

Spektrum

der Wissenschaft

Die neue Vermessung des Weltalls

Was Strukturen zwischen
den Galaxien über die kosmische
Expansion verraten

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



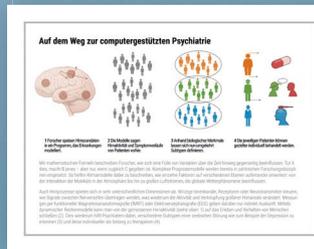
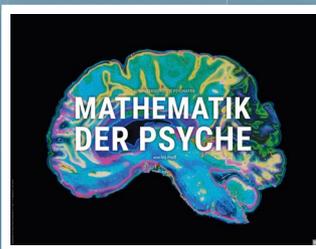
BIODIVERSITÄT Manifest zum Schutz der Artenvielfalt
ARCHÄOLOGIE Mumien aus dem Salzbergwerk
PROTEINFALTUNG Durchbruch dank künstlicher Intelligenz

Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



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

Wählen Sie unter mehr als 300 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



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



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



EDITORIAL DURCHBRUCH BEIM PROTEIN-ORIGAMI

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

► Ein wichtiges Thema in meinem Biochemiestudium waren Proteine und deren räumliche Struktur. Diese molekularen Werkzeuge erfüllen unverzichtbare Dienste in allen Lebewesen, und ihre Funktionen hängen von der konkreten individuellen Gestalt der Makromoleküle ab. Lange lautete daher eines der großen Probleme der Biowissenschaften: Wie kann man aus der im Erbgut codierten Abfolge der Aminosäuren eines Eiweißstoffs erschließen, zu welcher dreidimensionalen Form sich das Molekül faltet? Erstere ließ sich in den 1990er Jahren bereits recht leicht aufklären, doch die Strukturbestimmung erwies sich als harter experimenteller Brocken. Entweder mussten die Proteine unter großem Aufwand für eine Röntgenstrukturanalyse kristallisiert werden, oder man versuchte mit dem damals neuen Ansatz der Kernspinresonanz zu ermitteln, wie die einzelnen Abschnitte eines Proteins räumlich zueinander liegen. Ich erinnere mich noch gut an Kurt Wüthrichs Vorlesung zu letzterer Methode an der ETH Zürich, in der uns der spätere Nobelpreisträger die damit verbundenen Schwierigkeiten klarmachte.

Jetzt hat sich der seit Jahrzehnten gehegte Wunschtraum der Biochemiker und Molekularbiologen offenbar erfüllt – dank künstlicher Intelligenz. Der Algorithmus »AlphaFold 2« der Firma DeepMind kann mittlerweile erstaunlich präzise die räumliche Gestalt von Proteinen aus ihrer Aminosäuresequenz berechnen, wie der Biophysiker Gunnar Schröder vom Forschungszentrum Jülich ab S. 46 darlegt. Und das ohne aufwändige Laborversuche und in überschaubarer Zeit.

Ende Juli meldete DeepMind zusammen mit dem Europäischen Molekularbiologie-Laboratorium EMBL in Heidelberg sogar, sie hätten auf diese Weise inzwischen die Strukturen für fast alle menschlichen Proteine sowie für jene verschiedener wichtiger Modellorganismen erstellt und für die Forschung offen zugänglich gemacht. Die Zuverlässigkeit der Bestimmungen schwankt noch, liegt aber bei einem Großteil der Proteine bereits in einem sehr hohen Bereich. Bis Ende des Jahres soll die Anzahl der publizierten Strukturen von jetzt rund 365000 auf rund 130 Millionen anwachsen: Das wäre fast die Hälfte sämtlicher bekannten Eiweiße!

Für die Lebenswissenschaften könnte damit ein weiteres goldenes Zeitalter anbrechen, von dem wir alle profitieren. Denn zum Entwickeln schlagkräftiger Medikamente gegen bedrohliche Krankheiten ist die Kenntnis der Strukturen der relevanten Zielproteine oft eine entscheidende Voraussetzung. Entsprechend eröffnet der Artikel auch unsere neue dreiteilige Serie »Von der Molekülstruktur zum Medikament«.

Viel Vergnügen beim Lesen wünscht



NEU AM KIOSK!

Spektrum SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 3.21 zeigt, auf welchen Forschungsgebieten neuronale Netze und andere Computerprogramme uns unterstützen – und ungeahnte Durchbrüche ermöglichen.

IN DIESER AUSGABE



KYLE DAWSON, WILL PERCIVAL

Die Astronomen untersuchen die größten Strukturen des Alls. Ab S. 12 stellen sie die jüngsten Ergebnisse ihrer umfangreichen Himmelsdurchmusterung vor.



JOSEF SETTELE, SARA DIANA LEONHARDT UND GUNTHER KÖHLER

Anlässlich der 15. Weltbiodiversitätskonferenz in China schildern die Biologen, wie stark die Artenvielfalt weltweit bedroht ist – und was sich dagegen tun lässt (ab S. 30, 36 und 40).



CHANDRASHEKHAR JOSHI

Er gilt als Pionier einer potenziell revolutionären Technik: Der in den USA tätige Physiker erläutert Grundlagen und Perspektiven einer kompakten Art von Teilchenbeschleunigern (S. 60).

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

20 FORSCHUNG AKTUELL

Umbau der Mathematik

Computer bestätigen einen entscheidenden Beweis.

Aufgespalten

Das erstaunliche Teilungsverhalten der Mitochondrien.

Neuer IPCC-Bericht

Der Klimawandel ist kein Zukunftsproblem mehr, er ist jetzt Gegenwart.

Neuartige Proteinbrücke

Neben Disulfidbrücken gibt es noch andere kovalente Proteinvernetzungen.

29 SPRINGERS EINWÜRFE

Wenn Wirkstoffe nicht mehr wirken

Der Kampf gegen Resistenzen braucht Anreize.

55 FREISTETTERS FORMELWELT

Warum Wolken schweben

Die Antwort darauf ist gar nicht so einfach.

68 SCHLICHTING!

Das singende Teesieb

Beim Spülen regen Wasserwirbel Resonanzen an.

87 ZEITREISE

88 REZENSIONEN

93 IMPRESSUM

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 KOSMOLOGIE **DIE KARTIERUNG DES ALLS**

Systematische Vermessungen der Verteilung von Millionen von Galaxien könnten Fragen zur Entwicklung des Universums klären.

Von Kyle Dawson und Will Percival

Schwerpunkt: Artenvielfalt

30 BIODIVERSITÄT **DER SCHUTZ BIOLOGISCHER VIELFALT – EIN MANIFEST**

Weltweit brechen die Artenzahlen ein. Doch eine Umkehr ist möglich.

Von Josef Settele

36 INSEKTENSTERBEN **BESTÄUBER IM SINKFLUG**

Überall gehen die Bestände von bestäubenden Insekten zurück. Das hat negative Konsequenzen für die Ökosysteme und die Landwirtschaft.

Von Sara Diana Leonhardt

40 AMPHIBIENSTERBEN **ABGESANG DER FRÖSCHE**

Der Lebensraum von Amphibien wird in erheblichem Ausmaß zerstört. Eine Pilzinfektion belastet ihre Populationen noch zusätzlich.

Von Gunther Köhler

46 MOLEKULARBIOLOGIE **DAS GEHEIMNIS DER PROTEINFALTUNG**

Serie: Von der Molekülstruktur zum Medikament (Teil 1) Eine künstliche Intelligenz kann die räumliche Struktur von Proteinen präzise vorhersagen.

Von Gunnar Schröder

56 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **FORENSIK FÜR DEN HAUSGEBRAUCH**

Blutspuren lassen sich mit Hilfe von Farbstoffen aus Textmarkern oder Badesalz nachweisen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

60 PHYSIK **TEILCHENSCHLEUDERN DER ANDEREN ART**

Mit Plasmawellen bringen »Kiefeldbeschleuniger« Teilchen über wenige Meter auf Energien, für die bislang Kilometer nötig waren.

Von Chandrashekhar Joshi

70 ARCHÄOLOGIE **MUMIEN AUS DEM SALZBERG**

Mumifizierte Bergmänner zeugen von einem Grubenunglück vor 2400 Jahren. Die Ereignisse haben Forscher minutiös rekonstruiert.

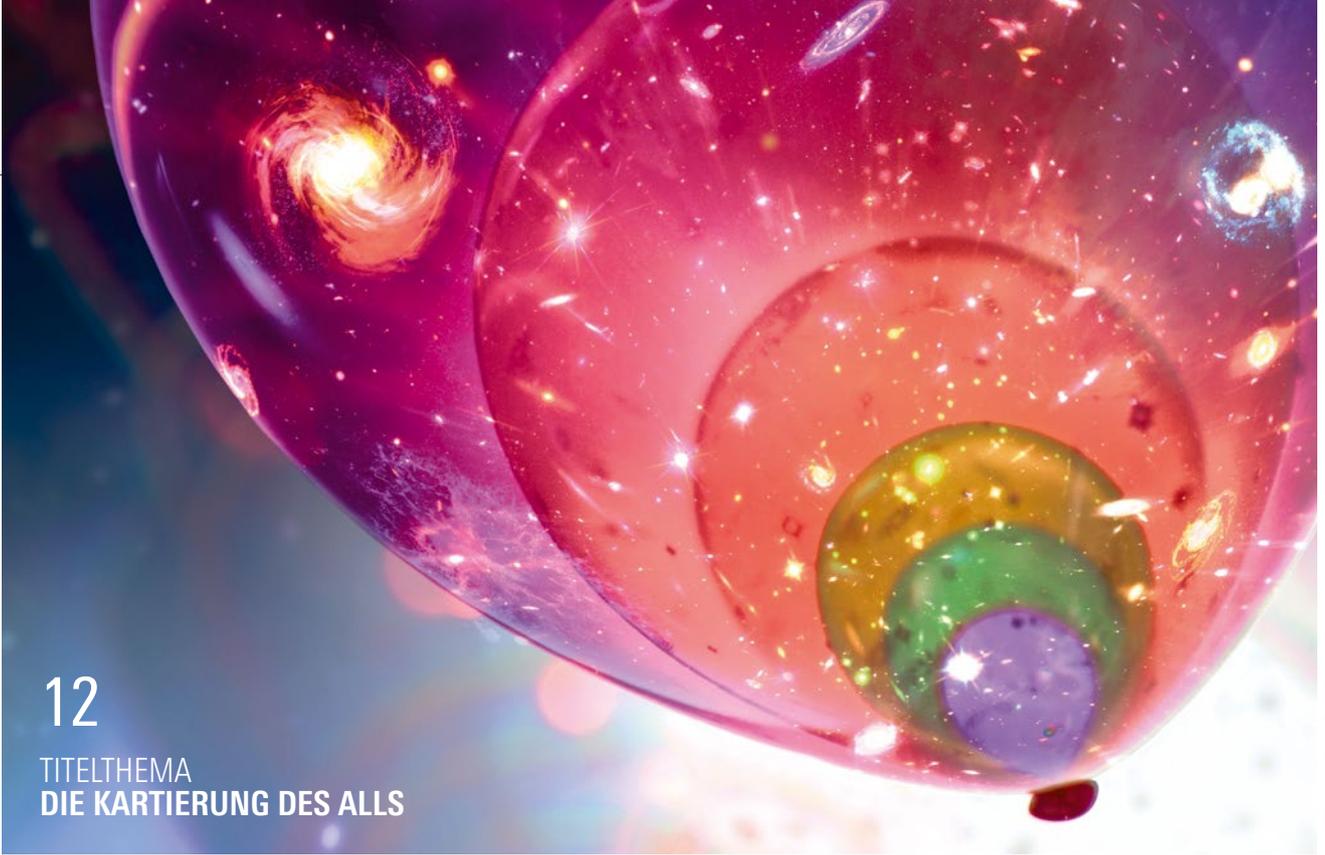
Von Karin Schlott

80 ZAHLENTHEORIE **MATHEMATISCHER BRÜCKENSCHLAG**

Eine neue Disziplin kombiniert Erkenntnisse der Zahlentheorie mit dynamischen Systemen, die insbesondere in der Physik eine große Rolle spielen.

Von Kelsey Houston-Edwards

TITELBILD:
DIANAARTUROVNA / GETTY IMAGES / ISTOCK
UND RASTAN / GETTY IMAGES / ISTOCK.
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA
DIE KARTIERUNG DES ALLS

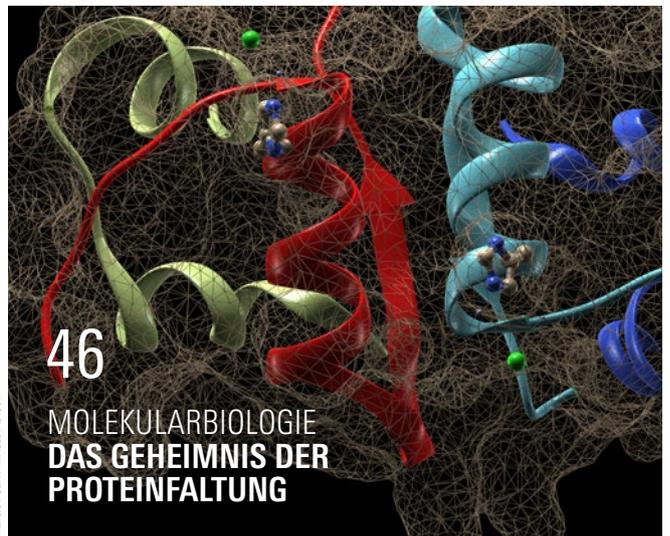
MARK KROSS STUDIO / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2021



40

AMPHIBIENSTERBEN
ABGESANG
DER FRÖSCHE

THOMAS SPORLEIN / GETTY IMAGES / ISTOCK



46

MOLEKULARBIOLOGIE
DAS GEHEIMNIS DER
PROTEINFALTUNG

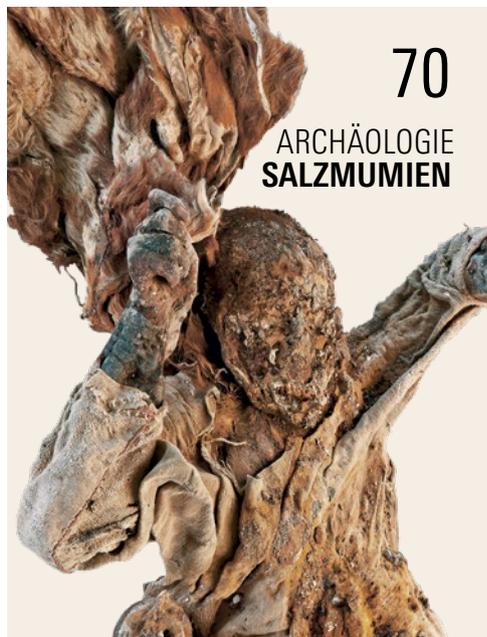
THEASIS / GETTY IMAGES / ISTOCK



60

PHYSIK
KIELFELDBESCHLEUNIGER

DESY / SCIENCE COMMUNICATION LAB



70

ARCHÄOLOGIE
SALZMUMMIEN

KLAUS STRANGE / DEUTSCHES BERGHAU-MUSEUM BOCHUM (DBM) / RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM (RUB) / ZANJAN CULTURAL HERITAGE, HANDICRAFTS AND TOURISM ORGANIZATION (ZCHTO)



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

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

SPEKTROGRAMM

EINBLICKE IN DIE KINDERSTUBE DER STERNE

► Wo im Universum entstehen Sonnen? Und wo fehlt es an stellaren Kinderstuben, obwohl man sie theoretisch erwarten würde? Solchen Fragen geht das Projekt PHANGS nach, indem es Galaxienaufnahmen verschiedener Teleskope miteinander kombiniert. Jedes der Instrumente zeigt eine andere Eigenschaft des entsprechenden Himmelsobjekts. Kombiniert erlauben sie einen Einblick, wie komplex die Sternentstehung ist – und liefern quasi nebenbei beeindruckende, farbenfrohe Bilder aus dem All.

Die Europäische Südsternwarte hat nun eine Auswahl solcher Aufnahmen veröffentlicht. Sie zeigen fünf Galaxien, die mit dem Very Large Telescope (VLT) und dem Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), beide in Chile, gemacht wurden. Es sind jeweils nur bestimmte Wellenlängen im sichtbaren, Infrarot- und Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums farblich dargestellt. Das gelblich warme Leuchten weist auf ionisierten Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefel hin; an den entsprechenden Stellen befinden sich Gaswolken, die diese Elemente enthalten und in denen junge Sterne entstehen. Blaue Zonen hingegen repräsentieren Bereiche mit alten Sternen. Kaltes Gas, der Rohstoff der Sternentstehung, ist in einem gelbbraunen Ton abgebildet.

»Zum ersten Mal können wir individuelle Sternentstehungsgebiete an zahlreichen Orten und in vielen Umgebungen auflösen – bei einer Auswahl von Galaxien, welche die typische Verteilung von Galaxienarten widerspiegelt«, sagt der Astronom Eric Emsellem von der Europäischen Südsternwarte. Mit Hilfe des VLT haben die mehr als 90 Forscherinnen und Forscher zirka 30 000 Nebel aus warmem Gas beobachtet und rund 15 Millionen Spektren aus verschiedenen galaktischen Regionen gesammelt. Mit ALMA wiederum kartierten sie etwa 100 000 Regionen aus kaltem Gas in 90 nahen Sterninseln. Auch das altgediente Weltraumteleskop Hubble steuerte Galaxienaufnahmen bei.

Pressemitteilung der Europäischen Südsternwarte (ESO) vom 16. 7. 2021



ESO/PHANGS (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GALLERY/IMAGES/ESO21104/)/CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)



PHYSIK METALLISCHES WASSER IST GOLDEN

► Mittels freier Elektronen lässt sich Wasser zu einem Metall machen und sieht dann aus wie Gold. Das berichtet eine Arbeitsgruppe um Pavel Jungwirth von der Tschechischen Akademie der Wissenschaften in Prag. Der Effekt kommt zu Stande, wenn man Wasserdampf unter niedrigem Druck auf einer flüssigen Natrium-Kalium-Legierung kondensieren lässt. Dann gehen Elektronen aus der Legierung in die nanometerdicke Wasserschicht über und bewegen sich frei in ihr. Sie machen das Wasser zum Metall – und färben es ein.

Einen Stoff in den metallischen Zustand zu überführen, ist auf zweierlei Weise möglich. Zum einen durch Ausüben hohen Drucks, unter dem sich die Atome so nahe kommen, dass ihre Elektronen nicht mehr an spezifische Kerne gebunden sind. Bei Wasser ist das in bisherigen Experimenten nicht gelungen, vermutlich weil hierfür weit höhere Drücke nötig sind, als sie sich derzeit erreichen lassen. Zum anderen kann man frei bewegliche Elektronen in dem jeweiligen Stoff lösen, indem man sie beispielsweise aus Natrium oder Kalium, die sehr

bereitwillig Elektronen abgeben, überreten lässt. Bislang war es schwierig, metallisches Wasser auf diesem Weg herzustellen, denn wenn H_2O auf Alkalimetalle trifft, reagiert es für gewöhnlich heftig.

Jungwirth und seinem Team gelang es, die Reaktion zu verlangsamen, indem sie flüssige Natrium-Kalium-Tropfen in eine Vakuumkammer schossen, in der ein sehr niedriger Wasserdampfdruck von etwa einem zehnmilliardstel Bar herrschte. In der Schicht, die auf den Tropfen kondensierte, lösten sich Elektronen, ohne die H_2O -Moleküle sofort zu spalten. Dies verlieh dem Wasser einen goldenen Farbton.

Allerdings entsteht das Kolorit auf völlig andere Weise als bei echtem

Gold. Während beim Edelmetall ein relativistischer Effekt für das gelbliche Schimmern sorgt – die Elektronen bewegen sich mit einem nennenswerten Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit, was ihr Absorptionsverhalten verändert –, sind es in der Wasserschicht kollektive Schwingungen der beweglichen Elektronen, so genannte Plasmonen. Zudem hält der Goldton dort nicht lange, denn die Elektronen bleiben in der wässrigen Phase nur kurze Zeit frei beweglich. Binnen Sekunden färbt sich die Schicht dunkler, wird rotviolett und schließlich von Flecken der Reaktionsprodukte Natriumhydroxid und Kaliumhydroxid durchsetzt.

Nature 10.1038/s41586-021-03646-5, 2021

MEDIZIN ZELLEN LEGEN NANO- MINEN GEGEN BAKTERIEN

► Ein bisher komplett unbekannter Mechanismus des Immunsystems bekämpft Bakterien in Körperzellen. Wie eine Arbeitsgruppe um John D. MacMicking von der Yale University berichtet, setzen Zellen etwa der Schleimhäute und der Blutgefäßwand das Protein APOL3 in ihren Innenraum frei. Dringen anschließend krankmachende Bakterien ein, tötet APOL3 sie. Der Mechanismus sei nicht nur völlig überraschend, er verdeutliche ebenso, dass potenziell jede Körperzelle an der Immunabwehr beteiligt sein

könne, kommentiert der Immunologe Carl Nathan von der Cornell University diese Erkenntnisse.

Das Team um MacMicking untersuchte, wie der Botenstoff Interferon-gamma ($IFN-\gamma$) den Organismus beeinflusst. $IFN-\gamma$ ist an Entzündungsprozessen beteiligt und spielt eine entscheidende Rolle sowohl für das angeborene als auch für das erworbene Immunsystem. Der Stoff aktiviert jedoch ebenso Gene in Zellen, von denen bisher nicht bekannt war, dass sie an der Immunabwehr mitwirken. Mit Hilfe der Genschere CRISPR-Cas schalteten die Forscher insgesamt 19050 solcher Gene aus, um deren Funktion zu bestimmen. Dabei zeigte sich, dass APOL3 in der Lage ist,

Bakterien abzutöten und verschiedene Zelltypen vor bakteriellen Infektionen zu schützen. Das Molekül verlässt dabei nicht die Zelle.

Stattdessen funktioniert APOL3 im Zellplasma wie eine antibakterielle Mine. Dringt ein Erreger in die Zelle ein und stößt er auf das Protein, wird er vernichtet. Vermutlich zerfetzt das Eiweiß die Bakterienhülle: APOL3 gehört zur Gruppe der Apolipoproteine, die seifenähnliche Eigenschaften haben. Ein Teil des Moleküls ist wasser-, der andere fettlöslich. Dadurch binden sich diese Stoffe an Lipidmoleküle der Bakterienmembran und reißen sie aus ihrem Verband.

Science 10.1126/science.abb8113, 2021



NICHT ALLES, WAS GLÄNZT... Eine dünne Wasserschicht, die einen Tropfen aus Natrium und Kalium bedeckt, schimmert golden.

PHILIP E. WATSON, CZECH ACADEMY OF SCIENCES, PRAG

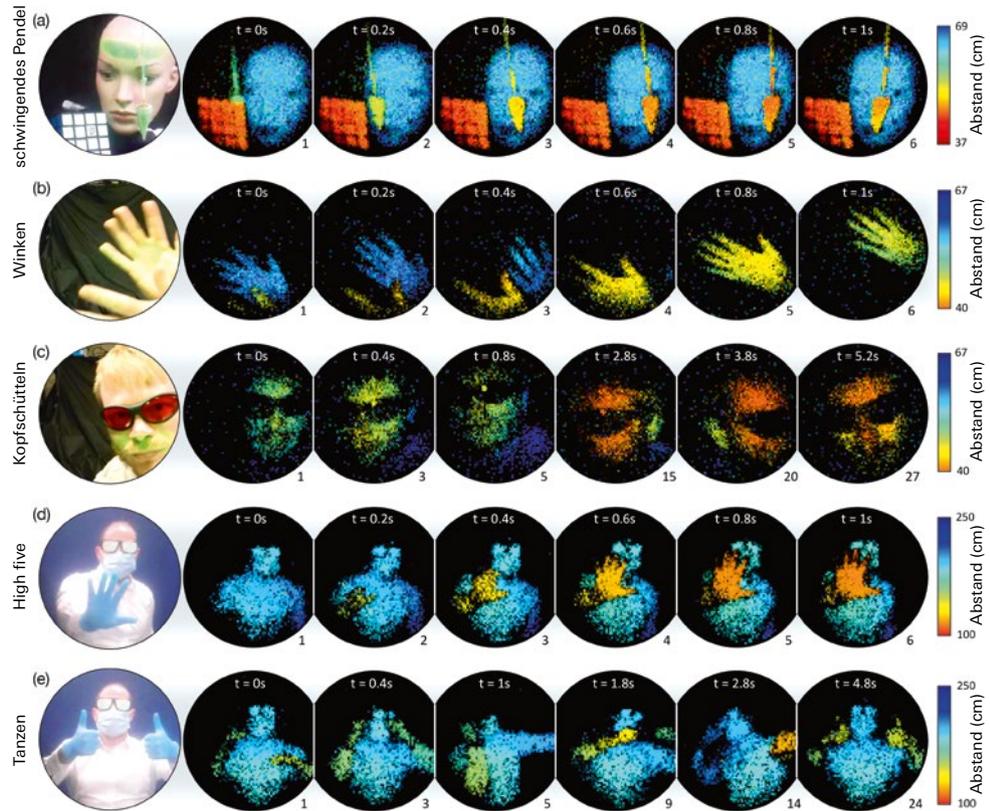
TECHNIK EIN HAARDÜNNER LASERSCANNER

Wissenschaftler um Miles Padget von der University of Glasgow haben einen Laserscanner entwickelt, der ein dreidimensionales Abbild der Umgebung liefert und seine Signale dabei durch Glasfasern laufen lässt, die nur Bruchteile von Millimetern dick sind. Damit hoffen sie Endoskope bauen zu können, die durch winzigste Öffnungen hindurch filmen.

Das Grundprinzip lautet, einen Laserimpuls durch eine Glasfaser zu senden und dessen Reflexion mit einer weiteren Faser aufzufangen. Die Zeitspanne zwischen Aussendung und Empfang verrät millimetergenau, wie weit das reflektierende Objekt entfernt ist. Durch punktweises Abtasten lässt sich das Objekt abbilden. Noch aus einer Distanz von zweieinhalb Metern kann das System Aufnahmen anfertigen.

Die Wissenschaftler müssen die Laserpulse dabei exakt modulieren. Deren Wellenfront ist so geformt, dass jeder Puls auf einen einzigen, frei wählbaren Punkt fokussiert. In ersten Tests gelang es, pro Sekunde 23.000 Punkte abzutasten und deren Entfernungen zu ermitteln. Daraus entsteht im Computer ein dreidimensionales Bild.

Das größte Problem liegt darin, dass die 40 Zentimeter lange Glasfaser den Laserpuls stört und seine Modulierung verzerrt. Padget und sein Team erfassen deshalb, wie sich ein bestimmtes Signal während der Passage verändert. Bei der eigentlichen Messung formen



STELLINGA, D. ET AL.: TIME OF FLIGHT 3D IMAGING THROUGH MULTIMODE OPTICAL FIBRES. ARXIV 2107.11450, 2021. FIG. 2 (ARXIV.ORG/ABS/2107.11450) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/4.0/LEGALCODE)

sie den Laserpuls dann vorab so, dass erst die Störung ihm die gewünschte Gestalt gibt. Das funktioniert bislang allerdings nur, solange die Faser nicht bewegt wird, was einen Einsatz als Endoskop noch vereitelt.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die zweite Glasfaser dar: Weil sie möglichst viel reflektiertes Licht sammeln muss, ließ sie sich in den Tests nicht dünner machen als einen halben Millimeter. Aber es gebe denkbare Alternativen, schreiben die Forscher.

SCHLÜSSELLOCH-BLICK Mit dünnen Glasfasern gelingt es, bewegte Objekte (ganz links) als Punktwolken abzubilden (Bildserien rechts).

So könnte man Fasern nutzen, die im Kernbereich den Laserpuls leiten und in der Peripherie das Lichtecho einfangen. In puncto Platzbedarf sei dies besonders effizient.

arXiv 2107.11450, 2021



IN ENTWICKLUNG Noch ist das Verfahren, Objekte durch schmale Glasfasern hindurch mit modulierten Laserpulsen abzulichten, im Laborstadium.

PALÄO BIOLOGIE GAB ES TIERE SCHON VOR 890 MILLIONEN JAHREN?

► Etwa 890 Millionen Jahre alte Versteinerungen könnten von frühen Schwämmen stammen. Damit wären die ersten Tierfossilien nicht nur 350 Millionen Jahre betagter als die bisher ältesten bekannten Spuren von Vielzellern – sie würden zudem aus einer Zeit stammen, als es nach verbreiteter Ansicht noch gar nicht genug Sauerstoff für sie gab.

Elizabeth C. Turner von der Laurentian University in Kanada berichtet, in den Überresten eines einst von Zyanobakterien aufgebauten Riffs röhrenartige, verzweigte Strukturen gefunden zu haben. Diese ähnelten sowohl den Fasernetzen existierender Hornschwämme als auch jüngeren Fossilien, die nachweislich von solchen Schwämmen stammen. Zudem befanden sich

die Strukturen bevorzugt in Bereichen des früheren Riffs, die nicht von den Mikroben genutzt wurden, vermutlich weil dort nur wenig Licht hinkam. Sollte sich diese Annahme bestätigen, würde das nicht nur genetische Analysen stützen, denen zufolge die ersten Tiere vor rund einer Milliarde Jahren entstanden – es würde ebenso bedeuten, dass diese Lebewesen nicht notwendigerweise vom Sauerstoffgehalt der Atmosphäre abhingen.

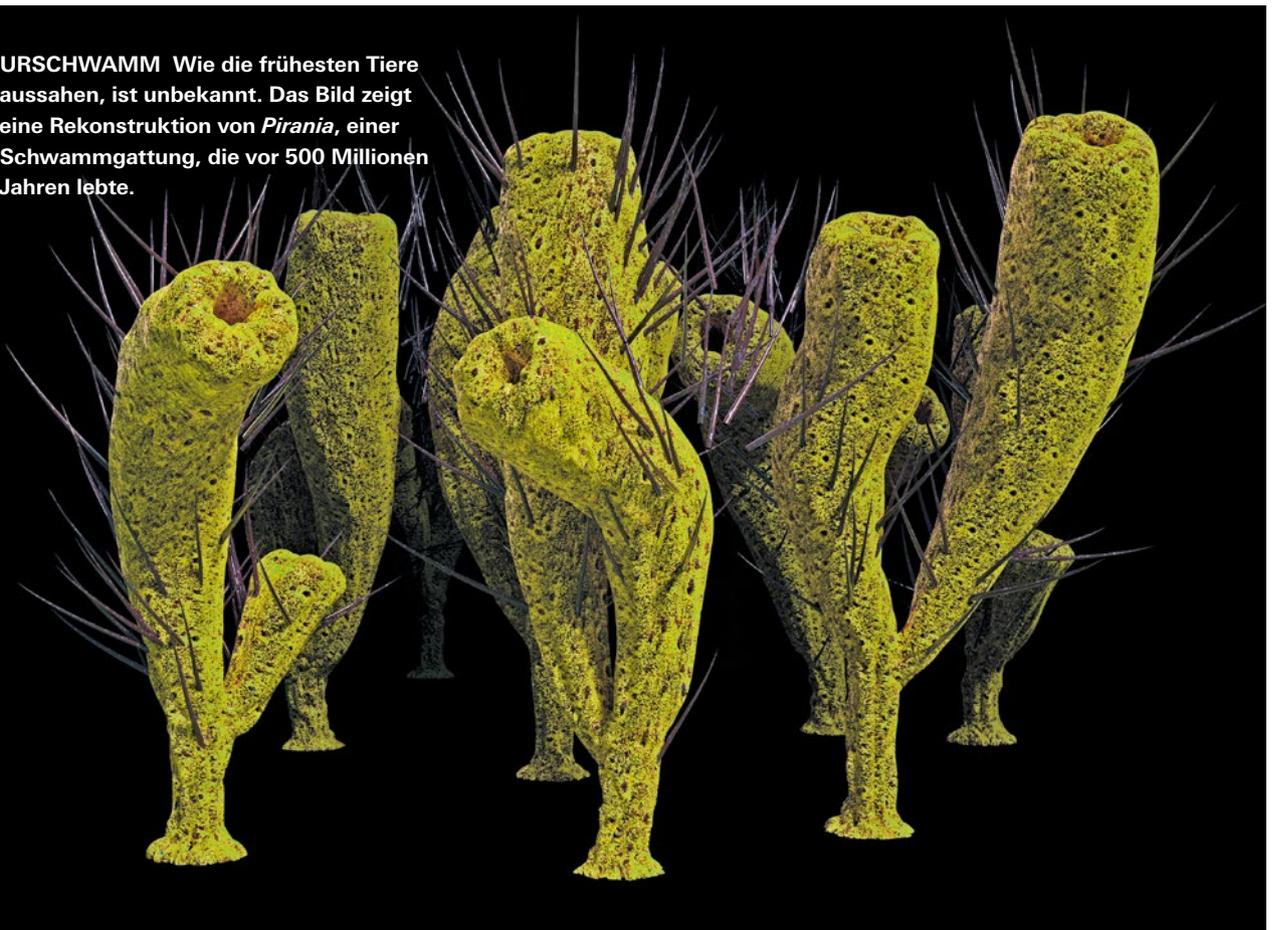
Tiere, auch Metazoen genannt, unterscheiden sich drastisch von Mikroben wie Bakterien. Ihre Zellen sind deutlich komplexer aufgebaut und bilden große gemeinsame Strukturen. Wann sie auf der Bühne der Evolution auftauchten, ist unklar. Molekulare Uhren deuten darauf hin, dass der gemeinsame Vorfahr aller Schwämme, der mutmaßlich ältesten Tiergruppe, vor knapp einer Milliarde Jahre lebte. Doch fehlen bisher Tierfossilien aus dieser Zeit. Lediglich chemische Marker

sprechen für die Existenz von Schwämmen vor mehr als 650 Millionen Jahren. Allgemein gehen Forscher davon aus, dass Tiere zwingend auf einen bestimmten Mindestsauerstoffgehalt angewiesen sind und deswegen erst erschienen, nachdem sich entsprechend viel Sauerstoff in der Umwelt angesammelt hatte, was vermutlich vor frühestens etwa 800 Millionen Jahren eintrat.

Turner schlägt eine Erklärung dafür vor, wie urtümliche Schwämme bereits 90 Millionen Jahre vorher existieren konnten. Vielleicht sei damals die Sauerstoffkonzentration rund um die Riffe, also in der Nähe der Fotosynthese betreibenden Bakterien, deutlich höher gewesen als im restlichen Ozean. Tiere seien womöglich auf diese sauerstoffreichen Oasen beschränkt gewesen. Einige moderne Schwämme seien zudem noch heute in der Lage, sehr niedrige Sauerstoffkonzentrationen zu tolerieren.

Nature 10.1038/s41586-021-03773-z, 2021

URSCHWAMM Wie die frühesten Tiere aussahen, ist unbekannt. Das Bild zeigt eine Rekonstruktion von *Pirania*, einer Schwammgattung, die vor 500 Millionen Jahren lebte.



KOSMOLOGIE DIE KARTIERUNG DES ALLS

Systematische Vermessungen erfassen Millionen von Galaxien, die sich über Jahrmilliarden im Weltraum verteilt haben. Anhand dabei entstandener Muster könnten sich wichtige Fragen zur Entwicklung des Universums beantworten lassen.



Kyle Dawson ist Professor für Physik und Astronomie an der University of Utah. **Will Percival** leitet das Waterloo Centre for Astrophysics in Ontario.

» [spektrum.de/artikel/1913881](https://www.spektrum.de/artikel/1913881)

AUFGEBLASEN Der junge Kosmos hat sich schnell ausgedehnt und dabei Strukturen erzeugt, deren Wachstum bis heute andauert.



Angesichts der unvorstellbaren Dimensionen des Kosmos ist es eine gewaltige Aufgabe, herauszufinden, wie groß er wirklich ist und wie er im Detail funktioniert. Viele Astronominnen und Astronomen haben ihre Karrieren der Erstellung von Karten des Universums auf allen Maßstäben gewidmet. Inzwischen hat das Projekt Sloan Digital Sky Survey (SDSS), an dem wir mitgewirkt haben, nach zwei Jahrzehnten Arbeit die größte dreidimensionale Übersicht des Kosmos angefertigt, die jemals zur Verfügung stand. Während sich das Projekt bereits in der nächsten Phase der Datensammlung befindet, umfasst das bis 2021 veröffentlichte Material sämtliche Regionen des Alls – von unserer unmittelbaren Umgebung bis zu den entferntesten noch sichtbaren Objekten – und enthält die Positionen von mehreren Millionen Galaxien. Diese sind wie Wegmarken über viele Milliarden Lichtjahre verteilt und reichen bis in die frühesten Epochen des Universums zurück.

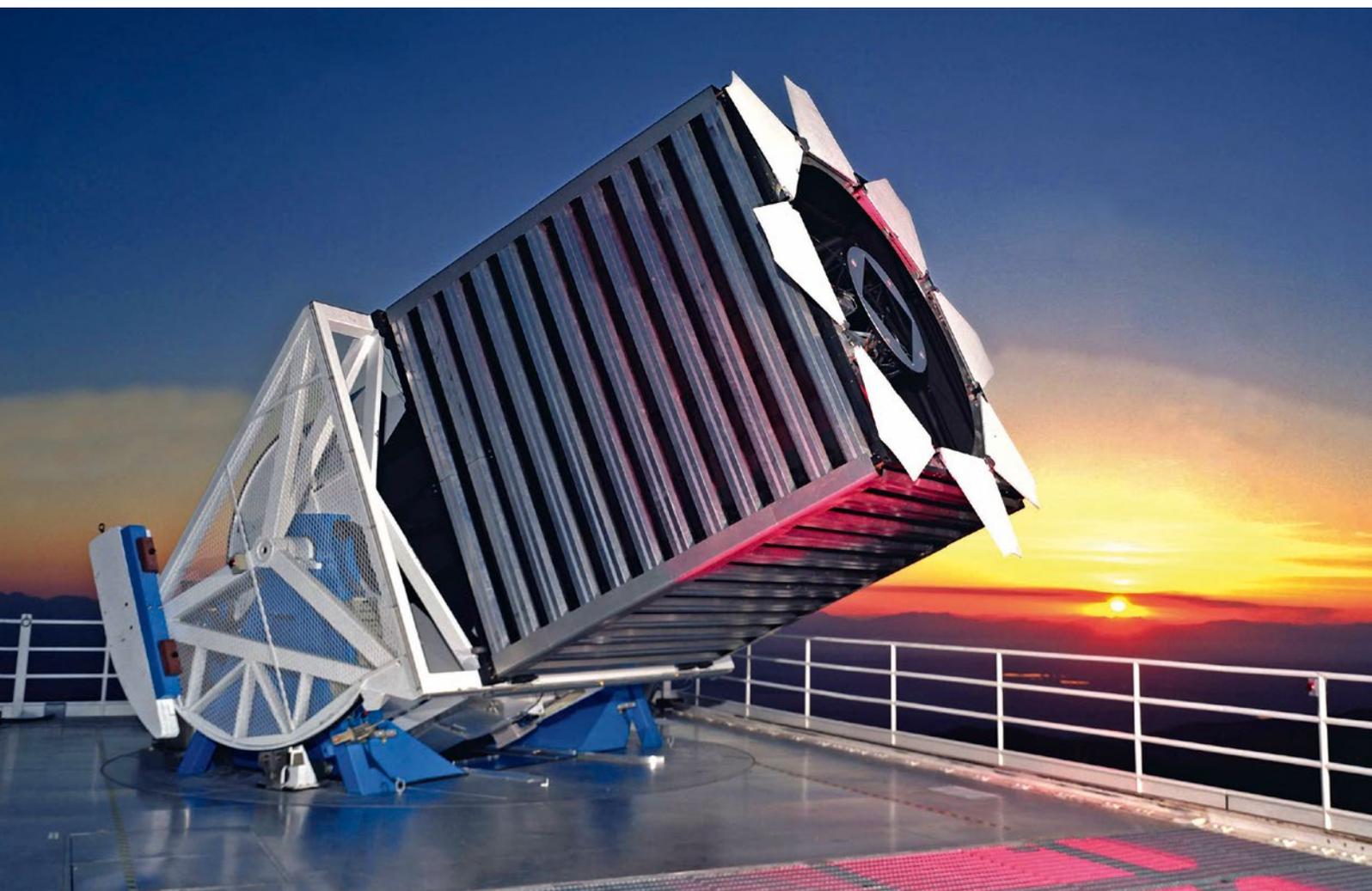
Dabei erscheinen die Galaxien keineswegs wie völlig zufällig verstreut. Stattdessen bilden sie Strukturen: in einigen Gebieten fadenartige »Filamente« und Schichten mit dicht gedrängten Galaxien, in anderen weitgehend leere »Voids«. Vermutlich haben sich die grundlegenden Muster

SDSS-TELESKOP Das Instrument für die Himmelsdurchmusterung wurde in New Mexico gebaut. Sein 2,5 Meter großer Spiegel kann das Licht auf eine Kamera oder ein Paar von Spektrografen bündeln.

schon vor der Entstehung der ersten Galaxien herausgebildet, also weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall. Indem wir das All so umfangreich wie möglich kartieren, können wir das Wachstum der Strukturen nachvollziehen und die tiefer liegenden Gesetze ableiten, die dazu geführt haben. Ein solcher galaktischer Atlas liefert womöglich Antworten auf einige der größten Fragen der Physik, etwa zur Natur der Dunklen Energie, die den Kosmos immer schneller expandieren lässt.

Ein Teilprojekt der vierten, von 2014 bis 2020 dauernden Phase des Sloan Digital Sky Survey war unsere Messkampagne Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (eBOSS). Deren Ergebnisse haben wir im Juli 2020 veröffentlicht. Die Untersuchungen basierten auf charakteristischen Anordnungen von Galaxien, die als baryonische akustische Oszillationen (BAO) bezeichnet werden.

Diese speziellen Muster gehen auf die Anfänge des Universums zurück. In einem winzigen Moment nach dem Urknall expandierte der Kosmos enorm schnell. Während dieser »Inflation« blähten sich subatomare Skalen im Verlauf von lediglich 10^{-32} Sekunden auf die Größe eines Golfballs auf. Infolgedessen nahmen winzige Quantenfluktuationen bei der Energieverteilung des Universums makroskopische Ausmaße an. So entstanden Regionen mit höherer Energiedichte, die allmählich immer mehr Materie an sich zogen und dabei andere Bereiche leerten. Im Lauf von Milliarden Jahren kosmischer Entwicklung führte das langsam zu jenen typischen Anordnungen der Galaxien, die wir jetzt auf großen Skalen beobachten.



Die BAO-Muster entstehen auf Grund der Weise, wie Licht und Materie miteinander wechselwirken und wie sie die Strukturbildung beeinflussen. Gemäß der besten verfügbaren Theorien enthält das Universum zwei Arten von Materie: eine, die mit elektromagnetischer Strahlung interagiert – die normalen Teilchen, die wir aus dem Alltag kennen –, und eine, die das nicht tut, die so genannte Dunkle Materie. Im heißen und dichten frühen Universum stießen die Teilchen der gewöhnlichen Materie und des Lichts (die Photonen) so oft aufeinander, dass sie regelrecht aneinanderklebten. Im Gegensatz dazu konnte sich die Dunkle Materie frei und ungestört bewegen. Sie unterliegt lediglich der Schwerkraft, die nur anziehend wirkt. Deswegen sammelte sich die Dunkle Materie in den Zentren der dichteren Regionen, während die von dort ausgehende Strahlung die normale Materie nach außen drückte.

Erst etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall gingen gewöhnliche Materie und Licht getrennte Wege. Zu der Zeit hatte sich das Universum ausgedehnt und abgekühlt, und die Photonen konnten sich endlich, ungehindert von den Teilchen, frei ausbreiten. Dieser erste Lichtschein des Kosmos ist am Himmel immer noch in Form allgegenwärtiger Mikrowellen als Hintergrundstrahlung sichtbar.

Von dem Moment an, ab dem Licht und Materie nicht mehr aneinander gekoppelt waren, blieb ein Überschuss an Teilchen dort zurück, wo sich zuvor die Wellenfronten der auseinanderstrebenden Strahlung befanden: jeweils in kugelförmigen Schalen um Mittelpunkte mit dicht gepackter Dunkler Materie. Zwar bewegten sich fortan gewöhnliche und Dunkle Materie wegen ihrer wechselseitigen Anziehung durch die Gravitation wieder aufeinander zu, doch dem Universum wurde durch den Prozess ein Muster aufgeprägt. Es besteht aus einem System verhältnismäßig dichter Zentren, die von Kugelschalen aus Materie umgeben sind. Die ursächlichen Dichtewellen, die baryonischen akustischen Oszillationen, haben charakteristische Abstände hinterlassen, die als mitbewegter Schallhorizont bezeichnet werden und sich in unserer Karte der Galaxien erkennen lassen.

Ein nützliches Standardmaß für jeden Winkel des Kosmos

Wir können dieses Merkmal für eine praktische Methode der kosmischen Entfernungsmessung heranziehen. Da sämtliche Strukturen fast zur gleichen Zeit und auf die gleiche Weise entstanden sind, haben die Schalen alle ungefähr die gleiche Ausdehnung – etwa 500 Millionen Lichtjahre trennen jeden Kern von seiner Hülle. Auf unseren Karten sehen die Formen nun kleiner oder größer aus, je nachdem, wie weit sie von uns weg sind. Wenn wir also ihren scheinbaren Durchmesser am Nachthimmel ermitteln und mit dem tatsächlichen Wert vergleichen, können wir die Entfernung von der Erde bestimmen.

Messungen mit diesem »Standardlineal« liefern zwar die mittlere Entfernung zu einer Gruppe von Galaxien, aber an und für sich noch keine Hinweise auf die kosmologischen Zusammenhänge. Dafür benötigen wir zusätzliche Informationen über die Geschwindigkeit, mit der sich die Galaxien von uns fortbewegen. Darum hat die SDSS-Durchmusterung

AUF EINEN BLICK PANGALAKTISCHE SCHWINGUNGEN

- 1** Unmittelbar nach dem Urknall hat das Zusammenspiel von Strahlungsdruck und Schwerkraft der Materie ein charakteristisches räumliches Muster aufgeprägt.
- 2** Dieses ist noch heute überall im Weltraum erkennbar und erlaubt es, mit umfangreichen Beoberkungskampagnen die beschleunigte Ausdehnung des Alls nachzuvollziehen.
- 3** Die Messergebnisse passen insgesamt zum Standardmodell der Kosmologie. Es gibt aber erklärungsbedürftige Unterschiede zwischen unserer lokalen Umgebung und weiter entfernten Strukturen.

nicht nur Fotos von einem Drittel des Himmels aufgenommen, sondern darüber hinaus zwei Millionen Galaxien und Quasare (das sind Galaxien, die auf Grund eines Materie verschlingenden Schwarzen Lochs im Zentrum besonders hell aufleuchten) spektrografisch erfasst. Im Zuge dessen werden die verschiedenen Wellenlängen der empfangenen Strahlung voneinander getrennt. Die spektrale Aufschlüsselung zeigt, wie schnell sich Galaxien von uns entfernen und wie sehr sich das Universum zwischen dem Moment, an dem das Licht ausgesendet wurde, und dem Zeitpunkt der Beobachtung ausgedehnt hat. Die Expansion streckt nämlich die Wellenlängen; das Phänomen wird Rotverschiebung genannt.

Jede Einzeluntersuchung mit eBOSS und seinem Vorgänger BOSS hat gleichzeitig die Lichtspektren von 1000 Galaxien geliefert. Dabei war für jedes Himmelsobjekt im Sichtfeld ein eigenes Glasfaserkabel nötig. Mit ihrem einen Ende führten die Kabel zu Spektrografen, das andere Ende steckte in einer Aluminiumplatte in der Fokusebene des Teleskops. Dafür mussten die Technikteams vor einer Beobachtungsnacht acht Platten in speziell angefertigten Kassetten präparieren, indem sie in jedes der 1000 Löcher von Hand eine Glasfaser platzierten. Auf diese Weise benötigten zwei Personen etwa eine halbe Stunde, um eine Kassette für die Positionierung im Teleskop vorzubereiten. Der produktivste Monat war der März 2012, in dem wir 103 000 Spektren aufzeichneten.

Die dafür interessanten Galaxien und Quasare wählten wir aus Bilddaten aus, die zuvor mit Teleskopen auf der ganzen Welt gewonnen wurden. Eine computergesteuerte Maschine bohrte dann Löcher in die Aluminiumplatten. Wenn das Teleskop schließlich für eine einstündige Belichtung einen bestimmten Abschnitt des Himmels anvisierte, war das Ende einer Faser in jedem Loch perfekt auf das Zentrum der Zielgalaxie ausgerichtet.

In jeder Nacht zwischen Dezember 2009 und März 2019, in der kein übermäßig helles Mondlicht den Blick in die Tiefen des Alls störte, leiteten die Glasfasern das Licht vom Teleskop zu insgesamt zwei Spektrografen. Diese detektier-

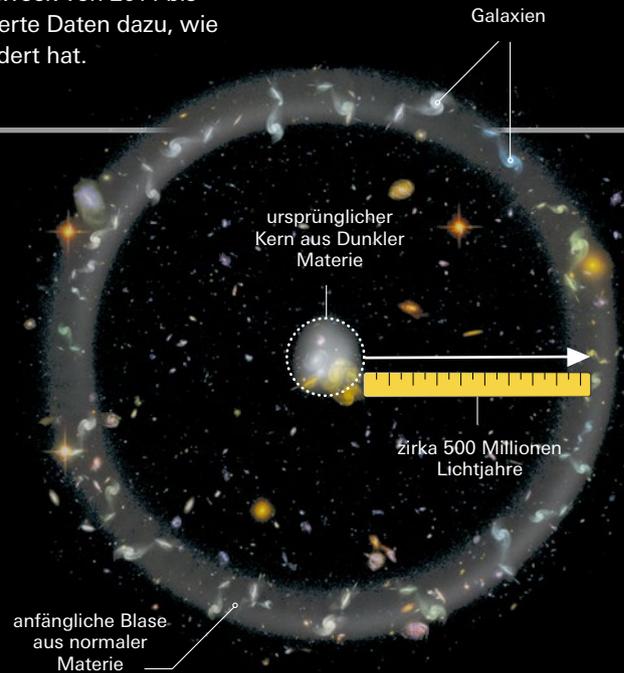
Wie schnell expandiert das All?

Der Kosmos dehnt sich immer rascher aus. Hinter dem Phänomen steckt die Dunkle Energie, deren Ursachen mit Beobachtungskampagnen wie dem Sloan Digital Sky Survey enträtselt werden sollen. Die zu dem Zweck von 2014 bis 2018 durchgeführte Himmelsdurchmusterung eBOSS lieferte Daten dazu, wie sich die Expansionsrate im Lauf von Jahrmilliarden verändert hat.

1

Galaxienmuster erkennen

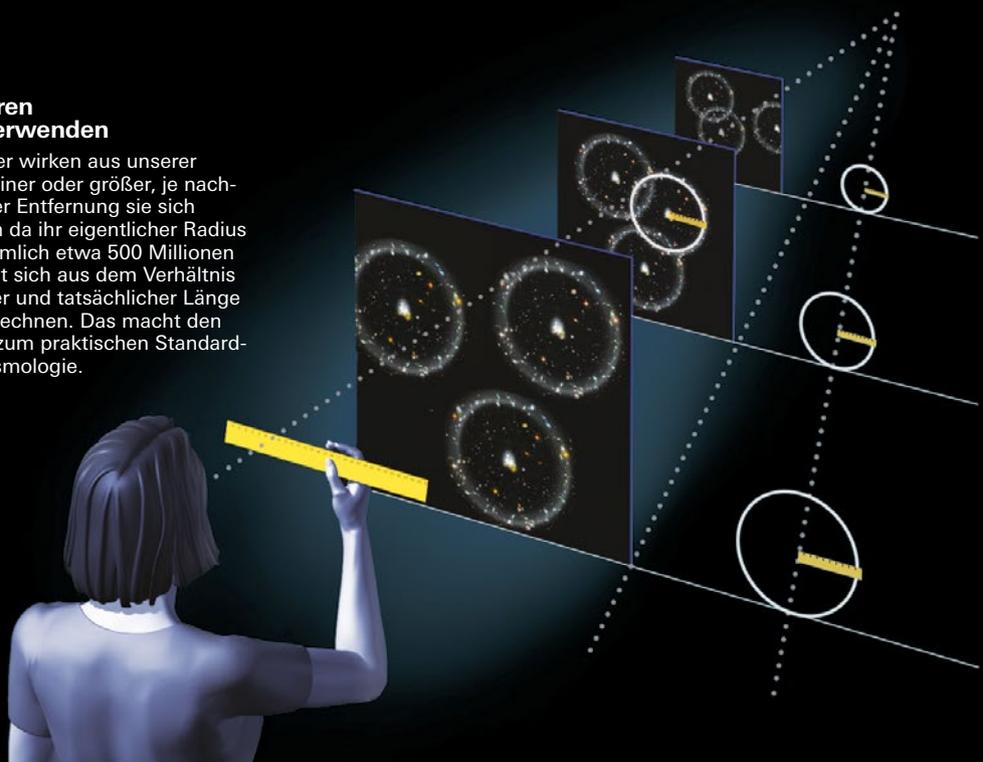
Die eBOSS-Beobachtungen zielten darauf ab, bestimmte großräumige Muster in der Anordnung von Galaxien zu identifizieren, die baryonischen akustischen Oszillationen (BAO). Sie haben ihren Ursprung in winzigen Schwankungen der Energiedichte unmittelbar nach dem Urknall, die sich allmählich aufschaukelten. Weil normale Materie und Strahlung in der Frühzeit des Alls eng miteinander verbunden waren, entstanden schließlich Kernbereiche mit viel Dunkler Materie, die von Kugelschalen aus normaler Materie und Licht umgeben waren. Der Radius der Strukturen entspricht heute rund 500 Millionen Lichtjahren. Mit der Zeit verteilten sich normale und Dunkle Materie infolge ihrer wechselseitigen Anziehung, und Galaxien formten sich dort, wo besonders viel Gas und Staub war. Trotz der Veränderungen ist bis heute das einstmalig aufgeprägte Muster zu sehen.



