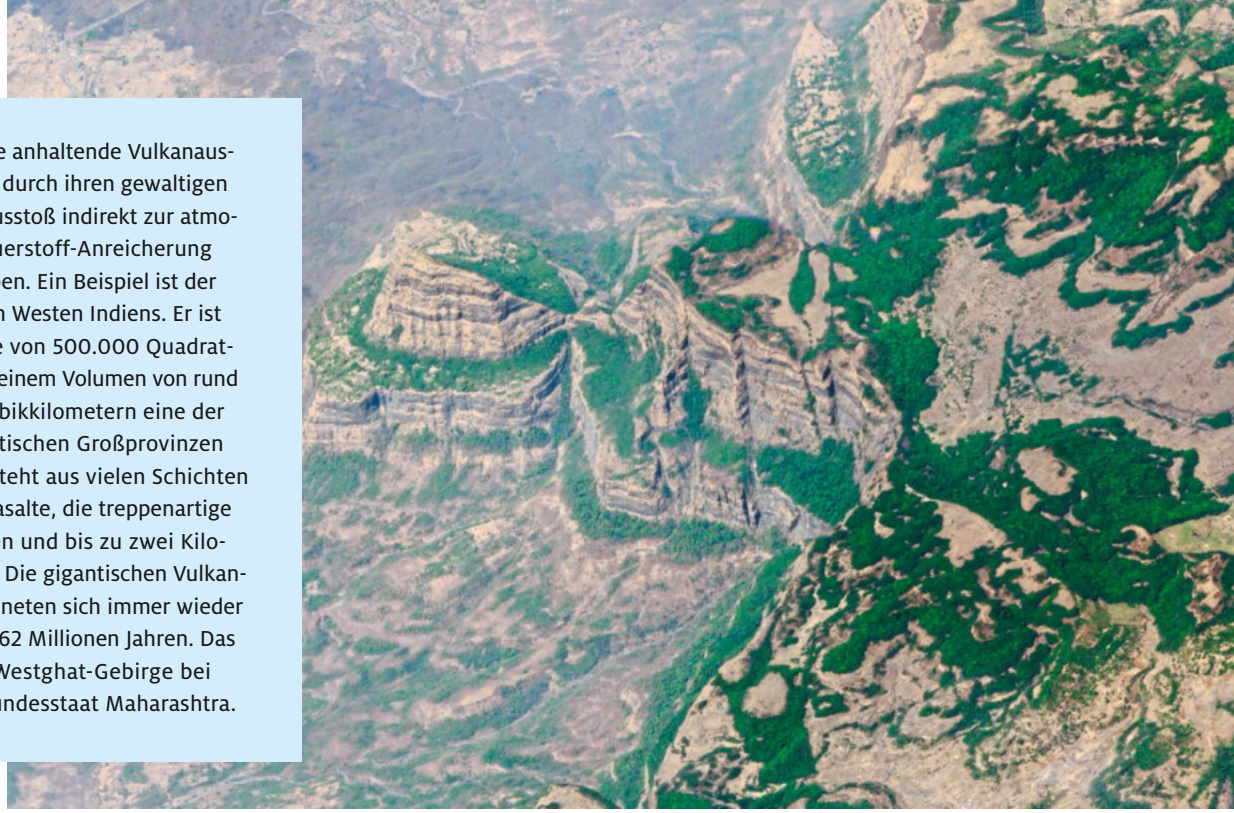
Wann kommt die Sauerstoff-Krise?

Auf lange Sicht kann die Wende zum Sauerstoff freilich enden. Nach den Annahmen von Kazumi Ozaki von der japanischen Toho-Universität, der auch an der Watanabe-Studie beteiligt war, und von Chris Reinhard vom Georgia Institute of Technology im US-amerikanischen Atlanta

Oasen des Sauerstoffs

Im Archaikum, vor über 2,5 Milliarden Jahren, könnte es mehrere Ozeanregionen mit einer erhöhten Konzentration an gelöstem Sauerstoff gegeben haben: bis zu 6 Mikromol, also etwa 0,00078 Gewichtsprozent. Das scheint zwar wenig, doch an der heutigen Meeresoberfläche sind es auch nur etwa 250 Mikromol. Es wird vermutet, dass sauerstoffreiche Gebiete bereits vor dem Großen Oxidationsereignis auftraten und wieder verschwanden. Da über die Verteilung der Kontinente im Archaikum kaum etwas bekannt ist, wurde die gegenwärtige Lage zur Orientierung eingezeichnet; damals war die gesamte Landmasse wahrscheinlich wesentlich kleiner als heute.





Starke und lange anhaltende Vulkanausbrüche könnten durch ihren gewaltigen Kohlendioxid-Ausstoß indirekt zur atmosphärischen Sauerstoff-Anreicherung beigetragen haben. Ein Beispiel ist der Dekkan Trapp im Westen Indiens. Er ist mit einer Fläche von 500.000 Quadratkilometern und einem Volumen von rund einer Million Kubikkilometern eine der größten magmatischen Großprovinzen der Erde. Er besteht aus vielen Schichten erstarrter Flutbasalte, die treppenartige Strukturen bilden und bis zu zwei Kilometer aufragen. Die gigantischen Vulkanausbrüche ereigneten sich immer wieder vor etwa 69 bis 62 Millionen Jahren. Das Foto zeigt das Westghat-Gebirge bei Matheran im Bundesstaat Maharashtra.

steht dem Luftsauerstoff ein fataler Kollaps bevor. Ihr Computermodell simuliert ebenfalls Klima, Atmosphäre, Ozeane und Biosphäre zusammen. Die Forscher ließen es in die Zukunft laufen, wobei sie die allmählich zunehmende Leuchtkraft der Sonne berücksichtigten.

Unser Tagesstern wurde bereits in der Vergangenheit immer heller und heißer und wird es weiter. Dies schließen Astronomen aus dem Studium sonnenähnlicher Sterne. Auf der Erde beschleunigt sich mit den höheren Temperaturen die Gesteinsverwitterung, was langfristig den CO_2-Gehalt der Luft sinken lässt. Fällt der Kohlendioxid-Gehalt aber unter einen kritischen Wert, wird die Photosynthese von Pflanzen und Mikroorganismen eingeschränkt, sodass immer weniger Sauerstoff produziert wird.

Um die Unsicherheiten bei den Parametern ihres Modells einzuhegen, erstellten die Forscher rund 400.000 Simulationen mit jeweils leicht unterschiedlichen Ausgangsbedingungen. Ausgewertet wurden nur diejenigen, die die heutige Erde reproduzierten. Demnach wird der Kohlendioxid-Gehalt so weit sinken, dass Pflanzen und andere photosynthetisch aktive Organismen nicht mehr überleben können. Ihr Massensterben wird die Hauptursache für die O_2-Abnahme sein.

Aus den quasi realistischen Modellläufen ermittelten Ozaki und Reinhard, dass der Sauerstoff-Gehalt in 1,08 plus/minus 0,14 Milliarden Jahren auf Werte fallen wird, die an die Zeit vor dem GOE erinnern. „Der Rückgang des Sauerstoffs ist extrem stark – wir sprechen von etwa einer Million Mal weniger Sauerstoff als heute“, sagt Reinhard.

Auch die Ozonschicht wird immer dünner. Im Gegenzug wird wohl der Gehalt an Methan auf das bis zu 10.000-Fache des heutigen Wertes steigen. Und sobald diese Veränderungen einsetzen, werden sie schnell voranschreiten: Den Berechnungen zufolge könnte die Luft ihren Sauerstoff in nur etwa 10.000 Jahren einbüßen. „Die Biosphäre kann sich an einen so drastischen Wandel nicht anpassen“, sagt Ozaki. Das Leben danach wird nur noch aus primitiven Mikroben bestehen, die keinen Sauerstoff brauchen.

Die Studie, die 2021 in Nature Geoscience erschien, wurde auch zu einem Meilenstein in der Astrobiologie. Zwar gibt es Kritik an Details, etwa am genauen Zeitpunkt des prognostizierten Sauerstoff-Kollapses. Klar ist aber, dass die bloße Suche nach der O_2-Signatur nicht genügt, um lebensfreundliche Bedingungen auf erdähnlichen Exoplaneten zu finden. Deshalb werden geeignete Kombinationen von Biomarkern diskutiert.

Kasting plädiert für Sauerstoff plus Methan. Das Kalkül: Beide reagieren miteinander und bauen sich relativ schnell ab. Wenn sie dennoch nebeneinander existieren, muss es Quellen geben, die ständig nachliefern. Auf der Erde übernehmen dies etwa die Photosynthese der Pflanzen und die Verdauung von Rindern. Allerdings ist der kombinierte Nachweis für alle gegenwärtig in Betrieb oder im Bau befindlichen astronomischen Instrumente wohl zu schwierig. So bleibt diese Aufgabe für die nächste Generation von Weltraumteleskopen. ■



THORSTEN DAMBECK ist promovierter Physiker und regelmäßiger BDW-Autor. Zuletzt berichtete er über irdische Eiszeiten sowie die vielen Eiskörper im Sonnensystem (BDW 3, 7 und 8/2026).

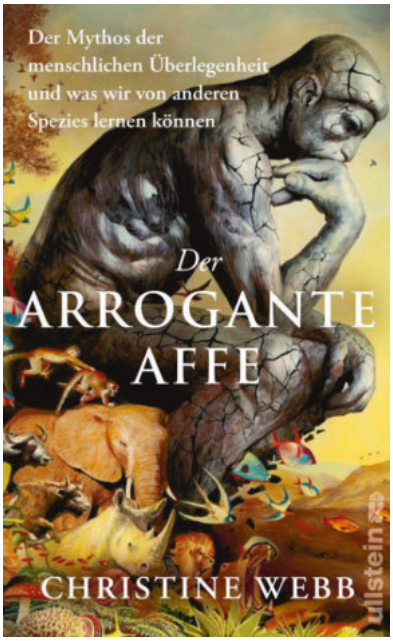
Science Photo Library / Fox, Frank | BDW-Grafik / Karl Marx; Quelle: S. L. Olson, L. R. Kump, J. F. Kasting, Chem. Geol. 362, 35 (2013) | Wikimedia Commons / Planet Labs, Inc (CC BY-SA 4.0)

Grenzen unserer Selbstgewissheit

Uns Tieren auf zwei Beinen fällt es schwer, die Wirkung unseres Verhaltens auf die Natur zu begreifen. Wir unterschätzen die kognitiven Fähigkeit anderer Tiere – und offenbaren damit eine bemerkenswerte kognitive Dissonanz.

Diesen Konflikt untersucht Christine Webb in ihrem tiefgründigen Buch „Der arrogante Affe“. In zehn Kapiteln widmet sich die Primatologin unserem gestörten Naturverständnis und unseren fehlgeleiteten Gedanken und Gefühlen. Sie richtet ihren Blick nicht nur auf unsere Wahrnehmung der Fauna, sondern ebenso intensiv auf unseren Umgang mit den Mitmenschen. Nachvollziehbar belegt sie, wie stark unsere ichbezogene Sichtweise die Beziehungen zur Umwelt prägt. Auch die Wissenschaft wird nicht davon verschont. So zeigt Webb etwa am „Kluger-Hans-Effekt“, wie eine voreingenommene Studienleitung die Leistung von Probanden beeinflussen kann.

Hier kreuzen sich Annahmen zur Welt der Tiere, zur Natur mit einer Arroganz, die meint, unsere Vormachtstellung über die Natur diene der Forschung. Diese Haltung verfälscht die Erforschung des Bewusstseins und zieht eine Spirale von Fehlannahmen nach sich. Die Autorin erläutert das etwa bei Hunden. In olfaktorischen Studien zeigen sie ein „Ich-Bewusstsein“, das von unserer anthropozentrischen Sicht deutlich abweicht.



Dennoch wollen wir Tiere kontrollieren. Wir bewerten sie danach, wie nützlich und unterhaltsam sie sind. Dass diese vermeintliche Kontrolle an Grenzen stößt, zeigt Webb am Beispiel von Kraken: Nur weil wir etwas als „Organismus“ bezeichnen, heißt das nicht, dass es sich in unsere abstrakten Kategorien fügt.

Webb fordert eine Dekolonisierung des Denkens und bezieht sich explizit auf unseren Umgang mit unterworfenen Völkern. Es fehlt uns, so ihre These, an Verständnis für deren Lebensweisen. Wir könnten viel lernen von indigenen Völkern. Traditionelle Wissenschaft und Offenheit für Neues sollten Hand in Hand gehen, so Webb. Die Vorstellung, dass Evolution eine rein kompetitive und individualistische Geschichte sei, sei engstirnig.

Dieses Buch zeigt: Unsere Arroganz und Ignoranz führen in die Sackgasse. Lesen Sie es aufmerksam. *Alexander Schramm*

Christine Webb
Der arrogante Affe
Ullstein Verlag, 432 S., € 24,99
ISBN 978–3–550–20232–2



Klimafreundliche Ernährung

Wie können wir uns gesund ernähren, ohne dem Klima und der Natur zu schaden? Diese Frage versucht der Biologe Dave Goulson in seinem Buch „Was also sollen wir essen?“ zu beantworten.

Das Ernährungssystem steckt in der Krise. Um die wachsende Bevölkerung satt zu kriegen, setzen Produzenten auf Massentierhaltung, Monokulturen und Pestizide. Das belastet sowohl unsere Gesundheit als auch die Natur: Böden verarmen, Arten verschwinden, die Erde erwärmt sich – und trotzdem ist nicht genug für alle da. Goulson nimmt die Gesundheits- und Umweltauswirkungen fast aller Lebensmittel ausführlich unter die Lupe: Fleisch und Fisch, Soja und Palmöl, Fleisch- und Milchalternativen, hoch verarbeitete Lebensmittel, gentechnisch verändertes Getreide und auch Biogemüse. Anhand aktueller Daten und Studien analysiert er auf verständliche Weise, warum hoher Fleischkonsum problematisch ist oder wieso lokal angebaute Tomaten nicht immer klimafreundlicher sind als Tomaten aus Spanien. Gleichzeitig nimmt er zur Kenntnis, dass die Verantwortung nicht nur bei den Konsumenten, sondern auch bei der Politik und den Produzenten liegt.

Er beschönigt nichts, findet aber auf die titelgebende Frage eine hoffnungsvolle Antwort: Es gibt eine ganze Menge gesunder, leckerer UND nachhaltiger Lebensmittel. Viele Empfehlungen hat man vielleicht schon einmal gehört – kann aber nach dem Lesen auch erklären, welche Gründe dahinterstecken. *Alina Wolf*

Dave Goulson
Was also sollen wir essen?
Hanser Verlag, 352 S., € 20,–
ISBN 978–3–446–28458–6





Passion für Schmetterlinge

Alles beginnt mit einem kindlichen Schlüsselerlebnis: Bei einem Spaziergang nimmt die dreijährige Marion Jaros erstmals bewusst die bunt schillernden Falter wahr – und verliebt sich augenblicklich in sie. Wenige Jahre später erlebt sie zu Hause das Schlüpfen eines Wolfmilchschwärmers aus einer Schmetterlingspuppe, die ein verwandter Zoologe ihr geschenkt hat. Von da an ist ihre Leidenschaft entfacht: Auf dem heimischen Balkon beginnt sie mit der Schmetterlingszucht. In ihrem Buch „Die fabelhafte Welt der Schmetterlinge" verbindet die Autorin persönliche Erlebnisse mit faszinierendem Wissen und zieht Leserinnen und Leser sofort in ihren Bann.

Besonders eindrucksvoll sind die Schilderungen der Vorgänge in der Puppe: Wie sich die Raupe nahezu vollständig auflöst und als Schmetterling neu entsteht, liest sich erstaunlich und spektakulär zugleich. Darüber hinaus zeigt das Buch, was aus echter Hingabe entstehen kann. Marion Jaros hat mit ihrer Familie ein Schmetterlingsparadies geschaffen, ein Schutzprojekt in Wien initiiert und viele Menschen für den Naturschutz begeistert. Inspirierend sind auch die Hinweise, wie sich nahezu jede Umgebung insektenfreundlich gestalten lässt. Dieses Werk, ergänzt durch außergewöhnliche Fotografien, ist ein Muss für Schmetterlings-Enthusiastinnen und -Enthusiasten – und zugleich eine bereichernde Wissensquelle für alle, an denen Schmetterlinge bislang unbeachtet vorbeigeflattert sind. *Stephanie Hanel*

Marion Jaros
Die fabelhafte Welt der Schmetterlinge
Goldegg Verlag, 240 S., € 28,–
ISBN 978–3–99060–522–6

Selbst-Spiegelung

Der Narzissmus ist in aller Munde. Ein Modethema voller Missverständnisse. Doch gerade das zeigt, dass die narzisstische Problematik uns alle betrifft, so Thomas Arnold und Thomas Fuchs in ihrem Buch „Das unersättliche Selbst". Sie betrachten die Problemstellung der – verkürzt gesagt – überzogenen Selbstliebe und mangelnden Empathie interdisziplinär.

Ihr Zugang in zehn Kapiteln zwischen Philosophie und Naturwissenschaft, Forschung und Geschichte ist ein phänomenologisch-existenzieller, der ein gestörtes leiblich-affektives Selbstverhältnis in den Mittelpunkt rückt. Spannende Beispiele sind Joan Crawford als „Die Frau mit der Narbe", die ihre innere Leere in „unendlicher Spiegelung" kompensiert, Ego-Shooter-Liebe und Caravaggios Werk „Narcissus".

Auch Geschlechtsperspektiven spielen eine Rolle: So sind nicht nur mehr Männer von narzisstischen Störungen betroffen als Frauen. Bei ihnen zeichnen sich auch andere Muster ab. Und beim Verhältnis von Zeit und Person wird unter anderem betrachtet, warum Personen weniger in der Gegenwart leben als in einer vermeintlich glänzenden Zukunft. Hinweise auf Therapiemöglichkeiten runden das Buch ab.