2

Die Strukturen als Lineal verwenden

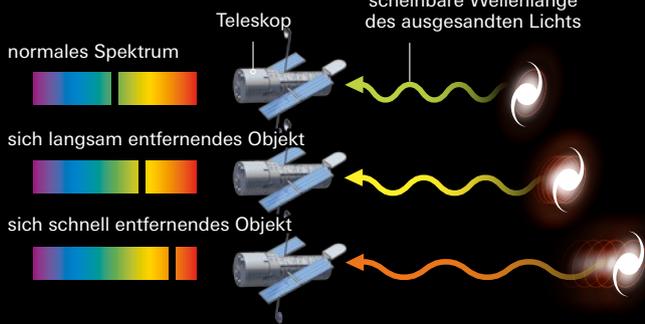
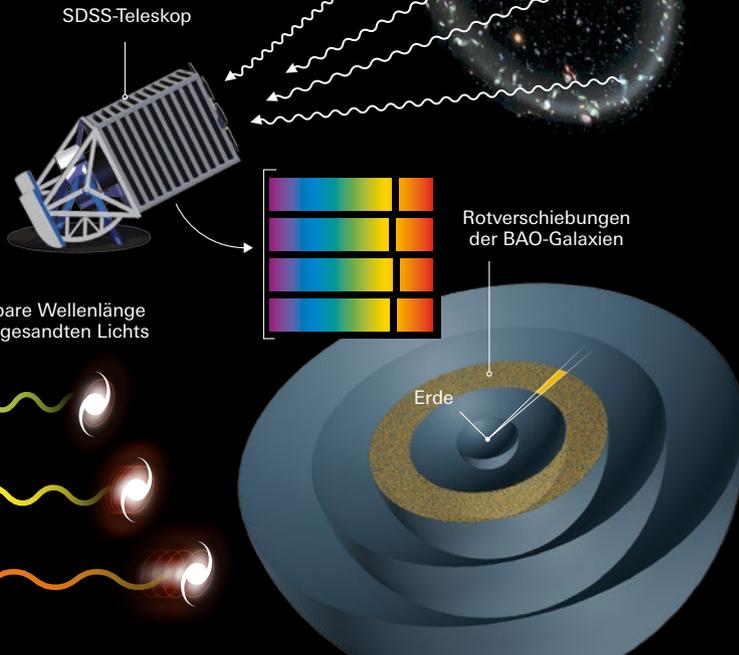
Die BAO-Muster wirken aus unserer Perspektive kleiner oder größer, je nachdem, in welcher Entfernung sie sich befinden. Doch da ihr eigentlicher Radius bekannt ist, nämlich etwa 500 Millionen Lichtjahre, lässt sich aus dem Verhältnis von scheinbarer Länge und tatsächlicher Länge die Distanz berechnen. Das macht den BAO-Abdruck zum praktischen Standardmaß in der Kosmologie.



3

Geschwindigkeiten messen

Die Distanz allein bringt noch kein besseres Verständnis der Dunklen Energie. Dafür ist zusätzlich Wissen darüber nötig, wie schnell sich die BAO-Galaxien von uns wegbewegen. Hier hilft der Dopplereffekt: Je weiter ein Objekt von uns entfernt ist, mit desto höherer Geschwindigkeit entflieht es. Dabei streckt sich die Wellenlänge des ausgesandten Lichts. Diese Rotverschiebung lässt sich mit Spektrografen anhand charakteristischer Absorptionslinien im Spektrum messen.

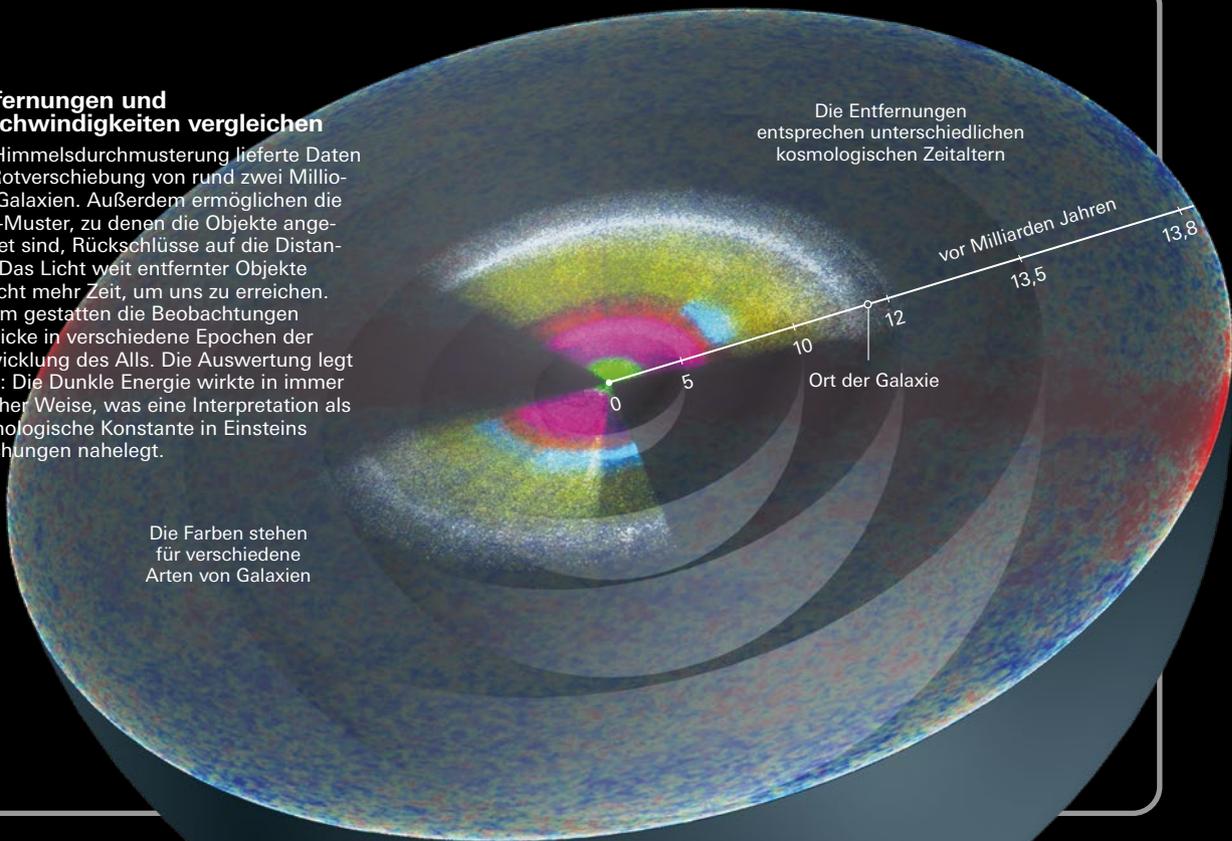


4

Entfernungen und Geschwindigkeiten vergleichen

Die Himmelsdurchmusterung lieferte Daten zur Rotverschiebung von rund zwei Millionen Galaxien. Außerdem ermöglichen die BAO-Muster, zu denen die Objekte angeordnet sind, Rückschlüsse auf die Distanzen. Das Licht weit entfernter Objekte braucht mehr Zeit, um uns zu erreichen. Darum gestatten die Beobachtungen Einblicke in verschiedene Epochen der Entwicklung des Alls. Die Auswertung legt nahe: Die Dunkle Energie wirkte in immer gleicher Weise, was eine Interpretation als kosmologische Konstante in Einsteins Gleichungen nahelegt.

Die Entfernungen entsprechen unterschiedlichen kosmologischen Zeitaltern



Die Farben stehen für verschiedene Arten von Galaxien

Das Standardmodell ist die beste verfügbare Beschreibung des Weltalls – bringt jedoch einige Schwierigkeiten mit sich

ten digital die Intensität des Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge. So konnten wir die Rotverschiebung jeder Galaxie berechnen. Während der knapp zehn Jahre haben wir die Daten zu Positionen und Rotverschiebungen von mehreren Millionen Galaxien gesammelt. Das Licht weit entfernter Objekte braucht zu uns länger als das näher gelegener, wir sehen sie also in einem jüngeren Zustand. Letztlich decken unsere Karten so einen Zeitraum von elf Milliarden Jahren ab – den größten Teil der fast 14 Milliarden Jahre dauernden Geschichte des Universums.

Zuletzt kombinierten wir unsere Messungen der Rotverschiebung mit den aus dem BAO-Standardlineal ermittelten Entfernungen. Die Beziehung zwischen beiden Werten gibt Aufschluss darüber, wie schnell sich das Universum über verschiedene Zeiträume in den letzten elf Milliarden Jahren ausgedehnt und das Licht der Galaxien gestreckt hat. Die Informationen sind unverzichtbar, um einem der größten Rätsel der modernen Physik auf die Spur zu kommen: der Dunklen Energie.

Bei der Dunklen Energie handelt es sich um eine mysteriöse Kraft, die das Universum immer schneller expandieren lässt. Das überraschende Phänomen wurde 1998 entdeckt. Das einfachste mathematische Modell für die Dunkle Energie ist die so genannte kosmologische Konstante Lambda, ein Term in den Feldgleichungen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Er beschreibt die im leeren Raum vorhandene Energie. Sie kann der nach innen gerichteten, gegenseitigen gravitativen Anziehung aller Massen im Kosmos entgegenwirken und so unter dem Strich das Universum beschleunigt auseinanderdrücken. Die kosmologische Konstante ist ein Teil des als Lambda-CDM bezeichneten kosmologischen Standardmodells, das in den letzten zwei Jahrzehnten etlichen experimentellen Überprüfungen Stand gehalten hat. Obgleich wir seine physikalischen Hintergründe noch nicht wirklich verstehen, ist es die derzeit beste verfügbare theoretische Beschreibung des Weltalls.

Lambda-CDM bringt jedoch einige Schwierigkeiten mit sich. Drei jüngere Untersuchungsergebnisse offenbaren Abweichungen zwischen dem Modell und der Realität. Erstens stimmen Messungen der lokalen Expansionsrate des uns umgebenden Raums nicht mit den auf Lambda-CDM basierenden Vorhersagen überein, die sich aus Beobachtungen des fernen Universums ergeben. Zweitens lässt sich aus dem kosmischen Mikrowellenhintergrund eine etwas stärkere Krümmung des Raums ableiten, als von der eingangs erwähnten Inflationstheorie vorhergesagt wird. Drittens scheint die Verzerrung des Lichts weit entfernter Galaxien durch zwischen ihnen und uns befindliche Materie schwächer zu sein als erwartet. Mit der Zeit könnten sich

solche Unstimmigkeiten durch bessere Messungen auflösen, oder sie entpuppen sich als erste Anzeichen dafür, dass ein neues kosmologisches Modell erforderlich ist. So oder so bringen präzise Himmelsdurchmusterungen wie mit eBOSS Licht in die Dunkelheit.

Die Analysen zeigen zum Beispiel einen Übergang, als das Universum 60 Prozent seiner heutigen Größe hatte. Zuvor hatte sich die Expansion des Raums verlangsamt, doch zu der Zeit nahm sie wieder Fahrt auf. Die Ergebnisse passen zum Lambda-CDM-Modell, laut dem in dieser Phase der kosmischen Entwicklung der Druck der Dunklen Energie nach außen Oberhand über die Gravitation der Materie gewann.

Ein weiterer entscheidender Teil des kosmologischen Modells ist die Geometrie der Raumzeit. Die Inflationstheorie sagt ein relativ flaches Universum voraus. Einige Analysen der Hintergrundstrahlung legen eine leichte Krümmung nahe. Mit Hilfe der eBOSS-Karten konnten wir die Genauigkeit im Vergleich zu früheren Beobachtungen um das Zehnfache verbessern. Wir fanden keine Hinweise auf eine Krümmung, was das Modell der Inflation stützt.

Wir prüften zudem kosmologische Hypothesen, indem wir untersuchten, wie schnell sich Strukturen bildeten, das heißt Galaxienhaufen und Filamente. Rotverschiebungen lassen auf die relative Geschwindigkeit der Galaxien in Bezug auf uns als Beobachtende schließen – aber nicht auf die Ursache der Bewegung. Der größte Teil der Rotverschiebung entsteht durch die Expansion des Kosmos, in deren Verlauf alle Objekte tendenziell voneinander wegstreben; teilweise wird sie hingegen auch durch Strukturbildung hervorgerufen. Wenn sich Galaxien zu Haufen sammeln und von Voids entfernen, ändern sich ihre Geschwindigkeiten und damit ihre Rotverschiebung.

Keine großen Überraschungen, aber eine kleine Unstimmigkeit

Solchermaßen beeinflusste Geschwindigkeiten zeigen sich durch Verzerrungen im so genannten Rotverschiebungsraum, bei dem die Koordinaten einer Galaxie gegen die Rotverschiebung aufgetragen werden. Hierbei vergleicht man die Muster entlang der Sichtachse mit denen quer dazu. Anhand der Stärke der Verzerrungen erhält man Aufschluss über die Geschwindigkeit, mit der eine Struktur wächst. Mit unseren Daten haben wir diese Rate mit hoher Genauigkeit berechnet, und das Ergebnis passt zu den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie. Frühere Messungen, die sich auf andere Methoden stützten, lieferten noch um etwa zehn Prozent niedrigere Werte.

Insgesamt gibt es bei unseren Untersuchungen keine Hinweise auf Fehler im kosmologischen Standardmodell: weder Überraschungen beim Strukturwachstum noch bei der Dunklen Energie oder der Geometrie der Raumzeit. Eine Diskrepanz können wir jedoch bestätigen, nämlich die bereits erwähnte zwischen einerseits der Expansionsgeschwindigkeit auf Basis von Daten aus dem lokalen Universum und andererseits der, die sich aus dem kosmischen Mikrowellenhintergrund ableiten lässt. Letzterer liefert zum Beispiel eine Expansionsrate von $67,28 \pm 0,61$ Kilometern pro Sekunde pro Megaparsec (ein astronomisches Entfer-

nungsmaß), während Messungen von Supernovae in unserer direkten Umgebung einen um ein Zehntel höheren Wert nahelegen. Unsere BAO-Messungen passen zu einem Expansionstempo von etwa 67 Kilometern pro Sekunde pro Megaparsec – sowohl in Kombination mit den Daten des Mikrowellenhintergrunds als auch für sich allein genommen. Der Unterschied zur Rate, die man erhält, wenn man nur das nahe Universum betrachtet, bringt die Grundannahmen des kosmologischen Modells ins Wanken. Es könnte immer noch ein Problem mit einer oder mehreren der Messungen geben, aber es ist genauso gut möglich, dass wir das Modell für die frühe Expansion des Alls und den mitbewegten Schallhorizont überarbeiten müssen. Vielleicht braucht es zur Erklärung eine neue Art von Teilchen, Feld oder Wechselwirkung.

Unterdessen geht das SDSS-Projekt weiter und produziert neue Karten. Die bisherigen Erfolge haben diverse Arbeitsgruppen in der Planung noch größerer Himmeldurchmusterungen bestärkt. Ein solches Projekt ist das Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI). Dazu gehört ein mit 5000 Glasfasern bestückter Spektrograf beim Mayall-Teleskop am Kitt Peak National Observatory in Arizona. Dessen Hauptspiegel hat einen etwa doppelt so großen Durchmesser wie der des Sloan-Teleskops. Statt von Menschen wird jedes der 5000 Kabel von einem speziellen Roboter in Position gebracht. Das Ziel bei DESI: eine

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



YURIY MAZUR / STOCK.ADOBE.COM

Kartierung von Galaxien, die zehnmal so umfangreich ist wie die des SDSS.

Hinzu kommt etwa die Satellitenmission Euclid von der Europäischen Weltraumorganisation. Nach dem für 2022 geplanten Start soll sie ebenfalls die Rotverschiebung von Galaxien durchmustern. Die Sicht aus dem Weltall wird nicht von der Erdatmosphäre behindert, was einen guten Blick auf höhere Rotverschiebungen – also größere Entfernungen – gestattet als vom Erdboden aus. Euclid wird Rotverschiebungen von zirka 25 Millionen Galaxien registrieren. Zusätzlich zu DESI und Euclid, an deren Entwicklung wir selbst beteiligt sind, gibt es Pläne für entsprechende Spektrografen und Messkampagnen an Teleskopen der Zehn-Meter-Klasse. Die so entstandenen Verzeichnisse werden die Menschheit beim Verständnis des Universums hoffentlich einen großen Schritt weiterbringen. ◀



MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!

**STERNE UND
WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2022

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung: Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen zeigen den Saturn im Sommer, eine Sternentstehungsregion in der Großen Magellanschen Wolke, FAST (das »Auge des Himmels«), die Milchstraße im Radiowellenbereich, den Käfernebel, die erste Aufnahme eines Schwarzen Lochs und weitere Himmelsregionen und -objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/aktion/hue

E-Mail: service@spektrum.de



ALGORITHMEN UMBAU DER MATHEMATIK MIT COMPUTERUNTERSTÜTZUNG

Lange zeigten sich Fachleute skeptisch gegenüber maschinellen Beweisassistenten. Doch nun hat ein Rechner eine bedeutende Arbeit geprüft, die den Weg zu einer vereinheitlichten Mathematik ebnen soll.

► Peter Scholze möchte einen Großteil der modernen Mathematik erneuern, ausgehend von einem ihrer Grundpfeiler. Jetzt wurde das Kernstück seiner Idee – ein entscheidender Beweis – von einer ungewöhnlichen Instanz bestätigt: einem Computer.

Die meisten Mathematikerinnen und Mathematiker bezweifeln, dass Maschinen die kreativen Aspekte ihres Berufs in absehbarer Zeit ersetzen werden. Dennoch deutet vieles darauf hin, dass moderne Technologien künftig eine zunehmend wichtige Rolle in der Forschung spielen könnten. Das neueste Ergebnis unterstützt diese Vermutung.

2019 präsentierte der renommierte Zahlentheoretiker Scholze seinen ehrgeizigen Plan, den er gemeinsam mit seinem Kollegen Dustin Clausen von der Universität Kopenhagen entwickelte, in einer Vortragsreihe an seiner Heimatuniversität Bonn. Die beiden Forscher taufte ihr Projekt »kondensierte Mathematik«. Es verspricht neue Erkenntnisse und Verbindungen zwischen den verschiedensten mathematischen Bereichen, von der Geometrie bis zur Zahlentheorie.

Das erregte schnell das Interesse ihrer Kolleginnen und Kollegen, denn Scholze gilt als einer der hellsten Sterne des Fachs und ist für seine revolutionären Konzepte bekannt. Wird ihre Vision verwirklicht, könnte die Art und Weise, wie die Disziplin gelehrt wird, in 50 Jahren völlig anders aussehen als heute, urteilt die Algebraikerin Emily Riehl von der Johns Hopkins University in Baltimore, Maryland.

Bis jetzt beruhte ein Großteil des ehrgeizigen Projekts auf einem Be-

weis, der so kompliziert war, dass selbst Scholze und Clausen nicht sicher sein konnten, ob er korrekt war. Doch Anfang Juni 2021 gab Ersterer bekannt, der Kern der Überlegung sei nun erfolgreich mit Hilfe einer speziellen Software geprüft worden.

Mathematiker benutzen schon lange Computer, um aufwändige Berechnungen durchzuführen oder komplexe Formeln zu manipulieren. In einigen Fällen haben sie sogar wichtige Beweise produziert, indem sie die Rechner riesige Mengen an sich wiederholender Arbeit erledigen ließen. Das wohl berühmteste Beispiel stammt aus den 1970er Jahren, als Kenneth Appel und Wolfgang Haken mit Hilfe eines Algorithmus' bewiesen, dass sich jede Landkarte mit nur vier verschiedenen Farben färben lässt, ohne zwei benachbarte Länder gleich zu kolorieren.

Lücken füllen

Beweisassistenten gehen noch einen Schritt weiter. Der Benutzer übergibt dem System Aussagen, basierend auf einfacheren Inhalten, die der Maschine bereits bekannt sind. Das Programm gibt anschließend an, ob die Tatsache gemäß seines aktuellen Wissens wahr oder falsch ist. Kann es keine eindeutige Antwort liefern, muss man weitere Details eingeben. Die Software zwingt einen Benutzer also, die Logik seiner Argumente stringent darzulegen. Dadurch vervollständigt man häufig simple Schritte, die ursprünglich bewusst oder unbewusst übersprungen wurden.

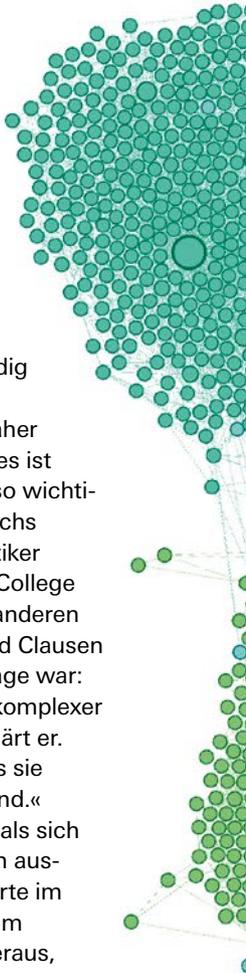
Sobald man die aufwändige Aufgabe vollbracht hat, die mathematischen Konzepte in einen Beweisassistenten

einzufließen, generiert das Programm daraus eine Art Bibliothek. Auf ihr können die andere Forscherinnen und Forscher aufbauen, um Inhalte auf höherer Ebene zu definieren. Mit der Software lassen sich dann Beweise prüfen, die sich für Menschen als zu zeitaufwändig oder schwierig darstellen.

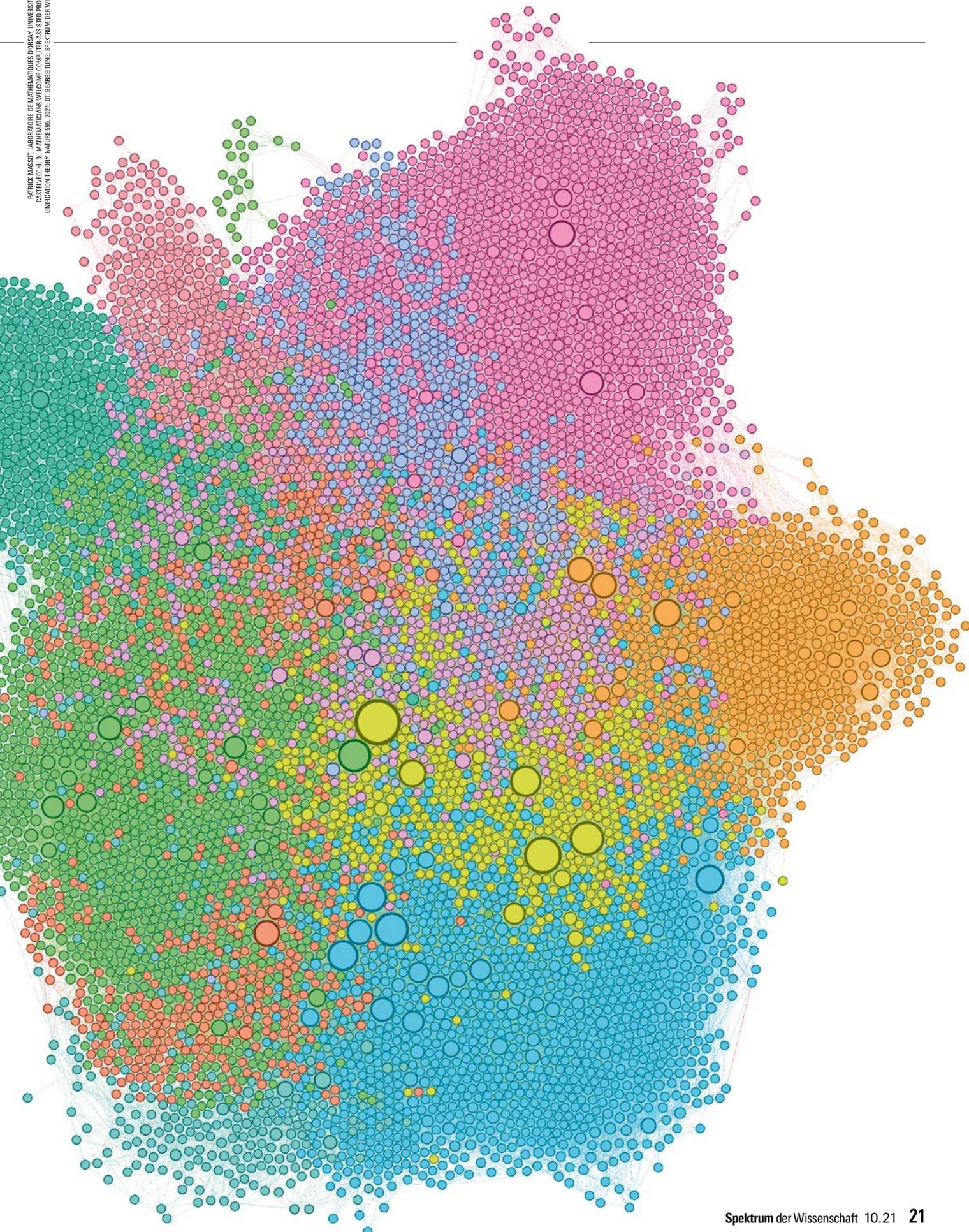
Die Algorithmen haben daher schon lange ihre Fans. Aber es ist das erste Mal, dass sie eine so wichtige Rolle an der Spitze des Fachs spielen, so der Zahlentheoretiker Kevin Buzzard vom Imperial College London, der zusammen mit anderen das Ergebnis von Scholze und Clausen überprüft hat. »Die große Frage war: Können die Assistenten mit komplexer Mathematik umgehen?«, erklärt er. »Wir haben nun gezeigt, dass sie durchaus dazu in der Lage sind.«

Das geschah viel rascher, als sich selbst die größten Optimisten ausgemalt hatten. Scholze forderte im Dezember 2020 Fachleute zum Thema Beweisassistenten heraus, das Kernstück seiner Arbeit zu prüfen.

KOMPLEXE AUSGABE Um eine mathematische Aussage zu prüfen, geben Benutzer die Inhalte in einen Beweisassistenten ein. Die Ausgabe entspricht einem komplexen Netzwerk, in diesem Fall stellt es das Ergebnis von Scholze und Clausen dar. Die Aussagen wurden dabei farblich kodiert und in die verschiedenen Teilgebiete gruppiert, zu denen sie gehören.



FRATELLO MASSIMO, LABORATOIRE DE MATHÉMATIQUES DOBRZY, UNIVERSITÉ PARIS SUD;
CASTELVECCHI D., MATHEMATIENS WILCOXME COMPUTE-ASSISTED PROF IN GRAND
UNIFICATION THEORY NATURE 595, 2021, DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Schnell bildete sich eine Gruppe Freiwilliger unter der Leitung von Johan Commelin, einem Mathematiker an der Universität Freiburg. Und schon am 5. Juni – weniger als sechs Monate später – verkündete Scholze auf Buzzards Blog, der Hauptteil des Experiments sei gelungen. »Ich finde es absolut verrückt, dass interaktive Beweisassistenten jetzt auf dem Niveau sind, innerhalb einer überschaubaren Zeitspanne schwierige Grundlagenforschung formal zu verifizieren«, schrieb er.

Der entscheidende Punkt der kondensierten Mathematik, so Scholze und Clausen, ist eine Umformulierung der Topologie, einer der Grundpfeiler des Fachs. Denn viele der untersuchten Objekte, etwa Oberflächen oder manche Datensätze, besitzen eine Topologie: eine Art Struktur, die bestimmt, welche Teile eines Objekts nahe beieinander liegen und welche nicht. Sie liefert damit eine Vorstellung von der zu Grunde liegenden Form – wenn auch auf andere Weise als die vertraute Geometrie, die es beispielsweise ermöglicht, genaue Abstände zu bestimmen. In der Topologie ist man blind gegenüber Veränderungen, die ein Objekt nicht zerreißen. Unter anderem ist ein Dreieck topologisch äquivalent zu jeder weiteren Form mit drei Ecken (sogar zu einem Kreis), aber nicht zu einer Geraden.

Die Topologie spielt nicht nur in der Geometrie, sondern auch in der Funktionalanalysis eine entscheidende Rolle. Funktionen (etwa Wellenfunktionen, die für die Quantenmechanik grundlegend sind) entspringen meist Räumen mit einer unendlichen Anzahl von Dimensionen. Das abstrakte Konzept hilft dann dabei, die Objekte darin genauer zu untersuchen. Die Topologie ist auch wichtig für gewisse Zahlensysteme, die so genannten p -adischen Zahlen, die eine exotische, »fraktale« Topologie besitzen.

2018 begannen Scholze und Clausen zu erkennen, dass die konventionelle topologische Herangehensweise zu Unvereinbarkeiten zwischen der Geometrie, Funktionalanalysis und den p -adischen Zahlen führte. Sie vermuteten, eine alternative Grundlage könnte

die Probleme überbrücken. Denn viele Ergebnisse dieser Bereiche haben erstaunlicherweise Analogien in den jeweils anderen – selbst wenn sie sich mit völlig unterschiedlichen Konzepten beschäftigen. Sobald man die Topologie auf »richtige« Weise definiert, entpuppen sich die Verbindungen zwischen ihnen als Instanzen derselben kondensierten Mathematik. »Es ist eine Art große Vereinheitlichung der drei Felder«, sagt Clausen.

Zusammen mit Scholze hat er verkündet, auf diese Weise einfachere, »kondensierte« Beweise und völlig neue Theoreme für mehrere tief greifende geometrische Tatsachen gefunden zu haben. Veröffentlicht haben sie diese aber noch nicht.

Die erstaunlichste Leistung

Denn die Sache hatte bisher einen Haken: Um zu zeigen, dass die Geometrie in das vereinheitlichte Bild passt, mussten die Forscher ein extrem kompliziertes Theorem über die Menge der reellen Zahlen beweisen. Scholze arbeitete unermüdlich daran, bis er es schließlich geschafft hatte. »Es war die erstaunlichste mathematische Leistung, die ich je gesehen habe«, erinnert sich Clausen. Doch der Beweis war so komplex, dass Scholze befürchtete, er könnte Lücken enthalten, die das ganze Unternehmen ungültig machen.

Daher bat er seinen befreundeten Kollegen Buzzard um Hilfe, einen Experten für den Beweisassistenten »Lean«. Über mehrere Jahre hatte sich Buzzard mit Kolleginnen und Kollegen bemüht, die gesamten mathematischen Inhalte für das Grundstudium am Imperial College London in Lean zu codieren. Er hatte auch angefangen, fortgeschrittenere Zusammenhänge in das System einzupflegen, einschließlich des Konzepts der perfektoiden Räume, für das Scholze 2018 die Fields-Medaille erhielt.

Als Commelin von der Herausforderung erfuhr, übernahm er die Führung bei dem Versuch, den undurchsichtigen Beweis der Zahlentheoretiker mit Lean zu überprüfen. Zusammen mit Scholze taufte er das Projekt »Liquid Tensor Experiment«, als Hommage an

die Progressive-Rock-Band Liquid Tension Experiment.

So entstand eine extrem engagierte Online-Kollaboration von Fachleuten aus der Mathematik und Informatik. Anfang Juni 2021 hatte das Team das Herzstück von Scholzes Beweis – der Teil, der ihm am meisten Sorgen bereitete – vollständig in Lean übersetzt. Und es klappte: Die Software verifizierte diesen Abschnitt.

Die codierte Version des Beweises umfasst Zehntausende von Zeilen und ist damit 100-mal länger als die Originalversion, so Commelin. »Wenn man sich nur den Lean-Code anschaut, wird man es sehr schwer haben, die dazugehörigen Gedanken zu verstehen.« Wie die Forscher allerdings betonen, hat ihnen der Aufwand, die Inhalte auf dem Computer zum Laufen zu bringen, dabei geholfen, die Arbeit besser nachzuvollziehen.

Trotz der beeindruckenden Fortschritte ist kaum jemand der Meinung, Maschinen würden bald Mathematiker ersetzen. Beweisassistenten können weder ein Lehrbuch lesen, noch einschätzen, ob eine Aussage interessant oder tief greifend ist, und sie brauchen ständigen Input von Menschen, so Buzzard. Dennoch könnten Computer bald in der Lage sein, auf die Konsequenzen bereits bekannter Fakten hinzuweisen, die man vielleicht übersehen hat, fügt er hinzu.

Scholze zeigte sich zwar überrascht darüber, wie weit man mit den Programmen gehen kann, aber er sei sich nicht sicher, ob sie weiterhin eine große Rolle in seiner Forschung spielen werden. »Momentan kann ich nicht erkennen, wie sie mir bei meiner kreativen Arbeit helfen könnten.«

Davide Castelvecchi ist Autor bei »Nature«.

QUELLE

Scholze, P.: Lectures on condensed mathematics. Uni Bonn, 2019
www.math.uni-bonn.de/people/scholze/Condensed.pdf

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 595, S. 18–19, 2021

ZELLBIOLOGIE

ZWEI ARTEN DER MITOCHONDRIENTEILUNG

Die »Kraftwerke der Zelle« können sich auf verschiedene Weise aufspalten: durch mittiges oder durch peripheres Einschnüren. Letzteres dient wohl dazu, beschädigtes Zellmaterial zu entsorgen.

► In den Wirren der Französischen Revolution wurde der renommierte Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) durch die Guillotine hingerichtet. Kurz zuvor hatte er entscheidende Erkenntnisse darüber gewonnen, woher atmende biologische Organismen ihre Energie bekommen. Er erkannte, dass die Atmung »einfach eine langsame Verbrennung

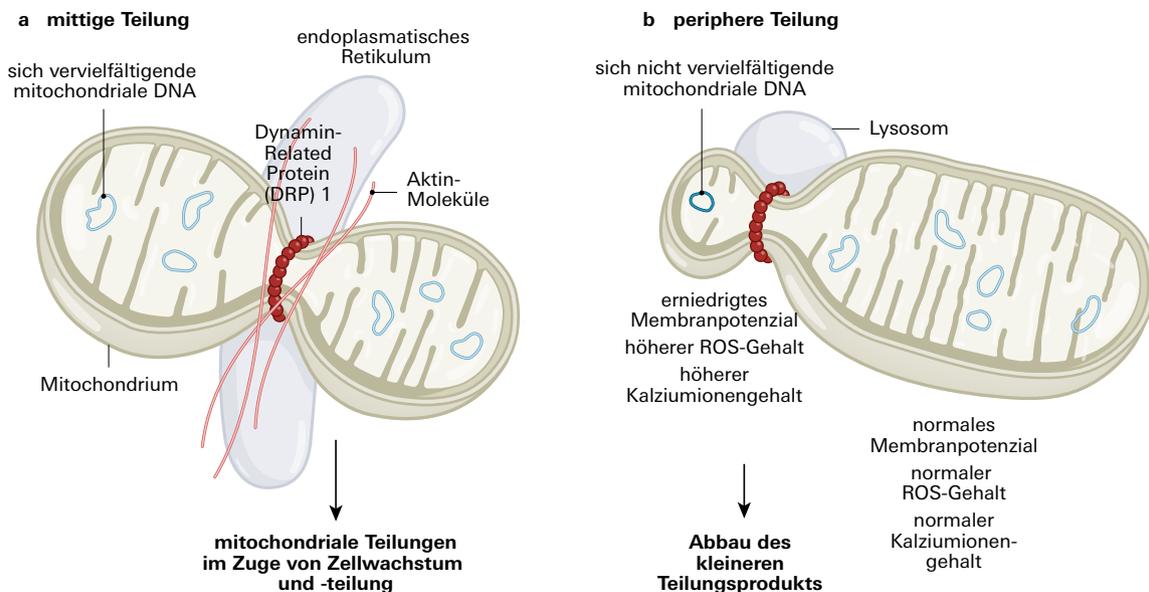
von Kohlenstoff und Wasserstoff ist und ähnlich funktioniert wie eine Lampe oder eine brennende Kerze; und unter diesem Gesichtspunkt sind atmende Tiere gewissermaßen Brennkörper, die sich selbst verfeuern«.

Um die Mitte des 20. Jahrhunderts wurde klar: Der von Lavoisier postulierte Brennvorgang findet in den Mitochondrien statt. Diese Zellstruktu-

ren gelten deshalb als Kraftwerke der Zellen. Die Verbrennung, die in ihnen abläuft, schädigt Moleküle und Molekülverbände, weshalb sich in aktiven Mitochondrien nach und nach Defekte anhäufen. Zu den schwerwiegendsten zählen Mutationen des mitochondrialen Erbguts, das sich im Innern der Organellen befindet. Mit Hilfe eines Abbauprozesses namens »Mitopha-

Symmetrisch oder asymmetrisch?

Mitochondrien in Säugerzellen können sich auf zweierlei Weise spalten. a) Mittige Teilungen begleiten typischerweise das normale Zellwachstum. Das Mitochondrium schnürt sich dabei zentral ein – ein Prozess, der mit dem Protein DRP1, mit Aktin-Eiweißen und dem endoplasmatischen Retikulum in Zusammenhang steht. Mitochondrien, die sich so teilen, zeigen keine Anzeichen einer Störung und besitzen mitochondriale DNA, die sich vervielfältigt. b) Periphere Teilungen sind an beschädigten Mitochondrien zu beobachten. Eine Rolle hierbei spielt wieder das Protein DRP1, aber ebenso das Lysosom. Das Mitochondrium schnürt sich nahe einem seiner Enden ein, wobei auf beiden Seiten der Teilungsstelle unterschiedliche Membranpotenziale vorherrschen und sich die Gehalte an reaktionsfreudigen Sauerstoffspezies (ROS) und Kalziumionen (Ca^{2+}) unterscheiden. Dem kleineren der beiden entstehenden Teile fehlt häufig DNA, die sich repliziert; oft enthält er sogar überhaupt keine mitochondriale DNA.



NATURE: CHAKRABARTI, B.; HIGGS, H.N. – REVOLUTIONARY VIEW OF TWO WAYS TO SPLIT A MITOCHONDRION. NATURE 553, 2021, FIG. 1. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

gie« entfernt die Zelle geschädigte Mitochondrien, indem sie sie zerlegt und teilweise recycelt, was wichtig ist, um die Zellfunktionen dauerhaft aufrechtzuerhalten. Störungen dieses Mechanismus sind an der Entstehung von Parkinson und anderen neurodegenerativen Erkrankungen beteiligt – besonders, wenn sie langlebige Neuronen betreffen.

Im Zuge der Mitophagie können sich Mitochondrien aufspalten und damit ihre geschädigten Bestandteile von den intakten trennen. Daneben teilen sich Mitochondrien aber auch während des Zellwachstums und der Zellvermehrung, um immer in ausreichender Menge vorhanden zu sein. Diese Teilungen sind im Unterschied zu solchen infolge eines Schadens ein gutes Zeichen für die Zellgesundheit.

Es liegt nahe, anzunehmen, dass Teilungsvorgänge im Rahmen der Mitophagie anders gesteuert werden als solche infolge von Zellwachstum. Hinweise hierauf gibt es schon lange, doch bisher fehlte ein eindeutiger Beleg dafür. Für die weitaus meisten Mitochondrienspaltungen ist das Eiweiß DRP1 (Dynamamin-Related Protein 1) erforderlich. Es lässt sich auf diverse Weise aktivieren: durch Veränderungen seiner Molekülstruktur; durch Interaktion mit mitochondrialen DRP1-Rezeptormolekülen; durch Wechselwirkung mit Aktin-Strukturproteinen des Zellskeletts oder mit mitochondrialen Cardiolipin-Molekülen; sowie durch Kontakt mit anderen Zellorganellen wie dem endoplasmatischen Retikulum, den Lysosomen und dem Golgi-Apparat. Bisher war unklar, ob all diese Faktoren an einem einzigen Teilungsmechanismus mitwirken oder an mehreren verschiedenen.

Die Physikerin Tatjana Kleele von der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Schweiz) und ihr Team haben nun Mitochondrienspaltungen mittels hochauflösender Mikroskopie untersucht und festgestellt, dass es zwei verschiedene Arten gibt. Bei der »mittigen Teilung« schnürt sich das Mitochondrium zentral ein, bei der »peripheren Teilung« erfolgt die Einschnürung nahe einem Ende des Organells (siehe »Symmetrisch oder

asymmetrisch?«). Die beiden Teilungsarten können ähnlich oft auftreten, etwa in Bindegewebszellen von Affen, aber auch in deutlich unterschiedlicher Häufigkeit – beispielsweise in Herzmuskelzellen neugeborener Mäuse, bei denen die mittige Teilung dominiert.

Die beiden Varianten unterscheiden sich in einigen wesentlichen Punkten voneinander. So findet die mittige Teilung in gesund wirkenden Mitochondrien statt, die keine Anomalien aufweisen. Periphere Abtrennungen hingegen sind dann zu beobachten, wenn an einem Ende des Mitochondriums ein reduziertes Membranpotenzial sowie eine erhöhte Konzentration von reaktionsfreudigen Sauerstoffspezies (ROS) vorliegen, im Rest des Organells aber nicht. Dem kleineren der beiden Produkte, die aus einer peripheren Teilung hervorgehen, fehlen oft DNA-Moleküle, die sich vervielfältigen – was klar auf eine Funktionsstörung hindeutet.

Zelluläre Müllentsorgung

Laut diesen Ergebnissen finden periphere Teilungen statt, wenn Mitochondrien beschädigt sind. Sie gehen der Mitophagie voraus und erlauben es, das geschädigte Material zu separieren, um es dem Abbau zuzuführen. Tatsächlich nimmt ihre Häufigkeit zu, wenn Zellen unter Stress geraten, während zugleich die Mitophagie-Aktivität wächst, wie die Forscherinnen und Forscher berichten. Im Gegensatz dazu steigt die Zahl mittiger Teilungen, sobald das Zellwachstum und die Zellteilung ange-regt werden.

Beide Teilungsarten gehen mit einer Anhäufung von DRP1 einher, unterscheiden sich aber hinsichtlich anderer Komponenten. Bei den mittigen haben die Mitochondrien oft Kontakt zum endoplasmatischen Retikulum (ER); und es gibt einen Zusammenhang zu Verknüpfungsreaktionen von Aktin-Molekülen durch ER-gebundene Proteine. Bei peripheren dagegen besteht Kontakt zu Lysosomen.

Die neuen Befunde erlauben künftig detailliertere Untersuchungen dazu, welche Faktoren unter welchen Umständen einen Einfluss auf solche

Teilungen nehmen. Und sie machen deutlich, wie wenig wir diese Mechanismen bisher verstanden haben – vor allem ihre frühen Prozesse.

Die Arbeit wirft auch Fragen auf. Wie kommt es dazu, dass bei peripheren Teilungen ein höherer Kalzium- und ROS-Gehalt sowie ein vermindertes Membranpotenzial komplett auf den kleineren Teil des Mitochondriums beschränkt bleiben? Dieses Phänomen ist bereits in älteren Studien dokumentiert worden. Ein möglicher Mechanismus könnte sein, dass sich die innere Mitochondrienmembran früher als die äußere teilt (die Organellen besitzen eine doppelte Hülle). Das muss aber nicht zutreffen, denn wie andere Forscher beobachtet haben, können Einstülpungen der inneren Membran, die so genannten Cristae, unterschiedliche elektrische Potenzialdifferenzen aufweisen, selbst wenn sie eng benachbart sind. Der erhöhte Kalziumgehalt im kleineren Fragment des sich teilenden Mitochondriums wiederum könnte mit Kalziumtransfers aus Lysosomen zusammenhängen.

Zudem ist nicht gesagt, dass es in Säugerzellen bloß zwei Arten mitochondrialer Teilungen gibt. Angesichts zahlreicher Regulationsmechanismen scheint es möglich, dass Variationen der beschriebenen Mechanismen existieren oder noch weitere komplett andere Wege.

Henry N. Higgs arbeitet als Professor für Biomedizin und Zellbiologie an der Geisel School of Medicine at Dartmouth, New Hampshire. **Rajarshi Chakrabarti** ist ebenda wissenschaftlicher Mitarbeiter.

QUELLEN

Kleele, T. et al.: Distinct fission signatures predict mitochondrial degradation or biogenesis. *Nature* 593, 2021

Kraus, F. et al.: Function and regulation of the divisome for mitochondrial fission. *Nature* 590, 2021

Martinez-Vicente, M.: Neuronal mitophagy in neurodegenerative diseases. *Frontiers in Molecular Neuroscience* 10, 2017

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 593, S. 346–347, 2021

ERDE & UMWELT

NEUER IPCC-KLIMABERICHT: KEINE PROGNOSE, SONDERN GEGENWARTSBESCHREIBUNG

Der neue Sachstandsbericht zum Klimawandel behandelt erstmals auch regionale und lokale Effekte, die bereits eintreten. Er markiert die wohl letzte Gelegenheit für ein wirksames Umsteuern. Ein Kommentar.

Die Politik, die ja in letzter Konsequenz immer lokal ist, konnte mit den Sachstandsberichten des Weltklimarats IPCC bisher augenscheinlich wenig anfangen. Zu abstrakt, zu unspezifisch, zu weit weg schien der Klimawandel, und damit als Thema zwar interessant, aber im Alltag auf der Prioritätenliste eher unten angesiedelt. Der nun veröffentlichte erste Teil des sechsten Berichts sollte derlei Ignoranz endgültig obsolet machen. Denn er beschreibt nicht mehr nur, wie sich der menschengemachte Klimawandel irgendwann in ferner Zukunft auswirken dürfte – er beleuchtet dessen direkte Folgen, die sich heute vor der eigenen Haustür erleben lassen, etwa in Form von Extremwetter.

Erstmals enthält die Analyse der – mit rein physikalischen Effekten befassten – Arbeitsgruppe I konkrete

Aussagen über lokale und regionale Effekte, insbesondere ein eigenes Kapitel über Extremwetter. Darin steht, was sich in den zurückliegenden Jahren bereits abgezeichnet hat: Wetterereignisse wie Hitze oder Starkregen, die immense Schäden verursachen, häufen sich mit steigenden Temperaturen überproportional an. Speziell einige jüngere Hitzeereignisse wären ohne menschlichen Einfluss äußerst unwahrscheinlich gewesen: Sie hätten sich in einer Welt ohne anthropogenen Klimawandel mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht ereignet, heißt es in dem Bericht.

Wo genügend Daten für solche Analysen vorliegen, lässt sich jetzt schon sagen, dass der Klimawandel auch Starkregenereignisse intensiviert, unter anderem in Mitteleuropa. Wer in Flussnähe wohnt, wird sich spätestens

jetzt Gedanken über mögliche böse Überraschungen machen müssen. Bei den Überschwemmungen beispielsweise, die Deutschland im Juli 2021 heimsuchten, traf es keineswegs nur ausgewiesene Gefahrenzonen.

Das ist der zentrale Unterschied des aktuellen Berichts im Vergleich zu den früheren Fassungen: Er beschreibt nicht die Zukunft des Planeten, sondern dessen Gegenwart. Was auch damit zusammenhängt, dass viele klimatische Veränderungen schneller eintreten als vermutet. So wird die weltweite Durchschnittstemperatur wohl bereits zehn Jahre früher als bisher erwartet um 1,5 Grad über dem vorindustriellen Mittelwert liegen.

Es sind vor allem die lokalen und regionalen Extremereignisse, die sich im Zuge der weltweiten Erwärmung häufen – und damit zur Alltagsrealität werden. Und das auf Jahrzehnte,

ENTFESSELTE NATURGEWALT Die Flutkatastrophe 2021 forderte in Deutschland mindestens 180 Todesopfer. Die Ruhr schwoll auf zwei Kilometer Breite an.



Jahrhunderte, Jahrtausende hinaus. Obendrein nimmt neben der Zahl auch die Intensität solcher Ereignisse zu, denn noch haben sich längst nicht alle Konsequenzen des bisher ausgestoßenen Kohlenstoffdioxids manifestiert – von dem CO₂, das wir künftig emittieren werden, ganz zu schweigen. Anders ausgedrückt: Was wir bisher erlebt haben, war erst der Anfang.

Die Chance, glimpflich davonzukommen, schwindet

Das große Problem dabei ist zum einen, dass wirksame Klimaschutzmaßnahmen immer drastischer und teurer werden, je länger man sie hinauszögert, und damit immer gravierendere Eingriffe in die Gesellschaft verlangen. Zum anderen muss man die direkten Folgen des Klimawandels mit immer größerem Aufwand abfangen. Es droht eine Eskalationsspirale: Wegen der teurer werdenden Schäden durch Extremwetterereignisse schwinden die Ressourcen, um die Ursache des Problems abzustellen. Nach einer Katastrophe ist es üblicherweise zweitrangig, ob der Wiederaufbau nachhaltig geschieht; der Fokus liegt eher auf schneller und damit emissionsstarker Schadensbeseitigung. Zum bereits emittierten Treibhausgas kommt dadurch weiteres hinzu, also zusätzliche Erwärmung. Das wiederum führt zu mehr Extremwetterereignissen und steigenden Anpassungs-

kosten, die ihrerseits den Klimaschutz noch stärker verzögern. Derartige Ressourcenkonflikte könnten schon bald unsere Fähigkeit erodieren, mit den klimatischen Veränderungen umzugehen – sowohl hinsichtlich ihrer Ursachen als auch ihrer Folgen. Bereits jetzt ist das Pariser Klimaziel, die 1,5-Grad-Schwelle nicht zu überschreiten, selbst mit drastischen Maßnahmen nahezu außer Reichweite, wie der Bericht belegt. Bei einer globalen Erwärmung oberhalb dieses Werts dürfte der Klimawandel erst richtig anfangen, weh zu tun.

Damit dokumentiert die Arbeitsgruppe I, wie die internationale Klimapolitik an der physikalischen Wirklichkeit scheitert. Vollmundige Versprechungen und Rechentricks haben nicht verhindern können, dass die globalen CO₂-Emissionen seit dem ersten IPCC-Bericht von 1990 um mehr als die Hälfte gestiegen sind. Das große Problem sind offensichtlich nicht die, die den Klimawandel unverblümt leugnen, sondern jene, die vorgeben, ihn zu bekämpfen – und sich dann im Wesentlichen auf symbolische Maßnahmen beschränken.

Der Bericht des IPCC führt mit den Abschnitten über regionale Folgen und Extremwetterereignisse nun auch der Lokalpolitik vor Augen, welche Konsequenzen die weltweite Erwärmung hat. Der Klimawandel geschieht weder weit weg noch in ferner Zu-

kunft, sondern hier und jetzt. Die Wetterereignisse der zurückliegenden Jahre unterstreichen das – nicht zuletzt in Form des diesjährigen Sommers der Extreme, der sogar Fachleute erschreckte: Hitzewellen, Extremtemperaturen, Dürren, Waldbrände und Überschwemmungen in Süd- und Mitteleuropa, Russland, der Türkei, den USA, Kanada, China, Indien, Myanmar, Nigeria und Sudan. Die zentrale Botschaft des IPCC-Berichts lautet, dass der Klimawandel nun endgültig so kleinräumig fassbar ist, wie es den Denkmustern der Menschen entspricht. Es wäre ein guter Anlass für einen globalen Neustart in Richtung Nachhaltigkeit. Und es ist vermutlich die letzte Gelegenheit, den Klimawandel auf ein Ausmaß zu beschränken, das – laut den 195 unterzeichnenden Staaten des Übereinkommens von Paris – noch als tolerierbar gilt.

Lars Fischer ist Chemiker und Redakteur bei »Spektrum.de«.

QUELLEN

AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/, 2021

Fischer, E.M., Sippel, S., Knutti, R.: Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change* 11, 2021

IPCC Working Group I Interactive Atlas. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>, 2021

BIOCHEMIE NEUARTIGE PROTEINBRÜCKE

Disulfidbrücken stabilisieren als molekulare Querverstrebungen die räumliche Struktur von Proteinen – das ist bekannt. Wie sich jetzt aber zeigte, gibt es noch völlig andere solche kovalenten Proteinvernetzungen.

Bei Proteinen bestimmt die Reihenfolge ihrer Bausteine, der Aminosäuren, maßgeblich Form und Funktion. Doch auch nachdem sich die Aminosäurekette gebildet hat, kann sie noch chemisch verändert werden, etwa in Form von Querverbindungen zwischen bestimmten Amino-

säuren. Besonders häufig kommen Disulfidbrücken vor, bei denen zwei Schwefelatome durch eine kovalente Bindung miteinander verknüpft sind. Göttinger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler stießen nun auf eine ganz andere und bislang unbekannt Art von Proteinvernetzung.

Um eine Disulfidbrücke zu bilden, müssen zwei Zysteine – die in der Aminosäurekette durchaus weit voneinander entfernt stehen können – räumlich eng zusammenkommen. Als die Forschenden um Kai Tittmann von der Universität Göttingen das Enzym Transaldolase aus dem Gonorrhoe-

NACH DER NATUR

Erreger *Neisseria gonorrhoeae* untersuchten, fiel ihnen auf, dass sich die Aktivität des nach der biochemischen Isolation nahezu inaktiven Enzyms durch Reduktionsmittel, die üblicherweise Disulfidbindungen aufbrechen, wiederherstellen ließ. Transaldolase enthält mehrere Zysteine. Zwei davon, so vermutete das Team, könnten durch ihren Brückenschlag das Enzym inaktivieren.

Daraufhin ersetzten die Chemiker jedes der Zysteinmoleküle separat durch eine andere Aminosäure – doch nur eine einzige der so hergestellten Mutanten widerstand der Inaktivierung. Wenn tatsächlich eine Disulfidbrücke das Enzym stilllegte, dann gäbe es aber prinzipiell zwei Möglichkeiten, das zu verhindern – nämlich durch den Austausch von jeweils einem der beiden beteiligten Brückenpfeiler. Was war hier los?