Brauchen wir wirklich noch ein Buch zum Thema? Nach der erhellenden und schneidigen Lektüre des „Selbst- und Weltverhältnisses von Narzissten in seinen Grundstrukturen" kann dies nur bejaht werden. *Alexander Schramm*

Thomas Arnold, Thomas Fuchs
Das unersättliche Selbst
Suhrkamp Verlag, 200 S., € 28,–
ISBN 978–3–518–58847–5

Bedrohte Wunder



Dieses zauberhaft illustrierte Buch feiert die Vogelwelt. 49 einst häufige Arten werden mit ihren Eigenheiten und Talenten porträtiert, darunter Pfuhlschnepfe, Mehlschwalbe, Spatz und Star. Ein Loblied auf Gesang, Nestbaukunst, Vogelzug und andere Wunder. *pw*

Robert Macfarlane, Jackie Morris
Das Buch der Vögel
Ullstein Verlag, 384 S., € 34,–
ISBN 978–3–550–20458–6

Zivilisation der Kraken



Wie sähe die Welt aus, wenn die Evolution anders verlaufen wäre und Tiere die Welt beherrschten? Vitali Konstantinov vergleicht unsere Fähigkeiten mit denen von Dinosauriern, Waschbären und anderen und entwirft alternative Zivilisationen, für Kinder ab 8 Jahren. *pw*

Vitali Konstantinov
Wenn nicht die Menschen
Kunstanstifter Verlag, 54 S., € 28,–
ISBN 978–3–948743–22–2

Historische Fake News



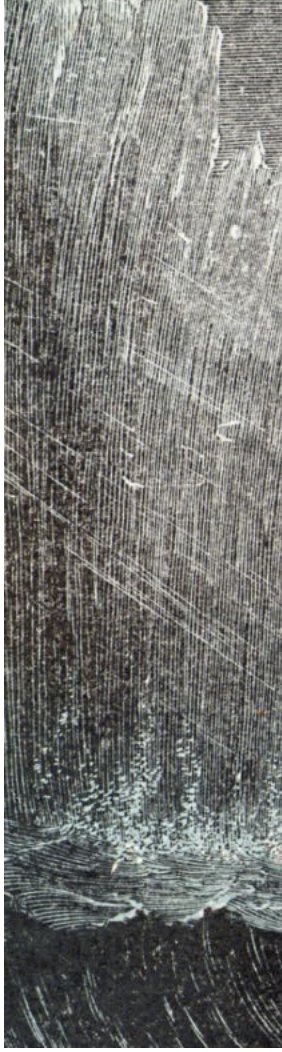
Fake News gab es schon immer. Das zeigt dieser muntere Streifzug durch die Geschichte – voller Lügen, Verleumdungen, Propaganda und Täuschungsmanöver: von Julius Caesar über Päpstin Johanna bis zur Vertuschung der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl. *pw*

Natasha Tidd
Die Macht der Lüge
National Geographic, 288 S., € 18,99
ISBN 978–3–98701–142–9

BILD DER
WISSENSCHAFT SHOP

Jetzt diese und weitere Bücher direkt in unserem BDW-Shop bestellen: hier.pro/redaktionstipps

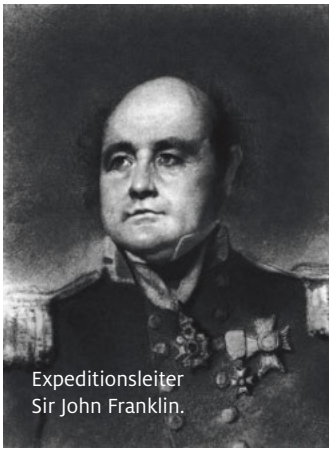
Verschollen im Eis



1845 beauftragt das Britische Empire den Polarforscher John Franklin mit einer Expedition in die Arktis. Er soll erneut nach der Nordwestpassage suchen, dem kürzeren Seeweg zwischen Atlantik und Pazifik. Doch das Unterfangen scheitert und keiner der 129 Expeditionsteilnehmer überlebt. Nun konnten Forscher weitere Crewmitglieder identifizieren.

von DAVID NEUHÄUSER

Mit dem Sieg über Napoleon im Jahr 1815 stieg das Vereinigte Königreich von Großbritannien und Irland zur Weltmacht auf See auf – mit der größten Flotte, den meisten Handelsschiffen und nicht zuletzt mit Forschungsschiffen (ehemaligen Kriegsschiffen), die nun überall dorthin fuhren, wo die Seekarten noch weiß waren. Es war das goldene Zeitalter britischer Entdeckungsreisen, geprägt durch Abenteuerlust, Forscherdrang und das Streben nach Ruhm und Macht. Die Arktis war ab 1818 ein solches britisches Expeditionsgebiet – unter anderem deshalb, weil man hoffte, in den arktischen Gewässern die Nordwestpassage vom Atlantik zum Pazifik zu finden, die den britischen Handelsschiffen die weite Umfahrung von Südamerika oder auch die gefährliche Afrikaroute ersparen würde. Doch die Suche erwies sich als schwierig.



Expeditionsleiter Sir John Franklin.

Erfolgreich war stattdessen im Jahr 1831 James Clark Ross bei einer anderen wichtigen Suche der Zeit: Im nördlichen Kanada (Nunavut) lokalisierte er erstmals den magnetischen Nordpol. Wichtig war dies deswegen, weil man durch die Erforschung des Erdmagnetfeldes die Navigation deutlich verbessern konnte. Man konstruierte gewissermaßen den Vorgänger des GPS. Für weitere Erdmagnetische Messungen und auch um den magnetischen Südpol zu finden, unternahm er 1839 eine Expeditionsfahrt in die Antarktis. Den Südpol konnte er jedoch nicht ganz erreichen. Insgesamt war Ross mit den beiden umgebauten Kriegsschiffen Erebus und Terror vier Jahre unterwegs. Nach seiner gefeierten Rückkehr gingen neue Überlegungen wieder Richtung Arktis, um dort weitere magnetische Messungen durchzuführen. Aber auch der Gedanke an die Suche nach der Nordwestpassage war wieder da. Nachdem James Ross, der gerade erst von seiner Antarktisreise zurückgekehrt war, eine erneute Expeditionsleitung abgelehnt hatte, fiel die Wahl auf John Franklin.

Franklin hatte an diversen Seeschlachten, darunter der von Trafalgar 1805, teilgenommen und war bereits ein erfahrener Polarforscher. Vor allem war er bekannt als „der Mann, der seine Stiefel aß“. Er hatte 1819 eine Expedition angeführt, die den Coppermine River in Kanada kartografieren sollte. Dabei nahm er Warnungen Einheimischer nicht ernst und kehrte zu spät um. Einige seiner Führer starben, und die Hungernden, einschließlich Franklin selbst, gingen dazu über,



Packeis verstellt den Weg. Vergeblich suchen die Mannschaften der Schiffe Erebus und Terror nach der Nordwestpassage.

Hulton Archive / Getty Images | Universal History Archive / Getty Images

ihre Mokassins zu essen. Die Tatsache, dass sie diese Strapazen überlebten, machte sie in der Heimat zu Helden. Nach weiteren Landexpeditionen wurde Franklin sogar zum Ritter geschlagen. Er erhielt das Kommando über die im Mittelmeer patrouillierende HMS Rainbow. Sein lockerer Führungsstil brachte dem Schiff den Spitznamen „Franklin's Paradise" ein. Später wurde Franklin Vizegouverneur von Van-Diemens-Land (Tasmanien), nachdem es dort aber Schwierigkeiten gab, war er über die Aussicht auf eine neue Expeditionsleitung hocherfreut.

Als Schiffe waren wieder die Erebus und die Terror vorgesehen, die sich schon auf der Reise in die Antarktis bewährt hatten. Sie waren bereits eisenverstärkt, nun baute man noch je Schiff eine Dampfmaschine ein. Bei Flaute sollten die 25 PS-starken Eisenbahnmotoren die Schiffe mittels Propellerantrieb auf etwa vier Knoten bringen können. In den Schiffen wurden zudem Rohre verlegt, durch die dampferhitztes Wasser fließen konnte, wodurch einige Bereiche beheizbar waren. Für die Betreuung der neuen Technik sollte der Ingenieur John Gregory seine erste Seereise antreten.

Auch mit Lebensmitteln war die Expedition üppig versorgt. Nach seiner Hunger-Erfahrung in Kanada ließ Franklin tonnenweise Vorräte laden, um bis zu drei Jahre im Eis überstehen zu können. „Weil es eine hervorragend ausgestattete Expedition war, gab keine wirklichen Zweifel daran, dass sie erfolgreich sein würde", erklärt der Anthropologe Douglas Stenton von der University of Waterloo, Kanada. Hinzu kam, dass die Öffentlichkeit äußerst erfolgsverwöhnt war, was Expeditionsfahrten anbelangte, daher rechnete sie fest mit einem weiteren Triumph. So wurden die Schiffe am 19. Mai 1845 euphorisch aus dem Hafen von Greenhithe in Südostengland verabschiedet.

Fahrt ohne Wiederkehr

Auch die Mannschaft war anfangs frohen Mutes. An Bord der Erebus sorgten nicht nur ein Hund und ein Affe für gute Laune, auch Franklins bekannter umgänglicher Führungsstil zeigte seine Wirkung. Das Transportschiff Barretto Junior begleitete die Expedition bis nach Grönland. Am 12. Juli 1845 kehrte es um und brachte die – wie sich erweisen sollte – letzten Nachrichten von Teilnehmern der Franklin-Expedition nach England zurück.

Dort hatte man zwar einkalkuliert, dass die Schiffe lange unterwegs sein würden, doch irgendwann wurde





Oben: Auf King William Island nahm die Franklin-Expedition ihr katastrophales Ende. Hier liegen die Knochen der Seeleute verstreut. Unten: Der Anthropologe Douglas Stenton bei der Arbeit an einem der Grabungsplätze.

man unruhig, vor allem Franklins Ehefrau Lady Jane Franklin drängte, etwas zu unternehmen. Als Anfang des Jahres 1848 noch immer kein Lebenszeichen die Heimat erreicht hatte, wurde die Admiralität aktiv. Die erste staatliche Rettungsexpedition leitete James Clark Ross, der 1845 die Führung der Expedition abgelehnt hatte, und den eine Freundschaft mit John Franklin verband. Noch weitere Schiffe starteten ins Polargebiet, doch niemand fand eine Spur der Verschollenen. Von Monat zu Monat wuchs daher die Gewissheit, dass sich eine Katastrophe ereignet haben musste.

Erst im Sommer 1850 führte eine weitere Suchaktion mit 14 Schiffen zu ersten Funden: zurückgelassene Kleidungsstücke, Verpflegung, und schließlich drei Gräber. Auf Tafeln war verzeichnet, dass es die von John Hartnell und William Braine von der Erebus sowie John Torrington von der Terror waren. Damals wusste man noch nicht, dass sie an Tuberkulose gestorben waren.

Ein Teilnehmer der ersten Suchexpeditionen, ein Forscher namens John Rae, befragte auf seinen weiteren Reisen immer wieder einheimische Inuit nach schiffbrüchigen weißen Männern. Eines Tages hatte er damit Erfolg: Inuit berichteten ihm von 40 Männern, die über das Land gezogen waren – schwach und ausgemergelt. Sie hätten bei ihnen Robbenfleisch gekauft und sich dann wieder aufgemacht. Monate später hätten die Inuit ihre Leichen gefunden – mit Anzeichen von Kannibalismus. Diese Nachricht sorgte im Vereinigten Königreich für Bestürzung und Zorn. Viele wollten die Aussage über den Kannibalismus nicht wahrhaben und unterstellten den Inuit sowie Rae, das Andenken von Helden vorsätzlich mit Lügen beschmutzen zu wollen.

Entdeckungen auf King William Island

1857 machte sich eine weitere Expedition auf die Suche nach den Verschollenen, geführt von Kapitän Leopold McClintock. Für ein besseres Fortkommen an Land war die Expedition zusätzlich mit Hundeschlitten ausgestattet. Ihm berichteten Einheimische vom Untergang eines Dreimasters westlich von King William Island sowie von der Landung eines zweiten Schiffs.

Bei Nachforschungen in dem beschriebenen Gebiet fand McClintock ein verlassenes Lager, weitere Leichen und eine hinterlassene Nachricht, verborgen in einer Felsenpyramide. Datiert auf den 28. Mai 1847 stand dort, der Mannschaft unter der Führung Franklins gehe es gut. Fast ein Jahr später, am 25. April 1848, war die Notiz allerdings ergänzt worden: Neun Offiziere und 15 weitere Besatzungsmitglieder seien inzwischen tot – darunter auch John Franklin, der am 11. Juni 1847 gestorben sei. Man habe die Erebus und die Terror zurücklassen müssen, 105 Männer seien an Land gegangen.

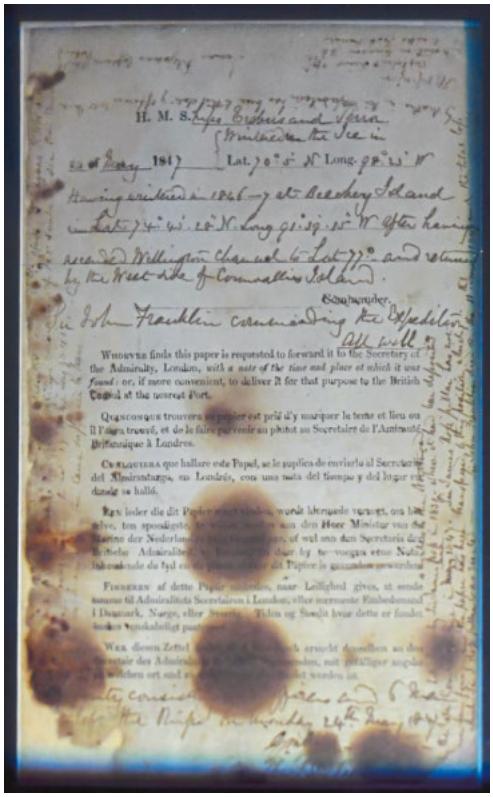
Der Grund für das Verlassen der Schiffe ist nicht genannt, vermutlich hatte die Crew ihre Vorräte aufgebraucht und keine Hoffnung mehr, noch über das Wasser weiterzukommen. Zur Zeit der Franklin-Expedition gab es in der Arktisregion ungewöhnlich kalte Winter und die Schiffe steckten tief im Eis fest. Die Expedition war

beispiellos gescheitert: „Zu jener Zeit ließen sich die Ereignisse in gewisser Hinsicht als nationale Tragödie bezeichnen“, erklärt Stenton.

Ins Bewusstsein gebrannt

Das erfolgsverwöhnte Britannien traf die Vorstellung der krank und ausgezehrt in den Tod wankenden Seeleute tief. Und bis heute hat man sie nicht vergessen. Vielleicht auch, weil es lange Zeit keine Gewissheit über das Schicksal der Besatzung gab, ist die Franklin-Expedition im Vereinigten Königreich seit nunmehr fast 180 Jahren Teil des kollektiven Gedächtnisses. Bis heute ranken sich Mythen um die Entdeckungsfahrt und sie bildet immer wieder die Grundlage für Bücher und Filme.

Das Thema Nordwestpassage hat mittlerweile eine neue Aktualität erhalten, da sie aufgrund des Klimawandels bald eisfrei sein könnte. Die Passage, die letztlich 1906 vom Norweger Roald Amundsen entdeckt worden war, wird von Kanada beansprucht. Durch bereits über 20 kanadische Expeditionen in das Gebiet gab es auch neue Entdeckungen in Bezug auf die Franklin-Expedition, allen voran die Funde der Schiffwracks: Am 1. September 2014 fand die Crew des kanadischen Eisbrechers Sir Wilfried Laurier dicht unter der Wasseroberfläche die Erebus. Zwei Jahre später entdeckte eine kanadische Organisation mithilfe von Hinweisen des Inuit-Rangers Sammy Kogvik auch die Terror.





James Fitzjames war nach dem Tod Franklins Kapitän der Erebus. Er ist der Verfasser der auf King William Island gefundenen Notiz über die Expedition. Im Mai 1847 berichtete er noch, der Mannschaft gehe es gut. Ein Jahr später notierte er das Verlassen der Schiffe. Doch auch an Land gab es für keinen mehr Rettung. Die sterblichen Überreste von Fitzjames wurden von Stentons Team identifiziert. Er wurde das Opfer von Kannibalismus.

Die Verschollenen

Doch wo war die Mannschaft? Es waren 105 Männer, die Anfang 1848 ihre Schiffe verließen und an Land gingen. Sicher ist: Sie alle kamen in der trostlosen Einöde des kanadisch-arktischen Archipels ums Leben. Selbst im arktischen Sommer gibt es auf den Inseln keine nutzbare Vegetation, stattdessen jede Menge Geröll und Felsen. Im Winter scheint kaum die Sonne und es herrschen Temperaturen von bis zu minus 50 Grad Celsius.

Drei der bedeutendsten archäologischen Fundstätten, die von dem verzweifelten Überlebensversuch der Mannschaft zeugen, befinden sich an einem kurzen Küstenabschnitt von King William Island, wo schon McClintock gesucht hatte. Der Anthropologe Stenton und seine Kollegen, die seit vielen Jahren an der Analyse der Funde von menschlichen Überresten und Artefakten der Expedition arbeiten, schlugen in diesem Gebiet immer wieder ihr Lager auf. „Ich habe elf Feldsaisons auf King William Island und der Adelaide-Halbinsel verbracht“, berichtet Stenton. Neben den schwierigen Wetterbedingungen kämpfen die Archäologen dort auch damit, dass sich die Fundstätten von King William Island nicht wie sonst auf einen Ort konzentrieren, sondern über große Bereiche verteilt sind. „Die Artefakte und Knochen liegen buchstäblich auf der Erdoberfläche“, sagt Stenton. „Nachdem die Männer starben, wurden ihre Körper von Tieren über ein gewisses Areal verstreut. Das erschwert die Arbeit, die Funde zu untersuchen und zuzuordnen.“

Per DNA-Analyse identifiziert

Zuletzt haben den Wissenschaftlern DNA-Analysen geholfen, einige der geborgenen menschlichen Überreste mit bestimmten Expeditionsteilnehmern in Verbindung zu bringen. Sie gewannen DNA-Datensätze aus Knochen von 21 Toten aus den Fundstätten von King William Island, benötigten aber für eine Identifizierung zusätzlich die DNA von heute lebenden Nachfahren. Um diese DNA zu erhalten, starteten sie im Jahr 2017 einen Aufruf im National Maritime Museum in Greenwich, London, als dort nach der Entdeckung der Erebus und der Terror eine große Ausstellung zur Franklin-Expedition präsentiert wurde. Stenton berichtet: „Wir platzierten dort einen schriftlichen Aufruf: ‚Wenn Sie mit einem Mitglied der Franklin-Expedition verwandt sind oder dies vermuten – wir führen eine DNA-Studie durch, also setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung.‘“

Karte: Kennonv / Wikimedia Commons (CC BY-SA 3.0) | Douglas Stenton / Universität Waterloo | Ben Stansall / AFP via Getty Image | mauritius images / Circle Archive / Alamy Stock Photos

Der Aufruf war erfolgreich. Die Forscher erhielten 135 Zuschriften aus sieben Ländern. In Zusammenarbeit mit Familienforschern und weiteren Spezialisten konnten die Wissenschaftler 31 Personen ermitteln, die als potenzielle Nachfahren für eine vergleichende DNA-Analyse infrage kamen. Für eine zuverlässige Feststellung der Verwandtschaft per DNA-Analyse ist eine direkte, ununterbrochene mütterliche oder väterliche Abstammungslinie erforderlich.