Röntgenstrukturanalyse

Eine hochauflösende Strukturanalyse mittels Röntgenkristallografie sollte das Rätsel aufklären. Sie offenbarte eine Brücke zwischen Stickstoff (N) über Sauerstoff (O) zum Schwefel (S) durch eine kovalente Bindung zwischen Lysin und Zystein (siehe »Lysin-Zystein-Brücke«). Das Sauerstoffatom in dieser N-O-S-Brücke stammt dabei nicht von den beteiligten Aminosäuren, denn weder die Aminogruppe (NH_2) des Lysins noch die Thiolgruppe (SH) des Zysteins enthalten ein solches. Vielmehr liefert vermutlich ein Sauerstoffmolekül (O_2) in unmittelbarer Nähe das nötige Brückenglied, wie die Kristallstrukturanalyse der reduzierten Form des Proteins (dem die Querverbindung fehlt) nahelegte.

Die Entdeckung einer N-O-S-Brücke in Proteinen ist bemerkenswert, weil in der organischen Chemie so gut wie keine Reaktion bekannt ist, die eine solche funktionelle Gruppe erzeugt. Eine N-O-Bindung zu bilden, erfordert stark oxidierende Bedingungen, die dann aber auch den Schwefel in der N-O-S-Brücke in eine höhere Oxidationsstufe überführen sollten. Außerdem droht der N-O-S-Gruppe eine so genannte Disproportionierung – eine Reaktion, bei der ein Molekül gleich-

AUFTAKTAUSSTELLUNG DER
HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU
BERLIN IM HUMBOLDT LABOR
JETZT OFFEN

EINTRITT FREI
INFOS & TICKETS UNTER
HUMBOLDTFORUM.ORG

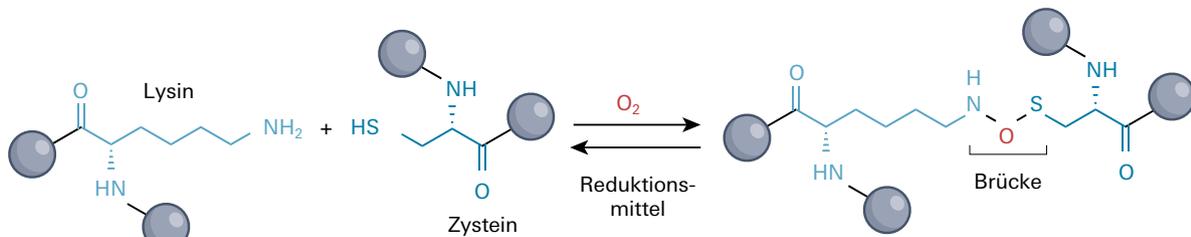
BERLINER SCHLOSS
SCHLOSSPLATZ
10178 BERLIN



HUMBOLDT
FORUM

Lysin-Zystein-Brücke

Göttinger Chemiker entdeckten in dem bakteriellen Enzym Transaldolase eine molekulare Querverbindung, bei der die Aminogruppe (NH₂) von Lysin mit der Thiolgruppe (SH) von Zystein über ein Sauerstoffatom kovalent verknüpft ist. Wie die Wissenschaftler vermuten, entsteht diese N-O-S-Brücke durch eine Reaktion mit molekularem Sauerstoff (O₂). Die chemisch leicht angreifbare Brücke wird wahrscheinlich durch die umgebende Proteinstruktur stabilisiert.



NATURE FASS, D., SEMENOV, S. N., PROKHOROV, I. M. UNCOMMON TYPE OF PROTEIN CROSSLINK DISCOVERED. NATURE 593, FEB. 1, 2021. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

zeitig als Oxidations- und Reduktionsmittel wirkt. Andererseits könnte die passende räumliche Lage einer Thiol- und einer Aminogruppe im Protein zusammen mit Sauerstoff die Oxidation zur N-O-S-Brücke ermöglichen, während die umgebende Proteinstruktur die Vernetzung stabilisiert und gleichzeitig die weitere Oxidation des Schwefels verhindert.

Als Reaktionsmechanismus schlagen die Autoren vor, dass sich Hydroxylgruppen (OH) sowohl an das Schwefelatom des Zysteins als auch an die Aminogruppe des Lysins anhängen. Doch wichtige Details bleiben hier noch unklar. Insbesondere wissen wir nicht, wie das Sauerstoffmolekül aktiviert wird, damit es an der Reaktion teilnehmen kann. Da allerdings an vielen chemischen Reaktionen mit molekularem Sauerstoff freie Radikale beteiligt sind, wäre das für die Erzeugung einer N-O-S-Brücke ebenfalls zu erwarten.

Eine weitere Frage ist, wie die Querverstrebung die enzymatische Aktivität beeinflusst. Die katalytische Stelle in der vernetzten Transaldolase unterscheidet sich räumlich nur geringfügig von der unvernetzten Version des Enzyms. Wie eine N-O-S-Brücke die Katalyse hemmt, bleibt also rätselhaft. Die Göttinger Forscher hatten außerdem beobachtet, dass die

Transaldolase mit Brücke hitzeresistenter ist als ohne. Das überrascht kaum, da das vernetzte Enzym einem geringen Risiko unterliegt, durch Konformationsschwankungen entfaltet und damit deaktiviert zu werden. Andererseits könnte eine gewisse räumliche Flexibilität für die Katalyse erforderlich sein, was wiederum die Querverbindung erschwert.

Leichter Bruch

In einem Punkt unterscheiden sich Disulfid- von N-O-S-Brücken fundamental: Die Bildung von Disulfidbindungen verläuft chemisch reversibel; Organismen können sie also im Austausch mit anderen thiolhaltigen Molekülen immer wieder brechen und neu formen. Im Gegensatz dazu schlägt die N-O-S-Bindung einen anderen chemischen Weg ein als die Spaltung. Erstere bedarf molekularen Sauerstoff, der aber nicht freigesetzt wird, wenn die Brücke bricht.

Außerdem ist es thermodynamisch schwierig, eine N-O-S-Brücke zu schlagen; doch um so leichter bricht sie. N-O-S-Querverbindungen könnten sich daher entwickelt haben, weil ihr Bruch Enzyme aktiviert, ohne dabei Disulfide zu zerstören. Es bleibt somit zu klären, wann es sich für Lebewesen lohnt, auf N-O-S- statt auf Disulfidbrücken zu setzen.

Diese Entdeckung einer neuen Proteinverknüpfung weist über das konkrete untersuchte Enzym und die N-O-S-Vernetzung selbst hinaus. Außerordentlich hochauflösende Röntgenaufnahmen haben hier Variationen in der Proteinfaltung offenbart, die zuvor im Rauschen der Daten untergegangen wären. Wer weiß, welche unerwarteten chemischen Gruppen noch in manch anderen Strukturanalysen verborgen liegen. Die Göttinger Studie wird Strukturbiologen dazu inspirieren, nach bisher übersehenen Auffälligkeiten in ihren Elektrendichtekarten von Biomolekülen zu suchen.

Deborah Fass ist Professorin für Strukturbiologie am Weizmann-Institut für Wissenschaften in Rehovot (Israel). **Sergey N. Semenov** leitet am selben Institut eine Arbeitsgruppe für Systemchemie und Katalyse.

QUELLE

Wensien, M. et al.: A lysine-cysteine redox switch with an NOS bridge regulates enzyme function. *Nature* 593, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 593, S. 343–344, 2021



SPRINGERS EINWÜRFE WENN WIRKSTOFFE NICHT MEHR WIRKEN

Beim Kampf gegen resistente Bakterien gerät die Medizin ins Hintertreffen, weil wirtschaftliche Anreize ausbleiben.

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

» [spektrum.de/artikel/1913905](https://www.spektrum.de/artikel/1913905)

Sobald man nicht mehr der Jüngste ist, drehen sich Unterhaltungen im Bekanntenkreis immer öfter um Gesundheitsfragen. In letzter Zeit hörte ich von zwei Fällen, wo auf Routineoperationen ernste Komplikationen folgten, weil die Patienten im Krankenhaus mit resistenten Keimen angesteckt wurden – und es erforderte jeweils längeres Herumprobieren, bis endlich ein Gegenmittel seine Wirkung tat.

Die imposante Erfolgsgeschichte der wissenschaftlichen Medizin ist eng mit der Entdeckung von Penicillin und anderen Bakterienkillern verbunden. Doch nun warnt ein Editorial der Fachzeitschrift »Science« vor dem drohenden Ende einer Epoche: Die »post-antibiotische Ära« stehe vor der Tür. Mit diesem Alarmschrei wollen Jennie H. Kwon und William G. Powderly von der Washington University School of Medicine zu verstärkten Anstrengungen im Kampf gegen resistente Keime motivieren (*Science* 373, S. 471, 2021).

Man stelle sich eine Zukunft vor, schreiben die Experten für Infektionskrankheiten, in der chirurgische Eingriffe oder eine Chemotherapie mangels zuverlässiger Antibiotika als allzu gefährlich abgesagt würden. Am Horizont zeichnet sich eine Resistenz-Pandemie ab, deren Opferzahl für den Zeitraum ab 2050 auf jährlich bis zu zehn Millionen Tote prognostiziert wird.

Leider herrscht in diesem Fall ein krasses Missverhältnis zwischen dem Ausmaß des Problems und dem marktwirtschaftlichen Interesse, es zu beheben. Antibiotika dürfen nicht viel kosten, aber zugleich erfordert der Kampf gegen die Resistenz innovative Ansätze der Pharmaforschung mit ungewissem Erfolg. Das kommt teuer. Es dauert üblicherweise 10 bis 15 Jahre, ein neues Antibiotikum zu entdecken und bis zur Marktreife zu entwickeln. Und wer weiß, wie schnell ein neuer resistenter Bakterienstamm das Medikament schon wieder obsolet macht? Große Pharmakonzerne gehen nur ausnahmsweise dieses

schlecht belohnte Risiko ein; meist sind es kleine Unternehmen, die sich darauf einlassen, doch denen droht unterwegs finanziell die Luft auszugehen.

Und selbst wenn die Entwicklung eines marktreifen Bakterizids endlich gelungen ist, garantiert das noch lange nicht den wirtschaftlichen Erfolg. Ein Beispiel: Die US-Pharmafirma Paratek hat mehr als 20 Jahre gebraucht, um – immer wieder von Insolvenz bedroht – 2019 endlich ihr Breitband-Antibiotikum Omadacyclin auf den Markt zu bringen. Dann wäre sie fast unter den Werbungskosten in die Knie gegangen, und schließlich musste sie mit dem Paradoxon fertig werden, dass ein allzu großer Markterfolg durch medizinische Regularien bestraft wird. Diese sollen einen allzu breiten Einsatz des neuen Antibiotikums verhindern, der in kurzer Zeit erst recht wieder die nächste Resistenz züchten würde.

Im geschilderten Fall wäre die Firma an den vielen Hindernissen wohl endgültig gescheitert, hätte sie nicht – zumindest für die nächsten Jahre – als Deus ex machina ein Auftrag einer US-Behörde gerettet, welche das Medikament als Schutz gegen potenzielle Biowaffen orderte (*Nature* 584, S. 338–341, 2020).

Ein leuchtendes Gegenbeispiel zur Antibiotika-Misere bietet die Entstehung neuartiger Impfstoffe gegen die Coronavirus-Pandemie: Da wirkten die universitäre Grundlagenforschung und die großzügige Förderung kleiner Biotechnikfirmen optimal mit der staatlich abgefederten Marktmacht großer Pharmakonzerne zusammen, um in sensationell kurzer Zeit ans Ziel zu kommen.

Ähnliche Anstrengungen erfordert auch die drohende Resistenz-Pandemie. Es gilt, eine öffentlich-private Partnerschaft von Forschung, Pharmaindustrie und Gesundheitswesen zu zimmern – sonst gehen der Medizin die Medikamente aus.

BIODIVERSITÄT DER SCHUTZ BIOLOGISCHER VIELFALT – EIN MANIFEST

Wir Menschen greifen massiv in die Ökosysteme der Erde ein. Die Zerstörung der Umwelt löste nicht nur eine weltweite Klimakrise aus, sondern verursachte auch ein Artensterben in nie da gewesener Geschwindigkeit. Doch es ist noch nicht zu spät, die ökologische Vielfalt unseres Planeten zu retten.

SEBASTIAN WIEDLING, UFZ



Josef Settele ist Agrarbiologe am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Halle sowie Professor für Ökologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Zusammen mit Sandra Díaz und Eduardo Brondizio leitete er die Arbeit am 2019 veröffentlichten Globalen Zustandsbericht des Weltbiodiversitätsrats IPBES. Als Mitglied des Sachverständigenrats für Umweltfragen berät er die deutsche Bundesregierung.

» spektrum.de/artikel/1913884

AUF EINEN BLICK AUF DEM WEG ZUR NACHHALTIGKEIT

- 1** Das Überleben der Menschheit hängt von der Natur und deren Ökosystemleistungen ab. Diese werden jedoch durch Umweltzerstörungen zunehmend beeinträchtigt.
- 2** Vor allem der dramatische Rückgang der Artenvielfalt bedroht weltweit die Leistungsfähigkeit der Ökosysteme.
- 3** Klimakrise, Artensterben und Pandemien bedingen sich gegenseitig und müssen daher gemeinsam angegangen werden. Das erfordert einen gesellschaftlichen Wandel, der Nachhaltigkeit zur Norm erhebt.

SCHWERPUNKT ARTENVIELFALT

Der Schutz biologischer Vielfalt – ein Manifest

Josef Settele

Bestäuber im Sinkflug

Sara Diana Leonhardt

Seite 36

Abgesang der Frösche

Gunther Köhler

Seite 40

Als ich im Sommer 2020 mein Buch »Die Triple-Krise« schrieb, las ich nach Jahren wieder eine zwischen 2008 und 2010 zusammen mit Kollegen verfasste Arbeit zu den Risiken des Artensterbens. Auf Basis der uns bekannten wissenschaftlichen Erkenntnisse hatten wir mehrere denkbare Entwicklungen skizziert. Darunter befand sich ein Szenario für mögliche Pandemien inklusive deren Folgen. Ich erschrak, wie nah wir in unseren Worst-Case-Annahmen der Realität von heute kamen: Damals konnten wir uns zehntausende Tote, überfüllte Krankenhäuser, zur Isolation gezwungene Menschen und weitgehend zusammengebrochene Volkswirtschaften vorstellen.

Genau das erlebt die Welt heute: Ein Virus, das den Sprung zum Menschen schaffte, bringt auf allen Kontinenten Tod, Schmerz und Trauer sowie schwere ökonomische und soziale Verwerfungen. Keine Regierung kann behaupten, nichts von solchen Risiken gewusst zu haben. Covid-19 ist längst nicht die erste tödliche Infektionskrankheit, die über Tiere zu uns gelangte. Malaria, Aids, Ebola, Mers, Sars sowie diverse Formen der Grippe zählen ebenfalls zu den Zoonosen. Die Pufferzonen zwischen Natur und Mensch verschwinden zunehmend, weil Wälder abgeholzt und in Weiden, Äcker, Plantagen oder Bauland verwandelt werden.

Auch in Zeiten der Pandemie vermag sich die Natur kaum zu erholen. So belegen die Brandrodungen im Amazonasgebiet, dass die Plünderung des Blauen Planeten weitergeht. In artenreichen Regionen richten Viren, die innerhalb einer Tierart vorkommen, kaum Schaden an, da die Wirtstiere nur vereinzelt auftreten. Durch die Vernichtung von Lebensräumen nimmt die Populationsdichte einiger weniger Spezies stark zu, was die Ausbreitung wie auch die Mutation von Krankheitserregern fördert. Generell gilt: Wenn wir in die noch übrig gebliebenen Naturräume vordringen, erhöht sich der Kontakt und damit das Risiko der Virenübertragung vom Tier zum Menschen.

Klimakrise, Artensterben und Pandemien

Ähnliche Gefahren drohen, wenn es uns nicht gelingt, uns von der Massentierhaltung zu verabschieden. Die ökonomischen und gesellschaftlichen Konsequenzen der Corona-Pandemie offenbaren, wie teuer die Vernachlässigung des Vorsorgeprinzips werden kann. Bei der Zerstörung der Umwelt werden solche Folgen bislang überhaupt nicht bedacht – und das Bewusstsein, dass Klimakrise, Artensterben und Pandemien zusammenhängen, dringt nur langsam durch. Immerhin erkannte EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen im Februar 2021: »Wenn wir nicht dringend handeln, um unsere Natur zu schützen, stehen wir vielleicht schon am Anfang einer Ära von Pandemien.«

Trotz der gravierenden Bedrohungen und den bislang ausbleibenden Fortschritten zu ihrer Bewältigung bin ich davon überzeugt, dass wir immer noch die zukünftige Entwicklung in die richtige Bahn lenken können. Dafür müssen wir allerdings endlich anfangen, die grundlegenden wirtschaftlichen, sozialen und technologischen Ursachen für die Naturzerstörungen anzugehen.

Im Oktober 2021 sowie im April/Mai 2022 wollen die knapp 200 Vertragsstaaten der Biodiversitätskonvention auf ihrer 15. Konferenz (Conference of the Parties to the Conven-

tion on Biological Diversity oder kurz COP 15 CBD) im chinesischen Kunming einen globalen Rahmen zum Schutz der biologischen Vielfalt beschließen. Der Weltbiodiversitätsrat IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) dokumentierte im Mai 2019 in seinem Globalen Zustandsbericht, wie menschliches Handeln in den vergangenen 50 Jahren die biologische Vielfalt verringert und die Ökosysteme beeinträchtigt hat. Diese erste umfassende Bewertung der Natur stellt klar, wie der Mensch in wahrhaft planetarischem Ausmaß die Umwelt verändert, obwohl er vollkommen von ihr abhängt. Der Bericht zeigt aber auch Wege aus der Biodiversitätskrise auf, indem er systematisch indigenes und lokales Wissen mit neuesten Erkenntnissen der Natur- und Sozialwissenschaften kombiniert. Die zentralen Schlussfolgerungen daraus bilden die Basis dieses Manifests.

Die lebenswichtigen Beiträge der Natur für die Menschheit werden auch als Ökosystemleistungen bezeichnet und betreffen praktisch alle Aspekte der menschlichen Existenz. Doch die Politik der Regierungen sowie die Mechanismen des Markts spiegeln ihren vollen Wert in der Regel nicht wider. Daher wundert es kaum, dass in den letzten Jahrzehnten die Fähigkeit der Natur, Umweltprozesse vorteilhaft zu regulieren – wie bei der Luft- und Wasserqualität, dem Aufbau gesunder Böden, der Bestäubung von Nutzpflanzen oder dem Küstenschutz – weltweit abgenommen hat (siehe »Entwicklung der Ökosystemleistungen«).

So bedeutet der Verlust von Küstenlebensräumen für 100 bis 300 Millionen in solchen Regionen lebenden Menschen ein erhöhtes Risiko für Überschwemmungen und Sturmschäden. Der dramatische Einbruch in der Biomasse bestäubender Insekten betrifft mehr als 75 Prozent der Nahrungsmittelpflanzen und gefährdet weltweit Ernteerträge von geschätzt jährlich 200 bis 500 Milliarden Euro (siehe »Spektrum« Mai 2019, S. 12 sowie »Bestäuber im Sinkflug« ab S. 36). Ebenfalls eingebüßt haben wir die nichtmateriellen Beiträge der Natur zur menschlichen Lebensqualität wie Bildung und Inspiration, physische und psychologische Erfahrungen oder die Unterstützung von Heimatverbundenheit.

Es gibt allerdings Ausnahmen vom Abwärtstrend. So stieg der Ertrag von Nutzholz und Fisch seit 1970 um fast 50 Prozent, und der Wert der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion hat sich ungefähr verdreifacht auf etwa 2,2 Billionen Euro im Jahr 2016. Doch selbst innerhalb der materiellen Beiträge zeigen einige Indikatoren einen starken Rückgang, wie die Einbrüche bei den Meeresfischbeständen belegen. Hinzu kommt die ungleiche Verteilung gesteigerter Produktion: Obwohl die Unterernährung in den letzten zwei Jahrzehnten weltweit zurückging, sind immer noch mehr als 800 Millionen Menschen von chronischem Nahrungsmangel betroffen.

Der Rückgang fast aller Ökosystemleistungen hängt direkt mit der globalen Zunahme der Konsumgüterproduktion zusammen. Wir forcieren die Ausbeutung der Natur, um mit der von uns kreierten steigenden Nachfrage Schritt zu halten. Seit 1970 hat sich die Weltbevölkerung verdoppelt, der Pro-Kopf-Konsum wuchs um 45 Prozent, der Wert der globalen Wirtschaftsaktivität vervierfachte und der Welthandel verzehnfachte sich – gleichzeitig stieg die Entnahme von Lebewesen aus der Natur um über 200 Prozent.

Entwicklung der Ökosystemleistungen

Ökosystemleistungen bilden das Potenzial der Natur, kontinuierlich und nachhaltig die Lebensqualität des Menschen zu fördern. Sie lassen sich in regulierende, unterstützende und kulturelle Leistungen untergliedern, wobei mitunter mehrere Indikatoren innerhalb einer Ökosystemleistung zum Wohlergehen des Menschen beitragen. In nahezu allen Bereichen zeigt sich weltweit ein Abwärtstrend.

	Ökosystemleistungen	globaler 50-Jahres-Trend			ausgewählte Indikatoren
regulierend	Schaffung und Erhalt von Lebensräumen	↓			Verfügbarkeit an geeigneten Lebensräumen Unversehrtheit der Biodiversität
	Bestäubung und Samenausbreitung	↓			Vielfalt der Bestäuber Ausdehnung von naturnahen Elementen in Agrarlandschaften
	Verbesserung der Luftqualität		↘		Entgiftung von Luftschadstoffen
	Regulierung des Klimas		↘		Aufnahme von Treibhausgasen
	Abpufferung der Meeresversauerung			→	Aufnahme von Kohlenstoff
	Regulierung der Süßwassermenge		↘		Verteilung von Oberflächen- und Grundwasser
	Verbesserung der Qualität von Süß- und Küstengewässern		↘		Filterung von Wasser
	Aufbau, Schutz und Entgiftung von Böden		↘		Bindung von organischem Kohlenstoff
	Eindämmen von Gefahren und Extremereignissen		↘		Abpufferung von Gefahren
	Bekämpfung von Schädlingen und Krankheiten	↓		↘	Ausdehnung von naturnahen Elementen in Agrarlandschaften Vielfalt geeigneter Wirte
materiell und unterstützend	Energie			↗	Ausdehnung der landwirtschaftlichen Nutzfläche für Bioenergie Ausdehnung der forstwirtschaftlichen Nutzfläche
	Nahrungs- und Futtermittel	↓		↗	Ausdehnung der landwirtschaftlichen Nutzfläche für Nahrungs- und Futtermittel Häufigkeit mariner Fischbestände
	natürliche Rohstoffe			↗	Ausdehnung der landwirtschaftlichen Nutzfläche für Materialproduktion Ausdehnung der forstwirtschaftlichen Nutzfläche
	medizinische, biochemische und genetische Ressourcen	↓		↗	Anteil der medizinisch nutzbaren Arten phylogenetische Vielfalt
kulturell	Bildung und Inspiration	↓			Anzahl der Menschen mit Nähe zur Natur Vielfalt des Lebens als Lernanreiz
	physische und psychologische Erfahrungen		↘		Ausdehnung naturnaher und traditioneller Landschaften und Meeresgebiete
	Heimatverbundenheit		↘		Kontinuität des Landschaftsempfindens
	Optionen für die Zukunft	↓			Überlebenswahrscheinlichkeit von Arten phylogenetische Vielfalt

← schlechter besser →

Der Mensch hat drei Viertel der Landoberfläche direkt verändert; zwei Drittel der Meeresoberfläche leiden zunehmend unter den Auswirkungen menschlicher Aktivität; etwa 85 Prozent der Feuchtgebiete gingen seit dem Jahr 1700 verloren; und 77 Prozent der über 1000 Kilometer langen Flüsse fließen nicht mehr frei von der Quelle zum Meer. Küstenökosysteme weisen einige der größten und schnellsten Einbrüche der letzten Zeit auf. Der Bestand an lebenden Korallen hat sich in den vergangenen 150 Jahren fast halbiert. Korallenriffe werden wohl noch in diesem Jahrhundert weitgehend verschwinden, wenn der Klimawandel nicht stark eingedämmt wird (siehe »Spektrum« September 2021, S. 42).

Die globale Biomasse der Vegetation hat sich im Lauf der Menschheitsgeschichte halbiert; Wälder erstrecken sich heute lediglich auf etwa zwei Drittel ihrer vorindustriellen Fläche. Obwohl sich der Waldverlust seit den 1980er Jahren verlangsamt hat, schreitet er in vielen tropischen Regionen immer noch sehr schnell voran, und die zunehmende Ausdünnung der Wälder in den gemäßigten und nördlichen Zonen geht einher mit einer Fragmentierung sowie Funktionsverlusten wie bei der Kohlenstoffspeicherung.

Rund eine Million der insgesamt auf acht Millionen geschätzten Tier- und Pflanzenarten ist in naher Zukunft vom Aussterben bedroht, falls wir nicht gegensteuern. Wildtierpopulationen an Wasser und Land nehmen generell weiter ab. Seit dem Aussterben der Megafauna im späten Pleistozän sank die globale Biomasse wild lebender Säugetiere um mehr als drei Viertel – und beträgt heute weniger als zehn Prozent der Biomasse, welche die menschliche Bevölkerung ausmacht. Bei den für unsere Ernährung relevanten großen Raubfischen ging in den letzten 100 Jahren die Biomasse um zwei Drittel zurück. Aber auch andere Wirbeltiere wie Reptil-

en, Vögel und vor allem Amphibien verschwinden (siehe »Aussterberate seit 1500« sowie »Abgesang der Frösche« ab S. 40).

Selbst unsere Nutzpflanzensorten und Haustierrassen bleiben nicht verschont. Bedrohte wild lebende Verwandte von Nutzpflanzen stehen meist nicht unter Schutz. Das gefährdet die genetische Variabilität, auf der die langfristige Widerstandsfähigkeit der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion gegenüber Umweltstress beruht.

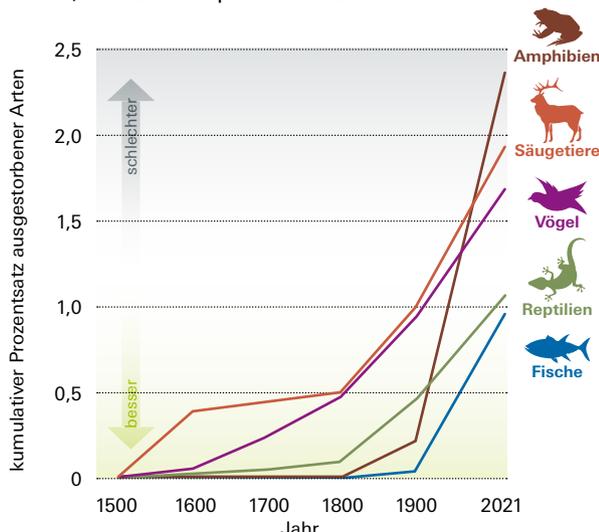
Bei den unmittelbaren Ursachen für den Wandel im Gefüge des Lebens stehen an erster Stelle die veränderte Nutzung und Ausbeutung von Land und Meer durch Ackerbau und Viehzucht beziehungsweise Fischerei. Als immer bedeutender werdender Treiber für die Zerstörung der Biosphäre entwickelt sich zunehmend der menschengemachte Klimawandel. Steigende Temperaturen und veränderte Niederschlagsmuster bringen viele Spezies an den Rand ihrer biologischen Toleranz und zwingen sie dazu, sich überaus schnell anzupassen oder die angestammten Lebensräume zu verlassen – oder eben auszusterben. Umgekehrt büßen aus dem Gleichgewicht geratene Ökosysteme ihre Fähigkeit ein, Treibhausgase aufzunehmen und zu binden, Wetterextreme zu überstehen und für uns wichtige Ökosystemleistungen wie frisches Trinkwasser und saubere Luft zu erbringen. Obwohl somit die Klimakrise und der Biodiversitätsverlust eng verwoben sind, wurden sie wissenschaftlich und politisch bislang meist noch getrennt voneinander diskutiert. Da aber auf beiden Gebieten die Situation extrem angespannt ist, erfordern Klima- und Artenschutz nach jahrzehntelangem Zögern jetzt schnelle und konzertierte Reaktionen sowie gesellschaftliche Transformationen.

Bestimmend für die beobachteten direkten Triebkräfte sind letztlich aber indirekte Einflüsse durch Demografie, Wirtschaft und Politik, die sich wechselseitig beeinflussen. So vermögen umweltpolitische Maßnahmen ökologische Beeinträchtigungen durch ökonomische Fehlentscheidungen abzumildern. Andererseits schaden etliche wirtschaftliche Anreize wie Subventionen für Fischerei, Landwirtschaft, Viehzucht, Forstwirtschaft, Bergbau oder Energieerzeugung der Natur. Zusätzlich können sich Naturschutzmaßnahmen mitunter ungleich auswirken. Beispielsweise unterstützen manche reiche Länder den Umweltschutz in ärmeren finanziell, um sich damit globale Vorteile wie den Erhalt bestimmter Arten oder der Speicherung von Kohlenstoff zu erkaufen – was allerdings mitunter zu Lasten von Wirtschaft und Gesellschaft vor Ort geschieht.

Angesichts all dieser Trends verwundert es kaum, dass internationale Vereinbarungen zum Schutz der Biodiversität nicht eingehalten werden. 2010 hatten die Vertragsstaaten der Biodiversitätskonvention 20 Ziele verabschiedet, die es bis 2020 zu erreichen galt und auf Grund des Tagungsorts Nagoya in der japanischen Präfektur Aichi als »Aichi-Ziele« firmieren. Hierzu zählen die Bekämpfung des Verlusts der Artenvielfalt, die Förderung nachhaltiger Nutzung, der Schutz von Ökosystemen samt ihrer genetischen Vielfalt, der Artenschutz sowie die Förderung von Ökosystemleistungen. Fast alle dieser Ziele wurden bis Fristende verfehlt. Diese Bestrebungen hängen wiederum entweder direkt oder über komplexe Wechselwirkungen mit den von den Vereinten Nationen festgelegten Zielen für nachhaltige Entwicklung wie der Bekämpfung von Armut und Hunger oder der Förderung von Gesundheit und Bildung zusammen. So gibt es wichtige Rückkopplungen zwischen der Um-

Aussterberate seit 1500

Seit dem 16. Jahrhundert sterben immer mehr Wirbeltiergruppen aus. Der negative Trend beschleunigte sich vor allem im letzten Jahrhundert. Unter natürlichen Bedingungen wäre mit einer jährlichen Aussterberate von 0,1 bis 2 Arten pro Million zu rechnen.



welt und der Entwicklung von Wirtschaft und Infrastruktur. Die Bedrohung der Natur gefährdet damit das Erreichen dieser Entwicklungsziele.

Viele der Biodiversitäts- und Nachhaltigkeitsziele sollten in Bezug auf Nahrung, Energie, Klima und Wasser sowohl lokal als auch global zu schaffen sein. Die Komplexität der Herausforderungen erfordert einen integrativen Ansatz, mit dem sich einerseits der Klimawandel abschwächen, der Verlust der biologischen Vielfalt aufhalten und die Ernährung der Weltbevölkerung sicherstellen lässt, und der andererseits Wechselwirkungen, Synergien und Zielkonflikte im Auge behält.

Selbst eine mäßige Klimaerwärmung wird wahrscheinlich die biologische Vielfalt beeinträchtigen und die damit verbundenen Vorteile für den Menschen gefährden. Um den durch die Treibhausgasemissionen ausgelösten globalen Temperaturanstieg auf 1,5 Grad Celsius bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu begrenzen (Pariser Klimaziel), bedarf es großflächiger Klimaschutzmaßnahmen, wobei auch Aufforstung oder der Anbau von Bioenergiepflanzen vorgeschlagen werden. Letztere könnten sich allerdings negativ auf Biodiversität, Nahrungsmittelproduktion und Wasserbedarf auswirken. Gleichzeitig erfordert die Sicherstellung einer ausreichenden Ernährung aller Menschen eine Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzfläche, was abermals die Biodiversität beeinträchtigt und die Klimakrise weiter zuspitzt.

Wandel zur Nachhaltigkeit

Diese Zielkonflikte kann man allerdings mit einer Reihe möglicher Maßnahmen umgehen. Der Klimawandel ließe sich abmildern, wenn wir uns auf die Wiederherstellung von Ökosystemen mit hohem Kohlenstoffgehalt konzentrieren und dabei gleichzeitig übermäßigen Verbrauch und Abfall reduzieren statt auf massive Monokulturplantagen zur Erzeugung von Bioenergie zu setzen. In ähnlicher Weise könnten wir den wachsenden Nahrungsmittelbedarf decken, ohne den ökologischen Fußabdruck der Landwirtschaft zu vergrößern, indem wir die Erträge nachhaltig steigern, unsere Ernährungsgewohnheiten ändern und die Verschwendung von Lebensmitteln vermeiden.

Die Umkehrung des fortschreitenden Niedergangs der Natur bei gleichzeitiger Bekämpfung sozialer Ungleichheit erfordert einen grundsätzlichen Wandel. Dabei muss über alle Systeme hinweg die Nachhaltigkeit von der altruistischen Ausnahme zur Norm erklärt werden. Für eine solche Transformation zum Wohl der Allgemeinheit müssen wir Widerstände von Besitzstandswahrern überwinden. Bereits bestehende Umweltvorschriften gilt es, besser um- und durchzusetzen; schädliche politische Regelungen wie Subventionen für Energienutzung oder Ressourcenabbau müssen reformiert oder ganz abgeschafft werden.

Für die Politik bedeutet das, die verschiedenen Ebenen miteinander zu vernetzen. Dafür müssen etwa in Deutschland auf Bundesebene alle Ministerien an einem Strang ziehen – das Verkehrsministerium genauso wie das Finanzministerium, so dass nicht mehr nur das Umweltministerium als einziges die Fahnen für eine vorsorgende Politik hochhält. Noch wichtiger ist eine internationale Zusammenarbeit, die vermeidet, dass wir über den globalisierten Handel den Artenverlust

exportieren, und die beim Güterimport im Auge behält, was wir damit in den Herkunftsländern anrichten können. Ein maßgeblicher Schalthebel für die Europäische Union stellt die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) dar, die bislang bei der Landnutzung immer noch auf Flächensubventionen statt auf gemeinwohlorientiertes nachhaltiges Wirtschaften setzt.

Eine solche Transformation lässt sich beschleunigen, indem Regierungen und Gesellschaft gemeinsam an zentralen Punkten ansetzen – selbst wenn manche Veränderungen auf Widerstand stoßen dürften. Dafür eignen sich insbesondere fünf Hebel:

1. Anreize für Umweltverantwortung,
2. bereichsübergreifende Zusammenarbeit,
3. Vorsorgemaßnahmen, um Naturschäden zu vermeiden, abzumildern und zu beheben,
4. Förderung widerstandsfähiger sozialer und ökologischer Systeme sowie
5. Stärkung von Umweltgesetzen.

Ein überproportional großer Effekt lässt sich außerdem erzielen, wenn man sich auf folgende acht Ansatzpunkte konzentriert:

1. die Vision einer guten Lebensqualität, die ohne ständig wachsenden materiellen Verbrauch auskommt,
2. die Senkung von Gesamtverbrauch und Verschwendung,
3. neue soziale Normen für Nachhaltigkeit und verantwortungsvollen Konsum,
4. die Bekämpfung von sozialen und geschlechtlichen Ungleichheiten, welche die Fähigkeit zur Nachhaltigkeit untergraben,
5. eine gerechte Aufteilung der Vorteile, die sich aus der Nutzung der Natur ergeben,
6. die Berücksichtigung (Internalisierung) von Folgekosten der durch wirtschaftliche Aktivitäten ausgelösten Umweltschäden,
7. die Etablierung umweltfreundlicher Techniken sowie
8. die Förderung von Bildung und Wissenschaft insbesondere in Bezug auf Naturschutz und Nachhaltigkeit.

Der Verlust der biologischen Vielfalt, die Klimakrise und das Ziel einer guten Lebensqualität für alle sind eng miteinander verknüpft und müssen dringend lokal wie global angegangen werden. Die Bewahrung eines lebenserhaltenden und lebenserfüllenden Planeten für den Menschen und andere Spezies stellen somit ein und dieselbe Herausforderung dar, die nicht durch »business as usual« bewältigt werden kann. Wir verfügen jedoch über eine Vielzahl von Ansätzen und Instrumenten, um gemeinsam Nachhaltigkeit zu erreichen. Die Transformationen in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft, die notwendig sind, um diese Veränderungen rechtzeitig und in großem Umfang umzusetzen, können durch eine Reihe von gezielten Interventionen insbesondere an den Schlüsselstellen der indirekten Einflussfaktoren ausgelöst werden. Auf diese Weise ist es immer noch möglich, die Ernährung und Versorgung der Menschheit zu gewährleisten und gleichzeitig die Lebensgrundlage für uns alle wiederherzustellen und für die Zukunft zu bewahren. ◀

INSEKTENSTERBEN BESTÄUBER IM SINKFLUG

Insekten bestäuben rund 80 Prozent aller Wild- und Nutzpflanzen. Doch weltweit schwinden die Bestände der Tiere in erheblichem Ausmaß. Die Auswirkungen auf Ökosysteme und Landwirtschaft sind dramatisch.



CHRISTOPH JUSTEN, ZWIF

Sara Diana Leonhardt ist Professorin für Pflanzen-Insekten-Interaktionen an der Technischen Universität München. Ihre Forschungsgruppe untersucht biologische, ökologische, physiologische und chemische Aspekte dieser wechselseitigen Beziehung in gemäßigten und tropischen Regionen mit Fokus auf Bienen.

» spektrum.de/artikel/1913887

Im Oktober 2018 rüttelte ein kleiner Verein aus Krefeld die Öffentlichkeit förmlich über Nacht wach: Die Mitglieder hatten in der Fachzeitschrift »PLOS ONE« eine Studie veröffentlicht, nach der Insekten innerhalb der letzten 30 Jahre um bis zu 80 Prozent zurückgegangen waren. Seit 1989 hatten die Hobby-Entomologen des Vereins regelmäßig auf einer kleinen, naturbelassenen Fläche inmitten einer für heute so typischen Agrarlandschaft mit großen Feldern, ein paar Hecken und vereinzelt Wäldchen fliegende Insekten gefangen und gezählt. Während anfangs an einem Tag durchschnittlich knapp zehn Gramm der Tiere in ihren Fallen gelandet waren, waren es am Ende weniger als zwei. Über die Studie berichteten neben klassischen Medien auch renommierte Fachzeitschriften wie »Nature« oder »Science«. Politiker sowie Umweltschützer richteten anschließend mahnende Worte an die Öffentlichkeit und beriefen sich auf die Besorgnis erregenden Ergebnisse aus Krefeld.

Kritiker bemängelten allerdings, dass wichtige Fragen unbeantwortet blieben: Bedeutet der ermittelte Mengenverlust wirklich, dass Insekten weniger werden? Es könnten etwa nur einst häufige Arten zurückgehen, während es anderen besser geht. Lassen sich die Ergebnisse tatsächlich auf ganz Deutschland oder sogar darüber hinaus übertragen? Womöglich ist das Phänomen lokal begrenzt.

Doch schon ein Jahr später lieferte eine neue Studie einer Forschergruppe um Sebastian Seibold und Wolfgang Weisser von der Technischen Universität München traurige Gewissheit: Der beobachtete Trend ist an verschiedenen Standorten über ganz Deutschland zu beobachten und schließt zahlreiche Insektenarten mit ein, so das Fazit. Weitere Studien folgten und bestätigten den mitunter dramatischen Rückgang der Insekten sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern.

Dieser Befund ist deshalb so bedenklich, weil viele Ökosysteme ohne Insekten nicht funktionieren. Die Tiere dienen etwa als Nahrungsgrundlage für andere Arten, darunter Vögel oder Amphibien. Darüber hinaus bestäuben etliche Insektenarten Pflanzen und sorgen so dafür, dass diese sich vermehren. Zu den Bestäubern zählen unter anderem Schmetterlinge, Fliegen, Käfer, Wespen, Hummeln und natürlich das bekannteste Beispiel, die Bienen.

Mittlerweile ist belegt, dass fast alle bestäubenden Insekten von einem mengenmäßigen Abwärtstrend betroffen sind. Ironischerweise stellt die einzige Ausnahme jene Bienenart dar, die den meisten Menschen beim Stichwort Insektensterben als Erstes in den Sinn kommt: die Europäische Honigbiene. Selbstverständlich stehen diese Tiere vor ähnlichen Herausforderungen wie ihre Verwandten – kaum naturbelassene Landschaften, Nahrungsknappheit und Pestizide. Im Gegensatz zu den Wildbienen werden sie jedoch von Imkerinnen und Imkern im Land umsorgt, und entsprechend sind ihre Bestände kaum gefährdet.

Anders sieht es bei den wilden Exemplaren aus; das sind in Deutschland 561 bekannte Arten. Gemäß der aktuellsten Einschätzung aus dem Jahr 2011 von führenden deutschen Wildbienenexperten sind davon 293 in ihrem Bestand bedroht, das entspricht mehr als der Hälfte. Lediglich etwas mehr als ein Drittel gilt als nicht gefährdet. Sieben Prozent sind entweder schon ausgestorben oder zumindest verschollen. Die restlichen Arten befinden sich auf einer so genannten Vorwarnliste, oder es liegen nicht genügend Daten vor. Am stärksten bedroht sind wohl jene Arten, die vor allem im Spätsommer in ländlichen Gebieten fliegen, wie eine 2019 publizierte Studie einer Gruppe um Susanne Renner von der Ludwig-Maximilians-Universität München nahelegt.

Bei Schmetterlingen ist die Lage ähnlich düster. Hier gelten mehr als 40 Prozent der 189 in Deutschland vorkom-

BESTÄUBER IN AKTION

Hummeln zählen zur Gattung der Echten Bienen. Sie sind ausgezeichnete Bestäuber, da sie durch ihre lange Zunge gut in tiefe Blüten gelangen. Wie vielen anderen Insekten macht auch ihnen die Zerstörung ihres Lebensraums zu schaffen. 16 Arten gelten in Deutschland als bedroht.

AUF EINEN BLICK VORTEILHAFT DIVERSITÄT

- 1** Sowohl die Bestände als auch die Diversität von Insekten gehen in Deutschland und anderen Ländern zurück. Schuld daran sind unter anderem die industrielle Landwirtschaft und der Klimawandel.
- 2** Besonders bestäubende Insekten sind sehr wichtig für Ökosysteme, da sie die Fortpflanzung der Pflanzen sicherstellen. Durch die Befruchtung von Kulturpflanzen sind die Tiere außerdem ökonomisch wertvoll.
- 3** Etliche Studien zeigen, dass eine ausreichend hohe Bestäuberdiversität die landwirtschaftlichen Erträge steigert und die Artenvielfalt ganzer Ökosysteme erhält.

menden oder ehemals beheimateten Tagfalter als bestandsgefährdet oder als bereits ausgestorben. Nur weniger als ein Drittel ist nicht bedroht. Unter diesen Arten ist bei fast zwei Dritteln in den letzten Jahrzehnten ein kontinuierlicher Rückgang ihres Bestands zu verzeichnen. Lediglich für magere zwei Prozent wurde ein Zuwachs beobachtet. Wohlgermerkt enthalten diese Daten allenfalls einen kleinen Ausschnitt der Schmetterlingsarten. Der große Teil zählt zu den Nachtfaltern, insgesamt mehr als 3500 Spezies. Ihre Bestände wurden bisher weit weniger erforscht. In Bayern gilt schon ein Drittel der dort vorkommenden Nachtfalter als bedroht.

Kaum Schwebfliegen in der Falle

Noch schlechter ist die Situation der Schwebfliegen. Etwa die Hälfte der 463 Arten in Deutschland galten bereits im Jahr 2011 als gefährdet. 2020 erschien in der »Deutschen Entomologischen Zeitschrift« ein Artikel des Teams um Wulf Gatter. Die Entomologen hatten über 40 Jahre an der Forschungsstation Randecker Maar auf der Schwäbischen Alb Schwebfliegen, Waffenfliegen und Schlupfwespen gefangen. Im Vergleich zu der Situation zwischen 1978 und 1987 fanden sie von 2014 bis 2019 über 90 Prozent weniger Schwebfliegenarten – vor allem solche, deren Larven sich von anderen Insekten wie Blattläusen ernähren.

Im Januar 2021 publizierte die Fachzeitschrift »Proceedings of the National Academy (PNAS)« eine Spezialausgabe zum Thema Insektensterben. Sie basierte auf einem Treffen der US-amerikanischen Entomologischen Gesell-

Das Verschwinden der Insekten hat erhebliche ökologische Auswirkungen. 2006 zeigte ein Team um den Ökologen Koos Biesmeijer vom holländischen Naturalis Diversity Center, dass Wildpflanzen und Bienen in den Niederlanden und im Vereinigten Königreich gleichermaßen zurückgingen. Solch korrelativen Studien können nicht klären, ob die Tiere weniger werden, weil sie keine passenden Nahrungspflanzen finden, oder ob Pflanzen schwinden, weil die Bestäuber fehlen. Sie weisen aber darauf hin, dass Kulturwie Wildpflanzen mit bestäubenden Insekten derart eng miteinander verbunden sind, dass der Verlust der einen sich auf die anderen auswirkt.

Zudem dienen zahlreiche Insekten als Nahrung, allen voran vielen Singvögeln, aber auch anderen Insekten wie Wespen. Oder sie leisten als Larven wichtige »Dienstleistungen« für die Pflanzenwelt – etwa indem sie Schädlinge vertilgen. Schwebfliegenlarven verspeisen zum Beispiel zuhauf Blattläuse. Der Erhalt insbesondere der bestäubenden Insekten ist also unmittelbar mit dem Schutz funktionierender Ökosysteme verknüpft. Fehlen diese Tierarten, werden viele andere Lebewesen und Pflanzen ebenfalls von unserem Planeten verschwinden.

Der Diversitätsverlust hat auch unmittelbare ökonomische Folgen. Bereits 2009 ermittelte ein Team um Nicolas Gallai und Bernhard Vaissière, damals am Institut national de la recherche agronomique (INRA) in Avignon, Frankreich, dass tierische Bestäuber – Insekten, Vögel, Fledermäuse und andere Wirbeltiere – weltweit eine Leistung für Kulturpflanzen erbringen, die einem Geldwert von etwa 153 Milliarden Euro entspricht. Das sind knapp zehn Prozent des Gesamtbetrags der landwirtschaftlichen Produktion im Jahr 2005.

Manche Kulturpflanzen, wie zum Beispiel Kiwi, Wassermelone oder Kürbis, können ohne tierische Bestäuber kaum Früchte ausbilden. Andere, darunter viele Obstsorten, Gurken oder Avocado, haben nach der Bestäubung durch Tiere bis zu 90 Prozent mehr Fruchtansätze. Bei Raps, Sonnenblumen oder vielen Erdbeersorten steigt der Ertrag durch Insektenbestäubung immerhin um bis zu 40 Prozent an. Eine umfassende Liste über die Abhängigkeit verschiedener Kulturpflanzen von Bestäubern hat Alexandra-Maria Klein, heute an der Universität Freiburg, gemeinsam mit internationalen Kollegen und Kolleginnen 2006 in »Proceedings of the Royal Society B« veröffentlicht. Demnach hängen drei Viertel aller Kulturpflanzen auf der Erde mehr oder weniger stark von tierischen Bestäubern ab. Dieser Anteil macht weltweit fast ein Drittel der pflanzlichen Nahrungsmittelproduktion aus.

Auf Grundlage verschiedener Parameter wie Bestäuberabhängigkeit, jährliches Produktionsvolumen und Weltmarktpreis der jeweiligen Kulturpflanze lässt sich näherungsweise der finanzielle Beitrag schätzen, der auf das Konto der Bestäuber geht. 2013 wendeten wir dieses Berechnungsprinzip auf die Länder der Europäischen Union (EU) an. Außerdem ermittelten wir für jedes EU-Land das jeweilige Gefährdungspotenzial im Fall eines massiven Rückgangs oder gar Ausfalls der Bestäuber. Dazu betrachteten wir, welchen Anteil die bestäuberabhängigen Kulturpflanzen am Gesamtertrag ausmachen. Für Deutschland



TOMATTI026 / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

schaft in St. Louis, Missouri, bei dem zahlreiche Experten das Thema Insektensterben und die Gründe dafür beleuchtet hatten. Das kaum überraschende Fazit der Fachwelt lautete: Die Schuldigen sind die »üblichen Verdächtigen«, allen voran die intensive industrielle Landwirtschaft. Mit ihr gehen ein erheblicher Einsatz von giftigen Pestiziden und ein massiver Rückgang naturbelassener Landschaften einher. Auf den meisten Agrarflächen fehlen diejenigen Pflanzen, die den Bestäubern als Nahrungsgrundlage oder Nistplatz dienen. In Städten und Siedlungsgebieten ist die Situation meist ähnlich. Zusätzlich kommt in urbanen Regionen noch die Lichtverschmutzung hinzu, die vielen nachtaktiven Insekten wie Nachtfaltern zum Verhängnis wird. Auch der Klimawandel macht den Tieren zunehmend zu schaffen. Da Insekten besonders gut an ihren Lebensraum angepasst sind, reagieren sie sensibel auf minimale Veränderungen in ihrer Umwelt. Schätzungen zufolge könnten bei einer Temperaturerhöhung um zwei Grad rund 20 Prozent der Insekten die Hälfte ihres Lebensraums verlieren.



TIVASOV / GETTY IMAGES / ISTOCK

BEDROHTER GROSSER EISVOGEL Mit einer Flügelspannweite rund sieben Zentimetern ist der Große Eisvogel (*Limenitis populi*) einer der größten Tagfalter in Deutschland. Er bevorzugt lichte Laubwälder aus Espen oder Schwarz-Pappeln, da sich seine Raupen von den Blättern dieser Baumarten ernähren. Die Art gilt in Deutschland als stark gefährdet.

lag dieser zwischen 1991 und 2009 beispielsweise bei 13 Prozent. Der durch die Tiere erwirtschaftete Betrag summierte sich im Schnitt auf mehr als eine Milliarde Euro pro Jahr. Äpfel, verschiedene Kohlsorten und Raps gehören dabei zu denjenigen Kulturpflanzen, die hier zu Lande am meisten von den Bestäubern profitieren. Die größten ökonomischen Einbußen auf Grund eines Bestäuberschwunds müssen allerdings die südlichen EU-Länder fürchten, darunter Spanien, Italien, Frankreich und Griechenland. Dort ist man am stärksten auf die Arbeit der fleißigen Insekten angewiesen, wie unsere Berechnungen demonstrieren.

Höhere Diversität, größerer Ertrag

Zwei in den Tropen durchgeführte Studien veranschaulichen wiederum die Bedeutung der Bestäuberdiversität. Klein und zwei weitere Forscher zeigten 2003, dass ein Anstieg an Bestäubern von 3 auf 20 Arten bei Kaffeepflanzen in Indonesien zu einem 30 Prozent höheren Fruchtansatz führte, und dies völlig unabhängig von der Häufigkeit, mit der die Blüten besucht wurden. Die Anzahl der in den Kaffeepflanzungen vorkommenden Spezies war ihrerseits abhängig von der Entfernung zum Regenwald: je näher am Wald, desto mehr Arten flogen die Kaffeepflanzen an.

2005 stellten der US-amerikanische Ökologe Taylor Ricketts und sein Team auf einer Konferenz eine zuvor veröffentlichte Studie vor. Sie hatten den Gewinn aus dem Ernteertrag von Kakaopflanzungen in Costa Rica berechnet. Die Pflanzungen befanden sich ebenfalls unterschiedlich weit von Regenwaldresten und damit dem Zuhause zahlreicher bestäubender Insekten entfernt. Farmen in Reichweite der im Wald beheimateten Bestäuber erwirtschafteten jährlich 60000 US-Dollar mehr als solche, die weiter entfernt waren. Ich nahm damals als Studentin mit Forschungsgebiet tropische Bienen auch teil und war begeistert von dem Vortrag. Enttäuschung machte sich allerdings in mir breit, als Ricketts auf meine Frage, ob diese Ergebnisse auch den

Bauern und Interessenvertretern vor Ort mitgeteilt worden waren, mit einem verständnislosen »Nein« antwortete.

Immerhin hat sich inzwischen ein Bewusstsein dafür entwickelt, dass es sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist, wenn möglichst viele unterschiedliche Bestäuberarten vorkommen. Das liegt an einem gerade für Ökosysteme typischen Phänomen: der Absicherung durch Diversität. Fällt aus irgendwelchen Gründen eine Art aus, weil sie etwa einem plötzlichen Aussterbeereignis zum Opfer fällt, dann können die anderen Arten diesen Ausfall kompensieren.

Ein weiterer Vorteil einer solchen Systemstruktur heißt Komplementarität. Beispielsweise meiden gerade Honigbienen kühle regnerische Temperaturen, wie sie häufig im Frühjahr vorkommen. Zu diesen Zeiten sind dann vor allem die an Kälte angepassten Hummeln als Bestäuber unterwegs und damit essenziell für früh blühende Obstsorten. Auch mögen Honigbienen keinen Wind, wie 2012 Klein und ihre Kollegen herausfanden. Sie hatten das Verhalten von Honig- und Wildbienen auf Mandelplantagen in Kalifornien untersucht und dabei festgestellt, dass Honigbienen lieber zu Hause bleiben, wenn es stark bläst. Die wilden Pendanten zeigten sich hingegen von solchen Wetterbedingungen wenig beeindruckt. Mandelbaumblüten wurden daher an windigen Tagen in Plantagen, in denen außer Honigbienen keine weiteren Bestäuber aktiv waren, nicht befruchtet.

Passend zu diesem Ergebnis berichtete eine Forschergruppe um Lucas Garibaldi von der argentinischen Universidad Nacional de Río Negro 2013, dass der Ertrag von mehr als 40 der weltweit angebaute Kulturpflanzen in Anwesenheit von Wildbienen doppelt so hoch ist, wie wenn lediglich Honigbienen vorkommen. Nur auf Letztere zu setzen, ist also auch aus rein wirtschaftlicher Perspektive keine gute Idee.

Es gibt demnach ökologische wie ökonomische Gründe, den kontinuierlichen Verlust an Bestäubern aufzuhalten. Einzig auf diese Weise lässt sich sicherstellen, dass neben der faszinierenden Vielfalt dieser Tiere auch deren herausragende Leistung, die Bestäubung zahlreicher Wild- und Kulturpflanzen, erhalten bleibt. Es ist daher allerhöchste Zeit, der Bedeutung dieser Tiere mit großer Vehemenz Aufmerksamkeit zu verschaffen und alles daranzusetzen, ihren beeindruckenden Artenreichtum dauerhaft zu erhalten. ◀

QUELLEN

Biesmeijer, J. C. et al.: Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 21, 2006

Hallmann, C. A. et al.: More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE* 12, 2017

Hofmann, M. M. et al.: Narrow habitat breadth and late-summer emergence increases extinction vulnerability in Central European bees. *Proceedings of the Royal Society B* 13, 2019

Leonhardt, S. D.: Economic gain, stability of pollination and bee diversity decrease from southern to northern Europe. *Basic and Applied Ecology* 14, 2013

Seibold, S. et al.: Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574, 2019

AMPHIBIENSTERBEN ABGESANG DER FRÖSCHE

Weltweit verschwinden Frösche und andere Amphibien von unserem Planeten. Besonders eine Pilzepidemie hat ihnen in den letzten Jahrzehnten stark zugesetzt. Zusätzlich schreitet die Zerstörung ihrer Lebensräume permanent voran. Höchste Zeit, die Tiere besser zu schützen.



Gunther Köhler ist Professor für Herpetologie am Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum in Frankfurt am Main. Er erforscht Amphibien und Reptilien vornehmlich in Lateinamerika und Südostasien.

» [spektrum.de/artikel/1913890](https://www.spektrum.de/artikel/1913890)

Die Nacht ist angebrochen, und der starke Regen lässt langsam nach. Von überall her schallen jetzt die unterschiedlichsten Froschrufe: Tiefes Knurren wird begleitet von insektenähnlichem Zirpen und schrillum Pfeifen. Hinzu kommen vereinzelt »Raaaak«-Laute, und aus den Bäumen über mir höre ich ein metallisches »Ping« sowie ein dumpfes »Gog-gog«. Es ist der 6. Juni 1992. Ich bin im Bergregenwald von Selva Negra im zentralen Hochland von Nicaragua unterwegs. Die Regenzeit hat vor ein paar Tagen begonnen und die Fortpflanzung der Frösche in Gang gebracht. In dieser Nacht zähle ich knapp 20 verschiedene Arten. Manche Exemplare sitzen am Ufer eines großen Tümpels, andere treiben auf seiner Wasseroberfläche, klammern sich an dünne Schilfhalme in der Ufervegetation oder sitzen auf Steinen eines Bachbetts. Ich entdecke die Amphibien im Pflanzendickicht, in Steinhaufen oder erspähe sie in drei bis fünf Meter Höhe in Bäumen. Ich bin umzingelt von Fröschen.

In den 1990er Jahren besuchte ich die Region um Selva Negra mindestens einmal jährlich, um Studien an Amphibien und Reptilien durchzuführen. Der starke Rückgang vieler Froschpopulationen in dieser Zeit ist mir bis heute schmerzlich in Erinnerung geblieben. Während ich bei meinen ersten Reisen nach Nicaragua zum Beispiel Arten des *Craugastor-rugulosus*-Komplexes noch häufig entlang von Bächen antraf, fand ich in den Folgejahren immer weniger, bis sie plötzlich vollständig verschwunden waren. Zunächst habe ich das Fehlen einzelner Arten einer natürlichen

Fluktuation im Rahmen der Populationsdynamik zugeschrieben. Doch als es im Wald von Selva Negra kontinuierlich stiller wurde, dämmerte mir, dass sich etwas dauerhaft verändert hatte.

Amphibien einschließlich ihrer Larven spielen eine wichtige Rolle in terrestrischen und Süßwasserökosystemen weltweit. Ohne sie funktionieren die Energieflüsse und das Nährstoffrecycling dort nicht mehr richtig. Dementsprechend hat ihr Verschwinden erhebliche ökologische Folgen auf Flora und Fauna.

Daher waren wir Biologen und Naturforscher alarmiert, als in den 1990er Jahren auch aus anderen Regionen Nachrichten über zusammenbrechende Froschpopulationen kamen, vor allem aus weiteren lateinamerikanischen Ländern und Australien. Manche Arten verschwanden sogar ganz von der Bildfläche und wurden als ausgestorben eingestuft. Selbst Naturschutzgebiete, in denen der Lebensraum unverändert in sehr gutem Zustand erschien, blieben nicht verschont.

Dennoch gab es anfangs Skepsis, ob wirklich ein Froschsterben globalen Ausmaßes stattfand. Es war bekannt, dass die Anzahl der Tiere stark variieren kann – besonders als Reaktion auf klimatische Faktoren. In ungünstigen Jahren nimmt ihre Population mitunter erheblich ab, bevor sie dann in den folgenden Jahren wieder auf die ursprüngliche Größe zunimmt. Daher ist es ohne eine jahrelange



AUF EINEN BLICK SCHUTZ FÜR AMPHIBIEN

- 1** Seit den 1990er Jahren häufen sich die Berichte über ein Froschsterben aus ganz unterschiedlichen Teilen der Erde. Um die Jahrtausendwende wird klar: Eine Pilzkrankung ist schuld.
- 2** Inzwischen erholen sich einzelne Populationen wieder von der Seuche. Dennoch sinkt die Anzahl der Amphibien auf unserem Planeten stetig, da der Mensch vielerorts ihre Lebensräume zerstört.
- 3** Naturreservate spielen eine Schlüsselrolle, um die Tiere vor dem Aussterben zu bewahren. Zusätzlich gilt es aber, Umwelt- und Klimaschutz noch deutlich intensiver zu betreiben als bisher.

LEMUR-LAUBFROSCH

Durch einen Pilzbefall ging der Bestand der Amphibien in vielen Regionen der Welt dramatisch zurück. Betroffen war auch der Lemur-Laubfrosch, der in Costa Rica, Panama und im Nordwesten Kolumbiens beheimatet ist.

Beobachtung schwierig, zwischen normalen Populationschwankungen und langfristigen Trends zu unterscheiden.

Die Anzeichen für ein Amphibiensterben rissen allerdings nicht ab. Und so wuchs die Überzeugung in der wissenschaftlichen Gemeinschaft, dass eine dramatische Entwicklung im Gang war. Wild wurde über die potenziellen Ursachen spekuliert: Hoch im Kurs standen zunächst die zunehmende Umweltverschmutzung, der Klimawandel sowie neuartige Infektionskrankheiten. Klassische Gründe für einen Verlust der biologischen Vielfalt wie intensive Landwirtschaft und Verstädterung ließen sich hingegen rasch ausschließen. Denn viele der Populationsrückgänge verzeichneten die Forschergruppen in Schutzgebieten, in denen keine offensichtliche Veränderungen des natürlichen Lebensraums stattfanden.

1998 verdichteten sich dann die Hinweise, dass der Übeltäter ein so genannter Chytridpilz mit der lateinischen Bezeichnung *Batrachochytrium dendrobatidis* ist. Die durch

diesen Erreger ausgelöste Erkrankung heißt Chytridiomykose. Zur Fortpflanzung produziert der Pilz bewegliche Zoosporen, die sich im Wasser verbreiten und neue Wirte infizieren können, in diesem Fall Frösche und deren Kaulquappen. Heute ist vollkommen klar: Die von dem Erreger ausgelöste Seuche hat nahezu auf der ganzen Welt Froschbestände dezimiert und dutzende Arten ausgelöscht. Auch in den meisten europäischen Ländern, darunter Deutschland, hat sich der Pilz inzwischen breitgemacht.

Vor einigen Jahren wurde zudem eine weitere Chytridart identifiziert, *B. salamandrivorans*, die vorwiegend Salamander und Molche befällt. In den Niederlanden und Belgien sind die Populationen des Feuersalamanders auf Grund dieser neuen Krankheit bereits erheblich kleiner geworden. Er gilt in diesen beiden Ländern nun als akut vom Aussterben bedroht.

In Mittelamerika waren diejenigen Frösche am stärksten betroffen, die in den mittleren Höhenlagen der Berge an

Dschungelexpedition: Den Amphibien auf der Spur

Im August 2002 während der Regenzeit war Gunther Köhler (links) mit seinem damaligen Studenten Ardiel Zebenzui (Dritter von links) auf einer zweiwöchigen Expedition im Bergregenwald des Cerro El Toro unterwegs, eine Region, die zum Nationalpark Saslaya im Nordosten Nicaraguas zählt. Insgesamt wurden sie von fünf Trägern und Helfern sowie zehn Soldaten und Polizisten begleitet, da in der Gegend bewaffnete Banden ihr Unwesen trieben. Auf der Expedition suchte das Team unter anderem nach bislang unentdeckten Amphibien und Reptilien. In Zusammenarbeit mit Kollegen hat Köhler während seiner Forscherlaufbahn bislang 120 neue Arten von Fröschen, Salamandern, Eidechsen und Schlangen beschrieben. Bereits in den 1990er Jahren bemerkte Köhler bei derartigen Expeditionen, dass in den Wäldern Mittelamerikas die Anzahl der Frösche teilweise dramatisch zurückging.



Bächen vorkamen und sich im Wasser vermehrten. Arten, die vorwiegend in den Bäumen lebten und weder Teiche noch Fließgewässer für die Fortpflanzung benötigten, zeigten keine Anzeichen für einen Rückgang.

Gründe dafür fanden Forschergruppen in den physiologischen und ökologischen Vorlieben des Pilzes. Er gedeiht am besten unter Nebelwaldbedingungen, also hoher Luftfeuchtigkeit und Temperaturen zwischen 15 und 25 Grad Celsius, ein typisches Klima unter anderem in den mittleren Höhenlagen Zentralamerikas. Da sich der Pilz außerdem über das Wasser verbreitet, haben an oder im Wasser lebende Arten ein größeres Risiko, sich mit den Zoosporen des Chytridpilzes zu infizieren als solche, die Bäche oder Teiche meiden.

Weite Verbreitung beugt Aussterben vor

Das Aussterberisiko ist außerdem bei nur lokal begrenzt vorkommenden Arten wesentlich größer als bei solchen, die geografisch weit verbreitet sind. Denn in einem großen Areal können die lokalen Bedingungen teilweise sehr unterschiedlich sein. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass in einigen Refugien bessere Überlebensbedingungen für die Art herrschen als im übrigen Gebiet. Zusätzlich sinkt in größeren Populationen das Aussterberisiko, weil es eine höhere genetische Variabilität gibt. Es ist dann wahrscheinlicher, dass manche Individuen die Krankheit überleben.

Zu den Symptomen der Pilzkrankheit zählen erweiterte Blutgefäße und eine verstärkte Verhornung der Hautoberfläche. Da Amphibien zusätzlich über die Haut atmen, bekommen sie dadurch schlechter Luft. Darüber hinaus beeinträchtigt die Veränderung ihren Stoffwechsel, weil die Haut Flüssigkeit und Mineralien aufnehmen und abgeben kann. Die Pilztoxine könnten zusätzlich giftig wirken, vermuten Fachleute. Üblicherweise verschlechtert sich der Zustand der befallenen Frösche fortwährend, bis sie schließlich verenden.

Die Vermutung war lange, dass ein gegen die Wirkung des Pilzes immuner Frosch aus Afrika an dessen Verbreitung die Hauptschuld trägt (siehe »Apothekerfrosch«). Mittels Genomsequenzierung konnten Wissenschaftler aber 2018 die Quelle des Chytridpilzes in Korea verorten. Dort fanden sie eine Population einer Vorgängerlinie des Pilzes. Zudem ist Ostasien ein Hotspot seiner Artenvielfalt, was ebenfalls dafür spricht, dass dort sein Ursprung liegt. Gemäß der Studie tauchte der Erreger wahrscheinlich erstmals im frühen 20. Jahrhundert in Korea auf und verbreitete sich dann durch den Amphibienhandel in der ganzen Welt.

Die Initiative »Global Amphibian Assessment« bewertete in den Jahren 2001 bis 2004 den Bedrohungsstatus von nahezu allen derzeit bekannten Amphibienarten. Die Ergebnisse waren alarmierend: Ein Prozent von ihnen gilt als ausgestorben und rund ein Drittel aller Froscharten wurde als bedroht eingestuft. Felduntersuchungen Anfang der 1990er Jahre in der Region Monteverde in Costa Rica hatten bereits ergeben, dass seit 1987 insgesamt 20 Froscharten verschwunden sind, das entspricht 40 Prozent der dortigen Froschfauna. Im nördlichen Südamerika sind vor allem die Arten der Harlekinkröten (Gattung *Atelopus*) betroffen. Schätzungen zufolge sind rund zwei Drittel der



MATHAN / STOCK.ADBE.COM

Apothekerfrosch

Die Tatsache, dass der Afrikanische Krallenfrosch zum Schwangerschaftstest taugt, brachte ihm die Bezeichnung Apothekerfrosch ein. Bei der Methode wird dem Tier Urin oder Blut einer Frau in den Lymphsack injiziert. Wenn das Weibchen nach 12 bis 24 Stunden Laich absetzt beziehungsweise beim Männchen Samenflüssigkeit ausfließt, gilt die getestete Frau als schwanger. Die bis in die 1960er Jahre praktizierte Vorgehensweise verbreitete sich weltweit – und mit ihr der Krallenfrosch. Auf seiner Haut siedelt ein Pilz, der ihm nichts anhaben kann. Viele andere Froscharten reagieren jedoch deutlich empfindlicher und verenden in der Regel durch einen Befall. Als Forschergruppen dann in den 1990er Jahren ein weltweites Amphibiensterben auf Grund des Pilzes registrierten, spekulierten einige, dass der Krallenfrosch Schuld an der Ausbreitung des Erregers trage. Genomanalysen des Pilzes deuten jedoch inzwischen darauf hin, dass er sich ausgehend von Südostasien auf dem gesamten Globus verbreitet hat.

bekanntesten Arten dieser Gattung aus ihren geläufigen Habitaten verschwanden.

Gleichwohl trägt der Chytridpilz natürlich nicht die alleinige Schuld am globalen Rückgang der Amphibienvielfalt. Tatsächlich ist die Zerstörung und Verschmutzung des Lebensraums der Tiere weiterhin die Hauptursache für ihr Verschwinden. Dazu tragen unter anderem die fortschreitende Entwaldung, Entwässerung und Kontamination von Feuchtgebieten bei. Eine Fragmentierung der Habitats führt zu kleineren, isolierteren Populationen, die weniger Ausbreitungsmöglichkeiten und ein höheres Aussterberisiko haben. Die Vielzahl an Giftstoffen in der Natur belastet die Amphibien zusätzlich.

Auch die globalen Klimaveränderungen, insbesondere die Erwärmung, wirken sich mitunter schwer wiegend auf die lokale und regionale Artenvielfalt aus. Denn eine höhere Temperatur kann dazu führen, dass jahrtausendealte Ökosysteme nicht mehr funktionieren und zusammenbrechen. Darüber hinaus wurden mancherorts fremde Arten eingeschleppt. Dies kann vielfältige negative Konsequenzen für die lokale Amphibienfauna haben. Die Tiere konkurrieren



GUNTHER KÖHLER

OPFER DER SEUCHE Die Art *Craugastor rugulosus* wurde vom Chytridpilz stark dezimiert. Die Zerstörung seines Lebensraums bedroht den Frosch zusätzlich.

nun um Lebensraum und Nahrung mit den Neuankömmlingen und können gar selbst von diesen gefressen werden. Zudem bringen die nicht heimischen Arten neue und mitunter gefährliche Krankheitserreger mit. Teilweise können einzelne Faktoren wiederum andere verstärken. So kann zum Beispiel die Erderwärmung die Ausbreitung invasiver Arten begünstigen.

Resistent gegen die Pilzerkrankung

Es gibt allerdings auch gute Nachrichten: Wir kennen zum Beispiel Froschgemeinschaften, die schon seit Jahrzehnten mit dem Chytridpilz leben und keine Anzeichen von Populationsrückgang zeigen. In der südlichen Sierra Madre del Sur haben wir etwa festgestellt, dass zahlreiche Kaulquappen typische Symptome einer Chytridinfektion aufweisen, insbesondere den Verlust ihrer Hornzähne am Maul. Mittels molekulargenetischer Methoden konnten wir jedoch den Pilz bei erwachsenen Fröschen nicht mehr nachweisen. Es liegt also nahe, dass die Tiere den Erreger loswerden – eventuell durch Sonnenbaden, da die erhöhte Temperatur und das UV-Licht diesen abtöten. Noch sind aber weitere Feld- und Laborstudien erforderlich, um zu verstehen, welche Strategien den Pilz eliminieren.

Außerdem ist eine fortwährende Beobachtung der Froschpopulationen notwendig, um die Infektionsdynamik und die langfristigen Auswirkungen der Seuche besser zu verstehen. Denn das Auftreten einer Infektion innerhalb einer Froschpopulation bedeutet keinesfalls automatisch deren Ende oder gar das Aussterben der Art. Inzwischen kennen wir zahlreiche Beispiele von Froscharten, deren Populationen durch die Pilzepidemie zunächst zusammenbrachen. Anschließend wurden sie über Jahre, zum Teil über Jahrzehnte nicht mehr in der freien Natur gesichtet. Erfreulicherweise sind aber irgendwann wieder Exemplare aufgetaucht.

Offensichtlich waren die Populationen so klein geworden, dass sie nicht mehr ohne Weiteres nachzuweisen waren. Einzelne überlebende Frösche, die gegenüber dem

Chytridpilz resistent genug waren, konnten sich zunächst im Verborgenen wieder vermehren. Als die Population dann groß genug war, gelang es auch, die verloren geglaubte Spezies erneut nachzuweisen. Das lässt hoffen, dass noch andere, als verschollen eingestufte Amphibienarten weiterhin existieren.

Nichtsdestoweniger werden Frösche und Salamander auf unserem Planeten tagtäglich weniger. Was also muss passieren, um diesen Prozess zu stoppen oder bestenfalls sogar umzukehren? Vielerorts könnten altbewährte Strategien helfen, etwa die Ausweitung von Naturschutzgebieten und eine eingeschränkte Bewirtschaftung von Naturflächen. Nach wie vor sind diese Maßnahmen ein fundamentaler Bestandteil eines langfristigen Naturschutzprogramms. Denn das Prinzip ist ganz einfach: Hängt eine Art vom Wald ab, verschwindet sie, wenn die Bäume abgeholzt werden. Gleichermäßen gilt diese Korrelation für die meisten anderen Naturlandschaften, darunter Moore, Wiesen oder Bachläufe. Entsprechend sind natürlich ebenso diejenigen Amphibienpopulationen bedroht, die die Chytridinfektionen überleben.

Aus diesem Grund spielen professionell verwaltete und geschützte Naturreserve eine Schlüsselrolle bei langfristigen Erhaltungsstrategien der Amphibien. Allerdings sind etliche Schutzgebiete tatsächlich nur auf der Karte vorhanden und somit nutzlos. Besonders in den Tropen mangelt es oft an ausreichend und gut ausgebildetem Personal sowie operativen Mitteln. Infolgedessen kommt es selbst in Reservaten zu anhaltender Abholzung, nicht regulierter Jagd und Pestizideinsatz.

Erschwerend kommt hinzu, dass sich der Klimawandel, der Eintrag von Umweltgiften und neu auftretende Krankheiten nicht durch Schutzgebietsgrenzen aufhalten lassen. Damit kann eine Strategie, die allein auf Naturreservaten beruht, die Artenvielfaltskrise nicht stoppen. Vielmehr braucht es zusätzliche Anstrengungen, um die Erderwärmung aufzuhalten, den Eintrag von Giftstoffen in die Natur zu beenden und die Ausbreitung invasiver Arten sowie von Infektionskrankheiten im Tierreich zu minimieren. Die meisten Wissenschaftler sind sich einig, dass dazu ein umfassendes Umwelt- und Klimaschutzkonzept nötig wäre, das weit über die bisherigen Maßnahmen hinausgeht. Dem Artenreichtum auf unserem Planeten zuliebe wäre es also höchste Zeit, aktiv zu werden. ◀

QUELLEN

Collins, J. P., Crump M. L.: Extinction in our times: Global amphibian decline. Oxford University Press 273, 2009

Hertz, A. et al.: Field notes on findings of threatened amphibian species in the central mountain range of western Panama. Amphibian and Reptile Conservation 6, 2012

O'Hanlon, S. J. et al.: Recent Asian origin of chytrid fungi causing global amphibian declines. Science 360, 2018

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

Wake, D. B., Vredenburg, V. T.: Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. PNAS 105, 2008

Unsere Neuerscheinungen

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



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

MOLEKULARBIOLOGIE DAS GEHEIMNIS DER PROTEINFALTUNG

THEASIS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Eine künstliche Intelligenz hat eines der kniffligsten Probleme der Molekularbiologie gelöst: die Vorhersage der dreidimensionalen Architektur von Proteinen. Das hat weitreichende Implikationen für Medizin und Biowissenschaften, denn die Eiweißmoleküle sind praktisch an allen Funktionen lebender Organismen beteiligt.

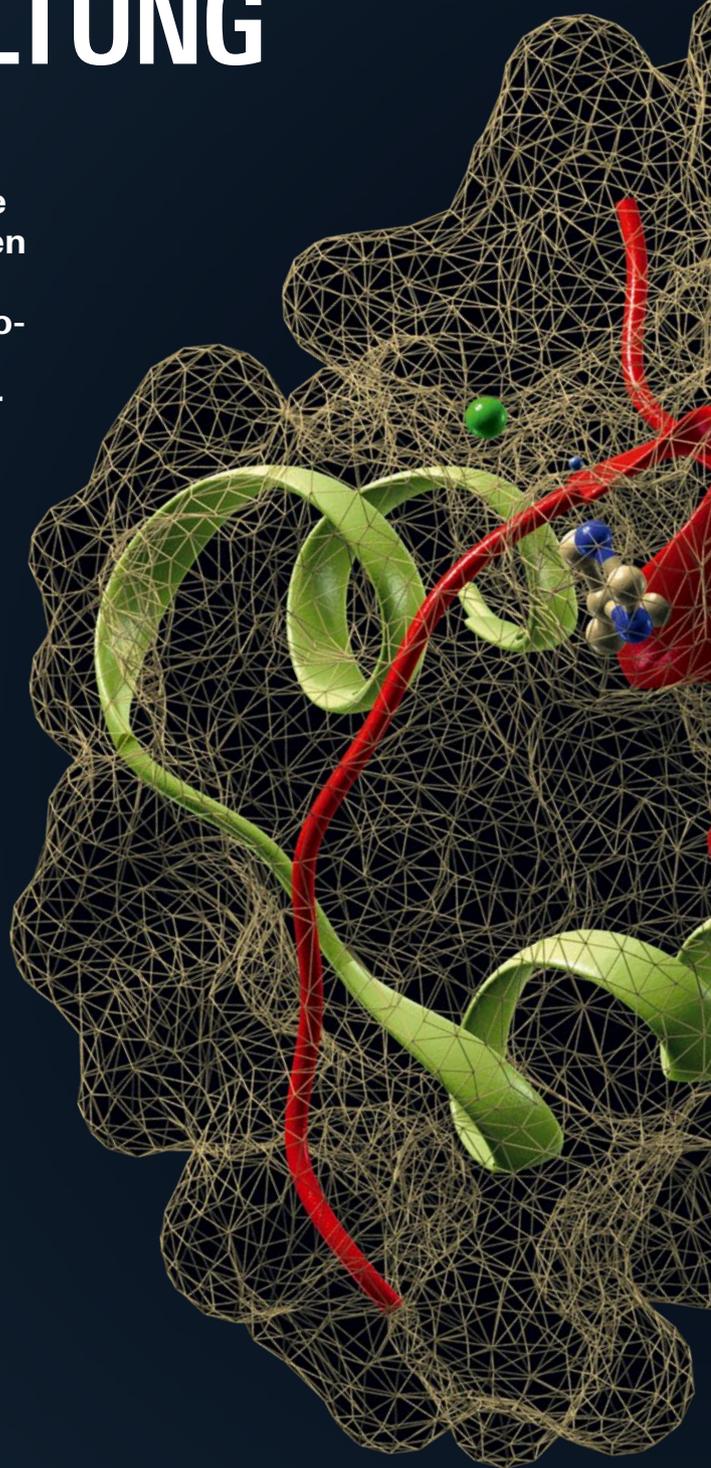


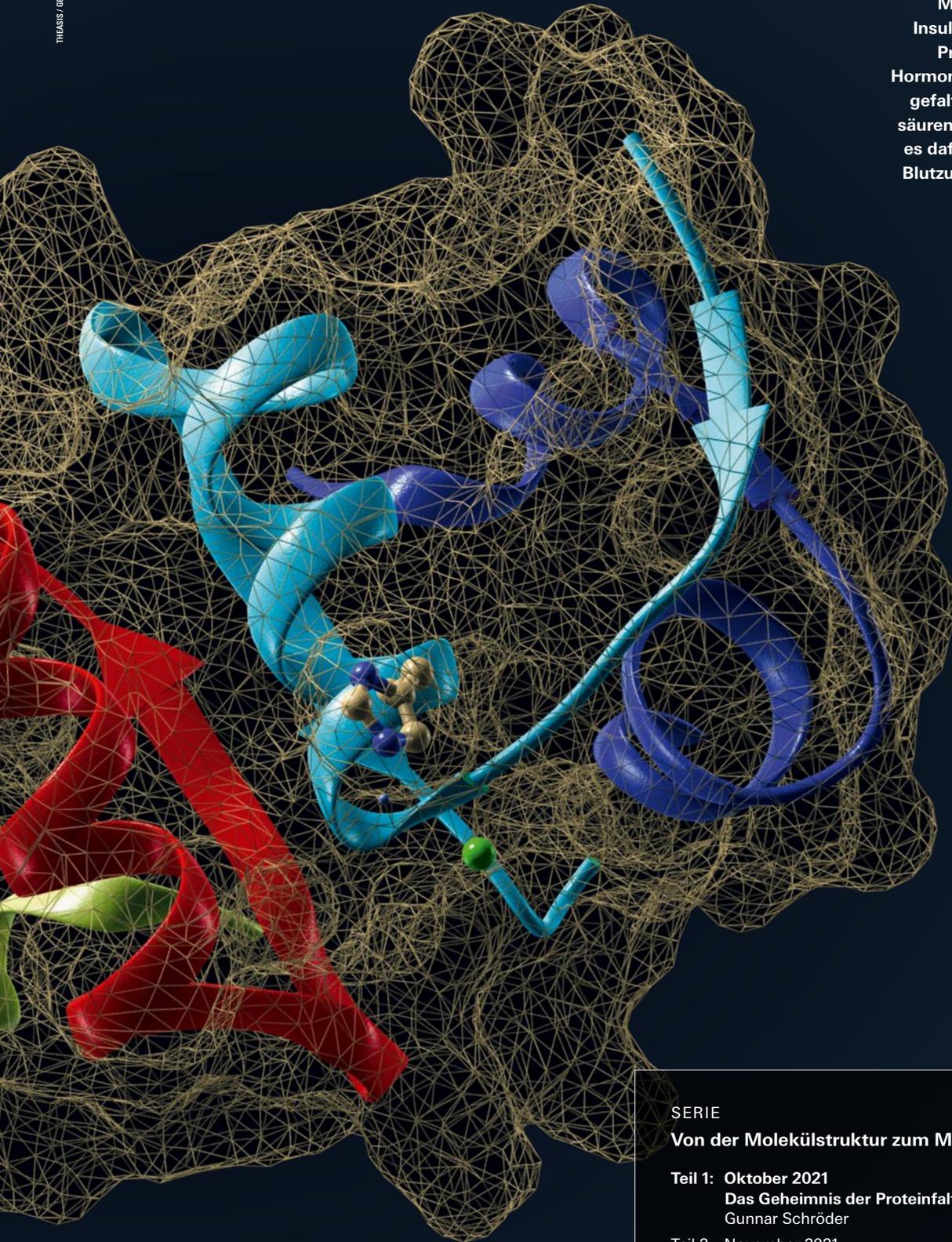
Gunnar Schröder ist Professor für Molekulare Biophysik an der Universität Düsseldorf und Leiter der Gruppe »Computational Structural Biology« am Forschungszentrum Jülich.

► [spektrum.de/artikel/1913893](https://www.spektrum.de/artikel/1913893)

Im Sommer 2020 versetzte eine Nachricht die biowissenschaftliche Gemeinschaft – mich eingeschlossen – in Aufregung: Einer künstlichen Intelligenz (KI) namens AlphaFold2 war es gelungen, die Struktur von etlichen Eiweißmolekülen mit bis dahin unerreichter Genauigkeit vorherzusagen. Seit 1994 messen sich Forschergruppen aus aller Welt auf einem alle zwei Jahre stattfindenden Wettbewerb namens Critical Assessment of Protein Structure Prediction, kurz CASP. Alle Teilnehmer bekommen Sequenzen aus Aminosäuren vorgelegt. Anhand dieser müssen sie dann die dreidimensionale Architektur des zugehörigen Proteins prognostizieren.

Aminosäuren bilden die Grundbausteine von Proteinen; sie formen lange Ketten, die sich zu äußerst komplexen Gebilden falten. Erst die einzigartige räumliche Struktur definiert die Funktion eines solchen Moleküls. Daher ist Kenntnis darüber in vielen Bereichen der Biologie und Medizin von hohem Interesse. Allerdings stellt die Vorhersage der Proteinfaltung lediglich anhand der Aminosäuresequenz Fachleute seit Jahrzehnten vor große Schwierigkeiten. Es war sogar lange nicht einmal klar, ob die Informa-





MODELL VON INSULIN
Insulin ist ein so genanntes Proteohormon – also ein Hormon, das aus einer langen, gefalteten Kette aus Aminosäuren besteht. Im Körper ist es dafür verantwortlich, den Blutzuckerspiegel zu senken.

SERIE

Von der Molekülstruktur zum Medikament

Teil 1: **Oktober 2021**

Das Geheimnis der Proteinfaltung
Gunnar Schröder

Teil 2: **November 2021**

Neue Medikamente dank Supercomputern
Konstantin Fackeldey, Christoph Gorgulla und
Marcus Weber

Teil 3: **Dezember 2021**

Wirkstoffe der Zukunft
Rowan Jacobsen

tion über die Abfolge der einzelnen Bestandteile überhaupt ausreicht, um die finale Gestalt eines Eiweißmoleküls exakt zu bestimmen.

Im Jahr 2018 nahm dann erstmals die KI »AlphaFold« am CASP-Wettbewerb teil. Programmiert wurde das System von der Firma DeepMind des Google-Konzerns Alphabet, die sich auf die Entwicklung von KIs spezialisiert hat. Bis dahin war DeepMinds Zugang aber eher »spielerischer« Natur gewesen. Bekannt wurde etwa das System »AlphaGo Zero«, das in dem Strategiespiel Go den weltbesten Spieler förmlich vernichtet hatte. Mit AlphaFold begab man sich nun auf neues Terrain – und das mit durchschlagendem Erfolg: Bei 24 von 43 Aminosäureketten konnte die KI die dreidimensionale Architektur ziemlich genau vorhersagen, was ihr den Sieg einbrachte.

Völlig überraschend kam die beeindruckende Leistung des Nachfolgeprogramms im Jahr 2020 also nicht. AlphaFold2 toppte allerdings das Ergebnis seines Vorgängers nochmals deutlich: Bei insgesamt 88 von 97 Proteinen konnte das System die dreidimensionale Struktur am präzisesten bestimmen. Für die Bewertung der vorhergesagten Strukturen wird vor allem der Global Distance Test (GDT) verwendet. Er gibt an, wie ähnlich sich zwei Faltungen sind, in diesem Fall die bereits bekannte und die vom Algorithmus berechnete für dasselbe Protein. Ein GDT von 0 bedeutet, dass die Formen keine Ähnlichkeit haben, und ein GDT von 100, dass sie identisch sind. AlphaFold2 erreichte für mehr als die Hälfte der Strukturen einen GDT von 92 und mehr. Eine höhere Genauigkeit erzielten auch die aufwändigen Labortechniken nicht (siehe »Experimentelle Methoden zur Proteinstrukturbestimmung«). Für fast 90 Prozent aller Testproteine lag der GDT über 80. Andere Computeransätze waren in den vorherigen Wettbewerben immer weit von der

Präzision solcher praktischen Methoden entfernt gewesen. Und auch AlphaFold hatte noch 2018 diese Genauigkeit nur bei zwei Prognosen erreicht.

Im Juli 2021 machte die Forschergruppe um den Chefentwickler Demis Hassabis von DeepMind schließlich den Quellcode ihrer Software öffentlich. Somit kann nun jeder mit ausreichend Expertise die KI nutzen und weiterentwickeln. Zusätzlich präsentierte das Team umfangreiche Ergebnisse ihrer KI, nämlich so gut wie alle Strukturen der Proteine des menschlichen Körpers (siehe »Datenbank des Lebens«). Die neuen Einblicke und Ergebnisse könnten zu etlichen Durchbrüchen in der Medizin und Biotechnologie führen und veranlassen die Forschercommunity zu wahren Begeisterungstürmen.

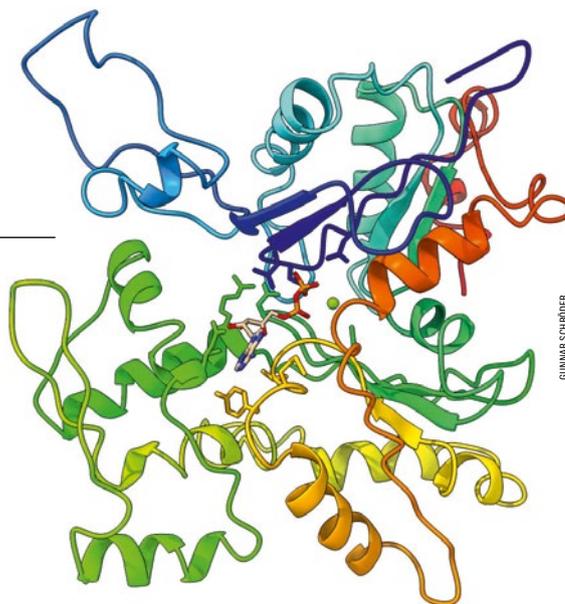
Die Euphorie wird verständlich, wenn man das wesentliche Ziel der Biologie betrachtet – das Leben in all seinen Facetten zu verstehen. Zu dem Zweck studieren Forschergruppen weltweit auf ganz verschiedene Art die kleinsten Bausteine des Lebens, die Zellen. Bereits seit mehr als 300 Jahren lassen sich diese mit Lichtmikroskopen beobachten. Das reicht allerdings nicht aus, um das Funktionsprinzip des Lebens zu entschlüsseln. Dazu muss man schon zu den Details dieser kleinsten lebenden Einheiten vordringen.

Richard Feynman, einer der berühmtesten Wissenschaftler des 20. Jahrhunderts, sagte einst: »[...] everything

Proteinstruktur

Ein Protein ist eine lange Kette aus Aminosäuren, die auf eine ganz bestimmte Weise räumlich gefaltet ist. Die Reihenfolge der verschiedenen Aminosäuren ist in einem entsprechenden Gen festgelegt, also einem Abschnitt der DNA. Ein Gen ist somit im Wesentlichen ein Bauplan für ein Protein. Die Aminosäurekette faltet sich nun derart, dass jedes Atom dieses langen Biomoleküls seinen exakten Platz findet. Die dreidimensionale Architektur entspricht der energetisch günstigsten Anordnung der Atome des Proteins im Raum und ist bereits durch die Aminosäuresequenz festgelegt. Das Bild zeigt

die visualisierte Form des Proteins Aktin. Es ist Teil eines Aktin-Filaments, das in der Zelle sowohl für die mechanische Stabilität sorgt als auch an der Kontraktion von Muskelzellen zentral beteiligt ist. Das Modell wurde vom Team des Autors mit Hilfe von Bilddaten angefertigt, die mit einem Kryoelektronenmikroskop aufgenommen wurden. Das Rückgrat des Proteins sind die breiteren Beta-Faltblatt-Strukturen und so genannten Alpha-Helizes (Spiralen). Die Farben von Blau (Anfang) über Grün, Gelb,



GUNMAR SCHROEDER

Orange nach Rot (Ende) verlaufen entlang der Aminosäurekette. In der Mitte ist das gebundene ADP-Molekül und daneben ein Magnesiumion als Kugelchen gezeigt. Einzelne Atome des Proteins sind in dieser Art der Darstellung der Übersichtlichkeit halber nicht abgebildet.

that living things do can be understood in terms of the jiggings and wiggings of atoms.« Das Verhalten von lebenden Dingen könne also durch die Bewegung, das Wackeln von Atomen verstanden werden. Wir Biophysiker und Strukturbologen studieren dafür aus vielen Atomen zusammengesetzte Moleküle, darunter Erbgutstränge wie DNA und RNA, Proteine, Lipide, Zucker und Botenstoffe. All diese Biomoleküle sind für lebende Organismen von entscheidender Bedeutung.

Die wohl zentralste Rolle spielen hier die Proteine. Der Anschaulichkeit wegen benutzen wir für sie gern die bildlichen Begriffe »Werkzeuge der Zelle« oder »zelluläre Maschinen«. Proteine treiben zum Beispiel unsere Muskeln an, transportieren Sauerstoff durch unser Blut, kämpfen als Antikörper gegen Krankheitserreger, verdauen als Enzyme Nahrung oder leiten Stromimpulse durch Nervenzellen. An den allermeisten Vorgängen in unserem Körper sind sie beteiligt. Wenn es also darum geht, das Leben zu erforschen, fällt der Blick zwangsläufig auf diese omnipräsenten Eiweißmoleküle.

Optimal wäre es, eine komplette menschliche Zelle mit einer Auflösung von einem zehntel Nanometer – das ist der zehnmillionste Teil eines Millimeters – abbilden zu können. So würde man die einzelnen Atome in den enthaltenen Biomolekülen erkennen können und damit auch deren dreidimensionale Struktur. Doch davon sind selbst die modernsten Mikroskopietechniken noch ein ganzes Stück entfernt.

Experimente zur Bestimmung der Struktur dauern oft sehr lange

Atomare Auflösung lässt sich allerdings erzielen, wenn die Proteine isoliert untersucht werden; dazu gibt es verschiedene experimentelle Methoden. Die Techniken sind aber in der Regel sehr aufwändig, und der Prozess kann sich über mehrere Monate, manchmal Jahre ziehen. Aus diesem Grund versuchen Fachleute seit Jahrzehnten, die dreidimensionale atomare Struktur von Proteinen allein aus deren Aminosäuresequenz theoretisch vorherzusagen. Dieses so genannte Proteinfaltungsproblem gilt als der heilige Gral der Molekularbiologie, da uns eine zuverlässige Lösungsstrategie schlagartig dem Traum vom hoch aufgelösten Bild einer ganzen Zelle deutlich näherbrächte. Aus diesem Grund hat das Ergebnis von AlphaFold2 so viele positive Reaktionen in der biowissenschaftlichen Gemeinschaft ausgelöst.

Die Vorhersage von Proteinstrukturen ist indessen nicht nur für die molekularbiologische Grundlagenforschung von großer Bedeutung, sondern auch für die Entwicklung neuer Medikamente. Die meisten Arzneimittel wirken, indem sie sich direkt an ein bestimmtes Eiweißmolekül binden und dadurch dessen Funktion beeinflussen. Das kann eine Blockade genauso wie eine Verstärkung der Proteinwirkung sein. Dazu braucht es ein Wirkstoffmolekül, das passgenau an das Eiweiß andocken kann. Voraussetzung für die Suche nach geeigneten Kandidaten ist daher die Kenntnis der molekularen Architektur des betreffenden Proteins.

Darüber hinaus wissen Ärzte mittlerweile, dass eine unkontrollierte Anhäufung von fehlerhaft gefalteten Eiweiß-

AUF EINEN BLICK KÜNSTLICHE INTELLIGENZ SAGT PROTEINSTRUKTUREN VORHER

- 1** Proteine sind fundamentale Bausteine des Lebens. Ihre komplexen dreidimensionalen Formen definieren ihre jeweilige Funktion.
- 2** Ist die Faltung dieser Eiweißketten fehlerhaft, kann das zu Krankheiten führen. Viele Medikamente nutzen außerdem Proteine als Angriffspunkte.
- 3** Bislang waren aufwändige Experimente notwendig, um die Architektur der Moleküle zu bestimmen – nun gelingt das auch im Virtuellen. Eine riesige Anzahl an Strukturen ist im Internet bereits frei verfügbar.

molekülen mit einer Reihe von Erkrankungen in Verbindung steht. Prominente Beispiele dafür sind vor allem neurodegenerative Krankheiten wie die Alzheimer- oder die Parkinsondemenz, aber auch Typ-2-Diabetes. In diesem Zusammenhang gilt es zu verstehen, wie es zu fehlerhaften Faltungen kommen kann und was sie bewirken.

Zusätzlich entwickelt sich im Moment das Gebiet des Protein-Designs. Hier stehen die Forschenden vor der umgekehrten Herausforderung; sie suchen diejenige Aminosäuresequenz, die sich in eine vorgegebene Struktur formt. Obwohl diese Technik noch ziemlich am Anfang steht, gibt es bereits eine Vielzahl von Anwendungen. Dazu zählt unter anderem die Entwicklung neuer Materialien mit fein justierbaren Eigenschaften, etwa nach dem Vorbild von Seide und Spinnweben, die aus Proteinen bestehen. Daneben konstruieren Biotechnologen bestimmte Enzyme, die zur industriellen Produktion von Chemikalien nützlich sind. Oder Biowissenschaftler bauen aus den Molekülen winzige Nanomaschinen, die künftig im Verborgenen verschiedenste Arbeiten verrichten könnten. Unter Medizinforschern wird außerdem das Design von Antikörpern hoch gehandelt sowie das von Proteinkäfigen, die Wirkstoffe nur an einem ganz speziellen Ort im Körper abgeben. Vorstellbar wären auch komplexere Pharmaka, die sich beispielsweise situationsabhängig ein- beziehungsweise ausschalten lassen. Für all diese Designansätze ist eine zuverlässige und effiziente Strukturvorhersage wie die von AlphaFold2 von großem Vorteil.

Doch wie schaffte es die KI, das Problem zu lösen? Die Antwort auf die Frage führt zunächst über den verwendeten Ansatz zur Vorhersage. Grob gesagt gibt es zwei Typen: Der erste basiert auf Wissen, der andere auf Physik. Beim wissensbasierten Vorgehen nutzt man alle bereits bekannten Informationen über Proteine, um daraus abzuleiten, wie bisher unbekannte Exemplare möglicherweise aussehen. Zum ersten großen Durchbruch kam es hier vor etwa zehn Jahren, als sich Methoden etablierten, mit denen man korrelierte Mutationen bestimmen konnte.

Im Allgemeinen bezeichnen Mutationen den zufälligen Wechsel einzelner Aminosäuren in der Molekülkette. Solche Änderungen können miteinander korreliert sein, wenn der Austausch einer Aminosäure auch weitere Änderungen in der Kette hervorruft. Zum Beispiel führt die Ersetzung einer kurzen Aminosäure durch eine längere dazu, dass im Protein der Platz knapp wird. In manchen Fällen wird daher im Gegenzug in der Nachbarschaft eine größere durch eine kleinere Aminosäure ersetzt. Andernfalls wäre das Protein womöglich nicht mehr stabil oder funktionsfähig.

Auf solche korrelierten Mutationen lässt sich durch den Vergleich mit ähnlich angeordneten Sequenzen in anderen Proteinen schließen. Da die Genomsequenzierung immer einfacher und schneller geht, sind mittlerweile bereits mehr als 2,4 Milliarden Sequenzen bekannt. Damit lassen sich für viele Proteine solche Nachbarschaftsbeziehungen bestimmen und daraus räumliche Informationen ableiten. Letztere liefern schließlich oftmals ausreichend Hinweise, um die dreidimensionale Struktur eines Proteins zumindest näherungsweise berechnen zu können. Dieses Vorgehen gab der

Experimentelle Methoden zur Proteinstrukturbestimmung

1) Röntgenkristallografie:

Für die Anwendung der Technik müssen die Proteine zunächst in Form von regelmäßigen Kristallen vorliegen. Diese Kristalle werden dann einem Röntgenstrahl ausgesetzt, typischerweise in einem Synchrotron, also einem ringförmigen Teilchenbeschleuniger. Die entstehenden Beugungsmuster des Röntgenlichts geben Aufschluss über die Anordnung der Atome im Kristall. Es können Auflösungen von unter 0,1 Nanometer erreicht werden, das entspricht dem Abstand zwischen zwei Atomen. Die Schwierigkeit besteht vor allem darin, hochgeordnete Kristalle zu gewinnen. Das ist in der Regel unproblematisch bei kleinen, starren Proteinen, wohl aber eine Herausforderung bei großen Proteinen und Proteinkomplexen, die häufig auch flexibel sind. Insbesondere Membranproteine sind schwierig zu untersuchen, da sie typischerweise von einer ungeordneten Lipidschicht umgeben sind, die sich nicht einfach entfernen lässt, ohne dass das Protein verklumpt. Für die Erfindung der Methode erhielten Max Perutz und John Kendrew (MRC Laboratory of Molecular Biology) 1962 den Nobelpreis für Chemie. Etwa 90 Prozent aller bisher bekannten Proteinstrukturen wurden mit dieser Methode entschlüsselt.

2) Kernspinresonanz-Spektroskopie:

Die Kernspinresonanz-Spektroskopie (englisch: nuclear magnetic resonance, kurz NMR) registriert die magnetischen Momente der Atomkerne. Diese Größe hängt sehr empfindlich von den Atomen in der Nachbarschaft ab. Durch geschickte Pulsexperimente lassen sich die Magnetisierungen bestimmter Kerne auf weitere Kerne übertragen. So kann man auf Nachbarschaftsbeziehungen von Atomen schließen und daraus dann die atomare dreidimensionale Anordnung berechnen. Ein großer Vorteil dieser Methode gegenüber anderen Techniken ist, dass die Proteine hier bei Raumtemperatur frei in wässriger Umgebung vorliegen und somit auch die natürliche Dynamik der Proteine untersucht werden kann. Doch die Größe der zu untersuchenden

Moleküle ist begrenzt, weil die Auswertung der komplexen Resonanzspektren für große Proteinkomplexe wegen vieler überlappender Resonanzpeaks nahezu unmöglich ist. Für die Entwicklung der magnetischen Kernspinresonanz erhielt der Chemiker Richard R. Ernst von der ETH Zürich 1991 den Nobelpreis für Chemie. Der Biophysiker Kurt Wüthrich verwendete an der gleichen Hochschule die Methode zur Strukturaufklärung von Proteinen und wurde dafür 2002 ebenfalls mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.

3) Kryoelektronenmikroskopie:

Bei dieser relativ jungen Technik werden die Proteine in einer extrem dünnen Wasserschicht (maximal 200 Nanometer dick) derart schnell eingefroren, dass das Wasser nicht kristallisieren kann. Damit sind die Makromoleküle in nahezu natürlicher Umgebung eingefangen und behalten ihre Form auch in der Vakuumkammer, in der sie mit Elektronen bestrahlt werden. In der Regel werden mit dem Mikroskop viele Bilder von Proteinen gemacht, die zufällig orientiert in dieser Wasserschicht liegen. Allerdings zerstört ein Elektronenstrahl die Biomoleküle relativ schnell, weshalb nur eine sehr geringe Dosis verwendet werden kann. Das führt zu einem sehr schlechten Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Aus den verrauschten Einzelbildern rekonstruiert anschließend eine Software die dreidimensionale Struktur. Ein entscheidender Vorteil ist, dass man mit der Methode sehr große Proteinkomplexe untersuchen kann. Zudem lassen sich verschiedene Strukturzustände voneinander getrennt bestimmen, da tatsächlich Bilder individueller Moleküle ausgewertet werden können. Im Gegensatz dazu muss man sowohl bei der Kristallografie als auch bei der NMR-Spektroskopie stets über alle Proteine in der Probe mitteln. Im Jahr 2017 wurden der Molekularbiologe Richard Henderson und die beiden Biophysiker Joachim Frank (Columbia University) und Jacques Dubochet (EPFL Lausanne) für die Entwicklung der Kryoelektronenmikroskopie mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.

Strukturprognose plötzlich viel Auftrieb und erhöhte die Qualität der Vorhersagen enorm.

Ausgehend davon hat DeepMind in den letzten Jahren mit Hochdruck an einem neuen Vorhersage-Algorithmus gearbeitet, der vorrangig auf einer Methode aus der künstlichen Intelligenzforschung beruht, dem so genannten Deep Learning, zu Deutsch mehrschichtiges oder tiefes Lernen. Diese spezielle Art der Informationsverarbeitung beruht wiederum auf dem so genannten maschinellen Lernen, bei dem künstliche neuronale Netze sich selbstständig immer stärker strukturell vernetzen und so bestimmte Probleme zunehmend besser lösen können. Sie lernen also von sich aus dazu.

Während bisherige Methoden zur Vorhersage der Proteinfaltung KI nur für Teilschritte verwendet haben, um mit den so gewonnenen Informationen dann klassische Modellierungsverfahren zu füttern, setzt AlphaFold2 auf die End-to-end-Vorhersage. Das bedeutet, dass die KI alle Arbeitsschritte selbst erledigt: Sie liest die Aminosäuresequenzen ein und gibt am Ende alle Koordinaten der enthaltenen Atome aus. Dazu wurde AlphaFold2 mit rund 170 000 bekannten Proteinstrukturen unter Einbeziehung der evolutionären, physikalischen und geometrischen Einschränkungen bezüglich der molekularen Architektur trainiert. Auf diese Weise lernte das Programm sowohl allgemeine Prinzipien des Aufbaus von Eiweißmolekülen als auch den Zusammenhang zwischen Struktur und Sequenz.

Vorgehen der KI

ähnelt unserem beim Puzzeln

Die erste Version von AlphaFold hatte noch die Tendenz, die Wechselwirkung zwischen bestimmten Abschnitten in der Sequenz zu stark zu gewichten. Das Nachfolgeprogramm enthält nun einen »Aufmerksamkeitsalgorithmus«, der relevante Daten zusammenbringen und irrelevante herausfiltern kann. Konkret geht es hier um die zahllosen Wechselwirkungen zwischen den Aminosäuren des Proteins. Die Vorgehensweise ähnelt dabei der Art, wie wir Puzzle zusammensetzen: Zunächst verbindet man Teile zu kleineren Stücken und sucht anschließend nach Möglichkeiten, diese zu einem größeren Ganzen zu verbinden. Gleichermäßen bildet das Programm Cluster von Aminosäuren, die signifikant miteinander wechselwirken, und setzt sie dann gewissermaßen zu einem vollständigen Protein zusammen.

Der zu Grunde liegende Programmcode ist seit Juli 2021 öffentlich, und daher kann jetzt im Prinzip jeder anhand von Aminosäuresequenzen die dreidimensionale Struktur von Eiweißmolekülen berechnen. Die Open-Source-Version ist laut einem Beteiligten des AlphaFold-Projekts etwa 16-mal schneller als noch im Jahr 2020. Binnen Minuten oder weniger Stunden spuckt sie die gesuchten Strukturen aus, je nach Größe des Proteins. Für manche Moleküle des CASP-Wettbewerbs rechnete das Programm mitunter noch mehrere Tage lang. Zusätzlich publizierten die Entwickler eindrucksvolle Ergebnisse der KI: Auf einer Internetseite sind frei zugänglich die Strukturen fast aller Proteine des menschlichen Körpers und 20 weiterer Organismen einsehbar (siehe »Datenbank des Lebens«).

Datenbank des Lebens

Im Juli 2021 veröffentlichten Forscherinnen und Forscher um den Chefentwickler Demis Hassabis umfangreiche Ergebnisse ihrer KI AlphaFold2: eine Datenbank, die die Proteinstrukturen fast des gesamten menschlichen Proteoms beinhaltet – also aller im menschlichen Körper vorkommenden Eiweißmoleküle (knapp 24 000). In der wissenschaftlichen Gemeinschaft löste die Nachricht Begeisterung aus, da die Kenntnis über das menschliche Proteom gewissermaßen als Schlüssel zum Verständnis des Lebens gilt. Bisher waren durch jahrzehntelange experimentelle Methoden gerade einmal 17 Prozent davon genau bestimmt, AlphaFold2 erhöhte diesen Anteil nun auf 98,5 Prozent. Insbesondere in der Medizin öffnen sich dadurch zahlreiche neue Möglichkeiten. So unterstützt DeepMind bereits ausgewählte Organisationen wie etwa die Genfer Initiative Drugs for Neglected Diseases, zu Deutsch Wirkstoffe für vernachlässigte Krankheiten, um für seltene Erkrankungen Behandlungen zu entwickeln. Die Proteinstrukturen helfen hier sowohl die Funktionsweise von Erregern zu verstehen als auch dabei, neue Wirkstoffe zu finden. Neben dem menschlichen sind in der Datenbank bereits 20 weitere Proteome von anderen wichtigen Organismen zu finden; insgesamt sind 365 000 Proteine gelistet. In den kommenden Monaten planen die Verantwortlichen, die Datenbank um einen großen Teil aller katalogisierten Proteine zu erweitern, das sind mehr als 100 Millionen. Die Datenbank wird in Zukunft am Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg betreut und ist hier frei für jeden zugänglich: <https://alphafold.ebi.ac.uk>

Tunyasuvunakool, K. et al.: Highly accurate protein structure prediction for the human proteome. *Nature* 596, 2021

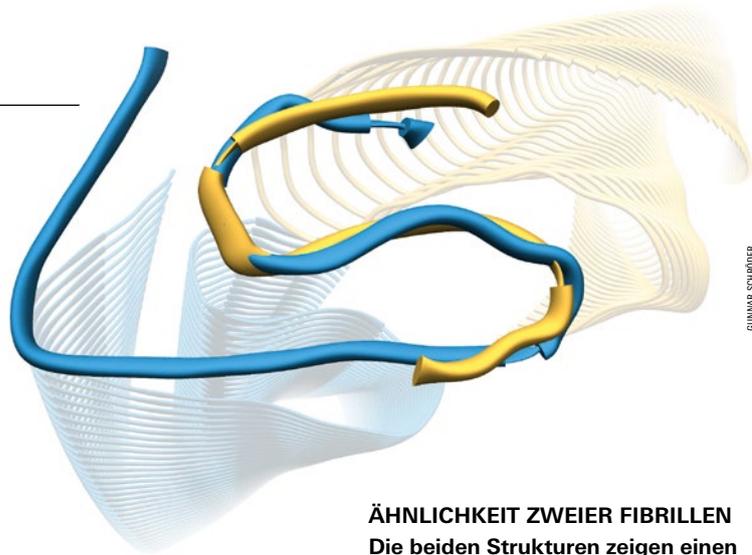
Die nächste Herausforderung steht aber bereits vor der Tür: Proteine üben ihre Funktion selten allein aus, sondern sie binden sich ständig an weitere Partnerproteine. Die Zahl aller Protein-Protein-Interaktionen im menschlichen Organismus wird auf 650 000 geschätzt. Allerdings ist bisher nur ein kleiner Bruchteil davon bekannt. Die Struktur solcher Molekülkomplexe zuverlässig vorherzusagen, ist offensichtlich noch schwieriger und auch mit dem AlphaFold-Ansatz noch nicht möglich.