Von diesen potenziellen Kandidaten nahmen die Wissenschaftler DNA-Proben durch Mundschleimhaut-Abstriche. Diese verglichen sie mit insgesamt 49 DNA-Proben von den archäologischen Fundstätten, und es gab Treffer. „Der erste war John Gregory. Ihn haben wir über einen seiner Ur-Ur-Ur-Enkel gefunden, der in Südafrika lebt“, sagt Stenton. Gregory war jener Ingenieur, der für die Eisenbahnmotoren in den Schiffen zuständig war, ihn hatte seine erste Seefahrt direkt in den Tod geführt.

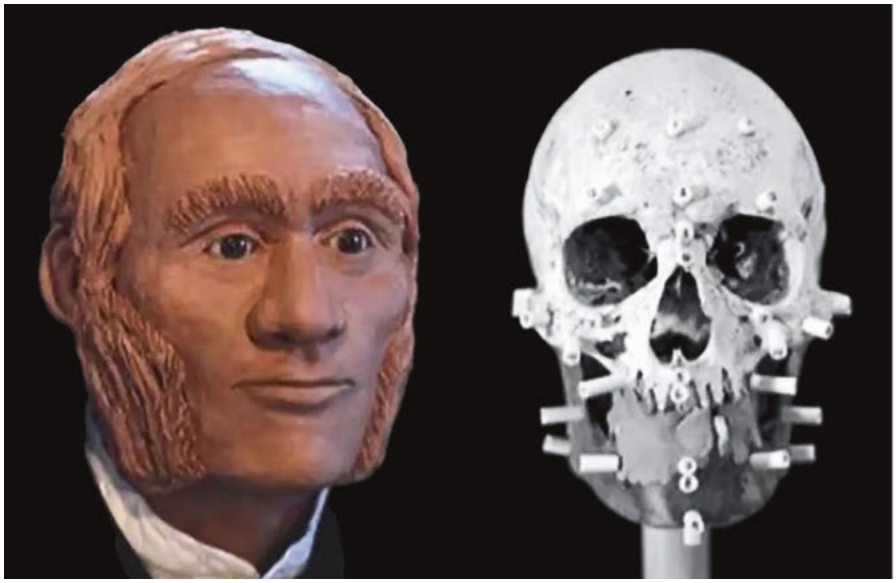
Die zweite Person war der Marineoffizier James Fitzjames. Er war der Verfasser umfangreicher Tagebucheinträge und Briefe, die von dem Begleitschiff Barretto Junior von Grönland zurück nach England gebracht worden waren, bevor die Erebus und die Terror in das kanadisch-arktische Archipel weitergefahren waren. Für Historiker bilden die Briefe bis heute die Informationsgrundlage über diesen ersten Teil der Expedition. Überdies war Fitzjames auch Verfasser jener Notiz, die McClintocks Mannschaft in der Felsenpyramide gefunden hatte. Zu diesem Zeitpunkt war Fitzjames Nachfolger Franklins als Kapitän der Erebus. Die Analyse seiner Knochen ergab noch einen tragischen Befund: Sie zeigen Spuren von Kannibalismus, Teile seiner Leiche waren mit dem Messer abgetrennt worden.

Zwei neuere von Stenton und seinen Kollegen veröffentlichte Arbeiten berichten von der Identifizierung vier weiterer Expeditionsteilnehmer: William Orren, Vollmatrose, David Young, Schiffsjunge erster Klasse, John Bridgens, Steward für die Unteroffiziere, und Henry Peter („Harry“) Peglar, Captain of the Foretop (wörtlich übersetzt: Kapitän des Vormars – ein Unteroffiziersgrad in der Royal Navy).

William Orren hatte 1845 mit 38 Jahren auf der Erebus angeheuert. David Young, der am 9. April 1845 im Alter von 17 Jahren Teil der Erebus-Besatzung wurde, fuhr schon als Elfjähriger zur See. Er starb ebenfalls auf King William Island, doch immerhin fand man an seinen Knochen keine Spuren von Kannibalismus. Die Forscher ließen von ihm eine forensische Gesichtsrekonstruktion erstellen, sodass man heute in etwa abschätzen kann, wie Young ausgesehen haben könnte. Mit solchen Rekonstruktionen bekommt die Mannschaft der Erebus buchstäblich ein neues Gesicht – neben denen der Offiziere,



Douglas Stenton an der Fundstätte NgLj-2 auf King William Island. Das Gedenk-Steinmal birgt die Überreste von 13 Seeleuten, die an diesem Ort ums Leben kamen – darunter James Fitzjames, William Orren und David Young.





John Gregory (links) war als Ingenieur an Bord der Erebus. Anhand seines Schädels wurde eine forensische Gesichtsrekonstruktion angefertigt. David Young (rechts) wurde erst kürzlich identifiziert, wie er etwa aussah, zeigt eine forensische Rekonstruktionszeichnung.

die kurz vor dem Beginn der Expedition fotografiert worden waren.

Rätsel um Peglar gelöst

Was den Unteroffizier Harry Peglar betrifft, so haben die Forscher mit der DNA-Analyse ein Geheimnis um ihn lüften können. Peglars Leiche war bei der Suchexpedition von McClintock gefunden worden, er war allein und hatte kryptische Notizen bei sich, die als „Peglar Papers" bekannt wurden. Teilweise hatte er sie rückwärts verfasst und ihr Inhalt ist größtenteils unverständlich. Aufgrund des ebenfalls bei ihm gefundenen Seemannsausweises schien seine Identität klar. Doch etwas passte dabei nicht: McClintock hatte berichtet, Peglar habe eine zweireihige Weste und ein schwarzes Seidentuch getragen, das zu einer lockeren Schleife gebunden war – ein Stil, der bei Offizieren nicht üblich war, sondern eher zu einem Steward passte. Daraufhin setzte sich die Interpretation durch, der Tote sei doch nicht der Unteroffizier Peglar. Die DNA-Analyse von Stenton und seinen Kollegen widerlegte nun jedoch diese These. Der Mann war tatsächlich Peglar. Vermutlich war er vor seinem Tod degradiert worden und trug deshalb vermeintlich unpassende Kleidung. „Wenn man sich Peglars Dienstakte genau ansieht, stellt man fest, dass er mindestens ein halbes Dutzend Mal degradiert wurde", erklärt Stenton. „Peglar verlor mehrmals wegen Fehlverhaltens seinen Rang. Und er wurde sogar in Ketten gelegt und erhielt zwei Dutzend Peitschenhiebe, weil er betrunken war und weil er gemeutert hatte."

Forschung bietet neue Chancen

Die Identifizierungen von Orren, Young, Bridgens und Peglar zeigen, wie neue Analysemöglichkeiten schlagartig zu Erkenntnissen führen können, die zuvor noch außer Reichweite waren. Zudem beleuchten sie über einhalb Jahrhunderte nach der Katastrophe die Schicksale einzelner Menschen und geben Einblicke darin, wer sie waren und was mit ihnen geschah.

Insgesamt sind nun die Überreste von elf Teilnehmern der Franklin-Expedition identifiziert. Die Männer Hartnell, Braine und Torrington wurden in beschrifteten Gräbern gefunden. Lieutenant John Irving konnte anhand einer Medaille identifiziert werden und der Assistenzarzt Harry D. S. Goodsir ließ sich mit forensischen Methoden durch seine auffällige Lippengrube und eine besondere Form des Unterkiefers zuordnen, zudem wies eine durchgeführte Isotopenanalyse seines Zahnschmelzes auf seine Heimat Ostschottland hin.

Stenton und sein Team konnten durch die neuen DNA-Analysen bislang sechs Besatzungsmitglieder identifizieren. Und schon bald dürften weitere folgen.

Die Forschungsarbeit von Stenton bringt in gewisser Weise die Menschen zu ihren Familien zurück. „Ihre Nachkommen wissen nicht, wo sie gestorben waren", sagt Stenton. „Nun können wir weiteren Familien sagen: ‚Wir haben ihn gefunden. Und wir haben ihn dank Ihrer Hilfe gefunden.'" Ohne die Mitarbeit der Nachkommen wäre diese Forschung nicht möglich – und wer von einer familiären Verbindung zu Expeditionsteilnehmern weiß, hat nun nach fast 180 Jahren die Chance, ein noch offenes Kapitel seiner Familiengeschichte abzuschließen. ■



DAVID NEUHÄUSER
ist promovierter Historiker. Er schreibt unter anderem für das Magazin DAMALS und ist Mitgründer, Co-Autor und Co-Moderator des Podcasts „Damals und heute".

Robert W. Park / Universität Waterloo | Diana Trepkov, Investigative Forensic Artist (2)


Solarstrom vom See

Solarkraftwerke benötigen viel Platz. Warum also sollten sie nicht dort errichtet werden, wo sie nicht mit anderen Nutzungen konkurrieren müssen, etwa auf Wasserflächen?

Sonderheft 2026

Solarstrom vom See

Auf der Seite 35 unter „Startschuss in Japan, Rekordjagd in Asien“ las ich, dass die japanischen Forscher angaben, die 20-Kilowatt-Peak-Anlage im Jahre 2007 wäre weltweit die erste Anlage gewesen, die auf dem Wasser realisiert wurde. Das kann ich nicht unkommentiert stehen lassen.

Bereits 1991 realisierten wir bei der ASE – Angewandte Solarenergie (ein Nachfolgeunternehmen der AEG-Solartechnik in Wedel, Schleswig-Holstein) eine Tiefenwasserbelüftungs-Anlage-TIBEAN im Kleinen Küchensee in Ratzeburg, mit einer schwimmenden circa 22-Kilowatt-Peak-PV-Anlage mit Modulen aus der Fertigung in Wedel. Die waren damals einen halben Quadratmeter groß, Doppelglas, Edelstahlrahmung und hatten etwa 50 Watt-Peak pro Modul.

Die AEG hat schon früh mit der Entwicklung von Photovoltaik in Wedel angefangen. Wir waren oftmals der Zeit dabei etwas voraus. Wenn ich die Photovoltaik heute betrachte, freue ich mich immer wieder, den Weg aktiv mitgestaltet zu haben.

Zu guter Letzt noch einen kleinen Hinweis zu dem ehrenamtlich geführten Möller Technicon-Museum, welches versucht, die Industriegeschichte der Stadt Wedel zu bewahren. Und davon war die AEG Solartechnik auch ein Teil.

Heiner von Riegen

Sonderheft 2026

AC/DC

Gegen Ende des Artikels kommt die Abneigung der Stromversorger zur Sprache, den Privathaushalt mit Gleichstrom zu versorgen.

Diese Abneigung hat einen sehr fundamentalen Grund. Bei Spannungen um übliche Werte in der EU wie 230 Volt ist ein Isolationsfehler bereits lebensbedrohlich. Simple Step-Down-Schaltregler verfügen nicht über eine Netztrennung. Steckdosen wie die üblichen erlauben die beliebige Polung, Verdrehung der Stecker, unter Aufrechterhaltung des Personenschutzes mittels Fehlerstrom-Abschaltung.

Bei Gleichstrom im Hausnetz gewinnt man Effizienz in den Geräten, muss diese aber mit einer Reihe von zusätzlichen Mitteln und Kosten erkaufen. Eine Umrüstung auf andere Spannungen ergibt keinen wirklichen wirtschaftlichen Nutzen gegenüber dem Stand der Technik.

Erst wenn die überwiegende Mehrheit der Gebäude die Komponenten zur Kfz-Ladetechnik aufweist, die Fahrzeuge bidirektional als Energiespeicher integriert sind, ergibt sich eine geeignete zusätzliche Infrastruktur und Normung.

Joachim Kröger

Heft 07|26

Bitte automatisch – es klappert die Mühle

Mit großem Interesse habe ich den Artikel gelesen. Es ist sehr spannend zu erfahren, dass „unbekannte“ Erfinder schon Dinge entwickelt hatten, die in ihrer Zeit kaum auf Gegenliebe gestoßen waren und zudem gelegentlich große Namen von einem Patent abhielten, da schon angemeldet.

Reiner Erkelenz

Die Redaktion behält sich vor, Leserbriefe gekürzt abzudrucken.

Ihre Meinung ist gefragt!

Beim Artikel über die Franklin-Expedition („Verschollen im Eis“, ab Seite 72) ist die neue Forschung, über die berichtet wird, die Identifikation von Expeditionsteilnehmern per DNA-Analyse. Der Artikel erzählt jedoch viel mehr rund um die Expedition. Ist das für Sie zu weit ausgeholt, zur Einordnung sinnvoll, oder auch einfach spannend?

Ihre E-Mail mit Stichwort „Umfrage 09/26 Franklin“ richten Sie bitte an: wissenschaft@konradin.de

BILD DER
WISSENSCHAFT SHOP

www.wissenschaft-shop.de



CIRCLE Pfännchen-Set für Raclette

Haltering, 6 Pfännchen zum Warmhalten, Garen und Überbacken, 6 Holz-Spachtel

Best. Nr. 806 932 **€ 99,95**



Höfats Bioethanol Flüssig-Brennstoff

3er Set, 1 l / Flasche, eine Füllung CIRCLE (ca. 650 ml) reicht für 2-4 Stunden

Best. Nr. 805 954 **€ 24,90**

Mehr Infos zum Produkt

Die Zukunft des Grillens: Kein Kabel, keine Gaskartusche, keine Kohlen!

Der höfats CIRCLE ist ein Alleskönner. Eine massive Plancha aus emailliertem Gusseisen ruht auf sechs „Flammen-Zylindern" – und das, wo immer Sie es wollen: Terrasse, Balkon, Esszimmer, Garten, Strand. Schnell aufgebaut, schnell auf Temperatur. Bioethanol brennt ruß- und rauchfrei. In Deutschland entwickelt: die Norm DIN 16647 bescheinigt die sichere Verwendung auch im Innenraum! Verschiedene Temperaturzonen erlauben das scharfe Anbraten eines Tataki bis zum sanften Garen von Fisch. Besonders praktisch: der als Drehrad konzipierte Standfuß steuert alle sechs Flammen synchron – stufenlos, präzise, ohne Hilfsmittel. Bestellen Sie jetzt ausgezeichnetes Design – 360° innovatives Grillvergnügen!

höfats CIRCLE 35 Tischgrill

Glaszylinder: feuerfestes Borosilikatglas, Wärmeleistung: bis 2000 W, Maße: Ø 35 × Höhe 20 cm, Gewicht: 6,1 kg, mit Flammenlöscher

Best. Nr. 806 931 **€ 249,95**



Mobile Abkühlung für heiße Tage!

Die Hitze wird immer häufiger zur Belastung. Ob auf dem Weg zur Arbeit, in Bus und Bahn, beim Stadtbummel, im Office, auf Festivals, Gartenparty, Sofa, im Bett oder im Urlaub – mit diesem Handventilator genießen Sie einen frischen Luftstrom, ganz ohne Steckdose. Mit sechs Stufen passen Sie die Luftzirkulation exakt Ihren Bedürfnissen an. Außerdem: 90° schwenkbarer Ventilatorkopf, 5.000 (!) mAh-Akku ermöglicht eine Laufzeit von bis zu 14 Stunden, Display mit Akkustand, Laden über USB-C-Anschluss, mit Standfuß und Smartphone-Halter!

Nedis Handventilator mit Akku

Farbe Rosé, Maße: 9 × 20 × 4 cm, Gewicht: 221 g, USB-C Kabel

Best. Nr. 806 930 nur solange der Vorrat reicht **€ 19,99**

Bestseller

Jetzt einfach und schnell online bestellen:
www.wissenschaft-shop.de

[1]



Passend dazu:
Höfats Bioethanol Flüssig-Brennstoff
3er-Pack – 3 Liter
Best. Nr. 805 954 **€ 24,90**

[2]



Mehr Infos zum Produkt

[3]



[4]



[1] SPIN air bringt Flammenzauber in Ihr Zuhause!

Dieser Flammenwirbel XXL mit Sockel aus Eiche bringt durch eine intelligente Belüftung die Flamme in dem feuerfesten Glaszylinder in eine faszinierende, aufsteigende Drehbewegung. Der Bio-Burner garantiert fast 2 Stunden Kaminzauber!

SPIN air Flammenwirbel 1200
Eiche, ø 13,8 × Höhe 54 cm, Indoor-Zulassung nach DIN EN 16647

Best. Nr. 806 787 **€ 199,99**

[2] Dieses Mini-Kraftwerk leuchtet bis zu 200 Meter!

Die Zweibrüder 1T revolutioniert die mobile Beleuchtung: Extrem leicht liefert sie bis zu 500 (!) Lumen! Dank USB-C-Ladefunktion und integriertem Li-Po-Akku (320 mAh) ist sie in nur einer Stunde wieder einsatzbereit. Das Aluminiumgehäuse mit IP66-Schutz trotzt Staub und Regen.

Zweibrüder 1T Aufladbare Mini-Taschenlampe
MF-Optik Spot & Flutlicht, USB-C

Best. Nr. 806 756 **€ 26,99**

[3] Einfach genial: spielerisch Kopfrechnen!

PLUxINUS verbindet Würfelspaß mit cleverem Rechnen und bietet gleich drei spannende Spielvarianten: kooperativ, solo oder im Wettkampf! Jede erfolgreich berechnete zweistellige Zahl bringt Ihnen Punkte – wer am Ende die meisten hat, gewinnt!

PLUxINUS: das Würfel- und Rechenspiel
Ab 8 Jahren, 1 bis 8 Spieler, 30 spezielle Würfel

Best. Nr. 806 720 **€ 24,99**

[4] LED-Lupe: Strahlend hell und scharf!

Eine neue Generation der Leuchtlupe: Das Nonplusultra in punkto Ergonomie, Ausleuchtung und Bedienkomfort. Die 4-fache Vergrößerung ist optimal, um Texte zu lesen. Mobilux ist ein Qualitätsprodukt made in Germany aus dem Hause Eschenbach Optik!

Eschenbach Mobilux LED Handlupe
17 cm, 2× AA/L, nur 140 g

Best. Nr. 805 842 **€ 99,99**

Neuheiten

BILD DER
WISSENSCHAFT SHOP



Schluss mit Kabelsalat unterwegs: 6-in-1 Ladekabel!

Ob Apple oder Android, Tablet oder Kamera: allroundo® GaN ist ein Power-Charger (30 W) und verfügt über ein integriertes All-in-One Lade- und Datenkabel (120 cm) mit dem Sie alle Endgeräte blitzschnell (bis zu 60 W) aufladen können. Bequem verstaut im Reise-Etui, sind die Adapter (USB-A, Micro-USB und Lightning) jederzeit perfekt geschützt.

allroundo® GaN Charger + All-In-One Kabel
L 100 × B 99 × H 44 mm, 182 g, Kabel bis zu 120 cm

Best. Nr. 806 852 **€ 49,99**



Wunderschöne Design-Gewürzmühlen in 2 Farben!

Die Kombination aus mattem Kunststoff in natürlichen Farbtönen und einem eleganten Deckel aus Eichenholz macht dieses Set zu einem echten Blickfang. Das bewährte Cera-Cut® Hochleistungs-Ceramic Mahlwerk garantiert präzise Mahlergebnisse, egal ob für feines Salz oder groben Pfeffer. Es ist geruchs- und geschmacksneutral, rostfrei und langlebig.

SCAPE Pfeffer- und Salzmühlen-Set (Adhoc Design)
Höhe je 12,3 cm, ø 5,8 cm, Hell- und Dunkelgrün

Best. Nr. 806 826 **€ 39,99**



Ein himmlischer Blick- und Papierfang!

Dieser wunderschöne Briefbeschwerer öffnet Ihnen eine Tür ins Universum. Je nachdem, wie Sie Ihr Planetarium drehen, eröffnen sich immer neue, verblüffende Ansichten. Bei einem flachen Blickwinkel vergrößern und neigen sich die Objekte am Rand und es entsteht die Illusion eines unendlichen Universums. Ein zauberhafter Blick- und Papierfang für Ihren Schreibtisch!

Briefbeschwerer Universum
Glas mit Lupeneffekt, ø 10 cm, Höhe 5 cm

Best. Nr. 803 086 statt UVP € 40,- **€ 29,99**



Mehr Infos zum Produkt

Ideal für Senioren mit extra großen Tasten!

Das Lenco PDR-065BK macht Radio kinderleicht: Easy Mode und extra große Tasten für Ein/Aus, 4 Favoriten und Lautstärke. DAB+/FM, gut lesbares 2,75-Display und Bluetooth 5.0. 2×2 W-Stereo-Lautsprecher sorgen für satten Klang, der 2.000 mAh-Akku hält bis zu 8 Stunden, plus Ladestation. 2 Weckzeiten, Sleep/Snooze und Fernbedienung.

Lenco PDR-065BK Tragbares DAB+/FM-Radio
210 × 100 × 130 mm, 1.323 g, inkl. Fernbedienung & Netzadapter

Best. Nr. 806 861 **€ 129,99**

Bestellen Sie auch telefonisch: +49 (0) 711 719 24 580

BDW+

Für alle Leserinnen und Leser dieser BDW-Ausgabe

BDW+
4 Wochen
gratis nutzen!



+ Artikel des Magazins Bild der Wissenschaft jederzeit und überall online lesen
+ Archiv mit rund 1.000 BDW+ Artikeln und praktischer Stichwortsuche
+ die neueste BDW-Ausgabe als PDF pünktlich zum Erscheinungstermin

Ihr 4 Wochen-GRATIS-Zugang zu BDW+

koninfo.de/BDP10006

Sie haben bereits ein Printabonnement? Einfach Code scannen und Upgrade-Angebot sichern.

Parteizugehörigkeit der Großstadtoberhäupter

Kommunal bunt

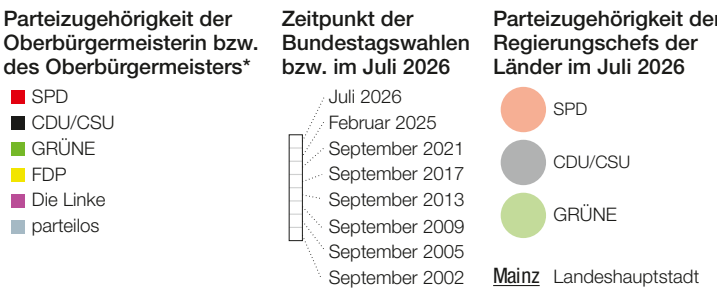
In Kommunalwahlen wird oft anders gewählt als in Land- oder Bundestagswahlen. In vielen Großstädten gewinnen Politiker, die einer anderen Partei angehören als der Ministerpräsident.

In der Vergangenheit waren die meisten Großstädte in fester parteipolitischer Hand von SPD oder CDU. Dies hat sich seit geraumer Zeit verändert. In zahlreichen Großstädten wechseln sich bei der Direktwahl der Stadtoberhäupter „schwarze“ und „rote“ Bürgermeister ab. Zunehmend sind sie auch „grün“ oder parteilos und in Jena und Dresden sogar „gelb“, auch Die Linke gewann 2023 mit Rostock erstmals in einer Großstadt. Gleichwohl existieren auch weiterhin „rote“ Hochburgen – beispielsweise in Leipzig, Bremen, Bochum, Offenbach am Main und Fürth. Dagegen gab es im betrachteten Zeitraum 2002 bis Juli 2026 nur noch eine lückenlose CDU-Dominanz in Paderborn.

Die Karte des Leibniz-Instituts für Länderkunde zeigt zudem, dass bei der Bürgermeisterwahl in den Großstädten vielfach anders abgestimmt wird als bei der Landtagswahl, sodass in den Flächenländern Bürgermeister und Ministerpräsidenten häufig unterschiedlichen Parteien angehören. Dies trifft auch – mit Ausnahme von Nordrhein-Westfalen und Thüringen – auf die Landeshauptstädte zu. In den Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen sind die dortigen Regierungschefs zugleich Bürgermeister.

Parteizugehörigkeit der Großstadtoberhäupter

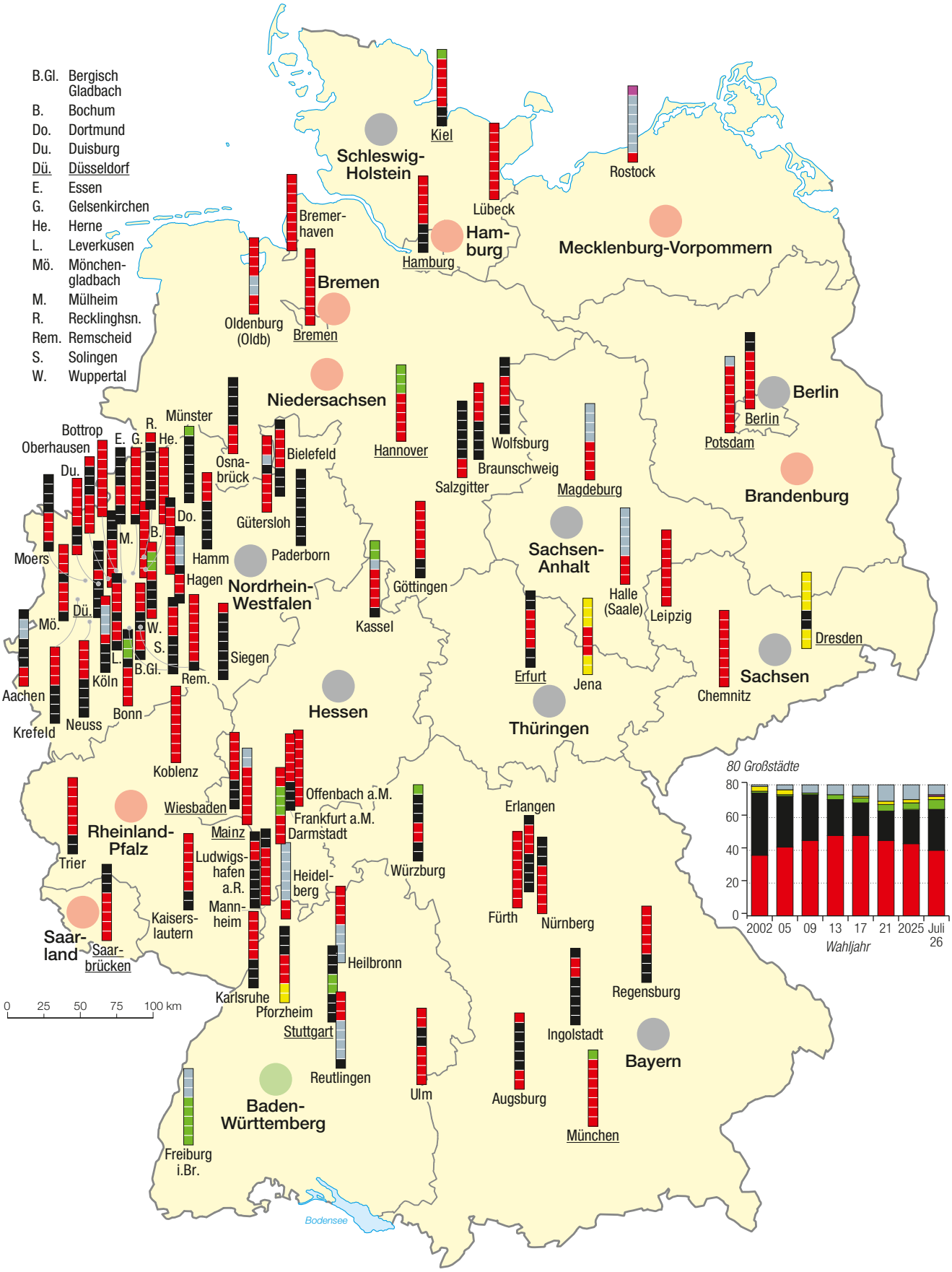
Zum Zeitpunkt der Bundestagswahlen 2002 bis 2025 und am 1. Juli 2026



Berücksichtigt wurden die Städte mit mehr als 100 000 Einwohnern am 31.12.2024.

* *Aus traditionellen Gründen gibt es in Bremen nur den Titel Bürgermeister, in Hamburg den Titel Erster Bürgermeister; in Berlin heißt das Stadtoberhaupt Regierender Bürgermeister. Alle drei sind zugleich Regierungschefs der Stadtstaaten (Länder).*

Quelle: eigene Recherchen



in Zusammenarbeit mit
BILD DER WISSENSCHAFT

© Leibniz-Institut für Länderkunde 2026
Autor: V. Bode
Kartenredaktion: B. Hölzel
Kartographie: A. Kurth

Die Farben fremder Welten

Ein Teleskop sieht keinen Wald auf einem fernen Planeten, sondern nur Licht. Doch genau darin könnten sich andere Biosphären verraten: durch Farben, Kanten im Spektrum und chemische Spuren.

von KAI DÜRFELD

Das Leben ist grün. Wälder und Felder, Wiesen und Auen leuchten in unzähligen Schattierungen. Das Grün der Pflanzen gehört zur Erde wie das Blau des Himmels und das Weiß der Wolken, die darüber ziehen.

Doch die Farbe der Flora ist kein Zufall. Sie ist das Ergebnis ihrer Anpassung an die Sonne. Wenn das Grün der Erde aber so eng mit dem Licht am Himmel verbunden ist, wie würden dann Pflanzenwelten auf Planeten aussehen, die andere Sterne umkreisen?

Nancy Kiang vom NASA Goddard Institute for Space Studies in den USA war eine der ersten Forscherinnen, die diese Frage systematisch untersuchte. Sie schuf daraus ein Werkzeug der Astrobiologie. Denn wer über fremde Biosphären nachdenken will, muss nicht bei exotischen Landschaften beginnen, sondern bei etwas sehr Irdischem: einem Blatt.



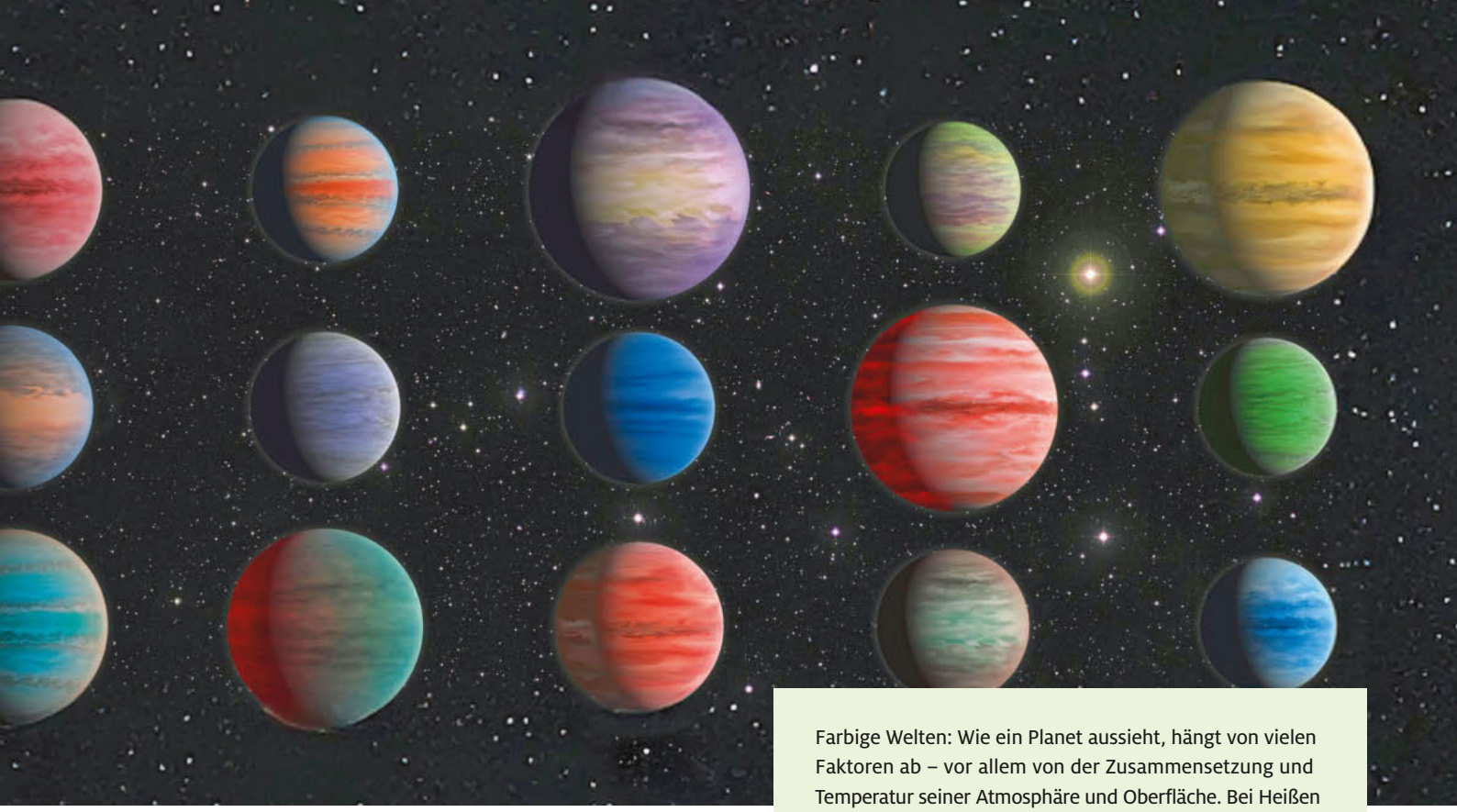
Laubblatt im Gegenlicht: Seine grüne Farbe ist kein Zufall, sondern eine Anpassung an die spektrale Energieverteilung des Sonnenlichts.

In einem Blatt steckt mehr als Farbe. Es zeigt, welche Wellenlängen des Sonnenlichts biologische Moleküle aufnehmen, welche sie weiterleiten, welche sie abgeben und welche sie reflektieren. Wer über Pflanzen auf fremden Planeten nachdenken will, muss deshalb zuerst verstehen, warum Pflanzen auf der Erde überhaupt grün erscheinen.

Warum Blätter grün sind

Für ein Blatt ist Sonnenlicht nicht einfach weiß. Es besteht aus Photonen, aus kleinen Lichtpaketen mit unterschiedlicher Energie. Durch Photosynthese baut die Pflanze daraus chemische Verbindungen auf. Diese Aufgabe übernehmen Chloroplasten. In ihnen sitzen Pigmente, die das Licht auffangen. Man kann sie sich wie molekulare Antennen vorstellen. Vor allem Chlorophyll a und b, aber auch Hilfspigmente wie Carotinoide, absorbieren Photonen. Ihre Moleküle sind so gebaut, dass sie bestimmte Energien besonders gut schlucken können. Vor allem blaues und rotes Licht hebt Elektronen in den Pigmenten auf ein höheres Energieniveau und stößt damit die ersten Schritte der Photosynthese an.