Eine weitere Schwäche der KI-Methode ist, dass damit der Prozess der Faltung nicht zwangsläufig klar wird. Dies

Eine Verbindung zwischen Alzheimer und Diabetes?

Fachleute vermuten, dass falsch gefaltete Proteine eine ganze Reihe von Krankheiten auslösen können. In jungen Jahren werden die unbrauchbaren Biomoleküle in der Regel umgehend abgebaut, mit fortschreitendem Alter funktioniert dieser Mechanismus aber immer weniger gut. Mitunter lagern sich nun fehlerhafte Proteine geordnet zusammen und bilden so genannte Fibrillen. Dabei fungieren einige wenige Proteine als Aggregationskern und lösen die Polymerisation mit weiteren Exemplaren aus. Gemeinsam mit meinen Kollegen vom Forschungszentrum Jülich und der Universität Düsseldorf sowie Wissenschaftlern der Universität Maastricht konnten wir 2017 mit der Kryoelektronenmikroskopie die Struktur von Beta-Amyloid-Fibrillen bestimmen. Diese treten im Gehirn von Alzheimerpatienten auf und hängen vermutlich mit dem geistigen Verfall zusammen. Zwei Jahre später, als wir die Struktur von IAPP-Fibrillen ermittelten, die bei Menschen mit Typ-2-Diabetes in der Bauchspeicheldrüse auftreten, erlebten wir dann eine Überraschung: Der Aufbau der Beta-Amy-

loid-Fibrillen (blau) und der IAPP-Fibrillen (gelb) ähnelt sich sehr stark (siehe Abbildung). Und interessanterweise gibt es auch einen epidemiologischen Zusammenhang: Patienten mit Typ-2-Diabetes haben eine etwa zweifach erhöhte Wahrscheinlichkeit, an Alzheimer zu erkranken. Bislang ist aber noch nicht geklärt, auf welche Weise die beiden Krankheiten zusammenhängen. Eine Antwort findet sich möglicherweise in der Fehlfaltung der beiden Proteine Beta-Amyloid und IAPP. Denn die IAPP-Fibrillen von Diabetespatienten könnten das Beta-Amyloid mittels so genannten »cross-seedings« dazu bringen, sich in Fibrillen zusammenzulagern. Der mutmaßliche Mechanismus würde auf einer direkten Interaktion zwischen unterschiedlichen fehlge-



GINNAR SCHROEDER

ÄHNLICHKEIT ZWEIER FIBRILLEN

Die beiden Strukturen zeigen einen Ausschnitt der beiden ähnlichen Fibrillen von Beta-Amyloid (blau) und IAPP (gelb). Die beiden vorderen Strukturen bilden das Rückgrat jeweils einer Proteinkette innerhalb der Fibrille. Man blickt auf einen Querschnitt durch die Fibrille entlang der Längsachse. Viele Kopien dieser Ketten liegen übereinander und bilden Fibrillen, die hier blass im Hintergrund gezeigt sind.

falteten Proteinen beziehungsweise deren Fibrillen beruhen, wenn diese eine gewisse Ähnlichkeit in der Struktur aufweisen. IAPP-Fibrillen würden demnach die Entstehung von Beta-Amyloid-Fibrillen begünstigen, weshalb sich die Wahrscheinlichkeit für eine Alzheimererkrankung erhöhte, wenn man unter Typ-2-Diabetes leidet.

würde aber zum Beispiel helfen, zu verstehen, weshalb der Prozess manchmal fehlerhaft abläuft und das bisweilen sogar Krankheiten auslöst. Hier kommt nun der zweite Ansatz zur Strukturvorhersage ins Spiel. Anhand der physikalischen Naturgesetze betrachtet man die im Molekül wirkenden Kräfte zwischen den Atomen. Damit lassen sich dann die Bewegungen der Atome in kleinen Zeitschritten simulieren. So kann man entweder ein Protein bei der Faltung beobachten oder ein bereits gefaltetes bei der Arbeit. Derartige Modellierungen der Molekulardynamik liefern also im Gegensatz zum wissensbasierten Ansatz nicht nur die Strukturen, sondern auch die einzelnen Zwischenschritte, die zum Ziel führen. Der dazu erforderliche Rechenaufwand ist jedoch gigantisch. Abhängig von der Größe des Proteins können selbst Supercomputer nur etwa eine Zeitdauer von 10 bis 100 Nanosekunden pro Tag simulieren. Gleichwohl gab es auf diesem Gebiet in den letzten zehn Jahren erhebliche Fortschritte. 2013 wurde die Ent-

wicklung der Methode gar mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet. Der Bioinformatiker David Shaw hat mit seiner Forschungsfirma DE Shaw Research in New York einen Computer speziell für Simulationen der Molekulardynamik entwickelt, der mehr als 100-mal schneller ist als selbst die besten Supercomputer. Shaw hatte lange Zeit Computerprogramme zum Wertpapierhandel entwickelt und einen der weltweit erfolgreichsten Hedgefonds (DE Shaw & Co) gegründet. Vor 20 Jahren wandte er sich dann wieder der Wissenschaft zu und hat seither viel privates Geld in die Entwicklung des Computers namens ANTON gesteckt (benannt nach dem niederländischen Naturforscher und bedeutendsten Mikroskopiker des 17. und beginnenden 18. Jahrhunderts Antoni van Leeuwenhoek). ANTON kann die Faltung von mehreren kleinen Proteinen bis zu einer Kettenlänge von 80 Aminosäuren korrekt vorhersagen. Allerdings formen sich solche kleinen Proteine in weniger als 50 Mikrosekunden. Für die routinemäßige

Strukturvorhersage von größeren und sich langsamer faltenden Proteinen ist der Rechenaufwand bisher schlichtweg noch zu groß.

Dennoch ist unser Bild von der Proteinfaltung hauptsächlich geprägt von solchen Moleküldynamik-Simulationen. Keine experimentelle Technik kann in auch nur annähernd vergleichbarer Präzision die einzelnen Schritte aufzeigen. Noch schwieriger ist es, die Faltung von Proteinen in ihrer natürlichen Umgebung innerhalb der Zelle zu untersuchen. Dementsprechend schlecht ist dieser Vorgang bislang verstanden. Sicher ist, dass die meisten Proteine zur Faltung in der Zelle Hilfe in Anspruch nehmen – von so genannten Chaperonen, englisch für Anstandsdame. Chaperone sind Proteinkomplexe, die eine Art Fass mit Deckel bilden. Fachleute gehen davon aus, dass sie dadurch im Inneren eine kontrollierte und geschützte Umgebung schaffen, in der sich die Eiweißmoleküle falten können, ohne mit anderen zu verklumpen. Das kann normalerweise leicht passieren, da das Innere von Zellen mit Proteinen und anderen Molekülen vollgepackt ist. Insbesondere die hydrophoben Abschnitte einer Aminosäurekette neigen in einer solchen Umgebung zum Zusammenkleben. Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass Chaperone zusätzlich die korrekte Faltung und Assoziation der Proteine beschleunigen, indem sie die Bewegung der Molekülkette beeinflussen. Von diesen Mechanismen sind aber nur wenige ausreichend gut studiert und dokumentiert.

Fehlfaltung kann sich zwischen Proteinen übertragen

Gleichermaßen lückenhaft ist unser Wissen, was die Fehlfaltung von Proteinen anbelangt. Überraschenderweise handelt es sich dabei in der Regel nicht einfach um eine zufällig falsch zusammengelagerte Struktur, sondern um einen sehr genau definierten so genannten Amyloidzustand. Tatsächlich lagern sich die fehlerhaften Eiweißmoleküle nämlich ordentlich in Schichten zusammen und formen lange, sehr stabile Fibrillen. Letztere können nun weitere Proteine dazu bringen, sich fehlerhaft zu falten und an die Fibrillen zu heften oder neue zu bilden. Dabei reicht offenbar eine gewisse Ähnlichkeit der Struktur aus, um auch Fibrillen eines anderen Proteins wachsen zu lassen. Fachleute sprechen in dem Zusammenhang von »cross-seeding« (siehe auch »Eine Verbindung zwischen Alzheimer und Diabetes?«).

Hier könnte das so genannte Prion-Prinzip ins Spiel kommen. Prionen sind fehlgefaltete Proteine, die gesunden Pendanten ihre Konformation aufzwingen können. Sie sind dadurch sogar in der Lage, Krankheiten zu übertragen, ähnlich wie Viren oder Bakterien. Prion ist dementsprechend ein Kofferwort aus »protein« und »infection«. Dieses verblüffende Phänomen beschrieb erstmals Stanley Prusiner von der University of California in San Francisco 1982. Er entdeckte das Prionprotein (PrP), das die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit sowie BSE auslösen und übertragen kann. Gemäß dem Prion-Prinzip würden womöglich sogar wenige fehlerhafte Proteine ausreichen, um eine unheilvolle Kaskade auszulösen, indem sie zu einer massiven Bildung von Fibrillen führen.

Im Gehirn von Alzheimerpatienten zum Beispiel finden sich massenhaft solche Aggregate, so genannte Plaques aus Beta-Amyloid-Proteinen. Diese Plaques sind laut einer weit verbreiteten Theorie der Endpunkt einer Aggregationskaskade, die für den geistigen Verfall bei den Erkrankten verantwortlich ist. Die Ursache für ihre Entstehung ist aber noch unklar. Ziemlich sicher ist jedoch, dass hier das Prion-Prinzip eine entscheidende Rolle spielt.

Auch Diabetespatienten weisen Ansammlungen falsch gefalteter Eiweißmoleküle auf. In den Betazellen der Bauchspeicheldrüse, die das blutzuckersenkende Hormon Insulin produzieren, lagert sich ein Protein namens IAPP zu Fibrillen zusammen. Das kann zu einem Absterben der Betazellen und zu einem krankhaften Anstieg des Blutzuckers führen. Auf Grund der Ähnlichkeit der Fibrillenstruktur bei Alzheimer und Typ-2-Diabetes könnte es sogar einen direkten Zusammenhang zwischen den beiden Erkrankungen geben.

Zwar hat die Forschung in den letzten Jahren Fortschritte gemacht, was das Verständnis von amyloiden Strukturen anbelangt, doch bezüglich deren Ursachen und Auswirkungen ist das meiste noch unklar. Interessanterweise sind in jüngerer Vergangenheit sogar viele Amyloide entdeckt worden, die konkrete Aufgaben erfüllen. Beispielsweise verwenden Bakterien Amyloide, um einen extrem stabilen und widerstandsfähigen Biofilm zu erzeugen und sich so gegen Austrocknung und Angriffe von außen zu schützen.

Während von »normal« gefalteten Proteinen bereits über 100000 Strukturen bekannt sind, wurden in den vergangenen drei Jahren mittels Kryoelektronenmikroskopie nur etwas mehr als 70 Amyloidstrukturen bestimmt. Daher funktionieren hier wissensbasierte Strukturvorhersagen, wie sie das AlphaFold-System betreibt, noch nicht. Es stehen schlicht zu wenige Daten für das Training der KI zur Verfügung. Bei diesen bekannten Amyloidstrukturen fällt vor allem auf, dass sich dasselbe Protein auf viele verschiedene Arten in eine Amyloidfibrille falten kann, es also eine Vielzahl von Strukturen einnehmen kann. Welche davon sind aber nun relevant für eine bestimmte Krankheit? Welche sind die Zielstrukturen, gegen die wir Medikamente entwickeln müssen? Auf solche und andere Fragen der Proteinfaltung gilt es künftig dringend Antworten zu finden. Das wird einerseits im Labor geschehen, andererseits aber von nun an auch ganz besonders mit Hilfe der Ergebnisse aus den mächtigen Computersimulationen. ◀

QUELLEN

Gremer, L. et al.: Fibril structure of amyloid- β (1-42) by cryo-electron microscopy. *Science* 358, 2017

Jumper, J.: Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature* 596, 2021

Lindorff-Larsen, K. et al.: How fast-folding proteins fold. *Science* 334, 2011

Röder, C. et al.: Cryo-EM structure of islet amyloid polypeptide fibrils reveals similarities with amyloid- β fibrils. *Nature Structural & Molecular Biology* 27, 2020

Senior, A.W. et al.: Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. *Nature* 577, 2020

Die Spektrum eLearningFlat



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

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

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

Spektrum.de/aktion/elearningflat



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

Die Spektrum eBookFlat



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

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

Spektrum.de/aktion/ebookflat



ROUDESIGN / BETTY IMAGES / ISTOCK



FRANZ SCHÄDEL / FLORIAN-FREISTETTER.DE/PRESSE/ / CC BY-SA 4.0 / CREATIVCOMMONS.ORG/LICENSING/FR-SA/4.0/LEGAL/0000

FREISTETTERS FORMELWELT WARUM WOLKEN SCHWEBEN

Häufig sind es Kinder, die sich darüber wundern – und die Frage ist keineswegs dumm. Tatsächlich hängt die Antwort auch mit der Verbreitung des Coronavirus zusammen.

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

► spektrum.de/artikel/1913908

Eine weiße Wolke am Sommerhimmel sieht federleicht aus. Dennoch kann sie Wassertropfen mit einem Gewicht von einigen dutzend Tonnen enthalten – eine große Regenwolke sogar noch viel mehr. Warum schwebt sie dann am Himmel und klatscht nicht einfach auf den Erdboden? Das lässt sich mit dieser Formel verstehen:

$$F = -6\pi\eta r v$$

Sie beschreibt das Gesetz von Stokes, mit dem man die Reibungskraft F auf einen kugelförmigen Körper mit Radius r berechnet, der sich in einer laminaren (nicht turbulenten) Strömung bewegt. η steht für die Viskosität des Mediums, durch die das Objekt mit der Geschwindigkeit v fließt.

Ein typischer Wassertropfen in einer Wolke hat einen Radius von etwa zehn Mikrometern. Solche Aerosole können lange schweben. Die Schwerkraft der Erde lässt den Tropfen zwar nach unten fallen, doch die Reibungskraft wirkt der Gravitation entgegen, bis die Fallgeschwindigkeit im Kräftegleichgewicht konstant wird. Damit kann man die Sinkgeschwindigkeit berechnen, die bei einigen Zentimetern pro Sekunde liegt. Die Wolke fällt also tatsächlich nach unten, wenn auch langsam.

Zumindest im Prinzip, denn die Atmosphäre steht nie still. Es gibt Aufwinde, welche den langsamen Sinkflug einer Wolke kompensieren können, zudem bilden sich Wolken vor allem in aufsteigender Luft, die sich ausdehnt und abkühlt. Wenn die Tropfen aber nach Kontakt miteinander verschmelzen und dadurch groß genug werden, fällt das Wasser irgendwann wirklich zu Boden, was wir dann als Regen erleben.

Die physikalische Beschreibung der Bewegung kleinster Partikel und Tröpfchen ist nicht nur von meteo-

rologischem Interesse. Gerade zur Zeit der Covid-19-Pandemie werden diese Aerosole öffentlich diskutiert. Die Frage nach der Ausbreitung von Viren mit der ausgeatmeten Luft hat unser Leben in den letzten Monaten massiv beeinflusst. Das Forschungsgebiet spielt jedoch auch eine wichtige Rolle, wenn man die Klimakrise oder die Auswirkungen der Umweltverschmutzung verstehen möchte.

Schon vor mehr als 100 Jahren stand das Gesetz von Stokes im Zentrum eines berühmten Experiments. 1910 wollten die US-amerikanischen Physiker Robert Millikan und sein damaliger Doktorand Harvey Fletcher den Wert der Elementarladung bestimmen: die kleinstmögliche elektrische Ladung, die ein freies Teilchen besitzen kann.

Um sie zu berechnen, erzeugten die beiden winzige Öltröpfchen, die sie beleuchteten, um an ihnen das gebeugte Licht in einem Mikroskop zu beobachten. Dann luden sie die Tröpfchen elektrisch auf und ließen sie in einem elektrischen Feld schweben. Die Stärke des Felds muss dafür die auf die Tropfen wirkende Gravitationskraft kompensieren. Ist dieser Zustand erreicht, kann man aus der Feldstärke die Elementarladung berechnen.

Im Detail war die Durchführung des Experiments natürlich um einiges komplizierter. Aber die zwei Physiker waren erfolgreich und konnten ein für die damalige Zeit angemessenes Ergebnis bestimmen. Millikan erhielt dafür 1923 den Nobelpreis, Fletcher ging hingegen leer aus, da er nach einer Abmachung mit seinem damaligen Betreuer in der Veröffentlichung der Ergebnisse nicht genannt wurde.

Die Elementarladung muss inzwischen nicht mehr gemessen werden: Im Zuge einer Neudefinition der SI-Einheit Coulomb für die elektrische Ladung wurde der Wert exakt festgelegt. Doch bis heute ist das Millikan-Experiment ein Klassiker geblieben. Generationen von Studierenden haben die fallenden Tröpfchen schon selbst beobachtet – was fast so schön ist wie ein Blick in die Wolken.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN FORENSIK FÜR DEN HAUSGEBRAUCH

Auch kriminalistische Laien können manche forensischen Untersuchungen durchführen. Zum Beispiel lassen sich Blutspuren mit Hilfe von Farbstoffen aus Textmarkern oder Badesalz nachweisen.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» spektrum.de/artikel/1913914

► Kriminalserien, in denen forensische Untersuchungen einen wesentlichen Teil der Handlung ausmachen, erfreuen sich großer Beliebtheit und werden deshalb seit Jahren in Endlosschleifen im Privatfernsehen ausgestrahlt. Bekannte Beispiele sind »CSI: Den Tätern auf der Spur«, »Bones – die Knochenjägerin« oder »Dexter« (CSI steht für Crime Scene Investigation und bezeichnet die US-amerikanische und kanadische Spurensicherung).

Unter Forensik versteht man die Gesamtheit wissenschaftlicher Verfahren, die zur Aufklärung von Straftaten dienen (rund 5,44 Millionen waren es 2019 allein in Deutschland, wovon 57,5 Prozent aufgeklärt wurden). Entsprechend vielfältig sind ihre Teilbereiche, die sich allerdings nicht immer klar voneinander abgrenzen lassen. Sie kommen aus der Psychologie und Psychiatrie ebenso wie aus der Biologie, Chemie, Pharmazie und Ballistik. Eine zentrale Rolle spielt ferner die Rechtsmedizin, und auch die Untersuchung und Auswertung von Datenträgern oder Netzinhalten gewinnt zunehmend an Bedeutung.

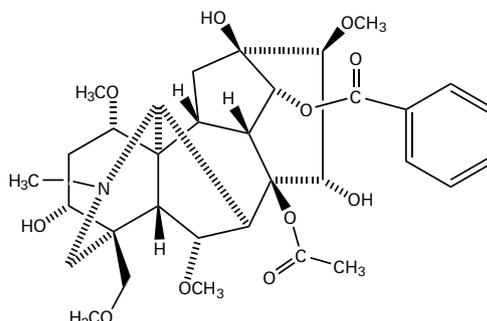
Einen Schwerpunkt der forensischen Chemie bilden analytische und insbesondere toxikologische Methoden. Sie dienen unter anderem zum Nachweis von Vergiftungen sowie von Drogen- und Medikamentenmissbrauch. Dabei werden meist Körperflüssigkeiten oder Gewebe von Organen analysiert, aber auch Haare – was schon so manchen Prominenten des Drogenmissbrauchs überführt und unter medialem Druck vom Sockel gestürzt hat.

Der zweite Schwerpunkt ist die kriminalistische Chemie. Dabei geht es vor allem um Untersuchungen am Tatort – etwa das Aufspüren bestimmter Substanzen wie Blut. Hinzu kommen die Sicherung und Untersuchung von Finger- und Fußabdrücken sowie von Waffen- und Munitonsspuren.

Heutzutage betreiben die Strafverfolgungsbehörden also einen enormen kriminaltechnischen Aufwand zur Aufklärung von Verbrechen. Doch das war nicht immer so. Im Mittelalter und der Frühen Neuzeit begnügte man sich mit der »peinlichen Befragung« von Verdächtigen. Ursprünglich war damit die Hauptvernehmung von Angeklagten bei Inquisitionsprozessen gemeint. Später verbarg sich dahinter der Einsatz der Folter, um ein Geständnis zu erzwingen. So leitet sich der Begriff »peinlich« von »Pein« (lateinisch: poena = Sühne, Buße, Strafe, Qual) ab.

Erst im Verlauf des 18. Jahrhunderts trat an die Stelle der Folter zunehmend die Suche nach Beweisen zur Überführung von Verdächtigen. In Preußen ist die Entwicklung mit Friedrich II. (dem »Großen«, 1712–1786) verknüpft, der kurz nach seinem Regierungsantritt die Folter stark einschränken ließ. In seinem Dekret vom 3. Juni 1740 heißt es: »Seine Königliche Majestät in Preußen haben aus bewegenden Ursachen resolvieret, die Tortur gänzlich abzuschaffen, außer bei Majestätsverbrechen, Landesverrätere, auch

STRUKTURFORMEL VON ACONITIN Wasserstoffatome wurden der Übersichtlichkeit halber weggelassen.



den großen Mordtaten, wo viele Menschen ums Leben gebracht.«

Vermutlich beruhte diese für die damalige Zeit unerhörte Anordnung auf einem persönlichen Erlebnis Friedrichs II. zehn Jahre zuvor. Um der Strenge seines Vaters zu entfliehen, wollte er sich heimlich über Frankreich nach England absetzen. Die Flucht wurde vereitelt und ein enger Freund Friedrichs, Leutnant Hans Hermann von Katte, als Mitwisser enttarnt, gefoltert und schließlich hingerichtet. Die Juristen stellte die Kabinettsorder freilich vor ein großes Problem, da ohne das meist über die Folter erreichte Geständnis keine Verurteilung möglich war.

Einer der frühesten dokumentierten Fälle, bei dem das Urteil ausschließlich auf Beweisen beruhte, datiert aus dem Jahre 1784. Der Sattler John Toms wurde für schuldig befunden, den Zimmermann Edward Culshaw in Ditton, Lancashire, getötet zu haben.

Laut Anklage schoss Toms bei einem Raubüberfall auf der Straße nach Liverpool seinem Opfer mit einer Pistole in den Kopf. Zu dieser Zeit waren die Pistolen noch Vorderlader: Treibladung und Projektil wurden durch die Mündung in den Lauf geschoben. Damit das Projektil nicht herausfiel, stopfte man zum Beispiel noch ein Papierknäuel hinterher. Und genau das wurde Toms zum Verhängnis. Bei der Untersuchung der Leiche von Culshaw fand sich ein Papierfetzen in der Wunde. Nach dem Reinigen und Auseinanderfalten stellte sich heraus, dass es sich um ein herausgerissenes Stück einer Zeitung handelte. Das passende Gegenstück entdeckten die Polizisten bei Toms.

Eine weit verbreitete und schon in der Antike genutzte Mordwaffe sind Gifte. Zunächst kamen Pflanzenextrakte zum todbringenden Einsatz. Ein Beispiel ist der weit verbreitete blaue Eisenhut (*Aconitum napellus*), dessen Giftwirkung bereits der römische Dichter Ovid (43 v. Chr.–17 n. Chr.) beschrieben hat. Besonders toxisch sind seine Wurzelknollen, die getrocknet und zerrieben wurden. Das Pulver oder ein daraus hergestelltes Extrakt ließ sich dem Opfer dann unbemerkt zuführen.

Die Giftwirkung beruht auf dem Alkaloid Aconitin. Es hat eine äußerst komplizierte räumliche Struktur, die außer einem ebenen Benzolring eine Reihe gewellter, ineinander verschachtelter Ringe aus fünf bis sieben Atomen enthält

und sich zweidimensional nur sehr schwer darstellen lässt (siehe »Strukturformel von Aconitin«). Die letale Dosis beim Menschen beträgt 1,5 bis 5 Milligramm des Reinstoffs. Da die Wurzelknollen einen Anteil von 0,2 bis 3 Prozent aufweisen, reicht der Verzehr von 1 bis 2 Gramm aus, um den Tod herbeizuführen. Aconitin verändert die Durchlässigkeit erregbarer Membranen für Natriumionen und verlängert so deren Einstrom bei einem Aktionspotential. Dadurch verzögert sich die anschließende Wiederherstellung des Ruhepotenzials (Repolarisation). Der Tod tritt schließlich durch Atemlähmung oder Herzversagen ein.

Neben diesem »pflanzlichen Arsen«, wie Plinius der Ältere (23/24–79) den Fingerhut nennt, wurden in der Spätantike auch echte Arsenverbindungen zu verbrecherischen Zwecken missbraucht. Der Mord blieb meist ungesühnt, weil es damals noch keine toxikologischen Tests gab, um Giftmorde nachzuweisen. Das änderte sich im Fall des Arsens (Arsen(III)-oxid, As_2O_3) erst 1836, als der englische Chemiker James Marsh (1794–1846) die nach ihm benannte Marshsche Probe entwickelte. Bei diesem Nachweis vermischt man die gifthaltige Substanz mit Zink und gibt Schwefelsäure hinzu. Letztere reagiert mit dem Metall, und der dabei erzeugte Wasserstoff setzt im Moment des Entstehens (in statu nascendi), in dem er noch atomar vorliegt, das Arsenik zu gasförmigem Arsenwasserstoff um. Entzündet man das entweichende Gasgemisch, zersetzt sich der hitzeempfindliche Arsenwasserstoff, und das Arsen scheidet sich auf einer in die Flamme gehaltenen Porzellanschale als charakteristischer schwarzer »Spiegel« ab.

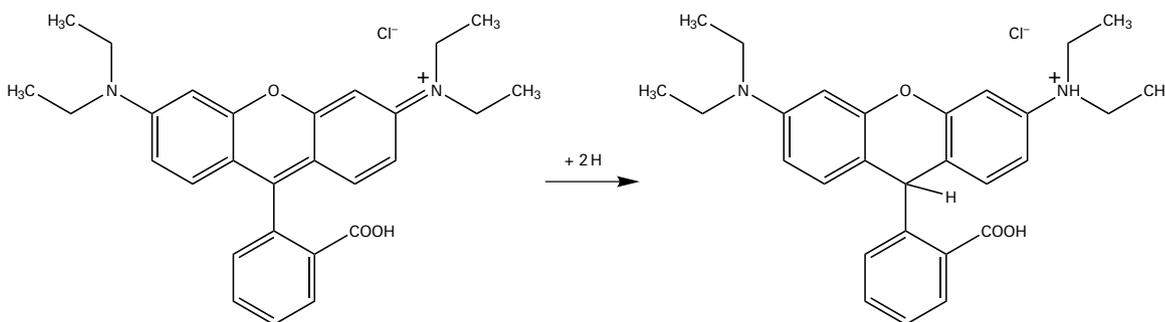
Die zugehörigen Reaktionsgleichungen lauten (die Symbole »s«, »aq«, »l«, »g« und »nasc.« stehen für »fest«, »in Wasser gelöst«, »flüssig«, »gasförmig« und »naszierend«):



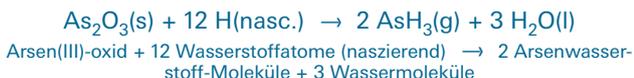
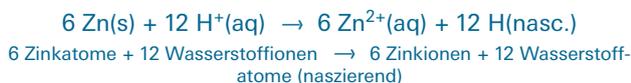
MATTHIAS DÜCCI

EISBECHER Die Mischung aus Rinderblut und H_2O_2 erinnert an ein Dessert.

REDUKTION DURCH NASZIERENDEN WASSERSTOFF
Dabei verwandelt sich rotes Rhodamin B in die farblose Leukoverbindung. Nach Zugabe von Wasserstoffperoxid und Hämoglobin kehrt sich der Vorgang wieder um.



MATTHIAS DÜCCI

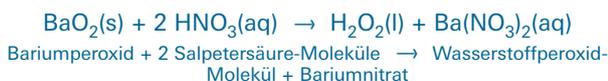


Auch weißer Phosphor steckte sehr wahrscheinlich hinter zahlreichen ungeklärten Todesfällen in früheren Zeiten. Damals war er leicht zu beschaffen. In Form von so genannten Phosphorlatwergen, einem Gemisch aus Mehl, Wasser, Fett und eben weißem Phosphor, diente er als Rattengift. 1854 entwickelte der Chemiker Eilhard Mitscherlich (1794–1863) dafür einen spektakulären Nachweis, als er einen mysteriösen Todesfall untersuchen sollte. Da er annahm, dass Phosphor im wässrig-breiiigen Mageninhalt nur sehr langsam oxidiert würde, erhitzte er einfach den Mageninhalt des Verstorbenen bis zum Sieden. Im entweichenden Dampf verriet sich der Phosphor durch sein charakteristisches grünliches Leuchten: eine Chemolumineszenz, die bei der Oxidation von P_4 -Molekülen in der Luft auftritt (»Spektrum« Juli 2018, S. 52).

Natürlich sind die Verfahren der toxikologischen Chemie inzwischen erheblich verfeinert worden. So gelingt es heute, Gifte sogar noch in Verdünnungen von eins zu einer Million (parts per million, kurz ppm) nachzuweisen. Bei organischen Stoffen kommen die Gaschromatografie, die Massenspektrometrie oder die Hochdruckflüssigkeitschromatografie zum Einsatz, bei Schwermetallvergiftungen sind es die Atomabsorptions-, die Emissions- sowie ebenfalls die Massenspektrometrie.

Der Nachweis von Blut

Im Jahr 1818 entdeckte der französische Chemiker Louis Jaques Thénard (1777–1857) eine Verbindung, die heutzutage gern zum Aufhellen von Haaren beziehungsweise Blondieren verwendet wird: das Wasserstoffperoxid. Er erhielt die Substanz per Zufall, als er das 1811 ebenfalls von ihm entdeckte Bariumperoxid mit Salpetersäure versetzte. Die Reaktionsgleichung lautet:

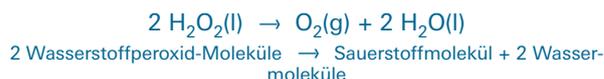


Später ersetzte man die Salpetersäure durch Schwefelsäure (H_2SO_4), so dass anstatt von löslichem Bariumnitrat schwer lösliches Bariumsulfat entsteht, das aus der Lösung ausfällt. Nach dem Abfiltrieren bleibt eine relativ reine Wasserstoffperoxid-Lösung zurück. Die Herstellungsmethode fand industrielle Verbreitung und blieb noch bis Mitte des 20. Jahrhunderts (unter anderem bei der BASF) im Einsatz, ehe das so genannte Anthrachinon-Verfahren an ihre Stelle trat.

Thénard führte zahlreiche Experimente mit der neuen Substanz durch. Dabei beobachtete er eine Gasentwicklung, sobald das Wasserstoffperoxid mit Blut in Kontakt kam. Besonders eindrucksvoll zeigt das ein beliebter

Versuch, der die anschauliche Bezeichnung »Eisbecher« trägt. Dabei gießt man in einen Glaskelch mit rund 350 Milliliter Fassungsvermögen 10 Milliliter Schweine- oder Rinderblut und fügt 15 Milliliter 30-prozentige Wasserstoffperoxid-Lösung hinzu. Das Gemisch schäumt auf und steigt in wenigen Sekunden den Kelch empor. Das Ergebnis erinnert an einen Eisbecher, da das Blut auch teilweise entfärbt wird (siehe »Eisbecher«).

An sich ist Wasserstoffperoxid nur metastabil, sollte also unter normalen äußeren Bedingungen in Sauerstoff und Wasser zerfallen. Eine hohe Aktivierungsbarriere verhindert diesen Zerfall jedoch. Das ändert sich, wenn ein Katalysator die Barriere absenkt. Blut enthält einen solchen Reaktionsbeschleuniger: die Katalase. Auch im menschlichen Körper wird im Zuge des Energiestoffwechsels nämlich Wasserstoffperoxid gebildet, das als Zellgift wirkt. Die Katalase zersetzt es und macht es so unschädlich. Ihr reaktives Zentrum ist die Hämgruppe, eine Komplexverbindung mit einem Eisenion im Zentrum. Ähnliche Gruppen finden sich im Hämoglobin, dem roten Blutfarbstoff, und haben dort dieselbe katalytische Wirkung. Die Zerfallsgleichung lautet:



Basierend auf dieser Erkenntnis entwickelte Christian Friedrich Schönbein (1799–1868) 1863 einen der ersten forensischen Tests auf geringste Blutmengen, der mit Wasserstoffperoxid in einer so genannten Guajaktinktur arbeitete: »Wasser, durch entfaseretes Blut nicht stärker gefärbt als nötig ist, um ihm eines für das Auge eben noch wahrnehmbaren Stich ins Rötliche zu geben, vermag die HO_2 -haltige Guajakinctur in kurzer Zeit noch merklich zu blauen, wesshalb ich auch die letztere als das empfindlichste mir bekannte chemische Reagens auf die Blutkörperchen den Physiologen und für gerichtliche Untersuchungen wiederholt empfehlen möchte.«

Die Summenformel von Wasserstoffperoxid wurde seinerzeit fehlerhaft mit HO_2 an Stelle von H_2O_2 angegeben. Guajakharz lässt sich aus Bäumen der Gattung Guajak gewinnen. Der von Schönbein vorgeschlagene Nachweis beruht auf der Oxidation der in der Tinktur enthaltenen





FEUCHTES WATTESTÄBCHEN Wurde es an einer eingetrockneten Blutspur gerieben, fluoresziert ein Wattestäbchen nach Behandlung mit dem Textmarkerreagenz und Wasserstoffperoxid-Lösung unter UV-Licht gelb.

MARTHA DUCCI

Guajakonsäure zu Guajakblau. Verantwortlich dafür ist der Sauerstoff, der entsteht, wenn Häm den Zerfall des Wasserstoffperoxids katalysiert. Der Guajaktest diente noch bis 2016 zur Untersuchung von Stuhl auf Blut im Rahmen der Darmkrebsfrüherkennung.

Einen weiteren Farbttest auf Blut veröffentlichte 1903 der deutsche Mediziner Erich Meyer (1874–1927), der dabei auf Vorarbeiten von Joseph Hoeing Kastle (1864–1916) zurückgriff. Als Kastle-Meyer-Test wird er auch heute noch verwendet. Er basiert auf Redoxprozessen mit dem Indikatorfarbstoff Phenolphthalein.

Mit Rhodamin B schlug der Mediziner E. Fuld 1917 schließlich einen anderen Farbstoff bei identischer Vorgehensweise vor. Rhodamine werden wegen ihrer intensiven Fluoreszenz heute in Textmarkern verwendet. So enthält der pinkfarbene »Luminator« von Stabilo zwei Rhodaminfarbstoffe, allerdings kein Rhodamin B. Dennoch kann er im folgenden Experiment als Farbstoffquelle für einen Blutnachweis dienen, weil geringe strukturelle Modifikationen in diesem Fall keinen Einfluss auf das Reaktionsverhalten haben.

Um den Versuch durchzuführen, zerteilen Sie den Textmarker mit einer Kneifzange in der Mitte und füllen die Farbstofflösung aus seinem Tank in ein Rollrandgläschen. Überführen Sie 0,5 Milliliter davon in einen Erlenmeyerkolben (100 Milliliter) und fügen Sie zum Verdünnen 20 Milliliter Brennspritus hinzu. Nach Zugabe von fünf Gramm Zinkstaub sollten Sie die Suspension mittels Glasstab fünf Minuten lang rühren. Setzen Sie auf den Erlenmeyerkolben anschließend einen durchbohrten Gummistopfen mit einem Glasrohr (Länge: 20 Zentimeter), das nur nach oben herausragt. Erhitzen Sie die Suspension schließlich auf einer Heizplatte und lassen Sie die Lösung etwa zehn Minuten lang sieden. Hierbei übernimmt das Glasrohr die Funktion eines Rückflusskühlers.

Danach ist die Lösung farblos, weil naszierender Wasserstoff, der analog zur Marshschen Probe bei der Reaktion von Zink mit Wasserstoffionen entsteht, die Rhodamine in ihre farblosen, nicht fluoreszierenden Leukoformen überführt. Da Luftsauerstoff den Farbstoff allmählich wieder oxidiert, sollten Sie das Reagenz möglichst schnell (innerhalb einer Stunde) weiterverwenden.

Für den Blutnachweis verdünnen Sie einen Tropfen Blut in einem Reagenzglas mit zwei Milliliter Wasser. Anschließend fügen Sie fünf Tropfen des Nachweisreagenz und unmittelbar danach zwei bis drei Tropfen einer dreiprozentigen Wasserstoffperoxid-Lösung hinzu. Unter UV-Licht ist daraufhin eine intensive gelbe Fluoreszenz zu beobachten. Bei Tageslicht erscheint die ursprünglich sehr schwach röt-

liche Lösung nun pink. Was ist geschehen? Unter der katalytischen Wirkung von Hämoglobin entsteht aus Wasserstoffperoxid Sauerstoff, der die farblosen Leukoverbindungen wieder zu den fluoreszierenden Ausgangssubstanzen oxidiert. Bei der Gegenprobe mit purem Wasser tritt dagegen keine Fluoreszenz auf.

Auch eingetrocknete Blutspuren lassen sich mit dem Textmarker-Reagenz nachweisen. Befeuchten Sie dazu ein Wattestäbchen mit einigen Tropfen Wasser und reiben damit auf dem Fleck, so dass etwas Blut darauf übergeht. Benetzen Sie das Stäbchen anschließend mit jeweils ein bis zwei Tropfen des Nachweisreagenz und der Wasserstoffperoxid-Lösung. Nach wenigen Sekunden ist unter UV-Licht eine deutliche gelborange Fluoreszenz zu sehen (siehe »Feuchtes Wattestäbchen«). Sie können die beiden Lösungen auch direkt auf eine Spur tropfen oder sprühen. Vorher sollten Sie diese aber mit einem feuchten Pinsel ein wenig verwischen, damit die Fluoreszenz leichter erkennbar wird.

In den 1990er Jahren hat Robert Cheeseman das Fluorescein auf seine Eignung für Tatortermittlungen untersucht. Der Farbstoff wird dabei wie die Rhodamine zunächst zu einer farblosen, nicht fluoreszierenden Leuko Verbindung reduziert und zur Untersuchung einer Probe dann mit dem Reagenz und einer Wasserstoffperoxid-Lösung vermischt. In Gegenwart von Blut bildet sich Fluorescein zurück, so dass unter UV-Licht eine intensive grüne Fluoreszenz auftritt. Auch diese Nachweismethode lässt sich mit einem Alltagsprodukt, nämlich fluoresceinhaltigem Badezusatz (zum Beispiel »Dresdner Essenz – Kuschelstunde« oder »Badeperlen stressfrei« von Kneipp) durchführen (siehe »Mehr zum Thema«).

In der Kriminologie dient heute üblicherweise Luminol zum Nachweis von Blutspuren. Bei diesem Verfahren, das der Jenaer Chemiker und Kriminologe Walter Specht (1907–1977) im Jahr 1937 entwickelt hat, katalysiert ebenfalls das im Blut enthaltene Hämoglobin die Oxidation des Leuchtstoffs durch Wasserstoffperoxid.

Allerdings handelt es sich hier wie beim weißen Phosphor um eine so genannte Chemolumineszenz. Das Oxidationsprodukt entsteht zunächst in einem elektronisch angeregten Zustand, aus dem es spontan in den Grundzustand übergeht. Dabei sendet es intensives blaues Licht aus. Bestrahlung mit UV-Licht ist nicht nötig; man muss das Reagenz nur im Dunkeln aufsprühen. Das macht das Verfahren sehr einfach anwendbar. ◀

MEHR ZUM THEMA

Brezesinski, K., Ducci, M.: Smarte Blutmarker – wie aus Textmarkern und Kosmetika forensische Helfer werden. CHEMKON 27, 2020

QUELLEN

Schönbein, C. F.: Über das Verhalten des Blutes zum Sauerstoff. Journal für praktische Chemie 89, 1883

Fuld, E.: Über Blutnachweis, insbesondere mittels Malachitgrüns, und eine neue Probe mit Rhodamin. Biochem. Z. 79, 1917

Cheeseman, R., DiMeo, L. A.: Fluorescein as a field-worthy latent bloodstain detection system. J. Forens. Ident. 45, 1995

PHYSIK TEILCHENSCHLEUDERN DER ANDEREN ART

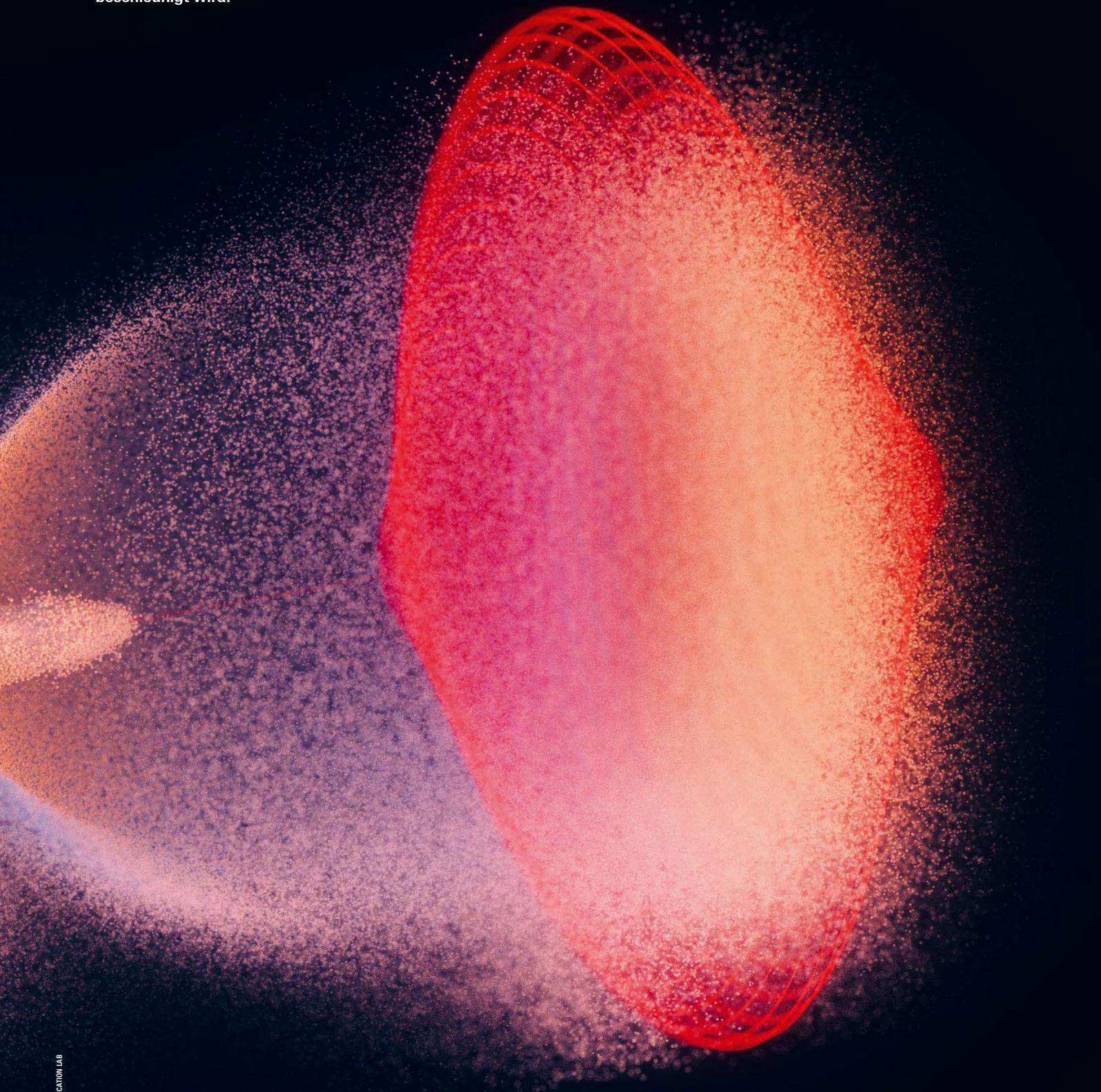
Mit Plasmawellen bringen »Kiefeldbeschleuniger« Teilchen über wenige Meter auf Energien, für die bislang Kilometer nötig waren. Dank der neuen Technologie könnten Forschungsanlagen deutlich kompakter und leistungsfähiger werden.



Chandrashekhar Joshi ist Plasmaphysiker an der University of California in Los Angeles. Dort erforscht er Laser-Plasma-Wechselwirkungen und neue Beschleunigerkonzepte.

» spektrum.de/artikel/1913896

REITEN IM LICHTSOG Beim LUX-Experiment des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY erzeugt ein intensiver Laserpuls (rot) eine Welle aus Elektronen (weiß), in der ein Elektronenpaket beschleunigt wird.



► Zu Beginn des 20. Jahrhunderts harrten noch immer diverse chemische Elemente ihrer Entdeckung, ganz zu schweigen von den grundlegenden physikalischen Bausteinen des Kosmos. 100 Jahre später waren dann nicht nur die letzten Lücken im Periodensystem geschlossen, sondern auch eine Reihe von Elementarteilchen bekannt, aus denen alles Bekannte im Universum besteht. Die entscheidenden Werkzeuge für diese Wissensrevolution waren die Teilchenbeschleuniger.

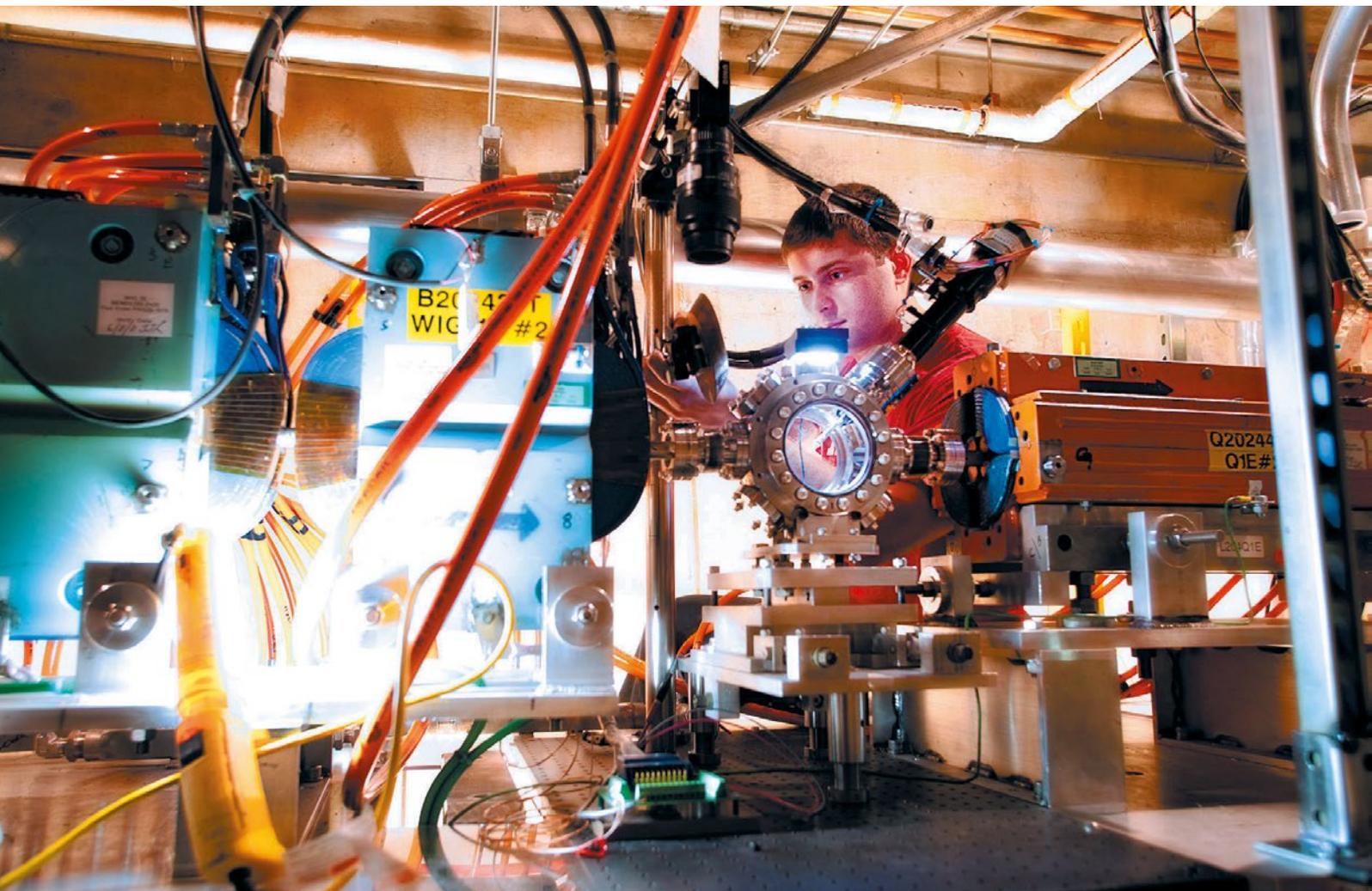
Als Höhepunkt der Entwicklung tauchte 2012 am Large Hadron Collider (LHC) des Forschungszentrums CERN bei Genf das lange gesuchte Higgs-Boson auf. Der LHC ist ein 27 Kilometer langer, ringförmiger Beschleuniger, in dessen Vakuumröhren zwei gegenläufige Protonenstrahlen mit jeweils sieben Teraelektronvolt (TeV) kollidieren. Ein Elektronvolt ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es von einer Spannungsdifferenz von einem Volt beschleunigt wird; ein TeV ist das Billionenfache davon. Beim LHC handelt es sich wohl um das komplexeste und teuerste jemals gebaute wissenschaftliche Gerät. Das Higgs-Boson komplettierte das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik, das sämtliche subatomaren Vorgänge beschreibt. Seitdem haben sich weder im LHC noch in irgendeiner anderen Maschine neue Elementarteilchen

PROTOTYP Ein Wissenschaftler arbeitet mit einem Kiefeldbeschleuniger des kalifornischen SLAC National Accelerator Laboratory.

bemerkbar gemacht. Haben wir also alles gefunden, was es zu finden gibt? Das ist zweifelhaft. Im Standardmodell fehlt die Dunkle Materie, die im All reichlich vorhanden, aber unsichtbar ist. Populäre Erweiterungen der Theorie sagen noch mehr Teilchen voraus. Dazu kommen weitere tief greifende Fragen, etwa nach dem Überwiegen von Materie gegenüber Antimaterie im beobachtbaren Universum. Mit einem leistungsfähigeren Beschleuniger könnten wir solche Rätsel eventuell lösen.

Es gibt bereits Pläne für einen International Linear Collider (ILC), der die Kollisionspartner auf gerader Strecke auf Energien von 250 Gigaelektronvolt (GeV) bringen soll. Das ist zwar weniger als beim LHC, dafür würden am ILC Elektronen mit ihren Gegenstücken aus Antimaterie zusammenstoßen, den Positronen. Da es sich dabei anders als bei den (aus Quarks zusammengesetzten) Protonen des LHC um Elementarteilchen handelt, wären die gelieferten Daten viel besser zu interpretieren. Allerdings sieht das erste Design 20 Kilometer Länge und Kosten im Bereich von zehn Milliarden Euro vor. Wegen der nötigen Investitionen hat bisher kein Land zugesagt, den ILC zu beherbergen.

Unterdessen ließe sich die im bestehenden Tunnel des LHC erreichbare Energie durch stärkere supraleitende Magnete auf 27 TeV erhöhen. Darüber hinaus gibt es Gedankenspiele für eine neue Maschine mit einem Umfang von 100 Kilometern. Dieser Future Circular Collider genannte Gigant könnte eine noch nie da gewesene Kollisionsenergie von 100 TeV erreichen. Doch die Kosten für das Projekt würden die für den ILC vermutlich sogar noch



übertreffen. Selbst wenn es dazu kommt, könnten die Arbeiten erst beginnen, sobald der LHC ab etwa 2035 seinen Betrieb einstellt.

Es zeichnen sich aber Alternativen zu immer gewaltigeren Konstruktionen ab. Seit den 1980er Jahren entwickeln zahlreiche weitere Physikerinnen und Physiker, darunter ich, unkonventionelle Konzepte für Teilchenbeschleuniger. Eines davon wird als Plasma- oder Kiefeldbeschleuniger bezeichnet. Ein solches Gerät könnte den Bau einer Maschine im TeV-Maßstab ermöglichen, die kompakter und viel billiger wäre als alles, was auf gegenwärtigen technologischen Standards beruht.