Im grünen Bereich ist die Absorption schwächer: Ein Teil des Lichts wird in tieferen Zellschichten ge-



Farbige Welten: Wie ein Planet aussieht, hängt von vielen Faktoren ab – vor allem von der Zusammensetzung und Temperatur seiner Atmosphäre und Oberfläche. Bei Heißen Jupitern zeigen Messungen der Weltraumteleskope Hubble und Webb bereits deutliche Unterschiede, die beispielsweise durch Metalloxide und -hydride verursacht werden (in der Illustration stark übertrieben). Bei kühleren, leichteren Planeten hätten auch Lebewesen einen messbaren Einfluss, falls es sie dort gibt.

nutzt, ein Teil durchdringt das Blatt, ein Teil wird zurückgeworfen. Das Auge sieht vor allem den reflektierten Anteil.

Grün ist also kein Zweck der Photosynthese – keine Pflanze „will“ grün sein. Wenn diese Farbe ein Nebeneffekt der Lichtverarbeitung ist, dann könnte anderes Licht auch andere Farben hervorbringen. Hier wird es für die Astrobiologie interessant.

„Die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie folgt universellen Prinzipien der Physik“, sagt Nancy Kiang. Wo Leben Licht als Energiequelle nutzt, muss ein Photon zunächst ein Molekül anregen. Ein Photon bringt ein Elektron auf ein höheres Energieniveau, die Energie wird weitergereicht, am Ende entsteht nutzbare chemische Energie. Welche Moleküle übernehmen diese Aufgabe? Chlorophyll sei dafür auf der Erde sehr gut geeignet, sagt die Forscherin. Aber es ist zugleich „auch das Ergebnis unserer besonderen Evolutionsgeschichte“.

Andere Sonnen strahlen anders

Chlorophyll ist an das Licht angepasst, das auf der Erde zur Verfügung steht. Doch auf anderen Planeten würde Licht anders aussehen. Nicht jeder Stern strahlt wie die Sonne. Manche Sterne sind heißer und bläulicher, andere kühler und rötlicher. Ihre Farbe ist ein Hinweis auf die Temperatur und darauf, wie sich ihre Strahlung über das Spektrum verteilt.

Am heißen Ende stehen die weiß bis bläulich leuchtenden O- und B-Typen. Sie liefern zwar gewaltige Energiemengen, sind aber kurzlebig und für eine lange, stabile biologische Evolution deshalb keine guten Kandidaten. Für die Frage nach fremder Photosynthese sind vor allem langlebige Sterne interessant, deren Licht über Milliarden Jahre verlässlich auf einen Planeten fällt. Sterne vom F-Typ zum Beispiel strahlen stärker im kurzwelligen blauen und ultravioletten Bereich. Noch langlebiger sind G-Typen wie unsere Sonne. Ihr Licht enthält viel sichtbare Strahlung, vom Violett über Blau und Grün bis ins Rote. Kühlere Sterne verschieben ihr Maximum zu längeren Wellenlängen: K-Sterne leuchten etwas rötlicher als die Sonne und können sehr lange stabil bleiben. M-Zwerge, die kleinsten und häufigsten Sterne der Milchstraße, senden besonders viel Energie im roten und nahen infraroten Bereich aus.

Damit ändert sich von Welt zu Welt die Grundlage für eine Photosynthese. Die Farbe einer fremden Biosphäre lässt sich also nicht einfach aus der Farbe ihres Sterns ableiten. „Wir schauen nach Leben, wie wir es kennen“, sagt Kiang.

Aber dieser Blick auf die Erde ist kein Bauplan für eine Kopie. Entscheidend ist das Zusammenspiel aus Sternlicht, Atmosphäre, Wasser, Molekülen und Evolution.

Illustration: ESA / Hubble, N. Bartmann | Antje Kraemer Photography

Fenster des Lebens

Photosynthese bewegt sich im Spannungsfeld von zu viel und zu wenig Energie. Grenzen setzt die Physik. Im unteren Wellenlängenbereich liegen sie im UV-A-Bereich. Wird die Strahlung kurzwelliger, dann sind die Photonen schlicht zu energiereich.

Hartes UV-C schädigt biologische Moleküle und bricht chemische Bindungen auf. Noch energiereicheres Röntgenlicht reißt Elektronen aus den Atomen heraus. Bei der Ionisation entstehen hochreaktive Teilchen, die komplexe Kohlenstoffverbindungen angreifen und zerstören können. Neben ihrem kurzen, heißen Leben wären O- und B-Sterne auch deshalb denkbar schlechte Kandidaten für eine stabile Biosphäre.

Am langwelligen Ende stellt sich das entgegengesetzte Problem: Je weiter das Licht ins nahe Infrarot rückt, desto weniger Energie trägt jedes einzelne Photon. Irgendwann reicht sie nicht mehr aus, um ein Elektron auf das nötige Energieniveau zu heben.

Einige Cyanobakterien verschieben diese Grenze etwas. Mit Chlorophyll f und umgebauten Photosystemen nutzen sie noch Strahlung aus dem nahen Infrarot; es liegt außerhalb des Bereichs des für den Menschen sichtbaren Spektrums. Auf fremden Welten könnte die Photosynthese noch einen Schritt weiter gehen. Zusätzliche Reaktionsstufen würden dann die Energie mehrerer Photonen nacheinander einsammeln und so auch tiefer ins nahe Infrarot vordringen. Doch mit jedem zusätzlichen Schritt wird der Prozess aufwendiger und verlustreicher.

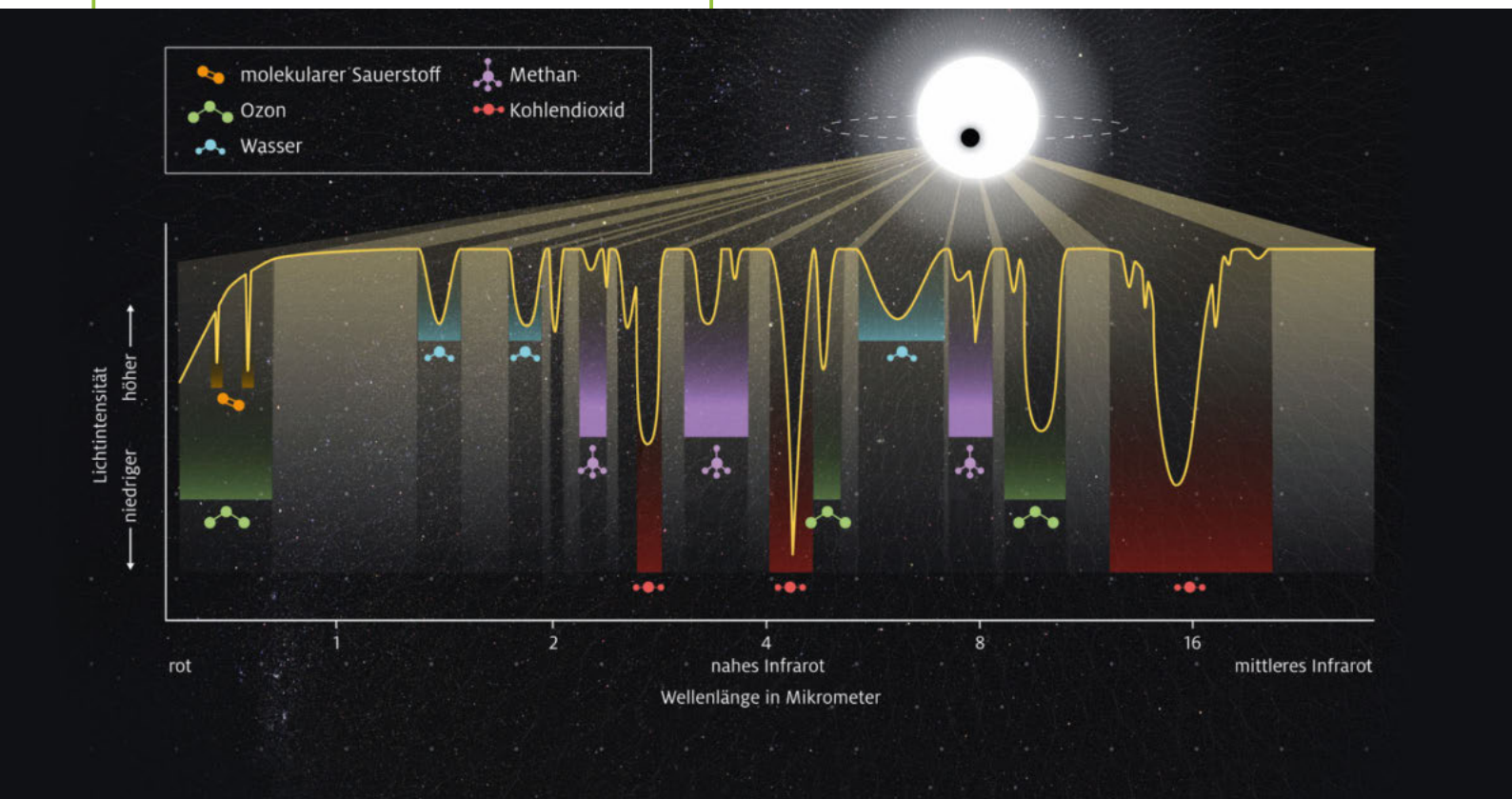
Zwischen diesen Extremen liegt das breite Lichtfenster, das die Photosynthese nutzen kann. Dort tragen die Photonen genug Energie, um ein Pigmentmolekül anzuregen und die erste Ladungstrennung auszulösen, ohne die beteiligten Moleküle zu beschädigen. Wie weit dieses Fenster ins ultraviolette oder infrarote Licht reicht, hängt von den Pigmenten und dem Aufbau der Photosysteme ab.

Farben des Möglichen

Aus diesem Spielraum entsteht die Farbe einer Biosphäre. Der Stern gibt sie nicht einfach vor, aber er verteilt die Energie im Spektrum und bestimmt damit, welches Licht Leben nutzen kann. Pigmente reagieren auf dieses Angebot. Sie sammeln geeignete Wellenlängen ein, schützen

Signatur einer Exoatmosphäre

Wenn ein Exoplanet mit einer Atmosphäre vor seinem Stern vorüberzieht, wird nur ein Teil des Sternenlichts hindurchgelassen, weil das Gas Photonen absorbiert. Jedes Element oder Molekül verschluckt dabei nur ganz bestimmte, aus Labormessungen bekannte Wellenlängen. Dadurch lassen sich diese Stoffe im Transmissionsspektrum des Sternlichts identifizieren, sodass Astronomen auf die Bestandteile der Atmosphäre schließen können. Dank der Messungen von Teleskopen wie Hubble und Webb wurden bereits Dutzende von Exoatmosphären analysiert. Die Grafik zeigt die idealisierte Simulation eines Spektrums von einem erdähnlichen Exoplaneten.



vor schädlicher Strahlung und werfen den Rest zurück. Erst dieser zurückgeworfene Anteil würde einer fremden Landschaft ihre Farbe geben.

Auf einem Planeten um einen F-Stern träfe besonders viel blaues und ultraviolettes Licht auf die Atmosphäre. Für Organismen an der Oberfläche wäre Energie daher kaum Mangelware. Sie müssten sich vielmehr vor einem Überangebot schützen. Schon auf der Erde fangen Carotinoide und andere Schutzpigmente energiereiches Licht ab und geben überschüssige Energie wieder ab. Dominierten solche Pigmente eine fremde Vegetation, könnten gelbe, orangefarbene, rote oder violette Töne ganze Landschaften prägen. Welche Töne sich durchsetzen, hängt allerdings auch davon ab, welche Strahlung die Atmosphäre bis zum Boden durchlässt.



Für das Studium von Exoplaneten gibt es inzwischen spezialisierte Observatorien. Eines namens SPECULOOS (Search for habitable Planets EClipsing ULtra-cOOl Stars) betreibt die Europäische Südsternwarte auf dem Cerro Paranal in Chile seit Dezember 2017. Hier suchen vier robotische Teleskope mit je einem 1-Meter-Hauptspiegel im nahen Infrarot nach terrestrischen Planeten bei Roten und Braunen Zwergen. Diese kühlen Sterne sind so lichtschwach, das sich vor ihnen vorbeiziehende Planeten relativ einfach nachweisen lassen.

Künstliche Sterne im Experiment

Inzwischen holen Astrobiologen fremdes Sternlicht ins Labor. Mit LED-basierten Sternlichtsimulatoren können sie Spektren nachbilden, die nicht dem Licht der Sonne entsprechen. Einzelne Lichtkanäle werden so angesteuert, dass am Ende kein weißes Laborlicht entsteht, sondern die Strahlung eines anderen Sterntyps. In kleinen Kammern wachsen dann irdische Organismen unter einer Sonne, die es auf der Erde nur als technische Nachbildung gibt.

K-Sterne stellen ein anderes Lichtangebot als die Sonne bereit. Sie sind kühler und ihr Spektrum ist stärker ins Rote verschoben. Dass irdische Photosynthese mit diesem rötlicheren Licht grundsätzlich zurechtkommt, zeigt ein Experiment an der Technischen Universität Berlin. Iva Vilović und Dirk Schulze-Makuch setzten Gartenkresse und Cyanobakterien dem simulierten Spektrum eines K-Zwergs aus. Dafür wurde zunächst berechnet, welches Licht auf der Oberfläche eines Planeten mit erdähnlicher Atmosphäre ankäme. Dieses Spektrum speiste das Team in einen LED-Simulator ein. Auch ein Tag-Nacht-Rhythmus wurde nachgestellt.

Das Ergebnis war erstaunlich unspektakulär und gerade deshalb interessant: Die Gartenkresse keimte, wurde grün und zeigte unter K-Zwerg-Licht eine ähnliche Photosyntheseleistung wie unter simuliertem Sonnenlicht. Das Cyanobakterium Chroococcidiopsis reagierte sogar stärker auf das fremde Licht.

Das Experiment verrät noch nicht, welche Farbe eine dort entstandene Vegetation hätte. Es zeigt aber, dass Leben auch ein rötlicheres Spektrum erfolgreich nutzen kann. Im Lauf der Evolution könnten Pigmente entstehen, die andere Bereiche dieses Lichts bevorzugen als das irdische Chlorophyll. Das vertraute Grün wäre damit nur noch eine Möglichkeit unter vielen.

Wenn das Licht ins Rote kippt

Während K-Sterne noch in der Nähe des vertrauten Sonnenlichts bleiben, verschieben M-Zwerge das Lichtangebot viel stärker. Ein großer Teil ihrer Strahlung liegt im roten und nahinfraroten Bereich.

Im italienischen Padua haben Forschungsteams auch dieses Licht in eine Versuchsanlage geholt. Ihr Aufbau wirkt wie eine kleine Bühne für fremde Sonnen: Oben sitzt ein Sternlichtsimulator, darunter eine Reaktionszelle, in der die Mikroorganismen wachsen. Das System ist abgeschirmt, gekühlt, überwacht und so gebaut, dass sich Licht, Temperatur und Atmosphäre kontrollieren lassen.

In dieser künstlichen Umgebung setzten die Teams um Riccardo Claudi und Nicoletta La Rocca verschiedene Cyanobakterien dem Licht eines simulierten M-Zwergs aus. Zum Vergleich ließen sie andere Kulturen unter sonnenähnlichem Licht und unter rein nahinfrarotem Licht wachsen.

Eigentlich hätte man erwarten können, dass vor allem jene Organismen profitieren, die die langen Wellenlängen mit besonderen Chlorophyllformen nutzen können. Doch unter dem vollständigen M-Zwerg-Spektrum

BDW-Grafik / Karl Marx; Quelle: NASA, ESA, CSA, STScI, Joseph Olmsted / STScI; R. Vaas | ESO / G. Lambert



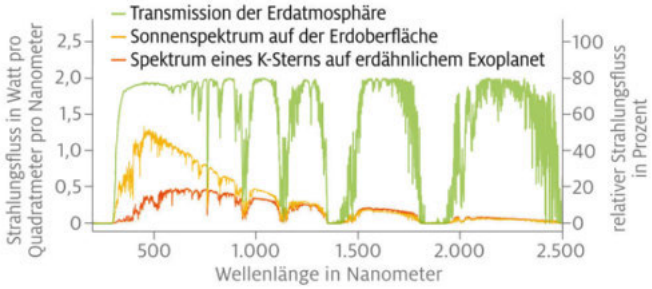
26 Lichtjahre entfernt im Sternbild Jungfrau läuft ein Exoplanet namens GJ 486 b in nur knapp 1,5 Tagen um einen Roten Zwergstern. Der felsige Trabant hat die dreifache Masse der Erde und ist rund 30 Prozent größer. Das Webb-Weltraumteleskop hat dort Hinweise für Wasserdampf gemessen, der jedoch auch von einem kühlen Sternfleck stammen könnte. Weitere Beobachtungen müssen zeigen, ob es sich um eine potenziell lebensfreundliche Welt handelt.

wuchsen und photosynthetisierten alle getesteten Stämme ähnlich gut wie unter Sonnenlicht und deutlich besser als unter nahinfrarotem Licht.

Auch dafür kennt die Erde bereits biologische Ansätze: das Chlorophyll f von Cyanobakterien. Organismen auf einem Planeten um einen M-Zwerg könnten in dieser Hinsicht noch extremer sein und einen großen Teil des sichtbaren und nahinfraroten Lichts aufnehmen. Für menschliche Augen würden sie dann möglicherweise sehr dunkel oder sogar schwarz erscheinen.

Spuren im Licht

Sterne unterscheiden sich in ihrer Leuchtkraft und in ihrem Spektrum. Hat ein Planet eine Atmosphäre, gelangt das Licht seines Sterns außerdem nicht zu gleichen Teilen an die Oberfläche, weil Moleküle wie Wasser, Sauerstoff, Ozon, Methan und Kohlendioxid es partiell absorbieren. Die Grafik zeigt das daraus resultierende Transmissionsspektrum der Erde und das Durchschnittspektrum der Sonne im Vergleich zu einem lichtschwächeren, kleineren K-Stern. Die irdische Vegetation hat sich an die spektralen Gegebenheiten angepasst. Das wäre auch bei belebten Exoplaneten der Fall.



Ein Planet, viele Farben

Doch selbst wenn der Stern die Richtung vorgibt, müsste er einen Planeten nicht einheitlich färben. Auf der Erde nutzen Algen abhängig von der Wassertiefe unterschiedliche Pigmente, weil Wasser das Sonnenlicht mit zunehmender Tiefe immer stärker sortiert. Manche Mikroben verwenden Rhodopsine, lichtempfindliche Pigmente, zur Energiegewinnung und können dadurch rötlich oder violett gefärbt sein. Atmosphäre, Wasser, Gestein und biologische Konkurrenz könnten auch auf einer fremden Welt zahlreiche Farbnischen schaffen.

Solche Möglichkeiten nennt Nancy Kiang einen „Regenbogen der Anpassungen". Gemeint ist eine Vielfalt biologischer Lösungen für unterschiedliche Lichtbedingungen. Selbst auf einem einzigen Planeten könnten verschiedene Pigmente, Schutzmechanismen und Lebensräume nebeneinander bestehen.

Besonders ausgeprägt wäre ein solches Mosaik auf einem Planeten, der seinem Stern immer dieselbe Seite zuwendet. Vom grell beleuchteten Zentrum der Tagseite bis in die ewige Dämmerung am Rand würden sich Lichtmenge und Spektrum verändern. Die Biosphäre könnte daher aus unterschiedlichen Lebensräumen bestehen, jeweils geprägt vom eigenen Lichtangebot.

Eine Kante im Licht

Aus den Farben einer fremden Biosphäre könnte ein Teleskop zunächst kein Bild gewinnen. Selbst mit den kommenden Großteleskopen bliebe ein erdähnlicher Exoplanet um einen anderen Stern nur ein winziger Punkt. Ob ein ferner Wald schwarz, rot oder violett aussähe, wäre aus dieser Entfernung kaum zu erkennen. Sichtbar würden nur die Spuren, die dieses Leben im Licht hinterlässt.

Auf der Erde ist eine Spur besonders vielversprechend: Pflanzen reflektieren große Teile des sichtbaren Lichts. Im nahen Infrarot erhöht sich aber die Reflexion abrupt, sodass im Spektrum eine steile Kante entsteht. Eine solche Red Edge macht aus grüner Vegetation ein messbares Signal. Satelliten im Erdorbit nutzen diesen Sprung

Illustration: NASA, ESA, CSA, Joseph Olmsted / STScI, Leah Hustak/STScI | BDW-Grafik / Karl Marx; Quelle: I. Vilović, D. Schulze-Makuch, R. Heller, Internat. J. Astrobiol. 23, e18 (2024); A. D. Baker et al., Astrophys. J. Suppl. 247, 24 (2020); R. Vaas



Gartenkresse unter verschiedenen Lichtbedingungen: Jeweils 100 Samen wurden entweder mit Sonnenlicht bestrahlt (effektive Sternoberflächentemperatur 6.000 Grad Celsius; linke Spalte) oder mit dem simulierten Licht eines Zwergsterns der Spektralklasse K (4.600 Grad; Mitte), oder sie wurde im Dunkeln belassen (rechts). Die Fotos zeigen das Ergebnis am ersten, dritten, fünften und siebten Tag. Die Kresse keimte im Licht eines K-Sterns früher als im Sonnenlicht oder in der Dunkelheit. In den Fotos ganz unten sind die Pflanzen am siebten Tag von der Seite zu sehen.

längst, um Pflanzenwachstum, Trockenstress oder die Ausdehnung von Wäldern und Feldern zu verfolgen.

Warum dies nicht für die Suche nach Leben auf Exoplaneten nutzen? Wenn fremde Organismen Licht ernten, könnten auch sie einen spektralen Bruch erzeugen – nicht notwendigerweise dort, wo sich die irdische Red Edge befindet.

Bei Planeten um heißere F-Sterne könnten Schutzpigmente und das stärkere blaue oder ultraviolette Licht eine solche Signatur verändern. Auch bei K-Sternen wäre eine Verschiebung denkbar, aber nicht zwingend. Bei M-Zwergen dagegen rückt das nutzbare Licht so weit ins Rote und nahe Infrarot, dass eine Reflexionskante weiter draußen im Spektrum liegen müsste. Doch sie wäre noch kein Beweis für Leben. Auch manche Minerale besitzen Reflexionskanten. Wolken, Eis, Ozeane, Atmosphäre und Gestein mischen sich in das Licht eines ganzen Planeten. Ein Teleskop sähe nicht eine Pflanze, sondern die gemischte Strahlung einer Welt.

Schwierige Beweisführung

„Wir werden Dinge finden, die uns umhauen“, gibt sich Nancy Kiang im Hinblick auf die ersten direkten Bilder ferner Planeten sicher. Doch gerade deshalb reicht es nicht, nach einer Kopie der Erde zu suchen. Entscheidend wäre, ob das Licht einer fremden Biosphäre eine Ordnung zeigt, die zu den dortigen Bedingungen passt: zum Stern, zur Atmosphäre des Planeten, zur Oberfläche und zu anderen Hinweisen auf Leben.

Überzeugen würde ein solches Signal erst im Zusammenspiel mit anderen Beobachtungen. Eine ungewöhnliche Kante auf einem wasserreichen Planeten wäre interessant. Noch interessanter wäre sie zusammen mit Gasen, die dauerhaft ohne Leben schwer zu erklären sind. Sauerstoff allein genügt nicht, denn er kann auch abiotisch entstehen. Sauerstoff oder Ozon gemeinsam mit Methan aber würden auf ein chemisches Ungleichgewicht hinweisen.

Dann ginge es nicht mehr nur um die Frage, welche Farbe fremde Pflanzen hätten. Dann würde die Farbe selbst Teil einer größeren Botschaft.

Ein Blatt im Sonnenlicht ist kosmisch

Am Ende führt die Frage nach fremden Pflanzenfarben zurück zur Erde. Ein grünes Blatt erscheint nicht mehr als Selbstverständlichkeit. Vielmehr wird es zum sichtbaren Ausdruck einer langen Beziehung zwischen einem Stern, einem seiner Planeten und dem Leben auf dessen Oberfläche.

Für Nancy Kiang liegt genau darin eine der stärksten Erfahrungen ihrer Arbeit. „Die Suche nach Leben auf anderen Welten hat vor allem meinen Blick auf das Leben hier auf der Erde verändert“, sagt sie. Diese Forschung zeigt nicht nur, wie fremd Leben anderswo sein könnte. Sie zeigt auch, wie besonders das Vertraute ist.

Vielleicht entdecken wir eines Tages auf einem Exoplaneten eine Biosphäre, die für unsere Augen dunkel, rötlich oder fremdartig schimmert. Vielleicht taucht ihr Licht nur als schwache Kante in einem Spektrum auf. Bis dahin genügt ein Blatt im Sonnenlicht, um zu erkennen: Selbst das Grün der Erde ist eine kosmische Farbe. ■



KAI DÜRFELD ist Wissenschafts- und Technikjournalist in Wermsdorf bei Leipzig. In BDW 5/2026 berichtete er über den Saturnmond Titan, in 6/2026 über das Radioobservatorium SKA.

I. Vilović, D. Schulze-Makuch, R. Heller. Observation of significant photosynthesis in garden cress and cyanobacteria under simulated illumination from a K dwarf star. International Journal of Astrobiology. 2024;23:e18. doi:10.1017/S1473550424000132

»Die Wahrscheinlichkeit ist nicht null!«

Ob sich Leben auf anderen Welten aus der Ferne erkennen lässt, hängt nicht nur von Biologie ab. Auch Sternlicht, Atmosphäre und Klima spielen dabei eine Rolle, betont die NASA-Forscherin Nancy Kiang. Sie ist überzeugt, dass die Suche nach fremdem Leben auch den Blick auf die Erde verändert.

Die Fragen stellte KAI DÜRFELD



Nancy Kiang
(*1965) erforscht am NASA Goddard Institute for Space Studies in New York, wie Biosphäre und Atmosphäre miteinander wechselwirken. Sie hat an der University of California in Berkeley in Biometeorologie promoviert. Im Kurs Microbial Diversity am Marine Biological Laboratory in Woods Hole, Massachusetts, vertiefte sie ihr Wissen über mikrobielle Stoffwechselwege. Robert Blankenship führte sie dort näher an die molekularen Grundlagen der Photosynthese heran. Später isolierte sie einen Stamm des Cyanobakteriums Acaryochloris marina, das mit Chlorophyll d längerwelliges Licht nutzt und damit zeigt, wie variabel Photosynthese sein kann.

Frau Dr. Kiang, Sie beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Frage, wie Leben auf anderen Welten aussehen könnte. Hat diese Suche Ihren Blick auf die Möglichkeiten von Leben im Universum verändert?
Tatsächlich hat sie eher meinen Blick auf das Leben hier auf der Erde verändert. Denn über Anpassungen an fremde Planeten und Sterne nachzudenken, führt auch dazu, unsere eigenen Annahmen über das Leben zu hinterfragen. Was daran ist ein Erbe der irdischen Evolution? Und was folgt universellen Prinzipien? Ein Beispiel ist die Umwandlung von Licht in chemische Energie. Dieser Prozess folgt grundlegenden physikalischen Prinzipien. In Pflanzen geschieht etwas Ähnliches wie in photovoltaischen Halbleitern in Solarzellen: Ein Photon regt ein Elektron in einem lichtabsorbierenden Molekül an. Dieses Elektron wird weitergegeben und löst eine Reaktionskette aus. In Pflanzen entstehen daraus biochemische Produkte, in Solarzellen elektrischer Strom. Dieses Grundprinzip dürfte auch auf anderen Planeten gelten. Aber die Farbe des Lichts, das absorbiert wird, kann dort anders sein.

Wird Ihnen mit den Jahren eher klarer, wonach wir suchen, oder aber, was wir noch nicht kennen?
Je länger ich mich mit diesen Fragen beschäftige, desto stärker wird mir bewusst, wie viel wir noch nicht wissen. Deshalb habe ich Kontakt zu Wissenschaftlern aus vielen anderen Disziplinen aufgenommen. Ich habe mit Geochemikern und Geologen gesprochen, um mehr über die präbiotische Chemie auf der frühen Erde zu erfahren. Von Biophysikern und Biochemikern wollte ich wissen, wie bestimmte biologische Moleküle arbeiten, miteinander interagieren und ob sie auf einem anderen Planeten anders funktionieren könnten. Evolutionsbiologen sollten mir helfen zu verstehen, wie sich das Leben auf unserem Planeten diversifiziert und ausgebreitet hat; Mikrobiologen sollten mir die physiologischen Grenzen von Mikroben aufzeigen; Planetenforscher sollten den Zusammenhang von verfügbaren Elementen und der Entstehung des Lebens einschätzen. Und mit Astronomen habe ich die schwierige Frage diskutiert, was für Spuren wir davon sehen könnten. Jeder dieser Forschungsbereiche erweitert unseren Wissensstand und eröffnet völlig neue Gebiete. Es fasziniert mich, dass wir noch immer erst am Anfang dessen stehen, was wir über das Universum und die Art von möglichem Leben darin herausfinden können.

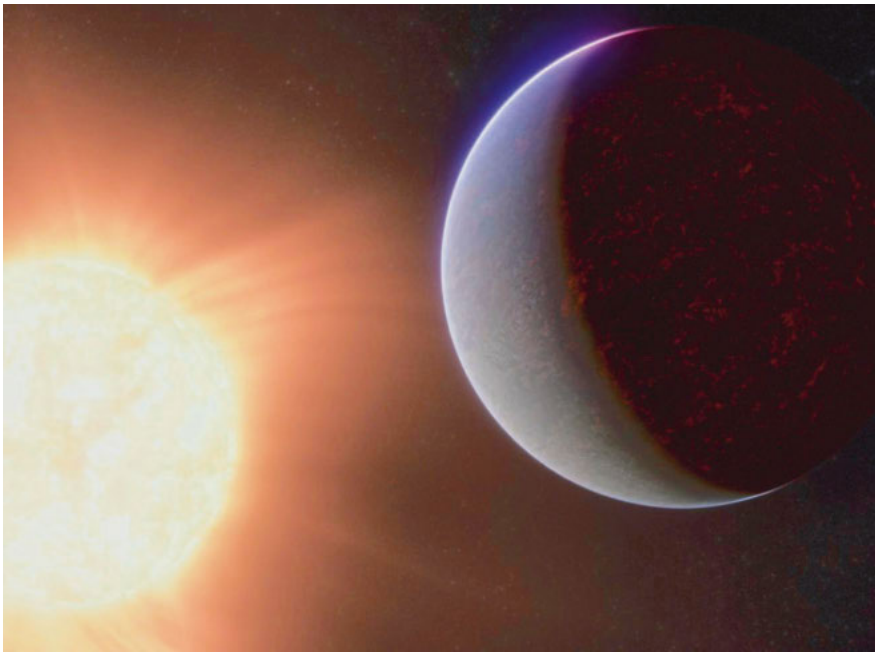
Wie könnte sich solches Leben überhaupt bemerkbar machen?
Wir könnten Spuren mikrobieller Lebensformen finden, die Gase in die Atmosphäre freisetzen. Vielleicht entdecken wir aber auch Hinweise auf komplexere Organismen, etwa durch lichtsammelnde Pigmente an der Oberfläche eines Planeten. Und manche Forscher denken sogar über Technosignaturen nach – also künstliche Gase, großskalige technische Strukturen oder Kommunikationssignale einer technologischen Zivilisation. Wie überzeugend solche Spuren sein werden, hängt allerdings stark von ihrer Art ab. Wenn wir auf einem wasserreichen Planeten gleichzeitig Sauerstoff und Methan nachweisen würden, wäre das ein sehr starkes Indiz für biologische Aktivität. Andere Signale wären schwieriger zu interpretieren. Denkbar wäre etwa eine auffällige Struktur im Reflexionsspektrum eines Planeten, die sich nicht durch bekannte geologische oder atmosphärische Prozesse erklären lässt. Das wäre äußerst spannend, würde aber zunächst mehr Fragen aufwerfen als beantworten.

Glauben Sie, dass wir in Ihrer Lebenszeit überzeugende Hinweise auf außerirdisches Leben finden werden?

Die Wahrscheinlichkeit ist nicht null! Solche Hinweise könnten aus unserem eigenen Sonnensystem kommen, etwa von der Europa-Clipper-Mission, die 2030 den Jupitermond Europa erreichen soll. Sie könnten aber auch von Exoplaneten stammen. Das James-Webb-Weltraumteleskop liefert bereits Daten zu felsigen Planeten um kühle Sterne. In den nächsten Jahren werden weitere Instrumente hinzukommen, etwa das Extremely Large Telescope der Europäischen Südsternwarte und langfristig das geplante Habitable Worlds Observatory der NASA.

Und was würde ein überzeugender Nachweis außerirdischen Lebens letztlich bedeuten?
Lassen wir die Hypothese der Panspermie einmal beiseite, würde das zunächst einmal zeigen, dass Leben unabhängig voneinander auf verschiedenen Planeten entstehen kann. Das allein wäre eine wissenschaftliche Revolution. Welche weiteren Konsequenzen sich daraus ergeben, hängt stark davon ab, was genau wir entdecken. Befindet sich das Leben auf einem Planeten um einen Stern, der sich stark von unserer Sonne unterscheidet? Dann würde das die Zahl potenziell lebensfreundlicher Welten im Universum erheblich vergrößern. Handelt es sich um einen erdgroßen Planeten um einen sonnenähnlichen Stern? Dann würden wir sofort fragen, ob dieses Leben auf derselben Biochemie beruht wie unseres oder auf einer völlig anderen. Wahrscheinlich könnten wir diese Frage zunächst gar nicht beantworten. Natürlich würde eine solche Entdeckung bedeuten, dass wir nicht allein sind. Das hätte weit mehr als nur wissenschaftliche Folgen. Es hätte tiefgreifende philosophische und gesellschaftliche Konsequenzen. Würde uns dieses Wissen stärker als Teil einer gemeinsamen Menschheit begreifen lassen? Würde es dazu beitragen, Konflikte zu überwinden? Oder würden wir darin lediglich einen weiteren Anlass für Konkurrenz und Auseinandersetzungen finden? Das sind Fragen, die weit über die Astronomie hinausreichen.

Was würde Sie mehr überraschen: der Nachweis von Leben selbst oder die Form, in der wir es finden?
Wahrscheinlich die Form, in der wir es finden. Bis heute haben wir zwar mehr als 6.000 Exoplaneten entdeckt, aber das ist immer noch nur ein kleiner und stark verzerrter Ausschnitt dessen, was es da draußen gibt. Jede neue Beobachtung erweitert unser Verständnis. Als 1979 die Raumsonde Voyager 1 am Jupitermond Io vorbeiflog und dort gewaltige Vulkanausbrüche entdeckte, war das eine echte Überraschung. Ähnliches könnte uns auch bei Exoplaneten bevorstehen. Im Moment gehen wir beispielsweise davon aus, dass Planeten um Rote Zwergsterne keine besonders guten Kandidaten für komplexes Leben sind. Ihre Atmosphären können durch starke Strahlung geschädigt werden, und viele dieser Welten dürften ihrem Stern immer dieselbe Seite zuwenden. Umso überraschender wäre es, dort einmal eine Technosignatur zu entdecken. Ich freue mich aber auch auf die Dinge, die wir heute noch gar nicht vorhersagen können. Wahrscheinlich werden wir Merkmale beobachten, die sich mit unserem gegenwärtigen Wissen nicht erklären lassen. Das muss nicht sofort auf Leben hinweisen. Vielleicht zeigt es uns zunächst nur, dass wir von Planeten und ihren Klimasystemen noch viel weniger verstehen, als wir glauben. Je mehr Welten wir beobachten und charakterisieren, desto besser werden wir unterscheiden können, was möglich und was wahrscheinlich ist. Wir stehen mit der vergleichenden Planetologie eigentlich erst am Anfang. Und genau das macht dieses Forschungsfeld so spannend.



Suche nach spektralen Lebensspuren auf Exoplaneten: Bestimmte Gase in der Atmosphäre oder Pigmente auf der Oberfläche wären Biomarker. Die Illustration zeigt die 41 Lichtjahre entfernte Supererde 55 Cancri e im Sternbild Krebs. Dort hat das Webb-Teleskop Kohlenmonoxid und -dioxid nachgewiesen.