Die heute genutzte Bauart der Teilchenbeschleuniger hat eine lange Vorgeschichte. 1897 experimentierten der Brite Joseph John Thomson und der Deutsche Emil Wiechert unabhängig voneinander mit Kathodenstrahlen (wie sie später beispielsweise lange Zeit in Fernsehgeräten verwendet wurden). Dabei entdeckten sie ein negativ geladenes Teilchen, das Elektron. In den 1930er Jahren gab es dann den ersten Kreisbeschleuniger, bei dem Teilchen das sie antreibende elektrische Feld mehrfach durchlaufen und so vergleichsweise hohe Energien erreichen. Im vom US-Physiker Ernest Lawrence erfundenen, handtellergroßen »Zyklotron« kamen Protonen so auf bis zu 80 Kiloelektronvolt.

Danach entwickelte sich die Beschleunigertechnologie schnell weiter. Bald ließ die Wucht der geladenen Geschosse eingehende Untersuchungen von Atomkernen zu, und die Ära der Hochenergiephysik begann. Ein ganzer Zoo hunderter unterschiedlicher Teilchen öffnete sich. Im letzten Viertel des vergangenen Jahrhunderts wurde klar, dass sie alle das Ergebnis der Wechselwirkungen von nur 17 fundamentalen Objekten sind. Diese Bausteine des Standardmodells entdeckten Physiker bis Ende der 1990er Jahre in Beschleunigerexperimenten – mit Ausnahme des Higgs-Bosons. Dessen Fund 2012 galt als abschließende Krönung.

Erst auf langen Strecken erhalten die Teilchen genügend Tempo

Damit gehören Beschleuniger zu den ertragreichsten wissenschaftlichen Instrumenten in der Geschichte. Darüber hinaus dienen sie einer Vielzahl von Anwendungen in der Medizin und anderen Bereichen des Alltags, von Röntgenaufnahmen über die Strahlentherapie bis hin zur Sterilisation von Lebensmitteln und der Erzeugung radioaktiver Isotope für diverse klinische Tests und Behandlungen. In der Spitzenforschung gibt es so genannte Freie-Elektronen-Laser für Strukturuntersuchungen etwa im Rahmen der Molekularbiologie und der Materialwissenschaft.

Grundsätzlich unterscheiden sich zwei Konstruktionsweisen: Kreis- und Linearbeschleuniger. Der ringförmige LHC ist ein Vertreter der ersten Kategorie. Hier durchlaufen zwei Protonenstrahlen in entgegengesetzter Richtung immer wieder Abschnitte mit »Hohlraumresonatoren« (auch Kavitäten genannt, englisch: cavities). Dort erzeugen Radiowellen elektrische Felder, deren Ausrichtung hin- und herschwingt. Die Frequenz ist auf den Ankunftszeitpunkt der positiv geladenen Protonen abgestimmt. So werden die Teilchen immer passend vorwärtsgezogen und allmählich beschleunigt. Sobald sie genug Energie gewonnen haben,

AUF EINEN BLICK SUBATOMARE WELLENREITER

- 1** Um Teilchen auf immer höhere Energien zu bringen, wurden Anlagen im Lauf der Jahrzehnte größer und teurer. Doch es gibt einen alternativen Ansatz, der in letzter Zeit große Fortschritte gemacht hat.
- 2** Die neue Technik basiert auf Strahlen, die elektrische Felder in einem Plasma anregen. Diese reißen die zu beschleunigenden Teilchen mit, was auf kurzen Distanzen enorme Geschwindigkeiten ermöglicht.
- 3** In Zukunft könnten solche kompakten Geräte in Laboren zur Anwendung kommen sowie wichtiger Bestandteil einer neuen Generation von Platz und Geld sparenden Teilchenbeschleunigern werden.

fokussieren magnetische Linsen die Protonenstrahlen auf mehrere sehr präzise eingestellte Kollisionspunkte entlang des Rings. Beim Aufprall entstehen extreme Energiedichten, was neue, massereichere Zoobewohner hervorbringt.

Allerdings geben geladene Teilchen Energie ab, sobald sie auf eine kreisförmige Bahn gezwungen werden. Für einen gegebenen Radius des Beschleunigerrings ist der Verlust durch die »Synchrotronstrahlung« geringer, wenn die Teilchen mehr Masse besitzen. Deshalb verwendet der LHC Protonen. Für die viel masseärmeren Elektronen wären die Einbußen infolge der Synchrotronstrahlung zu groß, und sie ließen sich nicht auf solch hohe Energien bringen. Will man Elektronen und die ebenso leichten Positionen kollidieren lassen, braucht man darum Linearbeschleuniger oder enorm große Radien mit minimaler Krümmung.

Auf dem Weg zu einer bestimmten Strahlenergie hängt die nötige Dimension der Anlage letztlich davon ab, wie viel Hochfrequenzleistung in die Bauteile gepumpt werden kann. Sonst laufen die Strukturen Gefahr, einen zerstörerischen elektrischen Durchschlag zu erleiden. Ursprünglich bestanden die Elemente aus dem gut leitfähigen Kupfer. Die Durchschlagsfestigkeit ermöglichte pro Meter eine maximal zuführbare Energie zwischen 20 und 50 MeV (Megaelektronvolt). Neue Bauteile arbeiten mit höheren Frequenzen, und supraleitende Komponenten erlauben stärkere Felder in den Kavitäten. Solche Entwicklungen werden inzwischen in allen Beschleunigertypen eingesetzt und weiterhin ständig verbessert. Die technischen Fortschritte in dem Bereich gehen sicherlich noch einige Zeit weiter.

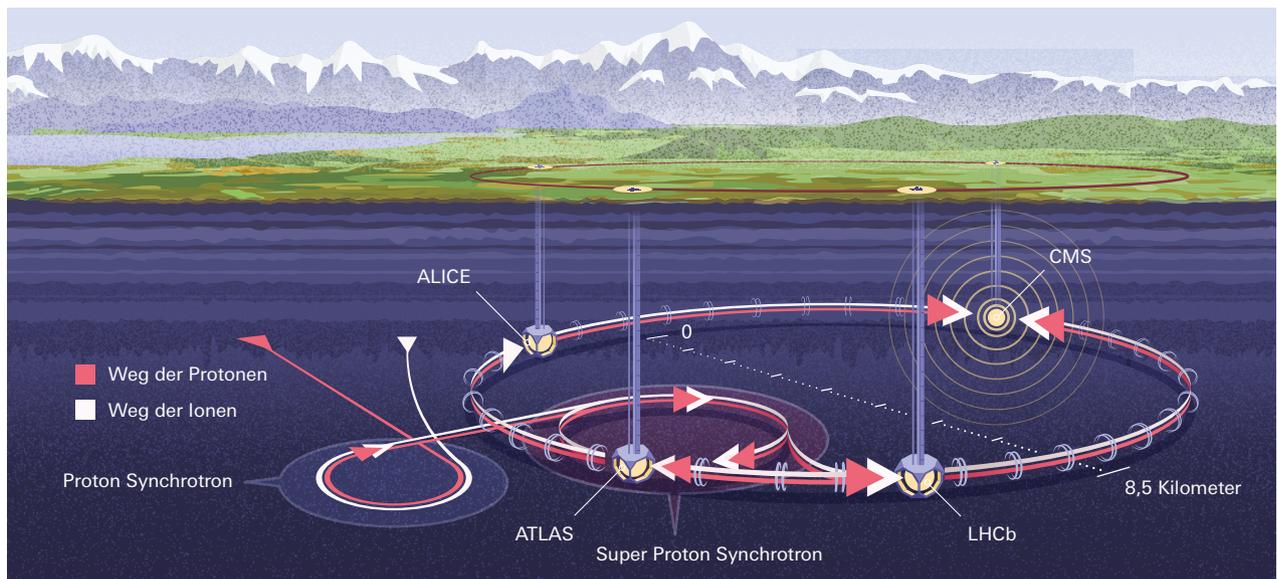
Irgendwann werden die konventionellen Möglichkeiten zur Aufrüstung einer bestehenden Strecke jedoch ausgeschöpft sein. Dann müssen wir entweder viel größer bauen – oder ganz anders. 1982 startete das US-Energieministerium eine Initiative zur Erforschung alternativer Ansätze für Beschleunigertechnologien. Das Programm brachte viele Ideen hervor; drei sind besonders viel versprechend.

Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation

Moderne Großanlagen bringen geladene Teilchen auf enorme Geschwindigkeiten, indem sie mit Radio- oder Mikrowellen elektrische Felder erzeugen. Der leistungsfähigste Beschleuniger der Welt ist der Large Hadron Collider, bei dem Protonen mehrfach im Kreis laufen, bevor sie kollidieren. In einer Nachfolgemaschine, dem International Linear Collider, sollen Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, auf gerader Strecke hohe Energien erreichen und zusammenstoßen. Doch die Konstruktion wäre aufwändig und teuer. Vielleicht führt ein gangbarer Weg zu neuen Entdeckungen über eine exotische, aber kompaktere Technologie, die Kiefeldbeschleuniger.

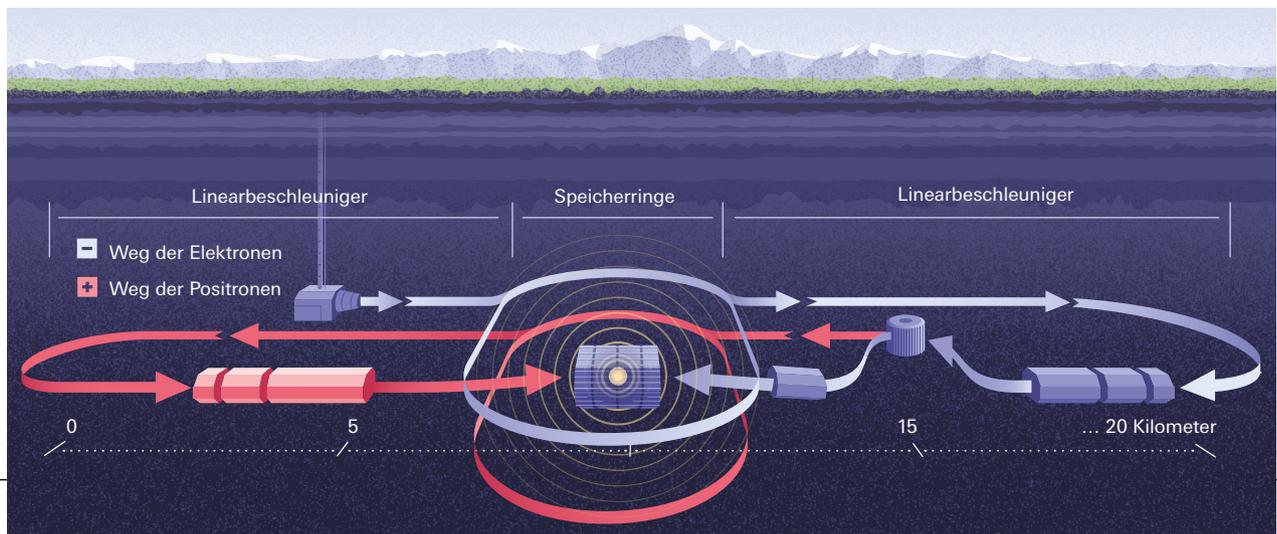
Der Rekordhalter: Large Hadron Collider (LHC)

In dem Ring mit 27 Kilometer Umfang stoßen Protonen mit Energien von bis zu 14 TeV zusammen. Die unterirdische, rund vier Milliarden Euro teure Anlage beherbergt mehrere Experimentierplätze. 2012 gab es mit dem Higgs-Boson die letzte Neuentdeckung eines Elementarteilchens. Für weitere Untersuchungen könnte die Kollisionsenergie des LHC auf bis zu 27 TeV steigen. Dafür müssten bei Umbauten neue supraleitende Magnete installiert werden.

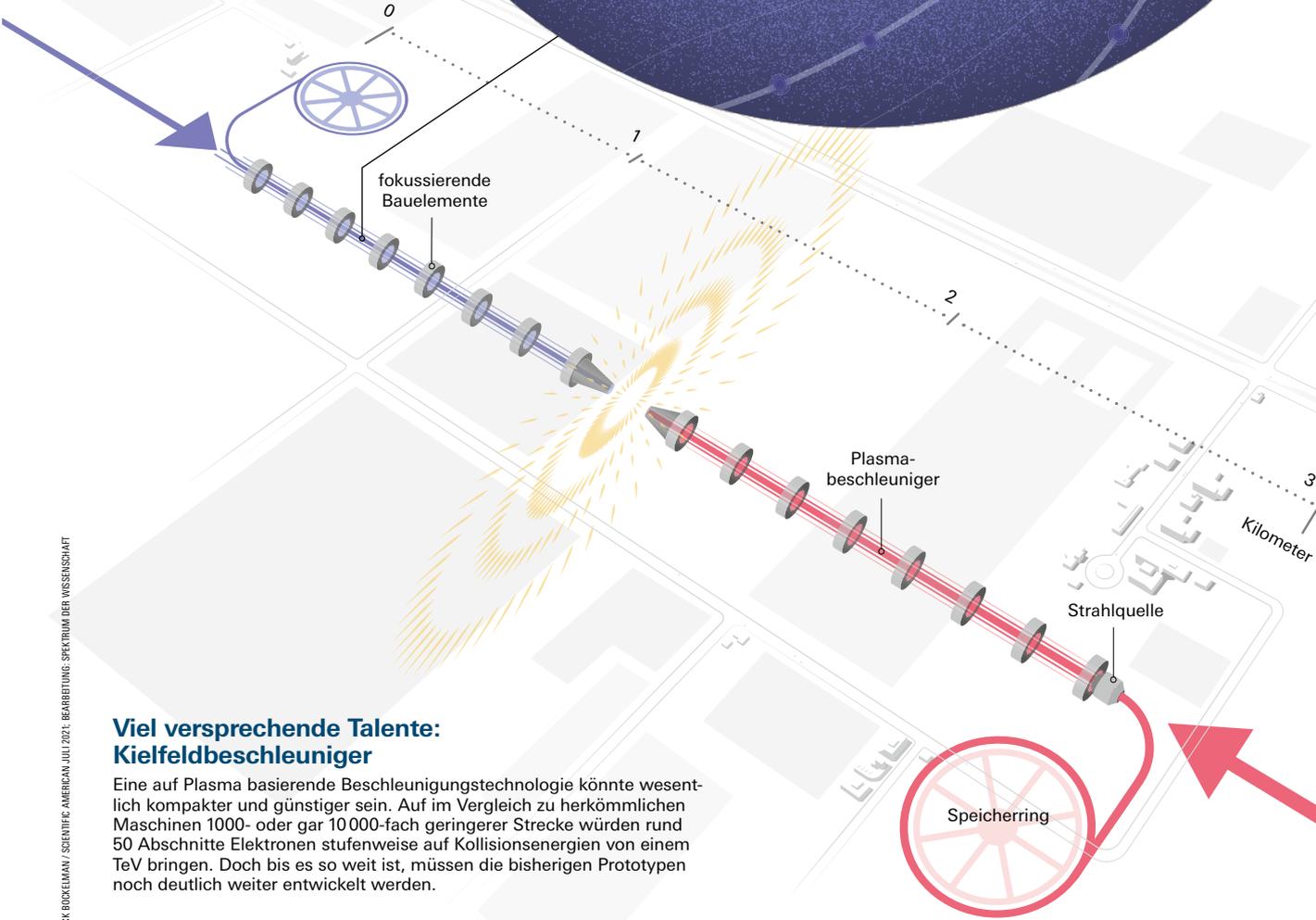
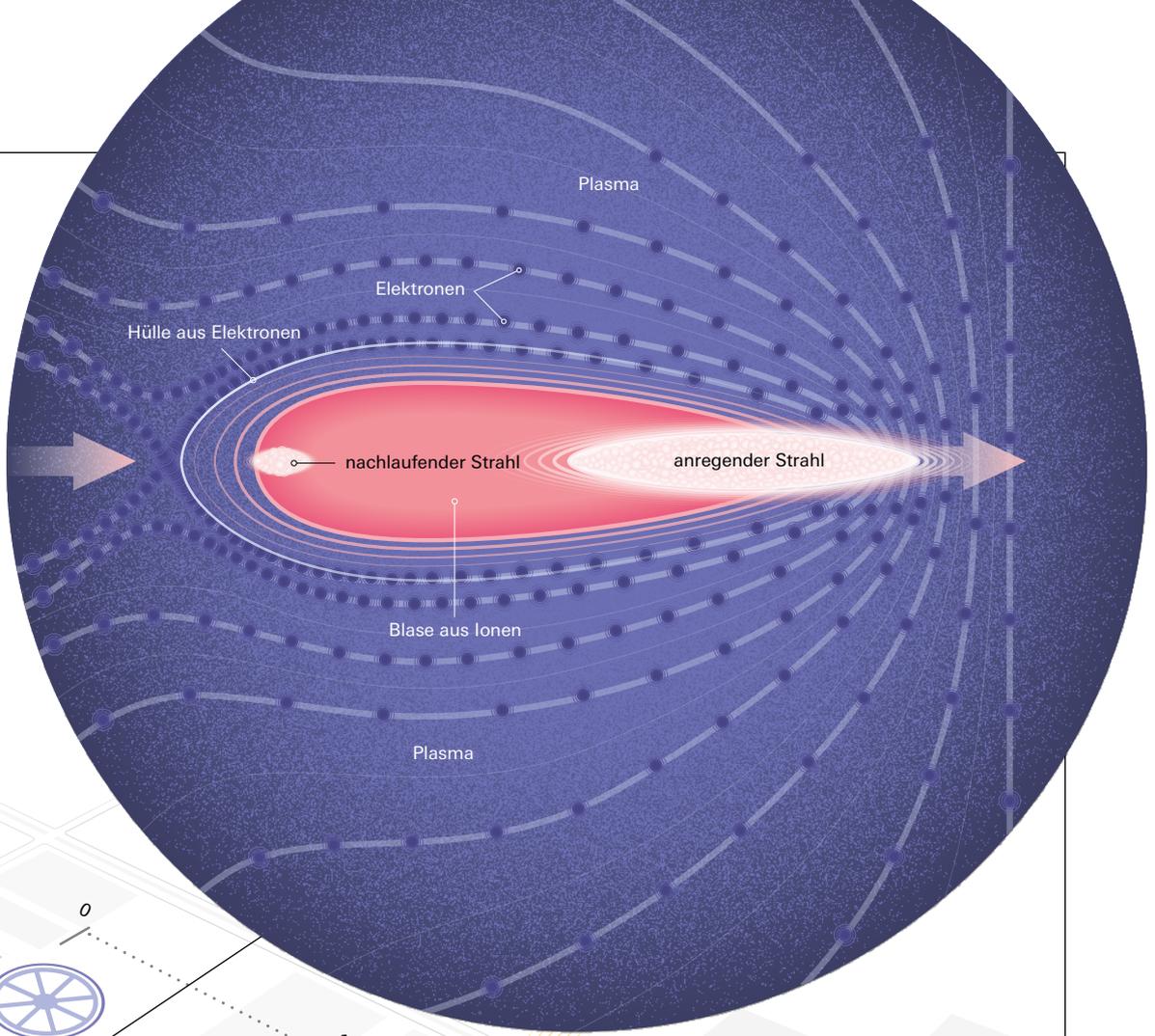


In den Startlöchern: International Linear Collider (ILC)

Bislang gibt es nur Planungen für die Maschine, in der Elektronen und Positronen über eine gerade Gesamtstrecke von 20 Kilometern auf Tempo gebracht (später wäre ein längerer Ausbau möglich) und mit 250 GeV zusammenstoßen würden. Das ist zwar weniger Energie als beim LHC; dafür lieferte der ILC besser interpretierbare Daten. Angesichts der Kosten von wohl zehn Milliarden Euro hat sich bisher aber kein Land zu einer Zusage durchgerungen.



Ein voranlaufender Laser- oder Elektronenstrahl bewegt sich durch ein Plasma. Dabei drückt er dessen Elektronen zur Seite und erzeugt hinter sich einen positiv geladenen Bereich. In diesen strömen die verdrängten Elektronen zurück. Hierdurch entsteht letztlich ein oszillierendes elektrisches Feld. Wenn im passenden Moment ein zweiter Strahl aus Elektronen dem ersten folgt, wird er durch das Feld beschleunigt.



Viel versprechende Talente: Kiefeldbeschleuniger

Eine auf Plasma basierende Beschleunigungstechnologie könnte wesentlich kompakter und günstiger sein. Auf im Vergleich zu herkömmlichen Maschinen 1000- oder gar 10 000-fach geringerer Strecke würden rund 50 Abschnitte Elektronen stufenweise auf Kollisionsenergien von einem TeV bringen. Doch bis es so weit ist, müssen die bisherigen Prototypen noch deutlich weiter entwickelt werden.

Der erste Ansatz wird Zwei-Strahl-Beschleunigung genannt (englisch: two-beam acceleration). Das Prinzip basiert auf einem relativ einfach herstellbaren, aber sehr stark geladenen Elektronenpuls, der ein hochfrequentes Feld in einem Hohlraumresonator anregt. Dieser überträgt seine Schwingung auf eine zweite Kavität, in der ein anderer Elektronenstrahl beschleunigt wird. Am CERN soll das Konzept mit einer Maschine namens Compact Linear Collider (CLIC) getestet werden.

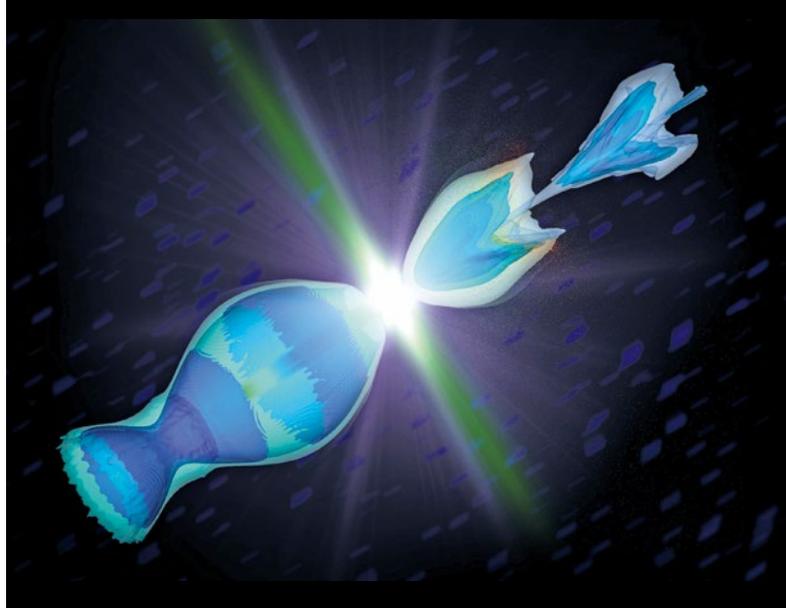
Eine zweite Idee ist die Kollision von Myonen, den erheblich schwereren Cousins der Elektronen. Sie sind ebenfalls Elementarteilchen, besitzen jedoch viel mehr Masse. Das wiederum bedeutet, dass sie in einem Kreisbeschleuniger beträchtlich weniger Bewegungsenergie in Form von Synchrotronstrahlung verlieren. Allerdings sind Myonen nicht stabil und zerfallen nach zwei millionstel Sekunden. Technisch würden sie aus den ebenfalls instabilen so genannten Pionen gewonnen, die ihrerseits entstehen, wenn man einen Protonenstrahl auf ein spezielles Material schießt. In der Realität existiert noch kein Myonenbeschleuniger, dennoch hat das Konzept einige eingefleischte Fans in der Hochenergiephysik.

Drittens gibt es eine auf Plasma basierende Option. Die meisten Menschen kennen drei Zustände von Materie: fest, flüssig und gasförmig. Plasma wird oft als der vierte Aggregatzustand bezeichnet und entsteht, wenn Elektronen aus der Hülle von Atomen herausgerissen werden. Ein Plasma ist im Wesentlichen ein ionisiertes Gas mit darin gleichmäßig verteilten Elektronen und Ionen. Plasma kommt in unserem Alltag nur selten vor, ist im Universum aber überall häufig; so bestehen etwa Sterne daraus. Im Labor lässt sich ein Plasma leicht erzeugen, indem man Strom durch ein Gas leitet, wie in einer gewöhnlichen Leuchtstoffröhre.

Ein energiereicher Puls schiebt das Plasma zur Seite wie ein Schiffskiel das Fahrwasser

Die Idee, es zur Beschleunigung zu verwenden, stammt aus den 1970er Jahren. John M. Dawson von der University of California in Los Angeles schlug seinerzeit vor, in Plasma durch einen intensiven Laserpuls oder gebündelte Elektronen eine Art Welle zu erzeugen. Diese sollte dann ein Paket aus geladenen Teilchen antreiben – und dabei herkömmliche Beschleuniger um den Faktor 1000 oder 10000 übertreffen. Das Konzept wird heute in Analogie zum Kielwasser eines Schiffs als Kielfeldbeschleuniger bezeichnet. Es zog viel Aufmerksamkeit auf sich, da mit ihm die Aussicht bestand, die gigantischen Maschinen ähnlich revolutionär zu miniaturisieren, wie es in der Elektronik ab den 1960er Jahren mit integrierten Schaltkreisen gelang.

Das Plasma in einem Kielfeldbeschleuniger verhält sich wie das Kielwasser hinter einem Schiff. Wenn dieses vorwärtsfährt, verdrängt es Wasser, das am Heck zurückfließt und eine nachlaufende Welle bildet. In ähnlicher Weise kann ein stark fokussierter und intensiver Laserpuls, der sich mit Lichtgeschwindigkeit durch ein Plasma bewegt, eine ihm folgende Strömung erzeugen. Sie ist relativistisch, das heißt, sie breitet sich fast mit Lichtgeschwindigkeit aus. Der Strahlungsdruck drängt die Elektronen des Plasmas ab wie ein Bootsrumpf das Wasser.



TEILCHEN GEGEN ANTEILCHEN In einer Computersimulation stoßen Elektronen und Positronen zusammen, die zuvor von Plasmafeldern beschleunigt wurden.

Man kann statt eines Laserpulses auch ein energiereiches Elektronenbündel benutzen. Es schiebt mit seiner negativen Ladung die Elektronen des Plasmas zur Seite. Die zurückbleibenden positiv geladenen Ionen sind träge und verweilen an Ort und Stelle. Sobald das Paket vorbeigezogen ist, werden die verdrängten Elektronen durch ihre gegenseitige Abstoßung sowie durch die Anziehungskraft der positiv geladenen Ionen zurückgetrieben. Sie bewegen sich so schnell, dass sie an ihnen vorbeischießen. Daraufhin verspüren sie wieder einen Rückwärtssog; eine Schwingung beginnt. So entsteht gewissermaßen im Kielwasser des Elektronenbündels auf Grund der Trennung von Ionen und Elektronen des Plasmas ein oszillierendes elektrisches Feld.

Wenn ein zweites Elektronenbündel auf das erste folgt, können die Teilchen Energie aus dem Kielfeld erhalten – wie durch die hochfrequente Strahlung im Hohlraumresonator eines konventionellen Beschleunigers. Befinden sich hinreichend viele Elektronen im nachfolgenden Bündel, ziehen sie aus dem elektrischen Feld genügend Energie ab, um dieses gerade so zu dämpfen, dass ein Feld mit konstanter Beschleunigungswirkung entsteht. So gewinnen die Teilchen des nachfolgenden Bündels gleichmäßig an Energie und bleiben als Paket beisammen, statt auf ihrem Weg durch das Plasma verschmiert zu werden.

Der große Vorteil eines Plasmabeschleunigers gegenüber anderen Ansätzen besteht in den elektrischen Feldern. Sie sind gut 1000-mal stärker als in herkömmlichen Kavitäten. Außerdem kann ein beachtlicher Teil der Energie, die der die Elektronen auseinanderschiebende Strahl auf das Kielfeld überträgt, vom nachlaufenden Bündel wieder aufgenommen und in Beschleunigung umgesetzt werden.

Sowohl bei laser- als auch bei elektronengetriebenen Kielfeldbeschleunigern gab es in den letzten zwei Jahrzehnten enorme Fortschritte. Meine eigene Gruppe von der University of California hat mit dem SLAC National Accelerator Laboratory im kalifornischen Menlo Park zusammengearbeitet. Dort haben wir Experimente mit Prototypen

durchgeführt. Dazu injizierten wir zwei Elektronenbündel mit einer Anfangsenergie von 20 GeV. Die Elektronen, die dem ersten Strahl durch ein 1,3 Meter langes Plasma nachliefen, gewannen auf dieser Strecke bis zu neun GeV. Bei Tests mit einem Positronenbündel wuchs dessen Energie um vier GeV auf einer Distanz von einem Meter. Überall auf der Welt finden ähnliche Experimente statt. Einige Teams setzen auf Laser und erreichen ebenfalls große Energiegewinne, am DESY beispielsweise bei Elektronenpaketen, die durch selbstlernende Computerprogramme optimal auf den Lichtpuls abgestimmt sind (siehe »Reiten im Lichtsog«, S. 60/61). Am CERN ist noch ein anderes Konzept auf dem Prüfstand: Hier läuft ein mehrere Zentimeter langes Protonenpaket durch ein Plasma und erzeugt auf ähnliche Weise ein Feld, das Elektronen beschleunigt.

Das ultimative Ziel der Forschung an Kiefeldbeschleunigern ist ein Linearbeschleuniger, der eng fokussierte Elektronenstrahlen mit gegenläufigen Elektronen oder Positronen zur Kollision bringt und auf eine Gesamtenergie von mehr als einem TeV kommt. Um das zu erreichen, müsste man wahrscheinlich etwa 50 einzelne Stufen in Reihe schalten, wobei jede die Energie der Teilchenbündel um 10 GeV erhöhen würde.

Die Technik muss noch den Kinderschuhen entwachsen

Doch es ist enorm schwierig, die antreibenden und nachfolgenden Strahlen entlang so vieler Plasmaabschnitte aufeinander abzustimmen. Der typische Radius des Kiefelds beträgt kaum einen Millimeter, und in dieses müssen die Elektronen mit der Treffgenauigkeit von weniger als einem Nanometer eingespeist werden. Das Timing zwischen dem ersten Strahl und dem nachlaufenden Paket muss auf ein Hundertstel einer billionstel Sekunde stimmen.

Jede Fehlausrichtung verschlechtert die Strahlqualität, weil dann die Elektronen um die Achse des Plasmafelds oszillieren. Dadurch gehen sowohl Ladung als auch Energie verloren, was sich in Form ausgesandter Röntgenstrahlung äußert. Diese so genannte Betatron-Emission begrenzt letztlich die Energie, die sich in einem Kiefeldbeschleuniger auf die Teilchen übertragen lässt.

Einer baldigen praktischen Umsetzung stehen weitere technische Hürden im Weg. Zum Beispiel ist für einen Teilchenbeschleuniger neben der Kollisionsenergie die zweite wichtige Kennzahl die »Luminosität«. Sie ist ein Maß dafür, wie viele Teilchen sich in einer gewissen Zeitspanne auf einen bestimmten Raumbereich fokussieren lassen. Wenn man die Luminosität mit dem Wirkungsquerschnitt multipliziert (das ist die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Teilchen aufeinandertreffen), kann man die Anzahl der Zusammenstöße berechnen, die man bei einer gegebenen Energie beobachten dürfte.

Die angestrebte Luminosität für einen Elektronen-Positronen-Linearbeschleuniger bei einem TeV beträgt 10^{34} pro Quadratzentimeter und Sekunde. Das entspricht 10^{10} Teilchen pro Bündel bei einer Wiederholungsrate von zehn Kilohertz und einem zehn milliardstel Meter kleinen Kollisionspunkt. Um das zu erreichen, müssten die Strahlen eine durchschnittliche Leistung von jeweils 20 Megawatt haben.

Selbst wenn man die Energie vom voranlaufenden Strahl auf die zu beschleunigenden Teilchen mit 50-prozentiger Effizienz übertragen könnte, bleiben 20 Megawatt im Plasma übrig. Das sind riesige Leistungen, die auf kleinem Raum zu- und abgeführt und bestenfalls erneut nutzbar gemacht werden müssten – keine einfache Aufgabe.

Und obwohl die Technologie bei der Beschleunigung von Elektronen erhebliche Fortschritte gemacht hat, steckt die Forschung an ihren idealerweise gegenläufigen Antiteilchen noch in den Kinderschuhen. Höchstwahrscheinlich wird noch ein Jahrzehnt Grundlagenforschung mit intensiver internationaler Zusammenarbeit nötig sein, um Experimente mit Positronen auf den gleichen Stand zu bringen, den wir heute bei Elektronen haben. Alternativ könnten wir Elektronen mit ihresgleichen oder sogar mit Protonen zusammenstoßen lassen.

Die Zukunft der Kiefeldbeschleuniger ist ebenso ungewiss wie spannend. Innerhalb von zehn Jahren könnten an Anlagen, die heute bereits Laser- und Elektronenstrahlen produzieren, erste darauf aufbauende 10-GeV-Beschleuniger auf den Labortischen stehen und verschiedene wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen erlauben. Von dort aus wäre es jedoch immer noch weit bis zu einem plasmabasierten Linearbeschleuniger, mit dem sich wirklich neue Physik erkunden ließe.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



MICHAEL HOCH UND MAXIMILIEN BRICE, CERN

Trotz der gewaltigen experimentellen Fortschritte entsprechen die bislang erreichbaren Strahlparameter noch nicht dem, was wir allein für den mit Elektronen bestückten Arm eines zukünftigen Elektron-Positron-Colliders bräuchten, der in neue Energiebereiche vorstoßen soll. Doch solange die Finanzierungsaussichten für Maschinen wie den International Linear Collider und den Future Circular Collider ungewiss sind, ist es vielleicht am besten, wenn wir zunächst versuchen, die exotische Technologie der Kiefeldbeschleuniger zu perfektionieren. Sie könnte einiges an Baugröße und Kosten sparen. Und vielleicht erschafft sie ein Werkzeug, mit dem wir am Ende neue fundamentale Wahrheiten entdecken. ◀

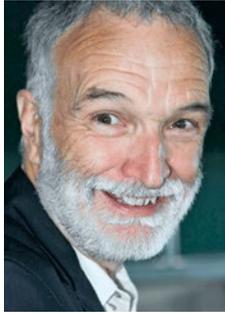
QUELLEN

Adli, E. et al.: Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch. *Nature* 561, 2018

Joshi, C. et al.: Perspectives on the generation of electron beams from plasma-based accelerators and their near and long term applications. *Physics of Plasmas* 27, 2020

Kirchen, M. et al.: Optimal beam loading in a laser-plasma accelerator. *Physical Review Letters* 126, 2021

SCHLICHTING! DAS SINGENDE TEESIEB



Trifft ein Wasserstrahl auf die Lochstruktur eines Edelstahlsiebs, ist manchmal ein Pfeifton zu hören. Er entsteht, wenn Wasserwirbel periodisch auf das Blech zurückwirken und Resonanzschwingungen anregen.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für »Spektrum« über physikalische Alltagsphänomene.

» spektrum.de/artikel/1913911

Daß vom reinlichen Metalle Rein und voll die Stimme schalle

Friedrich Schiller (1759–1805)

► Früher wurde die Teezubereitung von einem Pfeifen eingeläutet, heute wird sie eher damit beendet. Jedenfalls hat der Kessel für die Herdplatte mit seinem schrillen Flöten inzwischen beinahe ausgedient, während Teesiebe aus Edelstahl immer größere Verbreitung finden. Sie sorgen für ein seltsames akustisches Phänomen: Zahlreiche Videos im Internet zeigen, wie die Utensilien beim Reinigen im Spülbecken Töne von sich geben.

Die Zufallsentdeckung ist nach kurzem Ausprobieren leicht reproduzierbar, und unter den passenden Umständen offenbaren verschiedene Fabrikate ihre Musikalität. Zum einen muss der Wasserstrahl das Metall mit einer gewissen Geschwindigkeit treffen. Diese nimmt mit der Fallhöhe zu. Bei manchen Sieben reicht der Abstand zwischen Wasserhahn und Spülbecken nicht aus, und das Kunststück gelingt lediglich im Badezimmer oder mit dem Gartenschlauch. Zum anderen tönt die gelochte Fläche nur dann, wenn sie unter einem bestimmten Winkel getroffen wird. Um den für das Pfeifen optimalen Bereich zu finden, empfiehlt es sich, das Sieb unter dem Wasserstrahl ein wenig zu heben und zu senken und dabei die Neigung zu variieren. Am besten funktioniert es, indem der Strahl den flachen Boden trifft (siehe »Reinigen unter Piffen«). Im Lauf einer Reihe von Experimenten konnten mein Kollege Wilfried Suhr und ich sogar ein Sieb an der Mantelseite zum Tönen bringen.

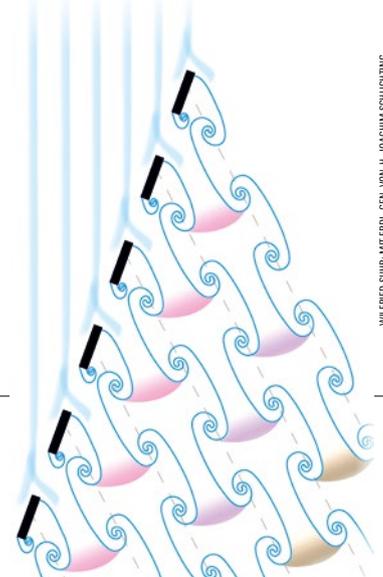
Der relativ kräftige Ton lässt auf eine Schwingung schließen, zu der das auftreffende Wasser das Lochblech anregt. Berührt man das Metall in der Nähe des Strahls, dämpft das den Vorgang, und das Pfeifen verschwindet. An allen übrigen Stellen kann man das Sieb hingehen anfassen, ohne damit den Ton zu beeinflussen.

Was dabei genau passiert, hat Wilfried Suhr in einer 2020 veröffentlichten Arbeit zusammengefasst. Der auf die Siebfläche prallende Strahl wirkt wie ein mechanischer Schwingungserreger, der zum Beispiel eine Lautsprechermembran vibrieren lässt. Doch das Wasser strömt gleichförmig aus dem Hahn. Woher kommt der Rhythmus, mit dem es das Blech auslenken und in Schwingung versetzen könnte? Es genügt dafür nicht, dass es mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit auf einen passenden Abschnitt des Lochblechs auftrifft. Darüber hinaus muss ihm durch eine geeignete Wechselwirkung eine Frequenz aufgeprägt werden.

Den Taktgeber entdeckt man bei einem genaueren Blick auf die Auftreffstelle. Längs des geneigten Blechs staut sich eine Strömung auf, die teilweise durch die Löcher hindurch auf die andere Seite gelangt (siehe »Lochblech aus der Nähe«). Wenn man die diversen Strömungsbereiche geschickt manipuliert und den Einfluss kleiner Störungen beobachtet, findet man heraus: Die Töne werden von einem länglichen Wasserwulst unterhalb des unmittelbaren Aufpralls hervorgebracht. Dort entsteht eine zeitlich periodische Wasserbewegung – für die wiederum die regelmäßige Lochstruktur notwendige Voraussetzung ist.

SYNCHRONISATION

Schematische Darstellung der Wirbelablösung von einer gelochten Wandung. Gekoppelte Wirbelpaare des gleichen Entstehungszyklus sind gleichfarbig markiert.



WILFRIED SUHR, MIT FREIL GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING



WILFRIED SUHR, MIT FRODL GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING

BEUTEL-ALTERNATIVE
Beim Zubereiten
losen Tees
werden wieder-
verwendbare
Metallfilter immer
populärer. Der
Soundeffekt kann
bei verschie-
densten Modellen
auftreten.



MIT FRODL GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING

REINIGEN UNTER PFIFFEN Ein Teesieb aus Edelstahl mit winzigen Löchern kann in dieser Position unter einem Wasserstrahl zum Klingen gebracht werden.

Die Blechstege zwischen den Löchern spalten nämlich den Wasserstrom auf und erfüllen dabei eine ähnliche Funktion wie gespannte Saiten in einem Luftstrom. Diese lösen jeweils eine Folge paarweise entgegengesetzter Wirbel aus, eine so genannte kármánsche Wirbelstraße. Sie stoßen sich gewissermaßen vom Draht ab, woraufhin er schwingt. Wenn dabei eine seiner Eigenfrequenzen angeregt wird, gerät er in Resonanz und ruft in der umgebenden Luft periodische Verdichtungen und Verdünnungen hervor. Sie werden als Ton wahrnehmbar. Nach diesem Prinzip erklingt beispielsweise eine Äolsharfe (siehe »Spektrum« November 2020, S. 52).

Ein vergleichbares, nur wesentlich komplexeres Geschehen spielt sich beim Teesieb ab. Im Bereich des Wasserwulstes entstehen hinter den regelmäßigen metallischen Stegen gleich mehrere solcher Wirbelstraßen, die hier aus Wasserwirbeln bestehen. Sie üben in ähnlicher Weise Kräfte auf die angeströmte Fläche des Siebs aus und bringen seine Eigenschwingungen zur Resonanz. Jedes der vielen benachbarten Wirbelpaare wirkt auf dieselbe Region des Blechs zurück. Zu einer einheitlichen kollektiven Schwingung des ganzen Siebbereichs kommt es bloß, wenn die Wirbel sich synchron ablösen und ihre Einzelkräfte gegenseitig verstärken (siehe »Synchronisation«). Passiert das wirklich? Fotografische Untersuchungen des Strömungsfelds an einem vergrößerten und vereinfachten Modell legen nahe, dass die Wirbel angrenzender Löcher tatsächlich aneinanderkoppeln, während sie sich vom Blech entfernen.

Das Phänomen ist relativ robust gegenüber Störungen. Schwingt das durchströmte Element des Siebs in Resonanz mit der Anregungsfrequenz der Wirbel, so ändert sich daran auch dann nichts, wenn die Auftreffgeschwindigkeit des Wassers in gewissen Grenzen variiert. Das schwingende Blech rastet auf die Eigenschwingung ein. Infolge dieses »Lock-in«-Verhaltens bleibt die Tonhöhe



WILFRIED SUHR, MIT FRODL GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING

LOCHBLECH
AUS DER NÄHE
Ein Wasserstrahl
durchdringt das
schräg gestellte
Sieb teilweise
und bildet auf der
Rückseite einen
Wasserwulst
(Pfeil), in dem die
Mechanismen
zur Tonentste-
hung ablaufen.

erhalten. Abweichungen zwischen Anregungs- und Resonanzfrequenz senken allerdings die Amplitude. Die verringerte Auslenkung macht sich dann in einer entsprechend abnehmenden Lautstärke bemerkbar.

Bei einem Exemplar eines Teesiebs ist es uns durch Variation der Falldistanz des Wassers sogar gelungen, unterschiedliche Eigenschwingungen des Lochblechs in Resonanz zu versetzen und damit Pfeifgeräusche verschiedener diskreter Frequenzen anzuregen. Mit der Länge des Strahls wuchs die jeweilige Tonhöhe. Bei Fallhöhen zwischen zwei Tonstufen und außerhalb des Lock-in-Bereichs verstummte das Teesieb jedoch.

QUELLE

Suhr, W.: Pfeiftöne vom Teefilter. Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 2020

WEBLINK

www.youtube.com/watch?v=-t_sQ5PrRdk
Eines unter vielen ähnlichen Youtube-Videos demonstriert das Phänomen.

ARCHÄOLOGIE MUMIEN AUS DEM SALZBERG



Erst bebte die Erde, dann gab die Salzgrube nach und begrub die Bergleute unter sich. 2400 Jahre später kommen sie wieder ans Licht – mumifiziert im persischen Salzberg Douzlākh. Inzwischen weiß man einiges über die antiken Kumpel: wie sie einst arbeiteten, wie sie gekleidet waren und welche Parasiten sie plagten.



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

» [spektrum.de/artikel/ 1913899](https://www.spektrum.de/artikel/1913899)

Forschung in Iran – über Grenzen hinweg

Das iranische Projekt am Douzlâkh hat Expertinnen und Experten aus sechs Nationen zusammengeführt: Iran, Deutschland, Österreich, Schweiz, Russland und England. Abolfazl Aali vom Archäologischen Museum Zolfaghâri in Zanjân und Thomas Stöllner vom Deutschen Bergbau-Museum und der Universität Bochum leiten die Forschungen, die vom Iranischen Nationalmuseum und der Iranischen Kulturerbe-Organisation in Teheran unterstützt werden. Zum Projekt zeigte das Bergbau-Museum 2021 die Ausstellung »Tod im Salz«, die auch online verfügbar ist: tod-im-salz.de

SALZMANN 4 Der vom Salz konservierte Körper eines 15-Jährigen überdauerte rund 2400 Jahre im Bergwerk von Chehrâbâd. Der Jugendliche war bei einem Grubenunglück ums Leben gekommen. Seine Kleidung hat sich fast vollständig erhalten – ein Ziegenfellumhang (links), Tunika und Hose aus Schafswolle sowie Lederschuhe.

Im Duster des Bergwerks hing ein unverkennbarer Geruch. Ein sonderbares Gemisch, wie der junge Farshid fand: der Schweiß der Kumpel, der Rauch der Öllampen, der erdige Dunst von Ton und der raue Reiz des Salzes. Der 15-Jährige sah sich um. Im Schein der Lichter brachen drei Dutzend Bergleute Salzstücke aus der Wand. Ihr monotones Schlagen hallte von den schroffen Wänden wider. Schon seit drei Generationen hatten Männer die Kristalle aus dem Berg gehämmert. So haben es Farshids Arbeitsgefährten erzählt, der wenig ältere Navib und der erfahrene Aaram. Inzwischen hatten die Kumpel in die mächtige Salzschicht eine große Halle geschält, die von Seite zu Seite etwa 25 bis 30 Meter maß.

Navib griff nach einem kugeligem Töpfchen und goss daraus Öl in eine Hand. Nachdem er Farshid das Gefäß gereicht hatte, verrieb er das Öl zwischen den Händen. Auch Aaram cremte sich ein. Ohne die glänzende Schicht würde das Salz die Haut rissig werden lassen. Als Navib begann, mit seinem Hammer weiße Kristalle aus der Wand zu brechen, öffnete Aaram seinen Sack aus Ziegenbalg. Farshid tat es ihm gleich. Der ältere Mann wies den Neuling an, gemeinsam das gebrochene Gut aufzuklauben. Sicher verpackt brachten sie die funkelnden Kristalle über Tage und kehrten zurück, um ihre Säcke erneut zu füllen. Zwischendurch fegten sie mit Handbesen Ton- und Gipsbrocken zusammen, die in der Wand den Salzstock durchzogen, und beförderten sie auf den Abraum in der Salzkaverne.

Dann knackte es. Farshid und die anderen horchten auf. Die Salzhalle bebte unter ohrenbetäubendem Getöse. Aaram rief nach Farshid, packte seinen Salzsack und rannte zum Stollenausgang, der junge Mann folgte ihm. Als die Firste, die Decke der Halle, nachgab, stürzten tonnen schwere Gesteinsbrocken herab. Navib überrollte eine Steinlawine an der Abbauwand. Aaram zerquetschte ein großer Fels. Farshid fiel bäuchlings zu Boden. Als er sich wieder aufrichten wollte, erschlug ihn schweres Geröll.

AUF EINEN BLICK DIE GESCHICHTE DER »SALZÖTZIS«

- 1 Im Salzbergwerk bei Chehrābād im Nordwestiran fanden sich die mumifizierten Überreste verunglückter Kumpel. Es sind weltweit die einzigen erhaltenen Salz mumien.
- 2 Anhand der Körperfunde und zahlreicher weiterer Artefakte können Archäologen das Leben der Bergarbeiter recht präzise rekonstruieren – sowie ein Grubenunglück um 400 v. Chr.
- 3 Wie naturwissenschaftliche Analysen ergaben, handelte es sich bei den toten Männern um ortsfremde Arbeiter. Wahrscheinlich waren sie vom Perserkönig zum Salzberg beordert worden.



DER SALZBERG Im 5. vorchristlichen und vom 3. bis 6. nachchristlichen Jahrhundert ließen die Perserkönige im Douzlākḥ Salz abbauen. Später, in islamischer Zeit bis jüngst 2009, wurde der Bergwerksbetrieb immer wieder fortgesetzt.

Die Namen Farshid, Aaram und Navib sind erfunden, heute sind die drei unter den Bezeichnungen Salzmann 4, 5 und 3 bekannt. Dennoch dürfte sich das Beschriebene im Wesentlichen so zugetragen haben. Die drei Bergleute kamen vor rund 2400 Jahren bei einem Grubenunglück ums Leben. Auch welche Ausrüstung sie bei sich trugen, wie sie bekleidet waren, ja sogar welche Parasiten in ihren Eingeweiden hausten, wissen Forscher. Denn das Salz, das die verschütteten Bergmänner umschloss, konservierte Körper und Kleidung.

Was damals in dem Salzbergwerk Douzlākḥ bei Chehrābād im heutigen Nordwestiran geschah, hat eine Expertengruppe um Thomas Stöllner vom Deutschen Bergbau-Museum und der Ruhr-Universität in Bochum sowie Abolfazl Aali vom Archäologischen Museum Zolfaghāri in Zanjān (sprich: Zandschan) mit kriminalistischem Spürsinn bis ins Detail rekonstruiert. Dank der mumifizierten Überreste der Kumpel, vieler weiterer Artefakte und der Fundsituation im Bergwerk fand das internationale Wissenschaftlerteam auch heraus, dass der Berg nicht nur um 400 v. Chr. einstürzte. Noch mindestens zweimal danach begrub er Salzschrüfer unter sich.

Der Kopf eines bärtigen Mannes und ein Bein im Lederstiefel

Bis ins 21. Jahrhundert hinein gruben Bergarbeiter immer wieder nach Salz im Douzlākḥ. Vielleicht weil dort eine besondere Form von Natriumchlorid schlummert. »Es ist sehr rein und sehr weiß«, berichtet Thomas Stöllner. »Das Steinsalz von Chehrābād hat damit eine sehr hohe Qualität.« Das Vorkommen ist bis zu 20 Meter dick. Zahlreiche Stollen und Gruben waren in die Schicht getrieben worden, so dass



DOUZLÄKH Das Salzbergwerk liegt nahe dem Dorf Chehrābād in der Region Zanjan, Nordwestiran.

SAHAND SAEDI / DEUTSCHES BERGBAU-MUSEUM BOCHUM (DBM) / FUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM (FUB) / ZANJAN CULTURAL HERITAGE, HANDICRAFTS AND TOURISM ORGANIZATION (ZCHTO)

untertägig große Hallen heranwuchsen. Sie waren im Lauf der Jahrhunderte mit dem Abraum, also dem Schutt der Abbauarbeiten, und herabgestürzten Brocken der Kavernen- decke verfüllt worden.

In jüngster Vergangenheit haben die Bagger eines iranischen Minenunternehmens die Deckschicht des Douzlākh abgeräumt. Dadurch lagen die meterdick verschütteten Abschnitte des Bergwerks nicht mehr unter Tage. »Wir haben uns teils mit schwerem Gerät von oben nach unten durchgegraben«, erzählt Stöllner.

Die ersten Salzleute hatten Minenarbeiter 1993 entdeckt: den Kopf eines bärtigen Mannes mit langem Haar – Salzmann 1 – sowie ein Bein, das in einem Ledertiefel steckt – Salzmann 7. Anschließend untersuchten Archäologen die Stätte, während zugleich das Minenunternehmen noch bis 2009 Salz abbaute. Dabei deckten Arbeiter und Ausgräber weitere unterschiedlich gut konservierte menschliche Überreste auf, darunter »Farshid«, den weitgehend vollständig erhaltenen Salzmann 4. Seit 2010 erforscht nun ein internationales Team aus Archäologen, Anthropologen, Medizinerinnen, Textilexperten, Geologen und Bioarchäologen die Geheimnisse des Douzlākh, des – aus dem lokalen Dialekt der Aseris wörtlich übersetzt – Ortes (»lākh«) des Salzes (»douz«).

Das Grabungsteam förderte Werkzeuge, Öllampen, Tongefäße, Textil- und Essensreste zu Tage. Sogar tierische und menschliche Ausscheidungen kamen ans Licht. Insgesamt haben die Ausgräber nicht nur vieles aus dem Dasein der Bergarbeiter im antiken Persien entdeckt, sondern auch die weltweit einzigen Salzmumien. Überhaupt: Die konservierten Leichname aus der iranischen Region

Zanjan gehören zu einer extrem seltenen Fundgruppe, deren wohl berühmtester Vertreter die Gletschermumie vom Tisenjoch an der österreichisch-italienischen Grenze ist. Der ledrige Leib ist besser bekannt als Ötzi. Der Mann aus dem Eis war vor rund 5300 Jahren von hinten mit einem Pfeil erschossen worden, zu Boden gefallen und verblutet. Ein meterdicker Gletscher hatte sich über den Toten geschoben und konservierte ihn für die Nachwelt – samt Mageninhalt, Kupferbeil und Strohmantel. Weil sich die Fundsituationen derart ähneln, nennen Stöllner und sein Team die menschlichen Überreste aus dem Iran denn auch liebevoll »Salzötzis«. Was diese so besonders macht: Anders als die tausendfach überlieferten ägyptischen Mumien waren die Salzleute nicht sorgsam einbalsamiert und mit fürs Grab gefertigten Beigaben bestattet worden, sondern ein plötzliches Ereignis hatte sie buchstäblich aus dem Leben gerissen.

»Ein menschenwürdiges Leben ist ohne Salz unmöglich«

Die Männer hatten Salz im Douzlākh gebrochen. Einen Stoff, der in der Weltgeschichte eher eine Nebenrolle zu spielen scheint, in Wahrheit aber für den Menschen unentbehrlich ist. »Mancher mag weniger interessiert sein, Gold zu suchen, es gibt aber niemanden, der nicht wünschte, Salz zu finden«, befand der spätantike Schreiber Cassiodor (um 490–580). Und der römische Universalgelehrte Plinius der Ältere (23/24–79) war überzeugt: »Ein menschenwürdiges Leben ist ohne Salz unmöglich.« Tatsächlich ist Salz lebensnotwendig. Ungefähr fünf Gramm Natriumchlorid benötigt jeder Mensch täglich. Es macht nicht nur Speisen schmackhaft, sondern auch Fleisch und Fisch haltbar.