Nancy Kiang | Illustration: NASA, ESA, CSA, R. Crawford / STScI

Heilige Wissenschaft

Wenn es um die Vornamen geht, ist das Ensemble der Science Busters wirklich gesegnet. Zweimal Martin, einmal Florian, eine Elisabeth, ein waschechter Peter (Petrus) und sogar eine alttestamentarische Ruth. Alles 1A-Promi-Heilige mit jeder Menge brauchbaren Patronaten. Der heilige Martin ist unter anderem für Reisende und Abstinenzler zuständig, und wer doch gerne einen Schluck trinken will, kann sich beim heiligen Florian melden, der nicht nur für die Feuerwehr, sondern auch für das Bierbrauen zuständig ist. Die heilige Elisabeth kümmert sich um kranke Menschen, und der heilige Petrus kann angerufen werden, wenn man es an den Füßen hat, von einer Schlange gebissen wird, Schiffbruch erleidet oder eine Brücke bauen will. Die heilige Ruth ist immerhin noch für Schwiegermütter zuständig, was man auch nicht unterschätzen darf.

Eigentlich könnten wir als Science Busters angesichts dieser massiven Unterstützung aus dem Kanon der Heiligen zufrieden sein. Aber leider hat die Kirche es bis jetzt versäumt, einen Helmut heiligzusprechen, sodass Helmut Jungwirth, der Biologe in unserem Team, ohne himmlische Patronanz auskommen muss. Aber er hat zumindest noch die Chance, ab jetzt ein redliches Leben zu führen und das eine oder andere Wunder zu wirken. Dann wird er vielleicht selbst heiliggesprochen und kann sich in die Reihe der Heiligen einreihen, die ebenfalls wissenschaftlich tätig waren. Besonders Ärzte sind hier vertreten: Lukas, der Evangelist, oder die heiligen Zwillingsbrüder Kosmas und Damian aus dem 3. Jahrhundert. Aus jüngerer Zeit kann Giuseppe Moscati genannt werden, der nicht nur einen Doktor in Medizin sondern auch einen in klinischer Chemie hatte und 1987 heiliggesprochen wurde. Und mit Takashi Nagai, einem Radiologen, der sich um Opfer der Atombombenabwürfe in Japan gekümmert hat, könnte möglicherweise irgendwann ein weiterer Mediziner heiliggesprochen werden: Für Nagai wurde 2021, über 70 Jahre nach seinem Tod, der Seligsprechungsprozess eröffnet. Damit trägt er den Titel „Diener Gottes“, was die erste Stufe auf dem Weg zur Heiligsprechung darstellt. Bereits eine Stufe weiter ist der Franzose Jérôme Lejeune – der Mitbegründer der Humangenetik und Entdecker der Ursache von Trisomie 21, wurde 2021 zum „Ehrwürdigen Diener Gottes“ erklärt.



Die SCIENCE-BUSTERS

Florian Freistetter ist promovierter Astronom und der wohl bekannteste deutschsprachige Science-Blogger. Seit 2015 ist er fester Bestandteil der Science Busters, hat mehrere Bücher veröffentlicht und betreibt die erfolgreichen Podcasts „Sternengeschichten“ und „Das Universum“. Er ist Experte für Asteroiden und Chaos im Universum.

Heilige für alle wissenschaftlichen Eventualitäten

Seit 1941 hat die Naturwissenschaft ihren eigenen Schutzpatron, nämlich den Gelehrten Albert Magnus, der im 13. Jahrhundert gelebt hat. Wenn demnächst wieder Menschen im Rahmen der Artemis-Missionen zum Mond fliegen, können sie dabei den heiligen Josef von Copertino anrufen, den Schutzpatron der Raumfahrt. Dieser erhielt seinen Status als Heiliger nicht, weil er im 17. Jahrhundert schon die ersten Raketen gebaut hat, sondern weil er angeblich in der Lage war zu schweben, so wie man es auch in der Schwerelosigkeit des Alls tut. Kritische Geister meinen allerdings, seine Levitationen wären nur Einbildung gewesen und Josef konnte einfach nur sehr beeindruckend hoch springen. Damit wird man normal bestenfalls Olympiasieger und nicht heilig, weshalb er quasi nachhelfen musste.

Wer mehr über die Sterne und das Weltall wissen will, kann den heiligen Dominikus anrufen, Schutzpatron der Astronomen. Warum? Das weiß nicht einmal der Vatikan: Die Sternwarte des Kirchenstaates erklärt zwar, dass es Geschichten gibt, laut denen ein Gelehrter aus Toulouse eine Vision von sieben Sternen gehabt haben soll, bevor Dominikus mit einem Gefolge von sechs Mönchen dort im 13. Jahrhundert ankam und einen Orden gegründet hat. Das reiche aber nicht, um die Verbindung von Dominikus und der Astronomie zu erklären, weshalb man für Hinweise dazu sehr verbunden wäre.

Science Busters/Ingo Pertramer; Illustration: erstellt mithilfe der Adobe-Firefly-KI



Der Osterstreit

Für die Mathematik kann man sogar zwischen zwei Heiligen wählen. Der erste ist Anatolius von Laodicea, der nicht nur Bischof und Heiliger war, sondern Computist. Das hat nichts mit modernen Computern zu tun, sondern bezeichnet Menschen, die das Osterdatum berechnen können. Aus heutiger Sicht ist das keine großartige Leistung mehr, dafür wird man nicht mal seliggesprochen und schon gar kein Heiliger. Aber damals, im frühen Christentum, war das den Leuten wirklich wichtig. So wichtig, dass es darüber sogar zum „Osterstreit" gekommen ist. Im 2. Jahrhundert standen sich die Quartodezimaner und die Protopaschisten gegenüber. Die Ersten haben gesagt, dass das Fest immer am 14. Tag des jüdischen Frühlingsmonats Nisan gefeiert werden muss, egal, welcher Wochentag das gerade ist. Die anderen meinten, dass man Ostern doch bitte an einem Sonntag feiern müsse, und zwar dem ersten nach dem jüdischen Pessachfest.

Geklärt wurde die Sache erst beim Konzil von Nicäa im Jahr 325: Ostern wird am ersten Sonntag nach dem ersten Vollmond im Frühling gefeiert. Aber wann fängt der Frühling an, wann findet ein Vollmond statt und wie rechnet man das alles aus? Das war der Job von Computisten wie Anatolius, der nicht nur gut in Mathe war, sondern auch gut über die Bewegung des Mondes Bescheid wusste und damit eigentlich ein viel besserer Schutzpatron für die Astronomie wäre als Dominikus. Aber tauschen ist unter Heiligen nicht üblich. Dafür ist Anatolius ein besserer Schutzpatron für die Mathematik als sein Kollege Hubertus von Lüttich. Das ist der, der am Karfreitag jagen wollte, dabei einen Hirsch mit Kreuz im Geweih getroffen hat und so zu einem frommeren Leben als Christ bekehrt wurde. Den Hirsch mit Kreuz kennt man heute vom Etikett der Jägermeister-Flaschen, doch was Hubertus mit Mathematik zu tun haben soll, bleibt unklar. Vielleicht erinnert das Kreuz an ein Pluszeichen?

Laurentius von Rom, der vom römischen Kaiser Valerian im 3. Jahrhundert durch Grillen auf einem glühenden Rost hingerichtet wurde, hat mit Wissenschaft wenig zu tun. Aber sein Todes- und Gedenktag ist der 10. August, die Zeit im Jahr, an der die Sternschnuppen der Perseiden über den Himmel ziehen und die deswegen volkstümlich auch „Laurentiustränen" genannt werden. Oder, wie eine der vielen Bauernregeln zum Laurentiustag sagt: „Sankt Lorenz kommt in finstrer Nacht / ganz sicher mit Sternschnuppenpracht." Und wer sich beim Anblick einer Sternschnuppe was wünschen will und noch Tipps sucht: Wie wäre es mit der Ernennung eines Schutzheiligen gegen Lichtverschmutzung. Die sorgt nämlich dafür, dass die „finstre Nacht" immer heller wird und irgendwann sehen wir weder Sternschnuppen noch Sterne. Aber immerhin könnte dann auch Dominikus seinen Job als Schutzpatron für Astronomie aufgeben, für den er ja sowieso nie qualifiziert war.

Motto der Science Busters:
Wissenschaft und Humor müssen keine Feinde sein.
Live sieht man sie auf Bühnen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, Termine: www.sciencebusters.at/termine.

Die Science Busters sind:
Martin Puntigam (Kabarettist), Ruth Grützbauch (Astronomin), Helmut Jungwirth (Mikrobiologe), Ursula Hollenstein (Infektiologin), Peter Weinberger (Chemiker), Elisabeth Oberzaucher (Verhaltensbiologin), Florian Freistetter (Astronom), Martin Moder (Molekularbiologe), Günther „Gunkl" Paal (Kabarettist)

Cogito

von Heinrich Hemme

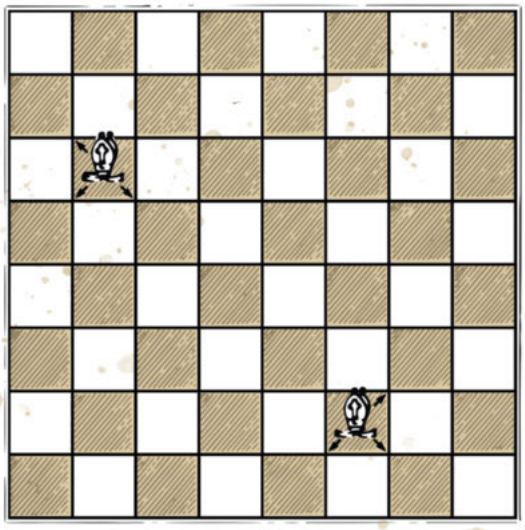


ehemals Professor für Physik an der Fachhochschule Aachen

Die Dreiviertelläufer

„Nichts bleibt so, wie es einmal war“, sagte die weiße Königin zu ihrem Spiegelbild, das sie aus dem kostbaren Spiegel griesgrämig anstarrte. „Mein Gemahl humpelt nur noch lustlos über das Schlachtfeld, die Türme schleppen sich bloß wenige Felder weit voran, die Springer und Läufer springen und laufen nicht, sondern kriechen, und die Bauern bleiben dem Kampfgebiet gleich völlig fern.“ Da ihre Spione ihr berichtet hatten, im Reich des schwarzen Königs gebe es die gleichen Probleme, beschloss sie, sich mit der schwarzen Königin zu treffen, um gemeinsam Lösungen zu finden.

Das Treffen fand im Schloss des roten Grafen statt, einem Wendehals, der sein Fähnchen immer für die Sieger einer Schlacht schwenkte. „Majestät, ich danke euch, dass ihr meiner Einladung gefolgt seid“, eröffnete die weiße Königin das Gespräch. „Ich denke, unter Königinnen können wir auf Förmlichkeiten verzichten. Nennt mich Isolde“, sagte die schwarze Königin. „Sehr gerne. Ich heiße Isabelle“, erwiderte die weiße Königin. „Wir haben große Schlachten geschlagen, und in vielen Liedern wird noch heute von unseren Heldentaten gesungen. Aber mein Gemahl ist alt geworden. Ebenso eurer. Sie sitzen meistens nur am Feuer in der Halle. Statt mit dem Schwert auf dem Schlachtfeld zu kämpfen, würden sie lieber Mau-Mau oder Mensch-ärgere-dich-nicht spielen.“ Die schwarze Königin war leicht indigniert. „Mein Gemahl und ich spielen gerne einmal abends eine Partie …“ Sie unterbrach sich selbst. „Ach, lassen wir das“, winkte sie ab. Die weiße Königin ergriff wieder das Wort. „Die Könige haben noch nie weite Züge gemacht, aber mein Gemahl weigert sich seit einiger Zeit sogar, nach Nordosten und nach Westen zu gehen. Und euer Gemahl, liebe Isolde, schleicht, wie ich gehört habe, nur noch nach Norden, Süden, Westen und Osten.“ „Ja, so ist es leider“, seufzte die schwarze Königin. „Und auch die Türme, Springer, Läufer und Bauern wollen nicht mehr in allen ihnen erlaubten Richtungen und Entfernungen gehen“, fuhr die weiße Königin fort. „Nur wir beide ziehen noch wie eh und je über das gesamte Schlachtfeld.“ Dabei verschwieg sie wohlweislich, dass sie bei langen Zügen auf halber Strecke stets ein Päuschen einlegte.



?

„Unsere Läufer können auf dem Schlachtfeld diagonal beliebig viele Felder weit ziehen, oder um es einmal durch Himmelsrichtungen auszudrücken, sie können beliebig weit nach Nordosten, nach Südosten, nach Südwesten oder nach Nordwesten ziehen. Ich habe Dutzende von Läufern rekrutiert, und alle sind bedauerlicherweise zu Dreiviertelläufern geworden. Jeder von ihnen ist nur bereit, in drei der vier Richtungen Nordosten, Südosten, Südwesten und Nordwesten zu ziehen. Jeder Dreiviertelläufer zieht zwar immer nur in dieselben drei Richtungen, aber diese drei Richtungen können bei jedem Dreiviertelläufer andere sein. Dazu kommt noch, dass sie sich gegenseitig bedrohen, wenn sie die Möglichkeit dazu haben.“ Königin Isabelle zog einen Schlachtplan aus ihrer Tasche und zeichnete dort zwei Läufer und einige kurze Pfeile ein. Dann erklärte sie: „In diesem Beispiel zieht der linke Dreiviertelläufer niemals nach Nordosten und der rechte niemals nach Nordwesten. Folglich bedroht der linke Dreiviertelläufer zwar den rechten, der rechte aber nicht den linken.“ „Was ihr nicht sagt“, meinte die schwarze Königin gelangweilt. Doch die weiße Königin schien sie nicht gehört zu haben. „Ich habe mich schon manchmal gefragt, wie viele Dreiviertelläufer, die sich nicht gegenseitig bedrohen, höchstens in unserem 8 × 8-feldigen Kampfgebiet stehen können“, sagte sie nachdenklich. Doch Königin Isolde zuckte nur mit den Schultern.

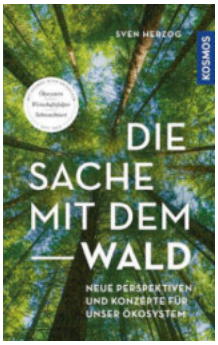
Können Sie die Frage der weißen Königin beantworten?

Cogito – rätseln Sie mit!

Teilnehmen können alle, außer die Mitarbeiter des Verlags und deren Angehörige. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Senden Sie Ihre Lösung bitte bis zum 30. September 2026 mit Betreff „Cogito 9“ per E-Mail an: cogito@konradin.de

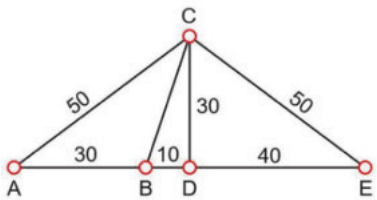
Die Lösungen und die Namen der Gewinner werden im Dezember-Heft 2026 und auf www.wissenschaft.de veröffentlicht.



… UND DAS GIBT ES ZU GEWINNEN

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Exemplare des Buchs „Die Sache mit dem Wald“ von Sven Herzog. Darin beschreibt der Förster und Professor an den Universitäten Göttingen und Dresden nach einem Überblick zu Mythen und zur Geschichte die verschiedenen Aspekte und Gefährdungen unserer Wälder als Ökosysteme, Wirtschaftsfaktor und Sehnsuchtsort. Er diskutiert faktenbasiert, ob nur der Klimawandel „schuld“ daran ist, dass es dem Wald „schlecht geht“, welche Rolle die Forstwirtschaft dabei spielt und ob es zu viel Wild gibt. Er erläutert die Unterschiede zwischen Ur-, Natur- und Nutzungswald und die Ambivalenz der Nachhaltigkeit. Weitere Informationen: www.kosmos.de

Die Lösung des Juni-Rätsels



Die Summe der Abstände zwischen Ashdown und Benton (AB), zwischen Benton und Dumas (BD) und zwischen Dumas und Elora (DE) beträgt AB + BD + DE = 30 + 10 + 40 = 80 Meilen und ist deshalb genauso groß wie der Abstand zwischen Ashdown und Elora (AE) von 80 Meilen. Folglich liegen Ashdown, Benton, Dumas und Elora aufgereiht wie Perlen an einer geraden Straße. Da $(AB + BD)^2 + (CD)^2 = (AC)^2$ oder $(30 + 10)^2 + 30^2 = 50^2$ oder 1.600 + 900 = 2.500 ist, liegen nach dem Satz des Pythagoras Ashdown, Clarksville und Dumas auf den Ecken eines rechtwinkligen Dreiecks mit dem rechten Winkel in Dumas. Folglich sind auch Clarksville, Dumas und Elora die Ecken eines rechtwinkligen Dreiecks. Somit gilt $(CE)^2 = (CD)^2 + (DE)^2$ oder $(CE)^2 = 30^2 + 40^2 = 2.500$, woraus man CE = 50 erhält. Elora ist also 50 Meilen von Clarksville entfernt.

DIE GEWINNER

Das Los hat unter den richtigen Einsendern entschieden.
Wir gratulieren! Je ein Buch über Insekten erhalten:
Roland Liedtke, Herten; Otto-Wilhelm Merten, Crespières, Frankreich; Peter Mike, München; Michael Schleyer, Braunschweig; Jörg Schmuki, Disentis, Schweiz

Illustration: Ricardo Rio Ribeiro Martins

WEINWISSER

Für alle, die mehr über Wein wissen wollen



Unabhängig, fundiert, kompakt:

WEINWISSER ist das führende deutschsprachige Wein- und Verkostungsmagazin für alle, die mehr über Wein wissen wollen.

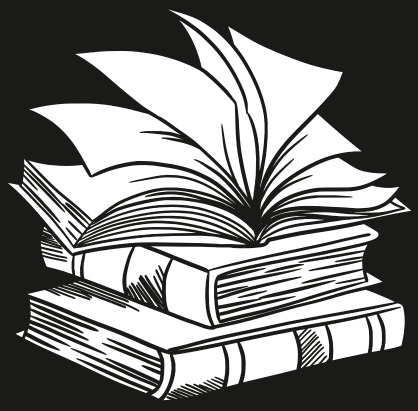
Hier kostenloses Probeheft anfordern:

☎ +49 711 82651-239

www.weinwisser.com

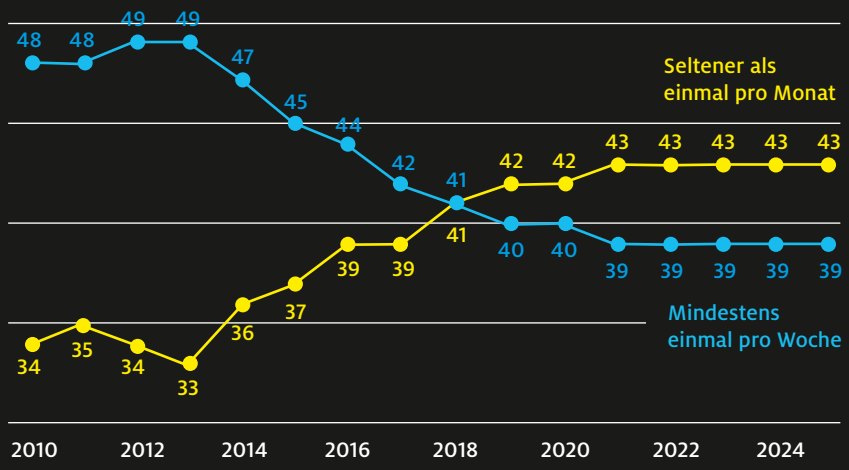
Bücher lesen

Immer weniger Menschen lesen Bücher: Etwa die Hälfte der Menschen in der EU schafft weniger als ein Buch pro Jahr oder liest gar keine Bücher. Wie die Situation in Deutschland aussieht und welche Genres am liebsten gelesen werden, zeigen diese Infografiken.



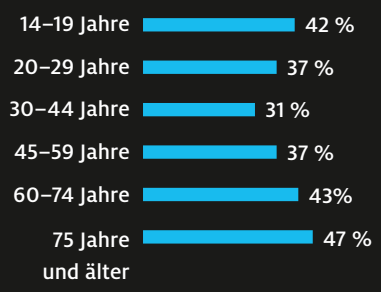
So oft kommen die Menschen in Deutschland dazu, **Bücher zu lesen**

(in Prozent)



Anteil der Menschen, die mindestens **einmal pro Woche in Büchern lesen**

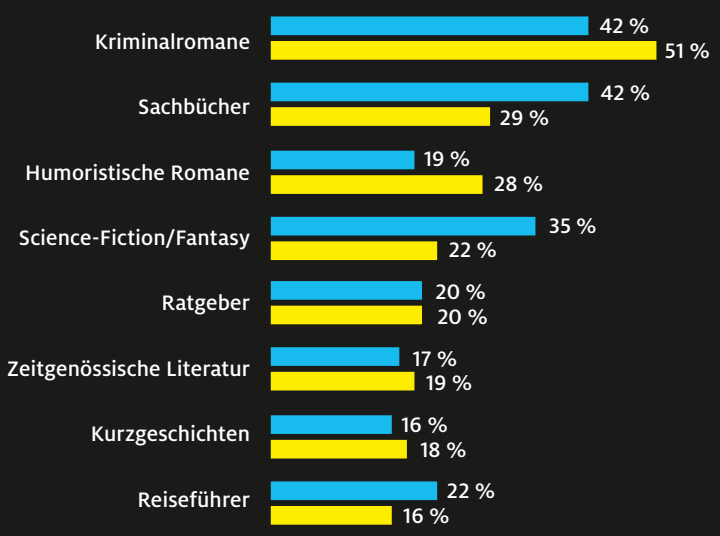
(nach Alter)



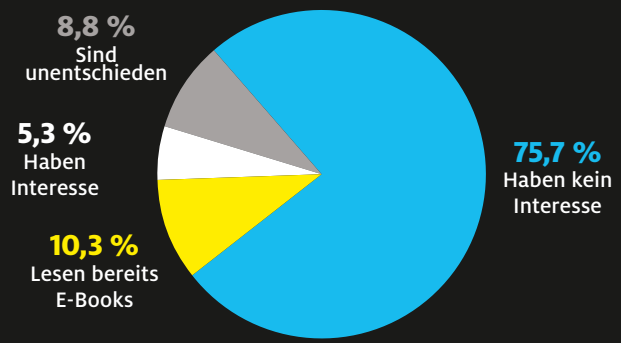
Etwa **12 Millionen** Menschen in Deutschland lesen Bücher auf **E-Reader, Tablet** oder **Smartphone.** **E-Books** machen etwa **6 Prozent des Umsatzes** auf dem Buchmarkt aus.

Beliebteste **Buchgenres**

(Mehrfachauswahl möglich)



So stehen Menschen **ab 60 Jahren zu E-Books**

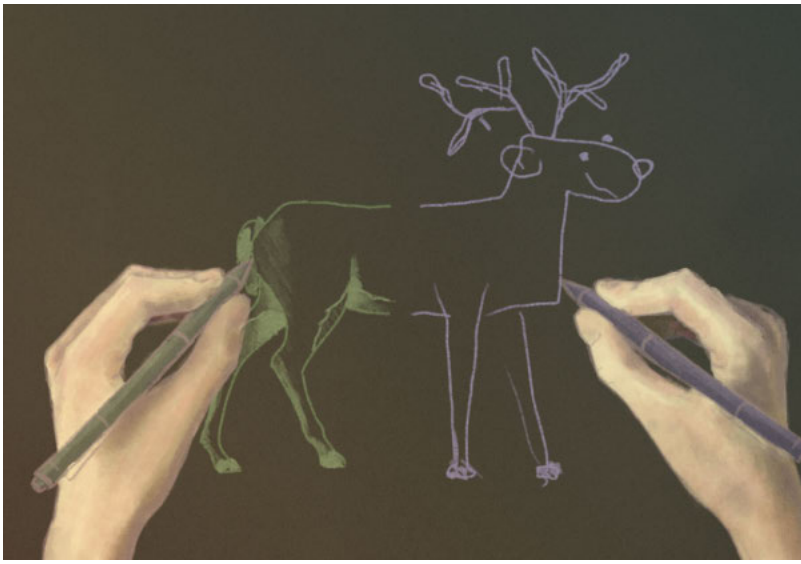


Quellen: Institut für Demoskopie Allensbach (2025): Allensbacher Markt- und Werbeträgeranalyse AWA 2025 (deutschsprachige Bevölkerung ab 14 Jahre)
Mavrogiannis, A.: Die Zukunft des Lesens. (Inst. für Demoskopie Allensbach, 2025)
Börsenverein des Deutschen Buchhandels: Buchmarkt kompakt 2025/2026

Update

Händigkeit beruht auch auf Übung

Ob wir Links- oder Rechtshänder sind, ist nur zum Teil angeboren. Vor allem die Nutzung der Hände entscheidet, welche von beiden dominant wird.



Übung macht den Meister – das gilt auch für die Geschicklichkeit unserer Hände.

Bislang
herrscht in der Neurowissenschaft die Hypothese vor, dass angeborene Eigenschaften unserer Gehirnhälften darüber bestimmen, mit welcher Hand wir geschickter sind. Bei Rechtshändern wäre demnach die rechte Hand von Natur aus dominant, weil die für sie zuständige linke Hirnhälfte eine feinere motorische Kontrolle ermöglicht. Tatsächlich haben Studien gezeigt, dass Babys bereits im Mutterleib eine Präferenz für eine Hand entwickeln – ein scheinbar starkes Argument für die Annahme, dass Links- oder Rechtshändigkeit angeboren ist.

Inzwischen
gibt es allerdings Hinweise darauf, dass sich unsere dominante Hand vor allem durch Übung entwickelt. „Wenn wir von Händigkeit sprechen, vermischen wir meist zwei verschiedene Aspekte: Präferenz und Dominanz“, erklärt ein Team um Ahmet Arac von der University of California in Los Angeles. Die angeborene Präferenz bestimmt darüber, welche Hand wir intuitiv für die meisten Aufgaben bevorzugen; die Dominanz beschreibt dagegen, mit welcher Hand wir geschickter sind. Aber wird eine Hand dominant, weil sie von Geburt an einen in den Hirnhälften begründet Vorteil hat? Oder profitiert sie einfach davon, dass wir sie von klein auf mehr nutzen und damit besser trainieren?

Um das zu testen, entwickelten Arac und seine Kollegen ein Experiment: Sie banden Testpersonen jeweils einen Stift an beide Ellbogen und baten sie, damit Buchstaben und Zahlen zu schreiben. Da keiner der Probanden jemals zuvor mit dem Ellbogen geschrieben hatte, ließen sich Übungseffekte weitgehend ausschließen. Würde ein Rechtshänder also auf Anhieb mit dem rechten Ellbogen deutlicher schreiben als mit dem linken, wäre das ein starker Hinweis darauf, dass das Gehirn eine Seite motorisch begünstigt. Wenn allerdings vor allem Übung die rechte Hand geschickter macht, sollte bei dieser ungewohnten Aufgabe keine Seite im Vorteil sein.

Tatsächlich bestätigte sich der zweite Fall: „Die Dominanz der rechten Seite verschwand, wenn mit einem neuartigen Effektor, dem Ellbogen, geschrieben wurde“, berichten die Forschenden. Durften die Testpersonen anschließend das Ellbogen-Schreiben üben, verbesserten sich beide Seiten auf ähnliche Weise. Am Ende des Trainings konnten viele der Probanden mit dem linken Ellbogen sogar akkurater schreiben als mit der linken Hand. Aus Sicht der Forschenden liefern diese Ergebnisse einen deutlichen Hinweis darauf, dass das, was wir landläufig als Rechts- oder Linkshändigkeit bezeichnen, zu einem großen Teil auf Übung beruht. „Man bevorzugt seine dominante Hand nicht, weil sie geschickter ist“, sagt Co-Autor John Krakauer von der Johns Hopkins University in Baltimore. „Sie wird geschickter, weil man sie bevorzugt.“

Weitere Versuche ergaben zudem, dass sich die Überlegenheit der dominanten Hand nur zeigte, wenn die Testpersonen mit Werkzeugen hantierten – sei es ein Stift oder ein Zeigestock. Sollten sie dagegen mit den Händen direkt vorgegebene Punkte berühren, waren ihre Bewegungen mit links ebenso präzise wie mit rechts. „Man würde keinen Unterschied zwischen den beiden Händen bemerken, gäbe es nicht Werkzeuge und Gegenstände in der Welt, deren geschickter Umgang Übung erfordert“, sagt Krakauer. Zukünftig wollen die Forschenden auch Menschen untersuchen, bei denen Präferenz und Praxis voneinander abweichen, darunter umerzogene Linkshänder sowie Schlaganfallpatienten, die ihre ursprünglich bevorzugte Hand nicht mehr benutzen können. *Elena Bernard*

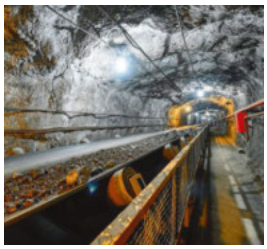
Edson De la O / Santa Fe Institute



Titelthema im Oktober

Die Menschen von Stonehenge

Stonehenge und andere Kreisgrabenanlagen der Steinzeit zeugen von einer erstaunlichen Gemeinschaftsleistung. Wer waren die Menschen, die diese Monumente erbauten? Was trieb sie an, Hunderte von Kilometern durch unwegsames Gelände zu wandern? Archäologische Funde und DNA-Analysen offenbaren faszinierende Einblicke in den Alltag, die Feste und soziale Organisation.



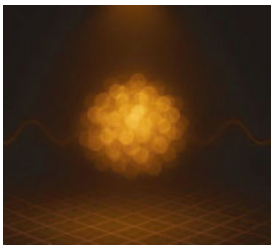
Bergbau
Heimische Rohstoffe

Deutschland ist stark von Rohstoff-Importen abhängig. Doch dank neuer Verfahren erlebt der Bergbau in Deutschland gegenwärtig ein Comeback.



Archäologie
Der Eisprinz

Eine neue Methode des Schockfrostens ermöglichte es, ein in Bayern entdecktes Kindergrab aus dem 7. Jahrhundert sicher ins Foschungslabor zu überführen.



Physik
Quantenrekord

Vor 100 Jahren fand Erwin Schrödinger die Grundgleichung der Quantenphysik. Nun gibt es einen neuen Rekord ihrer bizarren Konsequenzen.

Das nächste Heft **erscheint am 18. September**



You Got This Media / stock.adobe.com | nordroden / stock.adobe.com | Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege | Illustration: Markus Arndt / OpenAI

BILD DER WISSENSCHAFT

Impressum

ISSN 0006–2375 | 63. Jahrgang

GRÜNDUNGSHERAUSGEBER: Prof. Dr. Heinz Haber †

HERAUSGEBERIN: Katja Kohlhammer

VERLAG: Konradin Medien GmbH, Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen, Germany

GESCHÄFTSFÜHRER: Peter Dilger

VERLAGSLEITER: Peter Dilger

CHEFREDAKTEURIN: Andrea Stegemann
Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen, Germany

REDAKTION
Textredaktion:
Finn Brockerhoff (Kolumnen, Rubriken)
Salome Berblinger (Biologie, Medizin)
Dirk Eidemüller (Technik, Neue Medien)
Rüdiger Vaas (Astronomie, Physik, Cogito)
René Nagel (Volontariat),
Ronja Pappenberger, Hans Kretzschmar (Praktikum)
Bildredaktion/Bildmanagement:
Sandra Hendreich, Susanne Söhling
Layout/Illustrationen:
Ricardo Rio Ribeiro Martins (Art Direction)
Assistenz:
Sandra Hendreich: Phone +49 711 7594–392
Jennifer Weissbacher: Phone +49 711 7594–345
E-Mail wissenschaft@konradin.de
BDW-Leserreisen:
Dr. Karin Hollricher, Dr. Thomas Bührke

FREIE MITARBEIT/KOOPERATION
Elena Bernard (Update)
Petra Wiemann (Rezensionen)
David Neuhäuser (Archäologie)
Katharina Hensel (Social Media)
Tim Schröder (Podcast)
Grafikbüro Karl Marx (Visuelle Gestaltung/Infografik)
Verlagsbüro Wais & Partner GbR (Schlussredaktion)

ANZEIGEN- UND MEDIABERATUNG
Verantwortlich für den Anzeigenteil:
Silvija Pozgaj: Phone +49 711 7594–363
E-Mail silvija.pozgaj@konradin.de

AUFTRAGSMANAGEMENT
Melanie Strauß: Phone +49 711 7594–403
E-Mail melanie.strauss@konradin.de

ABOSERVICE
Abonnementbetreuung, Probehefte, Einzelverkauf, Adressänderungen: Leserservice bild der wissenschaft, Postfach 810580, 70522 Stuttgart, Phone +49 711 82651–201 Fax +49 711 82651–399, E-Mail bdw@zenit-presse.de
VERTRIEB: Heike Wiedenig: Phone +49 711 7594–482
PRESSEVERTRIEB HANDEL: IPS Pressevertrieb GmbH Carl-Zeiss-Straße 5, 53340 Meckenheim

BEZUGSPREISE
Jahresabonnement (12 Hefte + 2 Sonderausgaben): Inland € 139,10, Ausland € 154,10, Schweiz CHF 166,20. Jahresabonnement für Schüler und Studenten gegen Nachweis (12 Hefte + 2 Sonderausgaben): Inland € 113,30, Ausland € 127,40, Schweiz CHF 136,80. Jahresabonnement (12 Hefte): Inland € 114,60, Ausland € 128,40, Schweiz CHF 142,46. Jahresabonnement für Schüler und Studenten gegen Nachweis (12 Hefte): Inland € 90,60, Ausland € 103,80, Schweiz CHF 117,26. Alle Preise inkl. Versandkosten und MwSt. Jahresabonnement AboPlus 118,80 € inkl. MwSt. (ePaper und kostenfrei Paid Content). Einzelhandelspreis: Inland € 8,20, Österreich € 8,20, übrige Euro-Länder € 8,90, Schweiz CHF 14,50. Kündigungen von Abonnements sind dem Leserservice BDW, Postfach 810580, 70522 Stuttgart schriftlich mitzuteilen.

Bei Nichterscheinen aus technischen Gründen oder höherer Gewalt entsteht kein Anspruch auf Ersatz.

Druck: Vogel Druck und Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5, 97204 Höchberg, Printed in Germany

© 2026 by Konradin Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen

konradin mediengruppe

Das Bild der Wissenschaft Spezial 2026



Unter Strom

Im Mittelpunkt des neuen BDW Spezial steht die Frage, woher künftig die elektrische Energie kommt, die moderne Gesellschaften am Laufen hält. Deutschland setzt vor allem auf Sonne, Wind und andere erneuerbare Quellen statt auf Kernkraft und Kohle. Der Umstieg ist anspruchsvoll. Autorinnen und Autoren von BILD DER WISSENSCHAFT erklären Hintergründe, Stolpersteine und technische Lösungen. Zudem blickt das Heft auf andere Länder und ihre Wege in das Stromsystem der Zukunft.

Auch als digitales Heft erhältlich!

Jetzt für nur 8,20 € online bestellen:

bdw.de/spezial-2026

Oder direkt beim Bild der Wissenschaft Leserservice:

Bild der Wissenschaft Leserservice
Postfach 810580
70522 Stuttgart

Phone +49 711 82651-201
E-Mail bdw@zenit-presse.de

Wissenschaft in Bestform

34A2026



ALZHEIMER NIMMT
JEDEN TAG EIN STÜCK ERINNERUNG.

Helfen Sie diese Krankheit zu besiegen:
alzheimer-forschung.de/erinnerung

Kreuzstraße 34 · 40210 Düsseldorf
0800 - 200 400 1 (gebührenfrei)

Spendenkonto:
IBAN: DE19 3702 0500 0008 0634 00
BIC: BFSWDE33XXX
Bank für Sozialwirtschaft, Köln

Alzheimer Forschung
Initiative e.V.

P27