IN DER GRUBE Nachdem sie die antiken Bereiche im Bergwerk frei gelegt hatten, dokumentierten die Archäologen die Schichtenabfolge des Schutts (rechts).

THOMAS STÖLLNER / DEUTSCHES BERGBAU-MUSEUM BOCHUM (OBEN) / RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM (RECHTS) / ZAMANA CULTURAL HERITAGE, HANDICRAFTS AND TOURISM ORGANIZATION (RECHTS)

Überdies lassen sich damit Tierhäute gerben, und es dient als wichtiger Futterzusatz in der Viehzucht.

Menschen schürften den weißen Stoff indes nicht von alters her. Historisch betrachtet stieg der Bedarf wohl ganz allmählich vor rund 12000 Jahren, als die ersten Bauern im Vorderen Orient begannen, Felder zu bestellen. Entsprechend stand mehr Getreide auf dem Speiseplan. »Mit der Umstellung auf überwiegend kohlenhydratreiche Pflanzenkost konnte der tägliche Kochsalzbedarf nicht mehr allein über proteinreiche fleischliche Nahrung gedeckt werden, sondern musste systematisch und zusätzlich zugeführt werden«, erklärt Archäologin Stöllner. Mit der Jungsteinzeit begann demnach die Geschichte der Salzgewinnung. Die frühen Bauern sammelten die Kristalle entweder aus flachen Küstenstreifen ab, an denen Meerwasser verdunstet war, oder sie schlugen es unter Tage aus Salzstöcken.

Salzabbau unter den Perserkönigen

Die ältesten Spuren, die vom Salzabbau im persischen Douzlākh zeugen, reichen ins 5. Jahrhundert v. Chr. zurück. Zu jener Zeit herrschte das Geschlecht der Achämeniden über ein Reich, das sich von Kleinasien im Westen bis zum Indus im Osten erstreckte, vom Kaukasus bis zum Hindukusch, vom Mittelmeer bis zum Persischen Golf. Ausgehend von der Kernregion um die Palaststädte Persepolis, Susa und Ekbatana hatten die Perserkönige seit der Mitte des 6. Jahrhunderts v. Chr. Gebiet um Gebiet erobert, die

Ländereien anschließend in Provinzen unterteilt – so genannte Satrapien – und sie so der persischen Militär- und Steuerverwaltung einverleibt. Unter der Ägide der Achämeniden erschlossen die Bergmänner den Douzlākh.

Wie sich zeigte, war dies kein Zufall: »Das Bergwerk von Chehrābād hat nun nach mehr als 20 Jahren Forschung deutliche Belege dafür geliefert, dass der Bergbau vor allem in Zeiten florierte, in denen zentrale Herrschaftssysteme den Abbau kontrollierten und die Verteilung des Rohstoffs organisieren konnten«, fasst Stöllner ein Kernergebnis des Forschungsprojekts zusammen. Der Archäologe ließ dutzende Datierungen mittels Radiokohlenstoffmethode vornehmen. Und die ermittelten Zeiten fielen auf wenige Epochen, die mit den Herrschaftszeiten der großen persischen Dynastien übereinstimmen:

- Die erste Nutzungsphase verlief von ungefähr 500 bis 400/380 v. Chr. – also zur Zeit des altpersischen Reichs der Achämeniden.
- Danach arbeiteten erst wieder von zirka 200 bis 600 n. Chr. Kumpel im Bergwerk. Damals kontrollierten die Sassaniden die Gebiete des heutigen Iran, Irak, Aserbaidschan, Turkmenistan, Pakistan und Afghanistan – bis zur arabischen Eroberung im Jahr 642.
- Anschließend stand der Bergbaubetrieb lange still. Erst um 1100 hielten sich erneut Arbeiter im Douzlākh auf, als die türkischen Seldschuken Persien eingenommen hatten.

- Nach einer weiteren Unterbrechung wurde der Salzabbau im 16. und 17. Jahrhundert wieder fortgesetzt. Dies war die Zeit der Safawiden, die von 1501 bis 1722 über den Iran herrschten.
- Auch anschließend, bis etwa 1950, gewannen immer wieder Kumpel Salz aus dem Berg bei Chehrābād. In diese Phase der späteren Neuzeit fällt die bedeutende Dynastie der Qadscharen (1779–1925), die dann vom letzten Kaisergeschlecht der Pahlavi (1925–1979) abgelöst wurde.

Nach dem Unglück war Schluss

Immer wenn große Teile Vorder- und Mittelasiens in der Hand einer staatlichen Gewalt lagen, ließ sich der Bergbau im Douzlākh logistisch und finanziell bewerkstelligen. Doch in der Antike ging die Salzgewinnung längst nicht gleichförmig vonstatten – und auch nicht gleich lang. »In der Achämenidenzeit hatte das Bergwerk eigentlich keine lange Betriebszeit«, sagt Stöllner. »Vielleicht weniger als 100 Jahre.« Und sicher ist: Der Minenstopp war nicht geplant. Irgendwann zwischen 400 und 380 v. Chr. stürzte die Salzkaverne ein und verschüttete die Arbeiter. Die Achämeniden machten die Mine danach dicht. Sie lag für rund sechs Jahrhunderte brach.

Was war geschehen? Warum stürzte die Mine ein? Bei ihren Grabungen entdeckten die deutschen, österreichischen und iranischen Archäologen des Projekts genügend Indizien, um den Hergang des Grubenunglücks zu rekonstruieren. Sie haben drei mögliche Ursachen ausgemacht, die wohl im Zusammenspiel den Berg ins Wanken brachten:

- die Tatsache, dass dort rigoros Bergbau betrieben wurde;
- die geologische Beschaffenheit des Douzlākh;
- und ein Erdbeben, das die Katastrophe vermutlich losbrechen ließ.

Wie sich die Kumpel durch den Berg schlugen

In der Antike gingen die Arbeiter innerhalb der Salzschiefer zu Werke, sie pickten die Kristalle demnach nicht zwischen Gesteinsschichten heraus. Zu Beginn hatten die Kumpel dafür einen Stollen in den Salzstock getrieben, den sie anschließend Stück für Stück zu den Seiten erweiterten. Dazu legten die Bergarbeiter so genannte Vortriebe an – das heißt, sie öffneten Gänge im Salz, die sie ebenfalls zu den Seiten verbreiterten. »Am Ende erschlossen sie so eine große, unterirdische Halle, von der vereinzelt noch Kammern abgingen«, erklärt Stöllner. »Bergmännisch nennt man das Pfeiler-Kammer-Bau.« Denn für die Stabilität der zirka 25 bis 30 Meter weiten Halle hätten stehen gebliebene Pfeiler sorgen können. Überreste solcher Stützelemente haben die Forscher allerdings bislang nicht dokumentiert. Es sei zwar gut möglich, dass sie durch den Einsturz der Salzkaverne zermalmt wurden, dennoch will Stöllner nicht ausschließen, dass die antiken Bergmänner tatsächlich keine stehen gelassen hatten. »Man ging womöglich so lange auf diese Weise vor, wie es eben gut ging.«

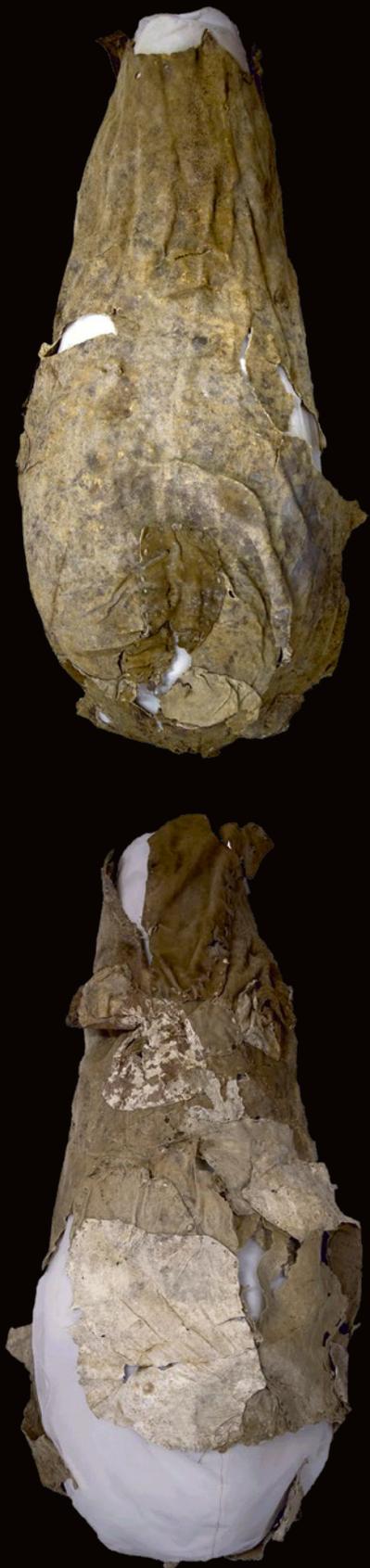
Dass die Grube einbrach, ist aber auch der geologischen Natur des Douzlākh geschuldet. Ungefähr entlang der westlichen Grenzregion des Iran stoßen zwei Kontinental-



WERKZEUGE Während der Achämenidenzeit im 5. Jahrhundert v. Chr. verwendeten die Bergleute Hämmer zum Salzbrechen (links). Als die Sassaniden von zirka 200 bis 600 n. Chr. im Bergwerk schürften ließen, schlugen die Kumpel das Salz mit Keilhauen (rechts) aus der Wand.

platten aneinander: die Eurasische und die Arabische Platte. Durch die tektonische Kollision hatte sich die Region um Zanjān im Lauf der Erdgeschichte gehoben. Gestein, das sich über der Salzschiefer abgelagert hatte, geriet dadurch allmählich ins Rutschen. »Die Salz führenden Lagen könnten hierbei mitgeschleppt, gefaltet und an die Oberfläche geschoben worden sein«, vermutet Rainer Herd von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, der sich mit der Geologie am Douzlākh beschäftigt hat. Die Salzschiefer war dabei zerdrückt worden. Und diese Fragmentierung machte sie instabil. Thomas Stöllner erklärt: »Stellen Sie sich einen Keks in einem Stück Plastilin vor. Der Keks ist der Steinsalzzug. Wenn Sie das zerquetschen, zerbricht der Keks. Nun wird untertätig abgebaut, also das Plastilin weggegraben. Wo der Keks fraktioniert ist, würden Sie dabei nicht erkennen. Wenn nun zu viel abgetragen wird, bröckelt der Keks heraus.«

Falls der »fragmentierte Keks« nicht von selbst zum Einsturz führte, könnte Ursache Nummer drei dafür gesorgt haben. Erdbeben erschüttern noch heute regelmäßig den Iran. Stöllner und sein Team gehen deshalb davon aus, dass erst der Boden bebte und dann die schütterte Salzschiefer nachgab. »Der Firstverbruch war eine gewaltige Katastrophe. Die verstürzten Blöcke waren viele Kubikmeter mächtig«, sagt Stöllner. Von derartigen Brocken waren »Farshid«, »Aaram« und »Navib« – Salzmann 4, 5 und 3 – erschlagen worden.



SALZSACK Die vielen geflickten Stellen zeugen von einer intensiven Nutzung des Sacks (zwei Ansichten). Er besteht aus einem vollständigen Ziegenbalg, der Hals diente als Öffnung des Transportbehälters.

DEUTSCHES BERGBAU-MUSEUM BOCHUM / OBGM / FUHM-UNIVERSITÄT BOCHUM (RUB) / ZANJAN CULTURAL HERITAGE, HANDICRAFTS AND TOURISM ORGANIZATION (CSTO)

Wie die Grabungen im Douzlākh und Untersuchungen an den Salzmännern ergaben, war nach dem Grubenunglück vor 2400 Jahren das Bergwerk noch mindestens weitere zweimal zur Zeit der Sassaniden eingestürzt: um 300 sowie um 500/600 n. Chr. Heute sind die Überreste von acht Bergmännern identifiziert. Vier starben zur Zeit der Achämeniden, die anderen vier während des neupersischen Reichs der Sassaniden. Die hygroskopische Wirkung des Natriumchlorids, also die Eigenschaft, einem Körper Feuchtigkeit zu entziehen, hatte die toten Männer mumifiziert. Doch nicht alle verunglückten Bergarbeiter sind gleich gut konserviert.

Geschorenes rötlich-braunes Haar

Frank Rühli und Lena Öhrström vom Institut für Evolutionäre Medizin der Universität Zürich untersuchten die Toten mit allen Raffinessen ihrer Zunft: per Röntgen- und Computertomografie sowie mittels Gen- und Isotopenanalyse. Überdies prüften sie Proben von Haut, Haar und Knochen. Der vollständig erhaltenen Mumie von Salzmann 4 konnten die Archäomediziner entsprechend viele Geheimnisse entlocken. So legt der Wachstumsstand der Handknochen und Zähne nahe, dass der achämenidische Bergmann bei seinem Tod ungefähr 15 bis 17 Jahre alt war. Sein Haar besaß einst eine rötlich-braune Farbe und war, kurz bevor er starb, geschoren worden. Sein Brustkorb war zermalmt, die Rippen mehrfach gebrochen und der Schädel zerquetscht. Als die Forschergruppe Salzmann 4 entdeckte, lag er bäuchlings unter einer dichten Schicht großer, herabgestürzter Stein- und Salzbrocken. »Durch die Wucht des Aufpralls sind wohl die inneren Organe geplatzt, und der Tod muss sehr schnell eingetreten sein«, resümieren Öhrström und Rühli. Zu Lebzeiten war der junge Mann aber vollkommen gesund gewesen.

Die Isotopenanalyse von Experten der University of Oxford an Haut- und Blutresten lieferte dann ein verblüffendes Ergebnis: Die Daten stimmten nicht mit der Isotopensignatur des Nordwestiran überein. Über ein Menschenleben hinweg lagern sich im menschlichen Körper bestimmte Stickstoff- und Kohlenstoffisotope ein – ihre Zusammensetzung hängt von der Ernährung ab, etwa davon, wo ein Mensch welches Wasser zu sich genommen hat. Im Fall von Salzmann 4 war damit klar, dass er bis kurz vor seinem Tod nicht in der Gegend um den Douzlākh gelebt hatte. »Er war ein Fremder«, fasst Thomas Stöllner zusammen. Und wie die Analysen an den übrigen Salzmännern achämenidischer Zeit belegten, war er nicht der Einzige.

Von »Navib«, Salzmann 3, blieb nicht einmal die Hälfte des Körpers erhalten, aber genug, um festzustellen, dass auch er ein junger Mann von ungefähr 18 bis 22 Jahren war. Neben ihm fanden sich ein Stahlhammer, der vermutlich zum Zerkleinern von Salzblöcken diente, Fetzen seiner Kleidung und geflickte, ausgetretene Lederschuhe. Wie bei »Farshid« sorgte die Isotopenanalyse für eine Überraschung: »Navib« hatte nicht immer in der Region von Zanjān gelebt. Er war ebenfalls von anderswo zum Douzlākh gekommen. »Hier dürften engere Bezüge nach Zentralasien beziehungsweise Turkmenistan vorliegen«, vermuten Stöllner und sein iranischer Kollege Abolfazl Aali. Bedauerlich sei, so die Forscher, dass die genetischen Untersuchungen bisher keine brauchbaren Daten lieferten. Auch bei den anderen Salzmännern



SALZMANN 1 Im Jahr 1993 förderten Salzarbeiter diesen Kopf zu Tage. Der bärtige Mann war bei seinem Tod zwischen 30 und 40 Jahre alt. Sein Haar war einst braun, wurde aber vom Chlorid im Salz weiß gefärbt. Er starb bei einem Grubeneinsturz um 300 n. Chr.

nern waren sie nur selten erfolgreich. Jüngst gelang lediglich die genetische Auswertung eines Schafs, genauer eines konservierten Schafbeins aus dem 5. Jahrhundert, dessen Erbgut erstaunlich gut erhalten blieb. Die Genetiker vom Trinity College Dublin stellten fest, dass sich das Nutztier von heutigen Schafen in der Region kaum unterschied.

Im Darm von Salzmann 5 hausten Parasiten

Im Fall von »Aaram«, Salzmann 5, bestätigte die DNA-Analyse zumindest das Geschlecht: Er war ganz sicher ein Mann. Und er kam aus dem nördlich des Iran gelegenen Zentralasien, wie eine weitere Isotopenuntersuchung ergab. Als »Aaram« starb, war er schätzungsweise 40 Jahre alt. Er litt an keiner Krankheit – einzig in seinem Gedärm hausten Bandwürmer der Gattung *Taenia*. Der Nachweis gelang, weil sich im Hüftbereich des Toten Reste des Darminhalts,

so genannte Paläofaeces, fanden. »Aaram« dürfte sich die Parasiten durch den Verzehr von halb garem oder rohem Fleisch eingehandelt haben.

Ähnlich wie »Farshid« war er von einem großen Felsbrocken erschlagen worden – an seinem weitgehend skelettierten Körper dokumentierten Rühli und Öhrström diverse Frakturen. Haut und Gewebe waren nur stellenweise erhalten geblieben, etwa die Fingerkuppen, an denen noch eine Substanz haftete. Das Forscherteam nahm eine winzige Probe und ließ sie mit Hilfe der Gaschromatografie untersuchen. Bei dieser Methode wird die Probe in seine chemischen Bestandteile zerlegt, um diese zu identifizieren. Das Ergebnis: Es handelt sich um ein Öl. Aus Sicht von Thomas Stöllner lassen sich eingölte Hände leicht erklären: »Wer im Salz arbeitet, bekommt rissige Hände – und das ist schmerzhaft. Da ist es klar, dass man die Haut

eincremen und einfetten muss.« Das Öl brachten die Kumpel womöglich in kleinen, kugeligen Tonbehältern in die Grube. Jedenfalls lagen zwei solche Gefäße bei Salzmann 4. Zurzeit laufen Analysen, mit denen die Rückstände im Inneren chemisch bestimmt werden. Stöllner: »Wenn es dieselbe Substanz sein sollte, hätten wir einen guten Beleg, dass sich Salzmann 4 und 5 kannten.«

Die Kluft aus der Kleiderkammer

Neben Salzmann 5 bargen die Archäologen eine Ziegenhaut. Es war ein Sack, der einen großen Salzblock und -stücke enthielt. Der Ziegenbalg, der an der Halsöffnung mit einem Riemen verschließbar war, diente offenbar als Transportbehälter, um das Salz über Tage zu schaffen. Zudem hingen am Toten noch wenige Kleiderreste: Eine Hose und ein knielanges Hemd (Tunika) waren zu erkennen. Diese Ausstattung war den Ausgräbern bereits bekannt. Beim Salzmann 4 haftet eine ähnliche Bergmannskluft vollständig am Leib.

»Farshid« ist mit einem robusten Gewand aus Schafswolle bekleidet, das von viel Knowhow und großer Expertise

Hallstatt: Das älteste Salzbergwerk der Welt

Seit mehr als 7000 Jahren schürften Menschen Salz im Bergwerk von Hallstatt. Der kleine Ort liegt in malerischer Kulisse an einem bewaldeten Hang über dem Hallstätter See im österreichischen Salzkammergut. Dass dort bereits in der Jungsteinzeit systematisch Salz gebrochen wurde, wissen Archäologen spätestens seit 1960. Über 90 Fundstellen haben sie seither dort frei gelegt – und reihenweise Erkenntnisse gesammelt.

So fanden die Forscher in der Grube unter anderem Kinderschuhe. Ferner dokumentierten sie an den Skeletten von Jugendlichen und Kindern aus den umliegenden Gräberfeldern deutliche Verschleißspuren – vor allem an den Gelenken, Halswirbeln und Schädeln. Daraus schließen der langjährige Ausgräber von Hallstatt, Hans Reschreiter, und seine Kollegen vom Naturhistorischen Museum in Wien, dass die Kinder schwere Lasten auf ihrem Kopf schleppten. Die Kumpel arbeiteten also von Kindesbeinen an im Berg. Zumindest seit der Eisenzeit im 1. Jahrtausend v. Chr.

Die gesamte Gemeinschaft war in den Salzkammern zu Werke gegangen. Denn die Gebeine der Erwachsenen waren ebenfalls von harter Arbeit gezeichnet. Auch sonst war es um die Gesundheit der eisenzeitlichen Hallstätter nicht gut bestellt: Fast alle litten an Entzündungen der Nasennebenhöhlen, vermutlich weil die Atemwege unter Tage durch den Rauch von Feuerstellen stark belastet waren.

zeugt. Seine Kleidungsstücke, eine weite Hose und ein langärmeliges Oberteil, waren jeweils in einem Arbeitsvorgang gewebt worden. »Bei der Herstellung des Kittels begannen die Weber ausgehend vom Handgelenk am Ärmel«, erklären Karina Grömer vom Naturhistorischen Museum in Wien und Shahrzad Amin Shirazi vom iranischen Research Center for Conservation of Cultural Relics. Um den Stoff über der Brust und dem Rücken zu verbreitern, hatte man Fäden dazugenommen. »Abschließend musste dieses große Stoffstück nur noch entlang des Halsausschnitts geklappt und an den Seiten zusammengenäht werden«, so die beiden Textilexpertinnen. Die Hose war auf dieselbe Weise entstanden. Zur Ausrüstung gehörte auch ein raffiniertes Umhang aus zwei zusammengenähten Ziegenfellern.

»Die Männer trugen eine Arbeitskleidung, die sehr funktional und gut durchdacht war«, erklärt Grömer. »Etwa der dichte Faltenwurf zwischen den Hosenbeinen. Darin war jegliche Art von Bewegung möglich – Beine spreizen, in die Hocke gehen, kriechen.« Ebenso bot die Tunika größtmögliche Armfreiheit, legte sich aber zugleich eng an den Körper, da die Kumpel sie an der Taille gürteten. Zusätzlich steckten die Hosenbeine in den Schuhen. So konnte weder Salz noch Staub an die Füße gelangen.

Die gleiche Garnitur wie Salzmann 4 trugen auch seine Arbeitsgefährten – so viel scheint sicher zu sein, selbst wenn ihre Kleidung im Lauf der Jahrtausende verwittert war. »Wir vermuten, dass es eine Art Kleiderkammer gegeben hatte. Dass die Bergleute mit Arbeitskleidung versorgt wurden«, sagt Grömer. Das spricht ebenfalls dafür, dass der zentralisierte Verwaltungsapparat der Achämeniden den Bergbau am Douzlākh organisierte. Der einzige markante Unterschied zwischen den Kumpeln prangte um die Taille: Jeder trug eine andere Art von Gürtel – »Aaram« ein Band aus einem bunten Textil, »Farshid« ein schlichtes Schlaufengewebe, »Navib« einen rundlichen Gurt, der wohl mit einer der Strickliesel ähnlichen Technik hergestellt wurde. Welche Bedeutung die Gürtel hatten, lässt sich nicht bestimmen, sagt Grömer. »Ob das ein Stück persönlicher Touch war, ein Abzeichen für die Arbeit oder einem anderen Zweck diente, wissen wir leider nicht.«

Filetbergbau – die Achämeniden wollten nur das Beste

Was laut Karina Grömer jedoch eindeutig zu erkennen ist: Zum Zeitpunkt des Unglücks hatten die drei Salzmann ihre Kluft unterschiedlich lange getragen. Während die Schuhe von »Farshid« nahezu neu sind, weisen die Mokassins von Salzmann 3 mehrere Reparaturen auf. Auch »Farshids« Hose ist unversehrt, seine Tunika indes und die Kleidung der anderen sind von der Schürfarbeit stellenweise abgerieben und geflickt. Neu eingekleidet, die Haare geschoren, jugendliches Alter – Thomas Stöllner und sein Team gehen davon aus, dass Salzmann 4 ein Neuling im Bergwerk war, ein Geselle.

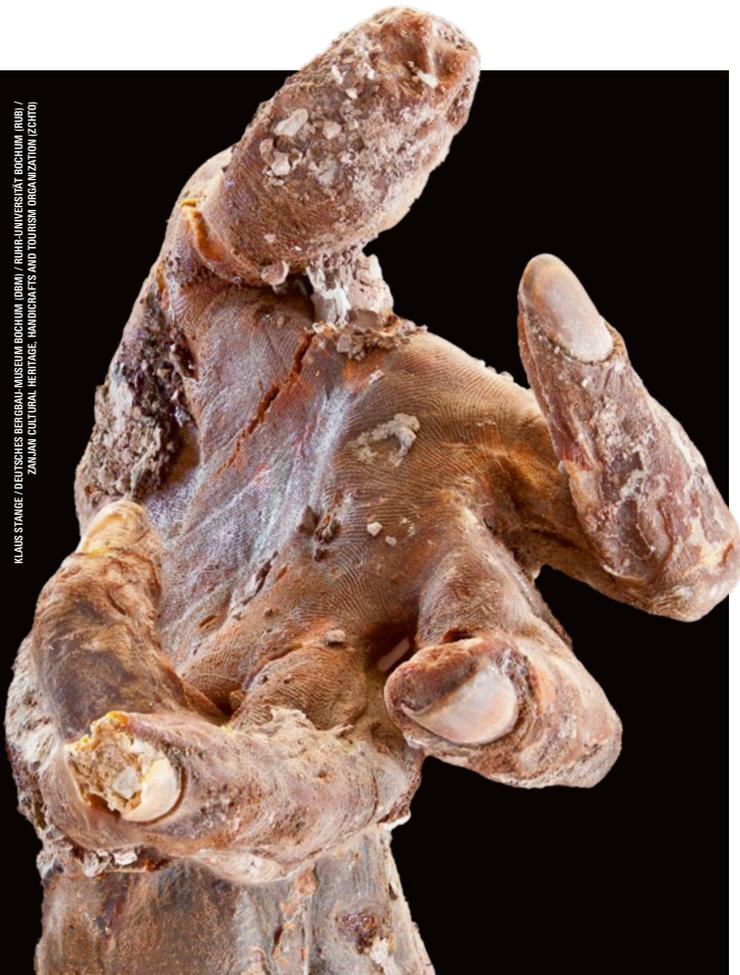
Aus der Fremde, irgendwo aus Zentralasien, kamen sie hingegen alle drei. Weshalb? »Die Gegend um den Douzlākh war zu jener Zeit kaum besiedelt. Der nächste Ort lag zehn Kilometer entfernt – es gab also kein Dorf zum Bergwerk«, sagt Stöllner. Denkbar sei, dass die achämenidi-

sche Verwaltung daher von anderswo aus dem Perserreich Experten heranholte, um das Steinsalz abzubauen. Vielleicht mussten die drei Kumpel auch einen der Wehrpflicht vergleichbaren Arbeitsdienst leisten. Bei all dem, was Altorientalisten bislang über das altpersische Reich wissen, wäre solch eine Dienstpflicht nicht ungewöhnlich.

Sicher ist, dass die Bergleute das Salz nicht in großem Stil gewonnen haben. Und das, was sie aus den Grubenwänden brachen, waren stets die besten Stücke. »Das Hauklein aus achämenidischer Zeit, also der Abbaurest, den wir bei den Grabungen fanden, war sehr salzreich. Man hatte demnach längst nicht alles aufgesammelt, was brauchbar war. Es wurde ein so genannter Filetbergbau betrieben«, erklärt Stöllner. Der Montanarchäologe vermutet daher, dass das Natriumchlorid nicht als gewöhnliches Gebrauchssalz gewonnen wurde. Sehr rein, sehr hell sind die Kristalle vom Douzlākh. Vielleicht schätzten die Achämeniden sie als besonderen Stoff. Einen Beleg für diese These gibt es allerdings nicht. In den Keilschrifttafeln aus Persepolis oder anderen Königs- und Satrapenpalästen haben Philologen denn auch das Wort für Salz bisher noch nicht identifiziert.

Dass mehr als die drei Männer im Bergwerk tätig waren, legen zwei Umstände nahe: Unweit von Salzmann 3 fand sich ein Kieferfragment, das zu einem weiteren Kumpel

FAST UNVERSEHRTE FINGERNÄGEL Durch das Salz hat sich die Haut von Salzmann 4, wie hier an seiner linken Hand, kaum zersetzt. Die Fingernägel waren auch zu Lebzeiten kaum beansprucht – ein Hinweis darauf, dass der junge Mann nicht lange im Bergwerk tätig war.



KLAUS STÄNBE / DEUTSCHES BERGBAU-MUSEUM BOCHUM (DBM) / RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM (RUB) / ZANJAN CULTURAL HERITAGE, HANDICRAFTS AND TOURISM ORGANIZATION (ZCTHO)

gehörte – er erhielt den Namen Salzmann 8. Und: Die behauenen Wände und Abbauspuren zeugen davon, dass wahrscheinlich mehrere Trupps in der Grube Steinsalz schürften.

Als dann das Herrscherhaus der Sassaniden den Salzabbau Jahrhunderte nach dem Unglück wieder aufnehmen ließ, hatte sich die Gegend um den Berg gewandelt, ebenso das Handwerk und die Ausrüstung der Bergleute: Nun, ab



ESEBENE / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

dem 3. Jahrhundert n. Chr., siedelten um die Mine Menschen, die sehr wahrscheinlich den Bergbau betrieben. Dafür verwendeten sie anderes Werkzeug als ihre Vorgänger aus dem 5. Jahrhundert v. Chr.: Sie hämmerten keine großen Stücke aus den Grubenwänden, sondern frästen mit so genannten Quer- und Keilhauen Furchen ins Salz, schlugen die stehen gebliebenen Grate ab und entfernten so auch Ton und Gips. Zudem sammelten sie selbst kleinste Salzbrocken aus dem Hauklein. Für den Abtransport setzten die Kumpel Esel ein – von den Lasttieren haben Stöllner und sein Team reichlich Hinterlassenschaften aufgelesen.

Die neue Bergmannsmode der Sassanidenzeit

Karina Grömer, die mit ihren Kolleginnen die Textilfunde sortierte, registrierte ebenfalls einen Wandel in der Bergmannsuniform. In den nachchristlichen Jahrhunderten trugen die Männer eine Art Boxershorts und zusätzlich Beinlinge, bei denen es sich um an der Hüfte offene Hosen handelt. Überdies war die Kleidung anders geschneidert worden: »Aus einem 50 Zentimeter breiten und 3 Meter langen Stoff hat man durch gezielte Schnitte – ohne jeglichen Verschnitt! – eine Tunika genäht«, erklärt die Archäologin. »Es ist eine sehr professionelle Arbeit.«

Auch in sassanidischer Zeit war die Grube eingestürzt. Zweimal sogar. Das bezeugen am deutlichsten die vom Salz mumifizierten Körperteile. Der Bergbau wurde dennoch fortgesetzt. »Vermutlich, weil es die Lebensgrundlage der Menschen aus dem nahe gelegenen Umfeld war«, nimmt Stöllner an.

Nach der islamischen Eroberung Persiens 642 war es wieder lange still in der Region um Chehrābād. Erst im Mittelalter kehrten die Kumpel zurück, um nach dem weißen Gold zu schürfen. Verunglückt war keiner mehr von ihnen. Zumindest haben die Ausgräber noch keine neueren Mumien geborgen. ◀

QUELLE

Stöllner, T. et al. (Hg.): Tod im Salz. Eine archäologische Ermittlung in Persien. Nünnerich-Asmus, 2020

ARITHMETISCHE DYNAMIK MATHEMATISCHER BRÜCKENSCHLAG

Eine neue Disziplin kombiniert Erkenntnisse aus der Zahlentheorie mit dynamischen Systemen, die insbesondere in der Physik eine große Rolle spielen. Das eröffnet eine unerwartete Verbindung zwischen den zwei so unterschiedlich anmutenden Gebieten und fördert erstaunliche Ergebnisse zu Tage.



Kelsey Houston-Edwards ist Mathematikerin und Wissenschaftsjournalistin in San Diego.

► spektrum.de/artikel/1913902

UNGEAHNTE VERBINDUNG Grundlegende Objekte der Zahlentheorie, zu denen elliptische Kurven in Form von Donuts gehören, hängen mit fraktalen Mengen zusammen.

Joseph Silverman erinnert sich noch sehr gut an den Moment, der ihn zur Begründung eines neuen mathematischen Bereichs führte. Es geschah aus einem Zufall heraus am 25. April 1992, bei einer Konferenz am Union College in Schenectady, New York. Damals lauschte er einem Vortrag seines angesehenen Kollegen John Milnor, der 1962 die renommierte Fields-Medaille und 2011 den Abelpreis erhielt. Seine Präsentation drehte sich um ein Thema aus der komplexen Dynamik, über das Silverman, ein Zahlentheoretiker von der Brown University, bislang nur wenig wusste. Doch als Milnor einige der grundlegenden Ideen vorstellte, entdeckte Silverman verblüffende Ähnlichkeiten zu seinem eigenen Fachgebiet. »Wenn man nur ein paar Wörter ändert, entsteht ein völlig analoges Problem«, erinnert er sich.

Angesichts dieser unerwarteten Erkenntnis, verließ Silverman den Raum voller Inspiration. Als er beim Frühstück am folgenden Tag Milnor begegnete, setzte er sich zu ihm und löcherte ihn mit Fragen. Während ihres Gesprächs erkannte der Zahlentheoretiker immer mehr Zusammenhänge der beiden so unterschiedlich wirkenden Bereiche. Er beschloss daher, ein Wörterbuch zu erstellen, das zwischen den wichtigsten Inhalten und Fragestellungen der dynamischen Systeme und der Zahlentheorie übersetzen sollte.

Muster in Zahlenfolgen

Auf den ersten Blick wirkt es so, als haben die beiden Gebiete kaum etwas miteinander zu tun. Doch Silverman sah, dass sie sich auf eine besondere Weise ergänzen. Während die Zahlentheorie nach Mustern in Folgen sucht, erzeugen dynamische Systeme eben solche Sequenzen – etwa, indem man die Position eines Planeten im Raum in regelmäßigen Zeitabständen notiert. Somit verschmelzen beide Welten, sobald man nach den Gesetzmäßigkeiten sucht, denen die geheimnisvollen Zahlenfolgen unterliegen.

In den drei Jahrzehnten, die auf Milnors Vortrag folgten, entdeckten Mathematikerinnen und Mathematiker immer mehr Verbindungen zwischen den beiden Bereichen. Das schaffte die Grundlage für ein völlig neues Fachgebiet: die so genannte arithmetische Dynamik.

Die Reichweite der jungen Disziplin wächst stetig. In einer Arbeit, die 2020 in dem prestigeträchtigen Fachjournal »Annals of Mathematics« veröffentlicht wurde, haben zwei Mathematikerinnen zusammen mit einem Kollegen die Analogie auf drastische und unerwartete Weise erweitert. Es gelang ihnen, ein jahrzehntealtes Problem der Zahlentheorie zu lösen, das bis dahin keinerlei Zusammenhang mit dynamischen Systemen vermuten ließ.

Ihr Beweis gibt an, wie häufig eine bestimmte Kurvenart gewisse Punkte in einem sie umgebenden Raum höchstens schneiden kann. Zahlentheoretiker hatten sich lange gefragt, ob es eine solche Obergrenze gibt. Die Autorinnen und der Autor des Fachartikels können die Frage nun eindeutig bejahen – zumindest für eine bestimmte Sammlung von Kurven.

In ihrer beeindruckenden Arbeit nutzten sie Methoden aus der arithmetischen Dynamik und erweiterten das Repertoire um neue Werkzeuge, die sie eigens dafür entwarfen. »Eigentlich wollten wir bloß die Zahlentheorie

besser verstehen – es war uns egal, ob es ein zu Grunde liegendes dynamisches System zu unserem Problem gibt. Aber da eines existierte, konnten wir es als Hilfe benutzen«, erklärt die Mathematikerin Laura DeMarco von der Harvard University, welche die Arbeit gemeinsam mit ihrer ehemaligen Doktorandin Holly Krieger, die inzwischen an der University of Cambridge lehrt, und ihrem früheren Doktoranden Hexi Ye von der Universität Zhejiang verfasst hat.

Anlass für ihr ehrgeiziges Projekt gab eine Konferenz im Mai 2010, bei der sich eine Gruppe von Mathematikerinnen und Mathematikern in einem kleinen Forschungsinstitut auf Barbados versammelte. An diesem für einen Arbeitsaufenthalt ungewöhnlichen Ort verbrachten sie die sonnigen Tage damit, wenige Meter vom Strand entfernt über verschiedene abstrakte Themen zu diskutieren. Auch die Vorlesungsräume – ohne Wände und bloß mit einfachen Holzbänken ausgestattet – waren so konzipiert, dass man der umgebenden Natur so nahe wie möglich sein konnte. »Als es an einem Abend regnete, konnte man die Leute nicht einmal richtig hören, weil die dicken Tropfen so laut auf das Metalldach prasselten«, erinnert sich Silverman, der wie DeMarco dabei war.

Trotz der Widrigkeiten und Ablenkungen markierte die Konferenz einen entscheidenden Moment in der Entwicklung der arithmetischen Dynamik. Sie brachte Fachleute wie Silverman, der aus der Zahlentheorie kommt, mit solchen wie DeMarco und Krieger zusammen, die sich ursprünglich dynamischen Systemen widmeten. Ihr Ziel war es, neue Anwendungsgebiete zu finden, die sich durch die Kombination beider Perspektiven ergeben.

Als Ausgangspunkt diente ein zentrales Objekt der Zahlentheorie: elliptische Kurven. Genau wie Kreise und Linien lassen sich diese Strukturen sowohl durch Formeln als auch durch geometrische Figuren ausdrücken. Algebraisch kann man sie durch Zahlenpaare x und y beschreiben, die eine Gleichung wie $y^2 = x^3 - 2x$ lösen – allgemein folgen sie der Formel: $y^2 = x^3 + ax + b$. Überträgt man die Lösungen für reelle Zahlen x und y in ein Koordinatensystem, entsteht ein Graph, der einer vertikalen Linie ähnelt, aus der eine Blase herausragt.

AUF EINEN BLICK BEWEGTE ZAHLEN

- 1 Die Zahlentheorie gehört zu den abstraktesten mathematischen Gebieten und widmet sich Zahlenfolgen wie den Primzahlen.
- 2 Dynamische Systeme beschreiben hingegen periodische Bewegungen – sie können aber auch interessante Sequenzen hervorbringen, die sich zahlentheoretisch untersuchen lassen.
- 3 Die arithmetische Dynamik verbindet beide Bereiche miteinander und ermöglicht es, lang ungeklärte Fragen beider Disziplinen zu beantworten.

Mathematiker sind schon lange daran interessiert, verschiedene Eigenschaften dieser Kurven zu untersuchen. Das bis heute bekannteste Ergebnis ist Andrew Wiles' berühmter Beweis von Fermats großem Satz aus dem Jahr 1994. Dieser besagt, dass Gleichungen der Form $a^n + b^n = c^n$ für n größer als zwei keine ganzzahligen Lösungen besitzen. Wiles bekam dieses überaus hartnäckige Problem aus dem 17. Jahrhundert in den Griff, indem er die Merkmale elliptischer Kurven untersuchte.

Tatsächlich sind diese Objekte unter Mathematikern gegenwärtig sehr beliebt, weil sie einerseits einfach genug sind, um sie gut analysieren zu können, aber andererseits gerade so kompliziert, dass man spannende Schlüsse aus ihnen ziehen kann. Als besonders nützlich erweisen sich dabei bestimmte Punkte auf den Kurven: Sie bilden eine Art Heimathafen für eine spezielle Operation, die der Addition ähnelt. Summiert man beispielsweise zwei Punkte, die sich auf einer Geraden befinden, dann liegt das Ergebnis wieder auf dieser Geraden. Zwar lassen sich die Punkte auf elliptischen Kurven auch addieren, doch ihre Summe ist dann nicht zwangsläufig Teil der Kurve – häufig liegt sie irgendwo daneben.

Interessanterweise besitzen elliptische Kurven aber eine spezielle interne Struktur, eine so genannte Gruppe, die eine andere Art von Arithmetik zulässt. Mathematisch gesehen ist eine Gruppe eine Menge, wobei die Verknüpfung zweier Elemente wieder Teil der Menge ist. Sie besitzt ein neutrales Element, dessen Verknüpfung alle anderen unverändert lässt (wie die Addition mit null), zudem gibt es zu jedem Element ein Inverses, deren Verknüpfung das neutrale Element liefert (etwa eine beliebige Zahl a und ihr Negatives $-a$). Somit bilden die ganzen Zahlen mit der Addition eine Gruppe.

Heimathafen- und Torsionspunkte

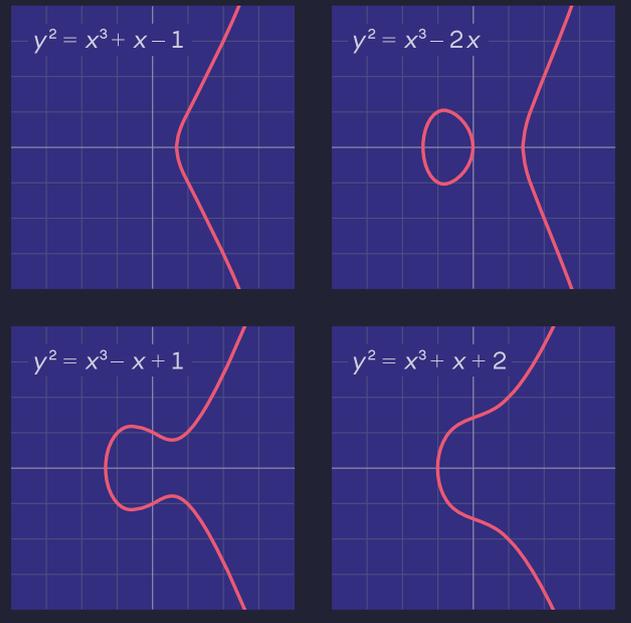
Punkte auf elliptischen Kurven besitzen ebenfalls eine Gruppenstruktur, wodurch ihre Verknüpfung – die in diesem Fall eine leicht abgewandelte Form der Addition – zu einem Ergebnis führt, das auf der Kurve liegt. Diese Besonderheit ermöglicht es, Zahlenfolgen zu erzeugen, die nützliche Merkmale der zu Grunde liegenden geometrischen Objekte preisgeben: Indem man etwa einen Punkt immer wieder zu sich selbst addiert, entsteht eine unendlich lange Sequenz, die Teil der elliptischen Kurve ist. Je nachdem, welchen Startpunkt man dabei wählt, erzeugt man eine andere Folge.

Hier kommen die bereits erwähnten Heimathafen-Punkte ins Spiel: Summiert man einen davon immer wieder mit sich selbst, führt das nicht zu einer unendlichen Folge mit neuen Zahlenwerten. Stattdessen stößt man auf eine Schleife, die irgendwann zu dem Punkt zurückkehrt, an dem man ursprünglich begonnen hat – und die Sequenz wiederholt sich ab da wieder von vorne.

Diese speziellen Startwerte, die Schleifen erzeugen, heißen in der Fachliteratur Torsionspunkte. Sie spielen insbesondere in der Zahlentheorie eine wichtige Rolle. Was verblüffend ist: Sie haben eine auffallende Ähnlichkeit zu einer bestimmten Art von Punkten, die in dynamischen Systemen auftauchen. Dieser Zusammenhang war es, der Silverman vor fast 30 Jahren stützen ließ und damit die arithmetische Dynamik ins Rollen brachte.

Elliptische Kurven

Trotz ihrer einfach anmutenden Darstellung haben sie eine vielfältige Struktur. Das macht sie zu wichtigen Objekten in der Zahlentheorie.



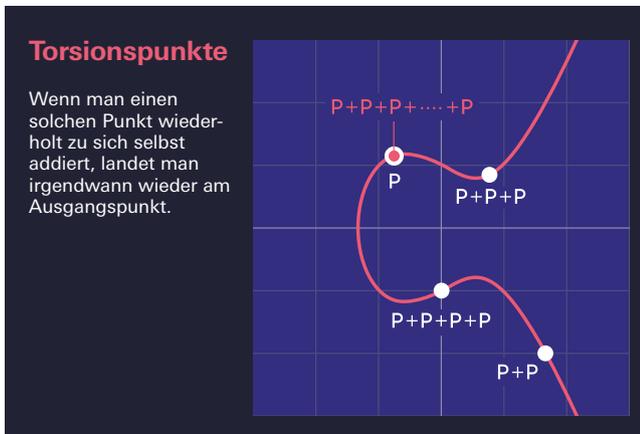
SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE

Dynamische Systeme dienen oft dazu, periodische Phänomene der realen Welt zu beschreiben. Dazu gehört das Abprallen einer Billardkugel nach den newtonschen Gesetzen, die Bewegungen von Galaxien, Sternen und Planeten oder auch komplexe Prozesse wie das Wetter. Die zu Grunde liegenden Gleichungen sind dabei häufig rekursiv: Das heißt, man beginnt mit einem Startwert, setzt diesen in eine Bewegungsgleichung ein und erhält daraus eine Ausgabe, die man erneut in die Funktion einsetzt und so weiter.

Einige der relevantesten dynamischen Systeme basieren auf einfachen Ausdrücken wie $f(x) = x^2 - 1$, so genannten quadratischen Polynomen. Polynome sind Summen aus potenzierten Variablen, die mit Vorfaktoren versehen sind, etwa $2xy^3 + 4x + 3$. Tatsächlich können solche simplen Funktionen, die uns bereits in der Schule begegnen, komplizierte fraktale Bilder namens Julia-Mengen erzeugen (siehe »Fraktal«).

Einige mögen sich darüber vielleicht wundern, da der Graph von $x^2 - 1$ eine Parabel ist – demnach müsste das rekursive Einsetzen von Ergebnissen Punkte erzeugen, die sich alle entlang dieser Kurve befinden. Tatsächlich kann der Graph aber kompliziertere Formen annehmen: Betrachtet man statt den aus der Schule bekannten reellen Zahlen komplexe Werte von x (also Summen aus reellen und imaginären Zahlen, die Wurzeln aus negativen Zahlen enthalten), erzeugen die Paare x und y ein ganz anderes Bild. Besonders spannend gestaltet es sich, wenn man mit einem komplexen x startet und das resultierende Ergebnis y immer wieder in die Funktion einsetzt, wodurch eine unendliche Folge von Punkten in der komplexen Ebene entsteht.

Das ist nur ein Beispiel für ein quadratisches Polynom, dessen größter Exponent 2 ist. Da viele Bewegungsglei-



chungen in dieser Form auftreten, bilden solche Funktionen die Grundlage dynamischer Systeme – so wie elliptische Kurven im Fokus zahlreicher grundlegender Untersuchungen in der Zahlentheorie stehen.

Die Verbindung beider mathematischen Bereiche entsteht, wenn man sich die Zahlenfolgen von dynamischen Systemen während ihrer zeitlichen Entwicklung ansieht. Betrachtet man zum Beispiel die quadratische Funktion $f(x) = x^2 - 1$ und setzt $x = 2$, erzeugt man durch wiederholtes Einsetzen die unendliche Folge 3, 8, 63 und so weiter. Wie bei elliptischen Kurven lösen aber nicht alle Startwerte eine stetig wachsende Sequenz aus. Beginnt man etwa mit $x = 0$, ergibt sich: 0, -1, 0, -1, 0, ... – man landet in einer kurzen, geschlossenen Schleife.

Im Bereich der dynamischen Systeme nennt man Startpunkte, für die sich die Folgen irgendwann wiederholen, endliche Bahnpunkte. Sie sind ein direktes Analogon zu Torsionspunkten auf elliptischen Kurven. In beiden Fällen beginnt man mit einem Wert, setzt ihn entweder in die dazugehörige Bewegungsgleichung oder verknüpft ihn mit sich selbst und landet in einem Kreislauf. Diese Übereinstimmung haben die zwei Mathematikerinnen und ihr Kollege in ihrem neuen Beweis benutzt.

Krieger, Ye und DeMarco trafen sich im August 2017 am American Institute of Mathematics in San Jose, Kalifornien, das kurzfristige Forschungsprogramme ermöglicht. »Wir verbrachten fünf Tage in einem Raum – wir mussten einige Fragen durcharbeiten«, erinnert sich Ye. In dieser Zeit entwickelten sie eine Möglichkeit, um die entscheidende Analogie zwischen den Torsionspunkten elliptischer Kurven und den endlichen Bahnpunkten dynamischer Systeme zu erweitern. Wie sie herausarbeiteten, kann man ein bestimmtes zahlentheoretisches Problem, das auf den ersten Blick nichts mit dieser unerwarteten Verbindung zu tun hat, verwandeln, um es mit Methoden aus der arithmetischen Dynamik untersuchen zu können.

Die betrachtete Fragestellung ergibt sich dabei aus der so genannten Manin-Mumford-Vermutung. Diese handelt von »algebraischen Kurven«, die im Allgemeinen komplizierter sind als elliptische, etwa $y^2 = x^6 + x^4 + x^2 - 1$. Zu jeder solchen Kurve gehört ein größeres geometrisches Objekt, eine Art Oberfläche – genannt Jacobi-Varietät –, die bestimmte Eigenschaften mit der Kurve teilt und für Mathematiker oft einfacher zu untersuchen ist.

Anders als elliptische Varietäten besitzen algebraische Kurven nicht zwingend eine Gruppenstruktur, die es ermöglicht, Punkte auf ihnen zu addieren, ohne die Kurve zu verlassen – aber die zugehörigen Jacobi-Varietäten schon. Darauf finden sich zudem Torsionspunkte, die wie bei elliptischen Kurven unter wiederholter Addition zu sich selbst zurückkehren.

Die Manin-Mumford-Vermutung befasst sich damit, wie oft eine algebraische Kurve, eingebettet in ihre Jacobi-Varietät, deren Torsionspunkte schneidet. Bildlich kann man sich das vorstellen, als würde man die Kurve auf der entsprechenden Oberfläche aufzeichnen. Yuri Manin vom Max-Planck-Institut für Mathematik in Bonn und David Mumford von der Brown University in Rhode Island vermuteten vor einigen Jahrzehnten, es gäbe bloß endlich viele solcher Schnittpunkte. Die Vermutung spiegelt die wechselseitige Beziehung zwischen der algebraischen (weil Torsionspunkte spezielle Lösungen der Gleichungen sind, welche die Kurve definieren) und der geometrischen (durch die Einbettung in die Jacobi-Varietät) Seite einer Kurve wider.

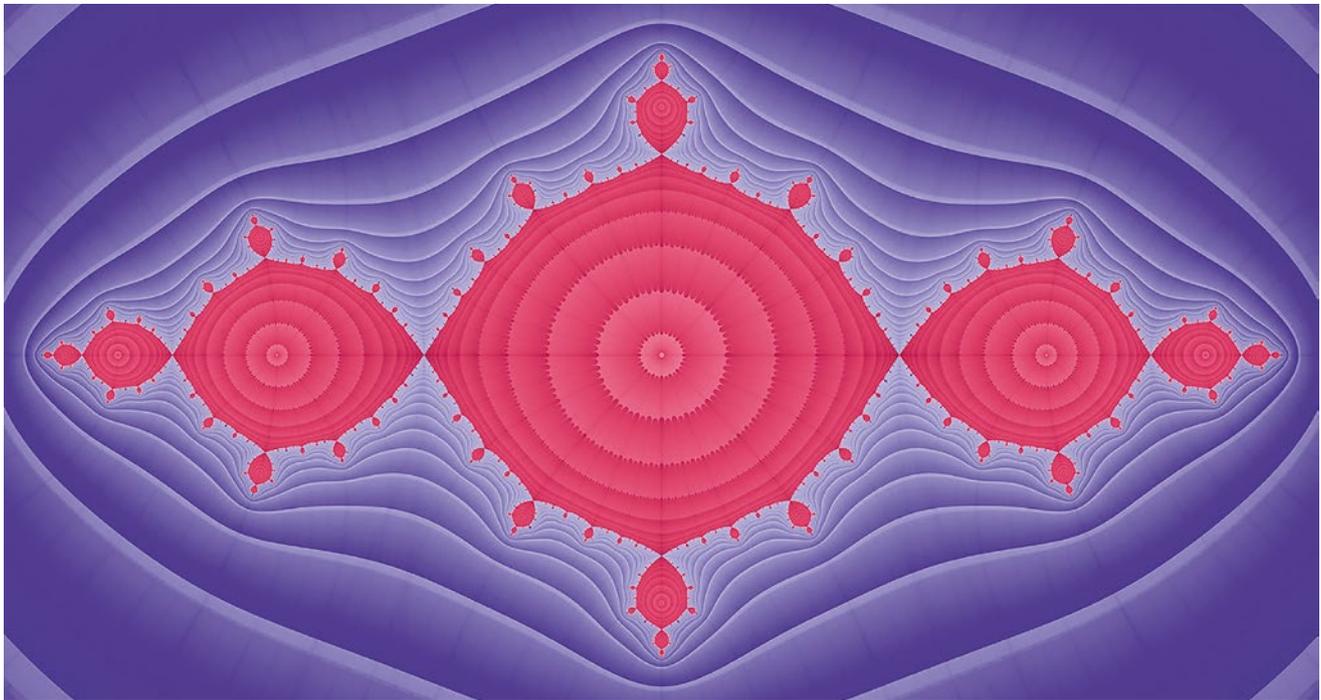
Wie lassen sich die Schnittpunkte zählen?

Manins und Mumfords Verdacht erschien überraschend, da die Torsionspunkte in jedem Bereich einer Jacobi-Varietät verdichtet auftauchen. Das heißt, man kann in einen beliebig kleinen Teil der Oberfläche hineinzoomen und wird dabei zwangsläufig auf solche Punkte stoßen. Dennoch sagt die Vermutung voraus, dass die eingebettete algebraische Kurve es schafft, alle Torsionspunkte – bis auf eine endliche Anzahl – zu verfehlen.

1983 gelang es dem französischen Mathematiker Michel Raynaud (1938–2018), die Hypothese zu beweisen. Seitdem haben viele Forscherinnen und Forscher versucht, die Arbeit fortzuführen: Sie möchten nicht nur wissen, ob die Anzahl der Schnittpunkte endlich ist, sondern wollen darüber hinaus herausfinden, ob es eine bestimmte Obergrenze dafür gibt, unabhängig von der zu Grunde liegenden algebraischen Kurve. Allerdings scheiterten alle Versuche, die Schnittpunkte zu zählen. Es fehlte eine klare Methode, mit der sich die komplexen Zahlen, die diese Punkte definieren, untersuchen ließen.

Wie sich jedoch herausstellte, kann die arithmetische Dynamik Abhilfe schaffen. In ihrer 2020 erschienenen Arbeit konnten DeMarco, Krieger und Ye zumindest für eine gewisse Art von Kurven beweisen, dass die Anzahl ihrer Schnittpunkte mit der entsprechenden Jacobi-Varietät stets unterhalb eines festen Zahlenwerts bleibt. Dem Mathematiker Lars Kühne von der Universität Kopenhagen gelang es Ende Januar 2021 in einer noch nicht vollständig begutachteten Arbeit sogar, eine konkrete Obergrenze für den allgemeinen Fall anzugeben, wobei er sich auf völlig andere Methoden stützte.

Die beiden Ergebnisse markieren einen erstaunlichen Fortschritt in der Zahlentheorie. Zwar hatte Raynauds frühe Arbeit bereits gezeigt, dass die Anzahl der Schnittpunkte endlich ist – aber theoretisch konnte die Zahl beliebig groß ausfallen. Sie hätte je nach betrachteter Kurve immer weiter anwachsen können. DeMarco, Krieger und Ye haben hingegen eine Grenze festgelegt – auch wenn sie den genauen



QUANTA MAGAZINE: NACH ADAM MAJEWSKI, NACH GABRIEL GARRIGO, V. J.: UNVEILING THE FRACTAL STRUCTURE OF THE MANIN-MUMFORD CONJECTURE. FILE: BASILICA_JULIA_SET_1000.PNG / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS ORG LICENSE BY SA 4.0 DE CALODI)

Zahlenwert nicht identifizieren konnten. Sie haben allerdings bewiesen, dass sie existiert und zudem eine Reihe von Schritten angegeben, die nötig sind, um die Zahl zu bestimmen.

Diese beeindruckende Leistung gelang ihnen, indem sie das Problem einschränkten. Sie fokussierten sich auf eine bestimmte Art von Kurven, deren Jacobi-Varietät in zwei elliptische Kurven aufgeteilt werden kann.

Es mag erstaunlich erscheinen, dass eine Varietät, die eine Art Oberfläche darstellt, sich derart zerlegen lässt. Doch in diesem Fall sind die dazugehörigen elliptischen Kurven keinen geschwungenen Linien, sondern ähneln einem hohlen Donut. Das liegt daran, dass man in die zu Grunde liegenden Gleichungen $y^2 = x^3 + ax + b$ komplexe Werte einsetzt. Da sich diese aus einem Real- und einem Imaginärteil (der Wurzeln negativer Zahlen enthält) der Variablen x und y zusammensetzen, ist der betrachtete Raum vierdimensional – und der Graph der Kurve beschreibt eine Art dreidimensionale »Oberfläche«.

Die Jacobi-Varietäten der von DeMarco, Krieger und Ye untersuchten algebraischen Kurven sehen dabei wie hohle Donuts mit zwei Löchern aus. Die Objekte lassen sich in zwei gewöhnliche Donuts mit je einem Loch aufspalten, die man jeweils durch eine elliptische Gleichung beschreiben kann. Diese Eigenschaft konnte das Trio nutzen, um die Anzahl der Schnittpunkte zwischen den betrachteten algebraischen Kurven und den Torsionspunkten ihrer Jacobi-Varietäten zu bestimmen: Denn tatsächlich entspricht der gesuchte Wert den Überschneidungen der Torsionspunkte beider elliptischer Kurven, welche die Varietät beschreiben. Um eine Obergrenze für die Manin-Mumford-Vermutung zu formulieren, mussten die Autoren also die beiden Donuts übereinanderlegen und herausfinden, wie oft die jeweiligen Torsionspunkte zusammenfallen.

FRAKTAL Diese Julia-Menge ergibt sich, indem man komplexe Zahlenwerte für x in $f(x) = x^2 - 1$ einsetzt, anschließend das Ergebnis wieder in die Funktion einfügt und so weiter, und die entstehenden Zahlenwerte in der komplexen Ebene markiert.

Dieses Vorhaben ließ sich jedoch nicht direkt umsetzen, weil die elliptischen Kurven stark unterschiedliche Formen annehmen können, was eine Untersuchung unter Umständen unmöglich macht. Es ist, als würde man Punkte auf der Oberfläche einer Kugel mit denen auf einem Würfel vergleichen. »Wir können die Torsionspunkte nicht wirklich zueinander ins Verhältnis setzen, weil sie auf verschiedenen geometrischen Objekten leben«, erklärt Krieger. Daher suchte das Team nach einer Möglichkeit, um die Punkte auf andere Weise zu untersuchen: zum Beispiel, indem man sie von ihren jeweiligen Oberflächen abhebt und dann übereinanderlegt – ungefähr so, wie man eine Sternkarte an den Nachthimmel anpasst.

Mathematische Sternkarten

Zwar sind solche mathematischen Sternkarten bekannt, aber zu diesem Zeitpunkt gab es keine geeignete Perspektive, um die aufeinanderliegenden Punkte zu zählen. Doch die arithmetische Dynamik ermöglichte es DeMarco, Krieger und Ye, einen passenden Blickwinkel zu finden. Dazu übersetzten sie die beiden elliptischen Kurven zunächst in zwei verschiedene dynamische Systeme. Obwohl die zu Grunde liegenden Oberflächen unterschiedliche Räume beschreiben, ist das bei den entsprechenden dynamischen Systemen nicht so. Die endlichen Bahnpunkte erscheinen für beide in ein und demselben Raum, der komplexen Ebene, wodurch sie sich vergleichen lassen. »Es ist einfa-

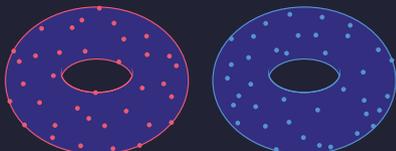
Schnittpunkte zählen

Um herauszufinden, wie häufig eine Kurve auf einer Jacobi-Varietät gewisse Punkte schneidet, ließ sich eine erstaunliche Analogie nutzen: Die Aufgabe entspricht dem Problem, die sich überschneidenden endlichen Bahnpunkte zweier dynamischer Systeme zu finden.



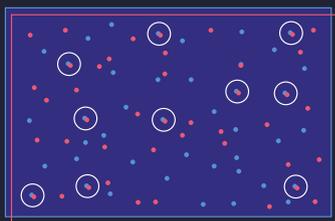
DIE JACOBI-VARIETÄT

Das Ziel besteht darin, gewisse Punkte auf der Jacobi-Varietät einer Kurve zu zählen.



TORSIONSPUNKTE

Die Varietäten lassen sich in zwei elliptische Kurven aufspalten. Da man diese in der komplexen Zahlenebene betrachtet, bilden sie eine Art Oberfläche, anstatt eine geschwungene Linie darzustellen. Die betrachteten Punkte auf den Varietäten entsprechen den Torsionspunkten der elliptischen Kurven.



ENDLICHE BAHNPUNKTE

Die Torsionspunkte lassen sich wiederum in endliche Bahnpunkte zweier dynamischer Systeme übertragen. DeMarco, Krieger und Ye haben bestimmt, wie häufig sie höchstens aufeinanderliegen.

cher, sich einen Raum mit zwei separaten dynamischen Systemen vorzustellen, als zwei separate Räume mit einem dynamischen System«, so DeMarco.

Dank der arithmetischen Dynamik wussten die drei Studienautoren, dass die endlichen Bahnpunkte der beiden dynamischen Systeme den Torsionspunkten der elliptischen Kurven entsprechen. Um eine obere Grenze für die Manin-Mumford-Vermutung festzulegen, mussten sie nur zählen, wie viele dieser Bahnpunkte aufeinanderfallen. Da sie nicht ein konkretes Beispiel lösen, sondern eine Obergrenze für jede algebraische Kurve dieser Art finden wollten, griffen sie auf eine Methode aus dem Bereich der dynamischen Systeme zurück. Dafür nutzten sie eine Funktion, die bestimmt, wie stark der Wert einer Zahl maximal anwachsen kann, wenn man sie wiederholt zu sich selbst addiert.

Auf elliptischen Kurven verändern sich Torsionspunkte bei einem solchen Verfahren langfristig gesehen kaum, da sie irgendwann immer zu ihrem ursprünglichen Wert zurückkehren. Dieses ausbleibende Wachstum lässt sich anhand einer so genannten Höhenfunktion messen. Sie ist gleich null, wenn man sie auf die Torsionspunkte elliptischer Kurven anwendet – zudem verschwindet sie, sobald man endliche Bahnpunkte dynamischer Systeme einsetzt. Das macht Höhenfunktionen zu einem bedeutenden Werkzeug der arithmetischen Dynamik, denn man kann sie sowohl auf der zahlentheoretischen Seite als auch für dynamische Systeme verwenden.

DeMarco, Krieger und Ye haben in ihrer Arbeit untersucht, wie häufig die Nullstellen der Höhenfunktionen für die zwei betrachteten dynamischen Systeme zusammenfallen. Wie sie herausfanden, verteilen sich diese Punkte über die gesamte komplexe Ebene, was es unwahrscheinlich macht, dass sie aufeinanderliegen – so unwahrscheinlich sogar, dass es nicht öfter als eine bestimmte Anzahl von Malen geschehen kann.

Anschließend übersetzten sie das Problem zurück in die Sprache der Zahlentheorie. So konnten sie beweisen, dass eine feste Grenze existiert: eine maximale Anzahl gemeinsamer Torsionspunkte auf zwei elliptischen Kurven. Allerdings ist es erstaunlich schwer, den Grenzwert exakt zu berechnen. Würde man ihn dennoch ihrer Überlegung folgend bestimmen, fiel der Wert höchstwahrscheinlich viel größer aus, als die tatsächliche maximale Anzahl übereinstimmender Punkte.

Eine ehrgeizige Vision

Ihr Ergebnis markiert einen deutlichen und unerwarteten Fortschritt auf dem Gebiet der arithmetischen Dynamik. »Sie waren in der Lage, eine Frage zu beantworten, die nur innerhalb der Zahlentheorie existierte und von der niemand dachte, dass sie irgendwie mit dynamischen Systemen zusammenhängt«, so Patrick Ingram von der York University in Toronto. Silverman sieht die aktuellen Arbeiten eher als Vision, die darauf hinweist, wozu die neue Disziplin noch alles führen kann. »Die bewiesenen Theoreme sind Spezialfälle dessen, was große Vermutungen sein sollten«, erklärt er.

Kurz nach der Vorveröffentlichung ihrer Arbeit brachten DeMarco, Krieger und Ye einen zweiten, damit zusammenhängenden Aufsatz heraus. In diesem gingen sie die Aufgabe aber umgekehrt an: Sie befassen sich mit einer Frage, die ursprünglich aus dem Bereich der dynamischen Systeme stammt, und verwenden Methoden der arithmetischen Dynamik, um sie zu beantworten. »In gewissem Sinn ist es dasselbe Argument, angewandt auf zwei verschiedene Beispiele«, sagt DeMarco. Die beiden Arbeiten bilden damit ein Paradebeispiel für die Mächtigkeit der Analogie, die Silverman vor fast 30 Jahren bemerkte. ◀

QUELLEN

DeMarco, L. et al.: Uniform Manin-Mumford for a family of genus 2 curves. *Annals of mathematics* 191, 2020

DeMarco, L. et al.: Common preperiodic points for quadratic polynomials. *ArXiv* 1911.02458, 2019

Kühne, L.: Equidistribution in families of Abelian varieties and uniformity. *ArXiv* 2101.10272, 2021

Raynaud, M.: Courbes sur une variété abélienne et points de torsion. *Inventiones mathematicae* 71, 1983

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Mathematicians Set Numbers in Motion to Unlock Their Secrets« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile im Abonnement

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

- ▶ Download des Monats (kostenfrei): im September **Spektrum** SPEZIAL BMH 3/20 »Sprache«
- ▶ Reduzierte digitale Produkte: im September »Zeit«, »Haustiere« und »Achtsamkeit«
- ▶ Regelmäßige Einladungen zu digitalen Redaktionsbesuchen oder zu Vorträgen (kostenfrei)
 - 26. 10. 2021: Digitaler Redaktionsbesuch **Sterne und Weltraum**, SuW-Redaktion
 - 10. 11. 2021: Websession »Wie **Spektrum**-Redakteure arbeiten: Von der Idee bis zum Artikel«, Mike Beckers (Redakteur **Spektrum** der Wissenschaft)
- ▶ Eigene Veranstaltungen zum Vorteilspreis:
 - 2. 10. 2021: **Spektrum**-LIVE-Veranstaltung: Digitaler »Landschafts-Astrofotografie«-Workshop für Neulinge, Sebastian Voltmer (Astrofotograf)
 - 3. 10. 2021: **Spektrum**-LIVE-Veranstaltung: Digitaler »Landschafts-Astrofotografie«-Workshop für fortgeschrittene Anfängerinnen und Anfänger, Sebastian Voltmer (Astrofotograf)
- ▶ Monatliche Verlosung von Büchern und **Spektrum**-KOMPAKT-Ausgaben
- ▶ Vergünstigungen und Rabatte bei Partnerangeboten:
 - Onlinekurs: **Spektrum**-Schreibwerkstatt (Preisnachlass)
 - Spektrum**-Hörbücher von Fliegenglas (reduzierter Abopreis)
 - Englischkurs von Gymglish (2 Monate kostenlos)
 - BrainPics: Künstlerische Hirnbilder in Perfektion (15 % Rabatt auf ein Bild Ihrer Wahl)
 - iversity Onlinekurse (Preisnachlass): »Die Toolbox für Deine Karrieregestaltung«, »Psychological Pricing in Practice« und »So gelingt Mitarbeitermotivation wirklich«

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

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

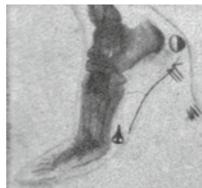
ÜBER HUNDERTE KILOMETER DRAHTLOS TELEFONIEREN

1921

»Die spanischen Behörden interessieren sich für die Herstellung einer telephonischen Verbindung zwischen Madrid und dem 560 km entfernten Ort Tetuan nahe Ceuta in Nord-Afrika. Das Centro stellte für die Versuche mit Ceuta ihre Zentralstation Carabanchel (Madrid) mit ihrer 100 m hohen Schirmantenne, die normalerweise mit dem alten 10-kW-Telefunken-Tonsender arbeitet, zur Verfügung. Zunächst wurde die etwa 300 km entfernte Station Valencia angerufen, die die telephonisch übermittelten Nachrichten sehr gut aufnahm. Daraufhin wurde die Station Tetuan zum Empfang aufgefordert. Prompt kam die Meldung zurück, dass man Madrid laut und deutlich verstanden habe.« *Technische Monatshefte 10, S. 239*

WENN DER ZOLL FÜSSE RÖNTGT

»Ein beliebter Behälter für kleine hochwertige Schmugglerware ist der Damenschuh. Ob Schmuggelgut unter der Brandsohle verborgen ist, ließ sich früher nur unter teilweiser Zerstörung des Schuhs feststellen. Heute bedient sich der Zollbeamter des Röntgenapparates. Den Erfolg zeigt unser Bild: An Metallteilen sind nicht nur Nägel und Schuhschnalle zu sehen, sondern auch zwei Ringe mit Edelsteinen.« *Die Umschau 41, S. 607*



Ein Zollbeamter röntgt den Fuß einer Frau samt Schuh, in dem zwei Ringe versteckt sind.

UNTERIRDISCHES WASSERKRAFTWERK TREIBT EISENBAHN AN

»Zum Betrieb der Bahn Kiruna-Riksgränsen in Lapland mußte eine Kraftanlage gebaut werden, deren treibendes Element die Porjus-Wasserfälle sind. Die Hauptschwierigkeit des Unternehmens bestand darin, daß die Wasserfälle den größten Teil des Jahres vereist sind. Man hat deshalb das Kraftwerk in der Erde errichtet. Von der Sohle des Flußlaufes wurden über 50 m tiefe Stollen in den Berg gesprengt, die in die ungeheuren Maschinenräume münden. Die Turbinen und Motoren finden sich in den Räumen tief unter der Erde, geschützt gegen alle Einflüsse der Witterung und werden das ganze Jahr hindurch mit Kraft versorgt.« *Die Umschau 43, S. 657*

TRAKTOR FAHREN IST SCHÄDLICH FÜR JUGENDLICHE

1971

»Ausgedehnte Röntgenuntersuchungen zeigten, daß vorzeitige Abnützungsschäden an der Wirbelsäule besonders häufig bei Traktorfahrern auftreten. Die ständigen Erschütterungen, die von den Unebenheiten der Straße und der Art des Fahrzeuges abhängen, belasten außerdem die Bandscheiben schwer, was vor allem die Heranwachsenden stark gefährdet. Die Ärzte warnen davor, Kinder und Jugendliche auf dem Traktor fahren zu lassen, wie das in landwirtschaftlichen Betrieben häufig der Fall ist.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 446*

DONALD-DUCK-EFFEKT UNTER WASSER

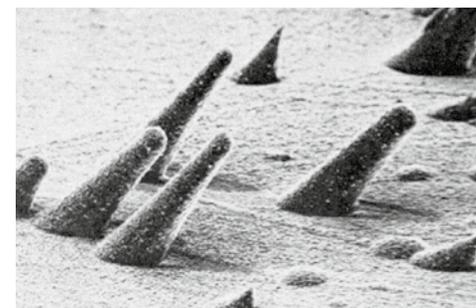
»Bei den Versuchen, längere Zeit in Tiefen von mehr als 60 Metern unter dem Meeresspiegel in »Unterwasserwohnungen« zu leben, haben [Forscher] wertvolle Erfahrungen sammeln können. Stickstoff in der Atemluft erweist sich als ungünstig. Man ersetzt ihn durch Helium. Die Folge ist aber eine abnorme Reaktion der Stimmbänder. Die Sprache eines Menschen erinnert an das verzerrte Gequake der bekannten Donald-Duck-Figur. Neuerdings ist es gelungen, durch Modulatoren den Effekt auszuschalten und die Stimme wieder zu normalisieren.« *Kosmos 10, S. 436*

KOSMISCHE STRAHLUNG BOMBARDIERT ASTRONAUTENHELME UND -HIRNE

»Über einen interessanten Befund an den Helmen der Astronauten von Apollo 8 und Apollo 12 berichten Mitarbeiter des Forschungszentrums der Firma General Electric. Sie fanden, daß zahlreiche hochenergetische Partikel der kosmischen Strahlung die Helme aus Lexan-Polykarbonat durchschlagen haben. Jede dieser Spuren entspricht einem hochenergetischen Teilchen, das in die Hirnschale des Astronauten eindrang. Wenn auch die Zahl der kosmischen Geschosse ohne Gefährdung ist, so trifft dies auf einen Raumflug von 2 Jahren (zum Beispiel zum Mars) nicht mehr zu. Bei einem langen Flug [werden] etwa 0,5% der Retina, 0,12% der Gehirnzellen und mehr als 1,6% der Riesenzellen des menschlichen Körpers irreparabel geschädigt.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 434

Abdruck der Helmoberfläche: Einschlaglöcher der Teilchen im Negativ.



REZENSIONEN

JOSCHA GRÖHLING, AUS GRÖHLING, J. TERSPUKEN EUROPAS; MIT FRIEDRICH BEH. DES VERLAGS EUGEN ULMER

SPURENSUCHE Auf dem Untergrund erkennt man die deutlich ausgeprägten Abdrücke eines Steinmarders.

TIERE FÄHRTENLESEN

Mit einem umfangreichen Standardwerk richtet sich einer der erfahrensten Spurenleser Deutschlands sowohl an Experten als auch an Laien – und erklärt, wie man selbst Spitzmausarten anhand ihrer Pfotenabdrücke unterscheiden kann.

► Gut 800 Seiten dick, fast 2,5 Kilogramm schwer – Joscha Grolms hat nicht einfach irgendein Buch über das Spurenlesen geschrieben. »Tierspuren Europas«, das im Juni 2021 im Ulmer Verlag erschienen ist, will das Standardwerk zum Thema sein – und schafft es spielend.

Bislang hat sich kein Autor an die Mammutaufgabe herangewagt, das ganze Thema, jede Spur, die sich unterscheiden lässt, von allen Tieren, die in Europa vorkommen, so akribisch wie nur möglich zwischen zwei Buchdeckel zu bannen. Grolms gelingt genau das: Auf einer Doppelseite im Buch arbeitet er beispielsweise durch Fotos und Spurbilder die Unterschiede der Trittsiegel von Weißzahnpitzmäusen im Vergleich zu denen von Rotzahnpitzmäusen heraus. Und das, obwohl wahrscheinlich 95 Prozent der Bevölkerung nicht einmal wissen, dass es Weiß- und Rotzahnpitzmäuse überhaupt gibt. Geschweige denn, dass man sie anhand ihrer Spuren auseinanderhalten kann.

Dennoch richtet sich das umfangreiche Buch gleichermaßen an Experten wie an Laien. Es ist das Werk eines Spurenlesers für andere Spurenleser: Joscha Grolms beschäftigt sich schon lange professionell mit der Materie. Nach dem Abitur ging er für ein Jahr in die USA, um bei einem Native American das Handwerk zu lernen. Seit seiner Rückkehr ist er in der »Wildnisschule Wildniswissen« aktiv, bei den Pionieren in Sachen Fährtenlesen in Deutschland. Dort gibt er Kurse und bildet sich auch selbst immer weiter fort.

In Deutschland ist Grolms der Einzige, der die weltweit zertifizierten Prüfungen im Spurenlesen abnehmen

darf. In der kleinen, aber stetig wachsenden internationalen Community ist er bestens vernetzt: Mark Elbroch, Autor eines Standardwerks über die nordamerikanische Tierwelt, war einer der Ideengeber für das vorliegende Buch und hat auch einige der Texte darin geschrieben. Viele Fotos von Fußabdrücken und Spuren haben andere passionierte Spurenleser beigesteuert. Für die ambitionierten Fährtenfinder sind die standardisierten Längen- und Breitenangaben der Trittsiegel und die aufwändigen Tusche-Punkt-Zeichnungen des Autors von unschätzbarem Wert.



Für den Laien wirkt das vielleicht wie eine Detailversessenheit, mit der er zunächst nicht viel anfangen kann. Aber auch Einsteiger kommen mit dem Buch auf ihre Kosten: Für ein wissenschaftliches Standardwerk sind die »Tierspuren Europas« erstaunlich luftig und bunt geraten. Auf fast jeder Seite finden sich große, aussagekräftige Farbfotos. Zu allen behandelten Tieren gibt es eine übersichtliche Beschreibung der Art, ihrer Lebensweise und der Spuren, die sie hinterlassen. Je nach Häufigkeit wird den Arten mehr oder weniger Platz gewidmet. So umfasst das Kapitel zum allgegenwärtigen Wildschwein ganze zehn Seiten, der Abschnitt über den Ichneumon – einen kleinen Mungo, der nur im Süden der Iberischen Halbinsel vorkommt – oder den Goldschakal jeweils »nur« vier Seiten.

Neben den genauen Vermessungen der Trittsiegel (für Experten) beschreibt der Autor einfachere Spuren: Den Mahlbaum der Wildschweine oder eine Suhle werden auch Laien erken-

nen, wenn sie beim Waldspaziergang darüber stolpern. Gleiches gilt für die geschälten Zapfen, die ein Eichhörnchen hinterlässt, oder die Schnabelabdrücke eines Spechts, der ein Stück Borke vom Baum gehiebelt hat.

Anfänger erfahren etwas über die Geschichte des Fährtenlesens und über die sich ergebenden Rätsel: »Welches Tier war es?« gehört dazu, auch »Was ist hier passiert?« und »Warum war das Tier hier?«. Wer mit solchen Fragen im Gepäck zum Spaziergang aufbricht, erlebt fast automatisch ein kleines Abenteuer.

Man kann sich beliebig weit und tief in den Spuren der Tiere verlieren. Genauso gut kann man aber auch bei null starten. Aha-Erlebnisse sind garantiert. Das ist das Schöne am Fährtenlesen und an diesem Buch: Sie wachsen mit dem Kenntnisstand und bedient die Bedürfnisse von Anfängern und Experten gleichermaßen.

Die Entfremdung von der Natur hat schon vor Jahrhunderten eingesetzt. In unserer globalisierten und technisierten Welt schreitet sie immer schneller voran. »Tierspuren Europas« hält dagegen, weil es den Zauber der Möglichkeiten zeigt: Wer weiß, dass man sogar Spitzmausarten an ihren Spuren auseinanderhalten kann, findet vielleicht seinen Glauben an die Fähigkeit zurück, die Natur zu verstehen.

Ralf Stork arbeitet als Naturjournalist und Buchautor in Berlin.

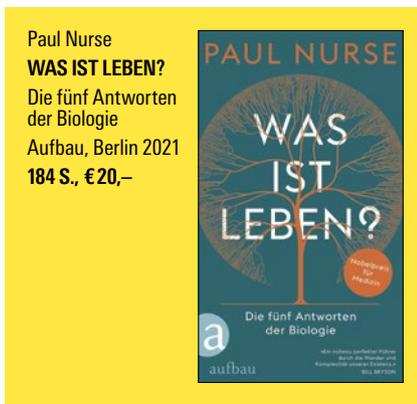
GENETIK WAS DAS LEBEN AUSMACHT

1944 fragte der Physiker Erwin Schrödinger in seinem viel beachteten Buch: »Was ist Leben?« Paul Nurse, Nobelpreisträger für Medizin, antwortet mit unserem heutigen Wissen darauf.

► Bei der Suche nach einer Definition des Lebendigen findet man je nach Quelle eine Aufzählung von fünf bis sieben Merkmalen. So muss ein Organismus aus Zellen aufgebaut sein, er soll wachsen, sich aus eige-

REZENSIONEN

ner Kraft bewegen, sich fortpflanzen und Reize aus der Umwelt aufnehmen können. Zudem sollte er einen Stoffwechsel haben – im Gegensatz zu Viren, weshalb sie von den meisten Biologen nicht zu den Lebewesen gezählt werden. Eher schwammig ist die Forderung, ein Geschöpf müsse zur Selbstregulation fähig und einer Weiterentwicklung (Evolution) unterworfen sein.



All das beschreibt, was einen lebendigen Organismus von einem unbelebten Gegenstand unterscheidet. Es erklärt aber weder, was Lebewesen ausmacht, noch, weshalb sie sein müssen, wie sie sind. Hinzu kommt, dass es zu fast jeder aufgelisteten Anforderung Ausnahmen gibt: So bewegen sich Pflanzen nicht – zumindest nicht vorwärts –, Bakterien wachsen nicht durch Größenzunahme, und die Definition eines eigenen Stoffwechsels verschwimmt bei einer parasitären Lebensweise. Ein komplexer Aufbau aus spezialisierten Einzelteilen, der ebenfalls manchmal gefordert wird, trifft lediglich auf höhere Lebewesen zu.

Kein Wunder, dass Sir Paul Nurse – britischer Genetiker, Zellbiologe und wie Schrödinger Nobelpreisträger – die bisherigen Antworten auf »Was ist Leben?« ziemlich unbefriedigend fand. In seinem Buch mit dem gleichnamigen Titel widmet er sich deshalb der Frage erneut, indem er eine Hand voll übergeordnete Konzepte herausarbeitet: »Die fünf Antworten der Biologie«, die seiner Meinung nach das Lebendige charakterisieren. Dabei greift er

viele Aspekte der herkömmlichen Definitionen auf, betrachtet sie jedoch aus einem anderen Blickwinkel, wodurch sich spannende Einsichten auftun.

Schrödinger, der sich als Physiker vorrangig der Frage gewidmet hat, wie Organismen in einem Universum, das sich von der Ordnung zum Chaos entwickelt, ihre eigene Ordnung erhalten, sah die Antwort vor allem in den Genen und ihrer Vererbung. Das ist nachvollziehbar vor dem Hintergrund einer Zeit, in der die Genetik große Fortschritte erzielte. So hatten drei Jahre vor Erscheinen des Buchs George Wells Beadle und Edward Lawrie Tatum gezeigt, dass Gene Bauanleitungen für Proteine codieren, und im Erscheinungsjahr selbst stand fest, dass sie aus DNA bestehen. Nurse baut auf Schrödingers Ideen auf, geht aber darüber hinaus.

Der Genetiker widmet jedem seiner fünf Konzepte ein eigenes Kapitel. Den Anfang macht die Zelle, es folgen das Gen, Evolution durch natürliche Selektion, das Leben als Chemie und das Leben als Information. Neu sind Nurses Ideen nicht, doch sie bringen das, was wir heute über das Thema wissen, auf neue Weise zu einem großen Ganzen zusammen. In seinem Ausblick geht der Autor auf aktuelle Entwicklungen ein, die das Leben, wie wir es kennen, entweder bedrohen (durch die Klimakrise oder Pandemien) oder zu seiner Rettung beitragen könnten (Gentechnik).

Nurse selbst hat den Zellzyklus erforscht und unter anderem die Cyclin-abhängige Kinase cdc2 entdeckt. Für diese Beschreibung wurde ihm 2001 der Nobelpreis für Medizin oder Physiologie verliehen. Anschaulich und dabei stets bescheiden gibt der Autor immer wieder Einblicke in sein eigenes erfolgreiches Forscherleben. So ist das Buch auch ein wenig Biografie, was ihm seine Lebendigkeit verleiht.

Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

UMWELT WIE KANN MAN DEN REGENWALD RETTEN?

Josef H. Reichholf schreibt in seinem neuen Buch über den komplexen Lebensraum und die Verantwortung des Globalen Nordens.

► Dieser Sommer hat es erneut gezeigt: Es brennt. Immer wieder, immer häufiger und immer heftiger. Griechenland, Italien, die Türkei, Algerien, der Westen der USA und Kanada stehen in Flammen. Diese fraßen sich durch besiedeltes und gut erschlossenes Gebiet, weshalb die Schäden so groß waren. Aber auch der Regenwald ist davon bedroht, in Brasilien und in den ohnehin schon fragmentierten Regionen in Afrika und Asien. Jedes Jahr geht ein gewaltiges Stück mehr verloren. So viel, dass in wenigen Jahrzehnten nichts übrig sein könnte – mit katastrophalen Folgen für die Artenvielfalt vor Ort und für das Klima.

Es gibt viele gute Gründe, das besondere Ökosystem in den Fokus zu nehmen. Genau das macht Josef H. Reichholf in seinem neuen Buch »Regenwälder. Ihre bedrohte Schönheit und wie wir sie noch retten können«. Der Autor ist Evolutionsbiologe, hat viele Jahre lang die Sektion Ornithologie der Zoologischen Staatssammlung in München geleitet und lehrt als Honorarprofessor an der TU München. Auf 260 Seiten entwirft er ein breites Panorama der tropischen Wälder, räumt mit einigen Mythen auf und klärt eine Reihe wichtiger Fragen: Warum sind gerade größere Tiere – anders als in den Savannen Afrikas –



so selten, obwohl Regenwälder die artenreichsten Lebensräume überhaupt sind? Weshalb konnte und kann Kautschuk am Amazonas nicht auch in großen Plantagen angebaut werden? Wieso sind die gerodeten Flächen dort so wenig produktiv und so anfällig für Störungen und Krankheiten?

Reichholf widmet sich ebenso den Verstrickungen des Globalen Nordens: Er erklärt, wie Deutschland und andere ehemalige Kolonialmächte die Regenwälder schon seit Jahrhunderten direkt und indirekt ausgebeutet haben – und dass sich daran bis heute nichts geändert hat: Ohne die Massentierhaltung und den ungebrochenen Hunger nach Fleisch in Europa und anderen Industrienationen würde es die unzähligen Brandrodungen, die Platz für noch mehr Soja- und Palmölplantagen schaffen, gar nicht geben. Erst die hohe Nachfrage macht den Raubbau rentabel.

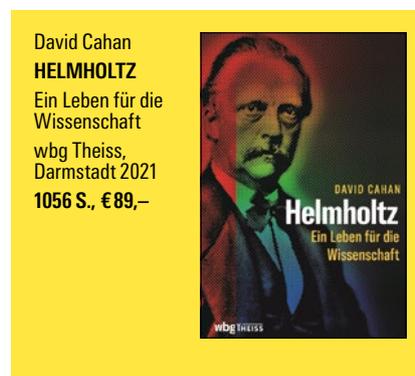
Auch wenn nicht alle Thesen brandneu sind – vom gleichen Autor ist schon 2010 ein Buch über die Ökobiologie des tropischen Regenwaldes erschienen –, schafft es Reichholf in gewohnt souveräner Sprache, ein tieferes Verständnis für den komplexen Lebensraum zu vermitteln. Und die virtuellen Bildertafeln Johann Brandstetters verstärken den Drang, die Schönheit der Wälder unbedingt zu bewahren.

Deshalb ist es ein bisschen schade, dass die im Untertitel in Aussicht gestellten Lösungsansätze zu deren Rettung dann doch etwas kurzkommen: Gerade mal 20 Seiten sind diesem Themenfeld gewidmet. Als wichtige Maßnahme empfiehlt Reichholf das großflächige Aufkaufen von Land, so wie China es schon lange praktiziert, wenn auch nicht aus Naturschutzgründen. Theoretisch ist das eine großartige Idee, nur gibt es in der Praxis keine Ansätze, die wirklich über das Lokale oder Regionale hinausgehen. Ebenso ist die Forderung, in Europa in den kommenden Jahren die Importe von Futtermitteln und Teakholzern drastisch zu reduzieren, zweifellos richtig und wichtig. An dieser Stelle hätte man gerne noch auf zwei oder drei Seiten mehr gelesen, wie

eine solche Kehrtwende praktisch aussehen könnte. Auch würde man etwas darüber erfahren wollen, wie abgeholzte Wälder wieder aufgeforstet werden können.

Am Ende des Buchs zieht Reichholf ein vorsichtig optimistisches Fazit: Die Hälfte des Regenwalds ist zwar zerstört, aber die andere Hälfte ist noch da und könnte – mit großen Anstrengungen und viel Geld – gerettet werden. Werke wie dieses machen in jedem Fall deutlich, dass sich das Engagement für den Wald lohnt.

Ralf Stork arbeitet als Naturjournalist und Buchautor in Berlin.



WISSENSCHAFTS- GESCHICHTE DER LETZTE UNIVERSALGELEHRTE

Nach mehr als 100 Jahren erscheint eine längst überfällige Biografie des renommierten Wissenschaftlers Hermann von Helmholtz.

► Hermann von Helmholtz war einer der herausragendsten Naturforscher des 19. Jahrhunderts. Als Mediziner, Physiologe, Mathematiker und Physiker erzielte er in allen Gebieten bedeutende Ergebnisse und wird daher mit Recht als der letzte Universalgelehrte bezeichnet.

Am geläufigsten dürfte der Energieerhaltungssatz sein, den er bereits im Alter von 26 Jahren formulierte. Allgemein bekannt ist auch die Erfindung des Augenspiegels, des ersten medizinischen Instruments, mit dem man in

das Innere eines lebenden Organs schauen konnte. Und die Messung der Reizleitungsgeschwindigkeit in Nervenfasern ist nur eine seiner vielen Errungenschaften in der Psychophysik.

Helmholtz starb 1894 hoch geehrt in Berlin. Eine Biografie von Leo Königsberger erschien bereits acht Jahre später und blieb über 100 Jahre lang maßgeblich. Eine umfassende Würdigung war daher mehr als überfällig – und ein großes Verdienst David Cahans, der seine jahrzehntelangen Studien mit diesem 1000-seitigen, äußerst detailreichen Monumentalwerk komplettiert.

Cahan war Professor für Wissenschaftsgeschichte an der Universität Nebraska-Lincoln und ist einer der führenden Helmholtz-Spezialisten. Er hat bereits mehrere Bücher und Abhandlungen über ihn verfasst, die als ergänzendes Material zur Biografie dienen.

Der Ausnahmewissenschaftler Helmholtz wurde zunächst Professor für Anatomie in Heidelberg, wo er sich anfangs vor allem der Sinnesphysiologie zuwandte. Doch nach und nach widmete er sich vermehrt der Hydro- und Elektrodynamik. Nach dem Tod seines Kollegen Gustav Magnus erhielt er dessen Professur für Physik in Berlin. So trug er auch in der Lehre dazu bei, die kommenden Physikergenerationen mit der Elektrodynamik vertraut zu machen. Zu seinen Doktoranden zählten etwa Heinrich Hertz, Wilhelm Wien, Albert Michelson und Max Planck. 1877 wurde er Rektor der Berliner Universität und zehn Jahre später erster Präsident der neu gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, die er bis zu seinem Tode leitete.

Helmholtz beherrschte selbstbewusst seine Forschungsgebiete. Solcher Stolz übertrug sich in Folge auch auf andere Naturwissenschaftler (zuvor genossen vor allem die Geisteswissenschaften einen guten Ruf) und verhalf ihnen zu gesellschaftlicher Akzeptanz. Dennoch sah er sich als Kulturträger und nicht als Politiker. Als Wissenschaftler, der

auch großes Interesse für alle Arten der Kunst zeigte und über deren naturwissenschaftliche Grundlagen philosophierte, war er daher der Idealtypus des deutschen Gelehrten.

Für die vorliegende Gesamtdarstellung eruierte Cahan zahllose Quellen, Briefe und Dokumente. Wert gelegt wurde in hohem Maß auf die Beleuchtung des Lebens des Physikers. Als klassische Biografie konzipiert, verknüpft der Autor Helmholtz' private und gesellschaftliche Lebensumstände mit seinem wissenschaftlichen Wirken zu einem Gesamteindruck dieser großen Persönlichkeit.

Nicht nur nebenbei entsteht dadurch auch ein Bild der sich verändernden Forschungslandschaft, also mit Institutionalisierung, Disziplinbildung und Spezialisierung, die kennzeichnend für das 19. und wegweisend für das 20. Jahrhundert waren.

Cahan wollte zeigen, wie die kulturellen und wissenschaftlichen Bedingungen Helmholtz prägten, er aber auch umgekehrt jene mitgestaltete. Das in Fülle zu beschreiben, ist selbst für ein großes Werk wie dieses keine leichte Aufgabe. So ist die Formulierung des Energieerhaltungssatzes nicht die Einzelleistung von Helmholtz, sondern eine Zusammenfassung von Ideen, die zu seiner Zeit weit verbreitet waren. Es war seine systematische und erkenntnistheoretisch begründete Vorgehensweise, welche die experimentellen Befunde auf ein neues fundamentales Prinzip zurückzuführen vermochte. Die Geschichte des Energieerhaltungssatzes allein könnte ein ganzes Buch füllen, doch bei Cahan nimmt sie nur wenige Seiten ein.

Ein weiteres Manko betrifft den enormen Einfluss, den der Wissenschaftler als Vorbild für die nachfolgenden Generationen hatte. Diese Forscher, welche die moderne Physik begründeten, beschrieben ein Studium unter Helmholtz als prägende Erfahrung – als eine Schule, die sie zu ihren eigenen und strengsten Kritikern machte. Leider führt Cahan diesen Aspekt kaum aus.

Die Beispiele zeigen, dass es selbst ein fast 1000-seitiges Buch nicht

schaffen kann, dem Giganten Helmholtz umfassend gerecht zu werden. Dennoch stellt es einen Meilenstein seiner Rezeption dar.

Doris Becher-Hedenus ist promovierte Wissenschaftshistorikerin an der Universität Regensburg.



ZEITGESCHICHTE NICHTS IST MEHR SO, WIE ES EINMAL WAR

Die Anschläge des 11. September 2001 setzten viele folgenreiche Ereignisse in Gang: vom US-amerikanischen Krieg gegen den Terror über Guantanamo bis zum Patriot Act, der die Rechte der Bevölkerung einschränkt.

► So gut wie jede Person, die alt genug ist, erinnert sich recht genau an den 11. September 2001. Denn an diesem Tag veränderten die Terroranschläge den Lauf der Welt: Mitglieder von Al-Qaida entführten insgesamt vier Flugzeuge, zwei davon ließen sie in die Türme des damaligen World Trade Center stürzen, eines auf das Pentagon. In der letzten Maschine wehrten sich die Passagiere und brachten sie über einem Feld in Virginia zum Absturz. An jenem Tag starben 2996 Menschen.

Anschließend sollte sich vieles ändern: Die USA erklären Afghanistan den Krieg und beschließen den Patriot Act, der es unter anderem dem Staat erlaubt, seine Bürger zu überwachen und Terrorismusverdächtige ohne Prozess beliebig lange zu inhaftieren. Zudem errichten sie das Gefangenenlager Guantanamo auf Kuba, in dem

es zu Folterungen kommt. Viele Staaten auf der Welt beteiligen sich ebenfalls an der militärischen Intervention in Afghanistan und verabschieden ähnliche Gesetze, welche die Rechte der Bevölkerung einschränken.

Der französische Journalist Baptiste Bouthier und die Illustratorin Héloïse Chochois zeichnen in ihrer Graphic Novel »9/11 – Ein Tag, der die Welt veränderte« die furchtbaren Ereignisse nach. Sie schildern, wie Rettungskräfte der New Yorker Feuerwehr, Mitarbeiter des World Trade Center, Journalisten vor Ort und der damalige Präsident George W. Bush die Anschläge wahrnahmen. Sie stützen sich dabei auf Berichte der Überlebenden. Protagonistin des Comics ist aber die heute 33-jährige Juliette, welche die Geschehnisse am 11. September 2001 als Heranwachsende in Frankreich mit Angst und Schrecken verfolgte.

Die Zeichnungen sind detailreich und schaffen eine düstere Atmosphäre. Dabei gelingt es Bouthier und Chochois, die Leserschaft mitzureißen und in die spannende Erzählung eintauchen zu lassen. Sie liefern nicht nur sachliche Zahlen und Fakten, sondern vermitteln auch die Gefühle und Emotionen der Menschen: die Verzweiflung der Rettungskräfte, denen bewusst wird, dass sie vielen Personen in den einstürzenden Türmen nicht helfen können, ebenso wie die Verunsicherung der Bevölkerung auf der ganzen Welt – selbst im so weit entfernten Frankreich.

Die Autoren berichten zudem von den Folgen der Anschläge: wie westliche Demokratien Gesetze verabschiedeten, die es ihnen ermöglichen, ihre Bürger zu überwachen. Über die Kriege, welche die USA in ihrem Kampf gegen den Terror führen – die Invasion in Afghanistan 2001 und die Entmachtung der Taliban sowie zwei Jahre später den Einmarsch in den Irak, wo die US-Soldaten Saddam Hussein stürzen. Dabei verschweigen Bouthier und Chochois nicht, dass diese Handlungen die Region im Nahen Osten ins Chaos stürzten.

Selbst heute, 20 Jahre später, sind die Gebiete weit von politischer Stabilität entfernt, wie die jüngsten Ereignisse in Afghanistan zeigen.

Auch über die islamistisch motivierten Terroranschläge der Folgejahre schreiben die Verfasser: etwa das Attentat auf den Madrider Bahnhof 2004 oder auf den Nachtclub Bataclan in Paris 2015. Dabei betonen sie, gerade der »Krieg gegen den Terror« der USA und anderer Beteiligten habe dazu geführt, dass sich Terrorgruppen wie der Islamische Staat gründeten und einen solchen Einfluss gewinnen konnten.

Mit ihrer informativen und spannenden Graphic Novel ist es Bouthier und Chochois äußerst gut gelungen, die schrecklichen Ereignisse aufzuarbeiten. Sie legen ein besonderes Augenmerk auf die zahlreichen Helfer und Rettungskräfte in New York City, von denen im Anschluss viele an Krebs oder schweren Atemwegspro-

blemen infolge des Staubs bei den Aufräumarbeiten erkrankten. Da die Geschichte häufig aus der Sicht einer französischen Heranwachsenden geschildert wird, liegt an manchen Stellen der Fokus auf Frankreich: etwa bei der Rede des damaligen Außenministers Dominique de Villepin 2003 vor der UNO, in der er sich gegen eine Beteiligung seines Lands am Irak-Krieg aussprach.

Insgesamt ist der liebevoll gestaltete Band durch und durch empfehlenswert – er liefert zwar keine neuen Inhalte, doch er gibt die historischen und politischen Geschehnisse der letzten 20 Jahre zu diesem Thema auf interessante Weise wieder. Und obwohl Comics nur wenig Text zur Verfügung steht, schafft es »9/11« dennoch, viele Informationen zu vermitteln.

Manon Bischoff ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

RESTITUTION WOHIN MIT DER KUNST?

Viele Kunstwerke und Museumsstücke wurden mit unlauteren Methoden erworben – ein Unrecht, dem sich die Politik, Forschung und Gesellschaft erst stellen.

► Restitution – seit ein paar Jahren ist der Begriff immer wieder in den Nachrichten zu lesen. Bekannte mediale Beispiele sind die Rückforderung der Büste von Nofretete, die Ausstellung der berüchtigten Benin-Bronzen oder die Anerkennung des Völkermords an den Herero und Nama im ehemaligen Deutsch-Südwestafrika und speziell der Umgang mit deren Gebeinen.

Dahinter verbirgt sich ein Konzept mit globaler politischer und kultureller Sprengkraft. Man könnte diesen komplexen Sachverhalt herunterbrechen auf die Rückgabe von geraubten oder unrechtmäßig erworbenen Kunstge-

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel.: 06221 9126-743,

E-Mail: service@spektrum.de

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

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

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

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 42 vom 1.1. 2021.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2021 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmut
Executive Vice President: Michael Florek
Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



genständen außerhalb von juristischen Ansprüchen. Doch um der Vielschichtigkeit des Begriffs und damit auch dem Ziel des Buchs »Geschichtskultur durch Restitution?« gerecht zu werden, ist es wichtig, einige Zusammenhänge zu kennen. Ohne dieses Hintergrundwissen bleibt der Inhalt in weiten Teilen unverständlich.

Die Basis bildet die europäische Kolonialzeit und damit verbunden das Sammelinteresse der Völkerkundemuseen. Nicht selten wurden die Objekte mit Gewalt oder unlauteren Methoden erworben – ein Unrecht, dessen sich die Verantwortlichen aus Politik, Forschung und Gesellschaft erst allmählich bewusst werden. Unter Restitution versteht man weiterhin die Entschädigung von im Dritten Reich geraubten Kunstgegenständen – sei es durch Rückgabe oder Kompensation als Teil einer Wiedergutmachung. Im Zuge der historischen Unrechtsbewältigung wird dieser Begriff auch für die Kolonialzeit verwendet.

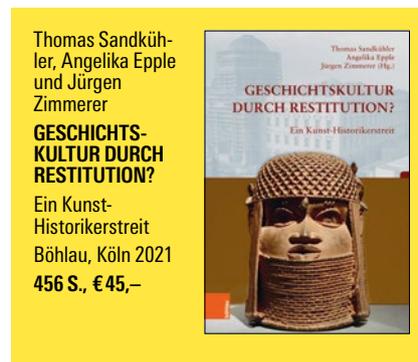
Drei weitere Schlüsselereignisse fallen erst in die letzten Jahre: die politische Entscheidung zum Bau des Humboldt-Forums als deutsches Kunst- und Kulturzentrum, die Rede Emmanuel Macrons, in der er die Rückgabe afrikanischer Besitzgüter in Aussicht stellte, sowie ein Gutachten der Wissenschaftler Felwine Sarr und Bénédicte Savoy, die in Macrons Auftrag untersuchten, wie eine solche Restitution ablaufen sollte. So weit die Vorgeschichte.

Das politische Versprechen hat Fragen aufgeworfen, wie man mit dem Erbe des Kolonialismus und seinen Folgen für die Gesellschaften der ehemaligen Kolonialmächte sowie deren Kolonien im Allgemeinen umgehen sollte. Das Thema fällt in eine Zeit, wo es durch verschiedenste Aktivistengruppen zu einem Hinterfragen traditioneller Sichtweisen kommt.

Als Reaktion haben die Historiker Thomas Sandkühler, Angelika Epple und Jürgen Zimmerer Werke von Autoren und Autorinnen gesammelt, die Restitution und die Darstellung von Kolonialzeit und kolonialer Kunst in Museen, unter anderem im Humboldt-Forum, thematisieren. Die wissen-

schaftlichen Aufsätze widmen sich auch grundsätzlichen Fragen: welche Folgen etwa die Rückgabe hat oder was Restitution für die Geschichtskultur und -wahrnehmung bedeutet.

Die Autorinnen und Autoren konzentrieren sich in ihren Texten auf unterschiedliche Aspekte, von ihren persönlichen Standpunkten aus, mit eigenen Zielen und Ansprüchen. Dabei sind internationale Spezialisten und Mitarbeiter des Humboldt-Forums, darunter Historiker, Geschichtsdidaktiker, Ethnologen, Museologen, aber auch Juristen vertreten.



Die Beiträge fügen sich in vier Themenbereiche ein: In »Positionen« findet man bisweilen extrem persönliche und emotionale Gegenthesen zu den Forderungen aus dem Bericht von Sarr und Savoy. Insbesondere Museumsfachleute erzählen in »Fallstudien« von ihrem Umgang mit Restitution. In »Deutschland postkolonial?« wird erklärt, welche kolonialen Themen in der heutigen Gesellschaft etabliert sind und welche Schwierigkeiten sich daraus ergeben. »Rechtsgeschichte und Geschichtskultur« beschreibt sehr verständlich die rechtlichen Probleme und die Wandlung eines Geschichtsbilds.

So unterschiedlich die Autoren sind, so fallen auch ihre Aufsätze aus. Sie reichen von klaren Fallberichten (etwa einer ethnologischen Feldstudie mit einer detaillierten Beschreibung des Diebstahls einer Maske in den 1990er Jahren in der Elfenbeinküste und deren Wiedererkennung in einer Privatsammlung) bis zu höchst philosophischen Überlegungen dazu, wie erlebte und gelernte Geschichte die aktuelle

Wahrnehmung prägt. Somit sind einige Texte individuell-charaktervoll, andere wissenschaftlich-theoretisch. Ähnlich verhält es sich mit Verständlichkeit und erwartetem Vorwissen.

»Geschichtskultur durch Restitution?« ist kein leichter Lesestoff; die Aufsätze fesselnd und langatmig zugleich, drei der Paper sind auf Englisch verfasst. Man sollte vor dem Lesen verschiedene Begriffe und die Vorgeschiede zu den angesprochenen Themen recherchieren, da diese Kenntnis vorausgesetzt wird.

Wer eine Lösung erwartet, wird enttäuscht. Stattdessen finden sich im Buch 23 einzelne Ansichten, die teilweise zu gegensätzlichen Schlüssen kommen. Aus der Komplexität des Hintergrunds wird schnell klar, dass eine für alle zufrieden stellende Lösung quasi unmöglich ist. So emotional, wie manche Forderungen oder Meinungen vertreten sind, ist kein Kompromiss möglich – jeder Vorschlag erscheint zugleich richtig und falsch. Dennoch ist der Inhalt ergreifend, nimmt die Leserschaft mit und erzwingt, sich mit der eigenen Position zu befassen. Oft möchte man mit dem Verfasser diskutieren und lobend zustimmen oder empört widersprechen.

Auffällig ist, dass viele Texte gegendert sind – mit 10 Frauen und 13 Männern unter den Autoren, scheint man auf eine ausgewogene Verteilung Wert gelegt zu haben. Zudem finden sich unter den zahlreichen Quellenangaben auch Tageszeitungen oder Online-Portale, was die mediale Resonanz sowie die Aktualität des Themas verdeutlicht.

Zielgruppe des Werks ist nach eigenen Angaben die Gesellschaft und eine breite Öffentlichkeit. Der Versuch, die Hintergründe einem bislang unbeteiligten Publikum in Form einer Aufsatzsammlung nahezubringen, scheint jedoch nur bedingt gelungen. Er scheitert an der Komplexität und der Heterogenität vieler Aufsätze. So bleibt es eher eine Positionierung innerhalb der Wissenschafts- und Museumsgemeinde – schade!

Robin Gerst ist Archäologe und wirkte an der Konzeption des Besucherzentrums »Paläon« in Niedersachsen mit.

BEWUSSTSEIN UND SPRACHE

Künstliche neuronale Netze, mathematische Konzepte und ehrgeizige Experimente sollen dabei helfen, die Grundlagen unseres Geists besser zu verstehen. (Serie »Bewusstsein«, »Spektrum« Juli bis September 2021)

Johannes Reich, per E-Mail: In keinem der drei Artikel der Kurzserie ist der Ansatz diskutiert worden, dass das Phänomen unseres Bewusstseins eng mit unserer Sprachfähigkeit verknüpft ist. Bewusstsein wird subjektiv als Erzählfluss erlebt. Sprache ist nach meinem Verständnis eine pragmatische Lösung des Henne-Ei-Problems, dass einerseits eine zweckorientierte Interaktion mehrerer Individuen ein gegenseitiges Verständnis erfordert, dessen Etablierung andererseits nur mittels einer zweckorientierten Interaktion geschehen kann. Solche Probleme können iterativ gelöst werden: Ein internes Modell wird mittels gesammelter Daten aufgebaut und verbessert. Sprachliches Denken wäre damit letztlich sehr differenzierte vorweggenommene soziale Interaktion. Insbesondere muss die Sprachlernende, um andere adäquat und ausreichend gut zu verstehen, sich intensiv in diese hineinversetzen können. Sie muss somit konzeptuell zwischen ihrer eigenen und der anderen Perspektive sinnvoll unterscheiden können. Wenn das nicht nach Bewusstsein riecht ...

LUFTIGER DÜNGER

Biologe Michael Denk stellte Untersuchungen an Kichererbsen und Weizen vor, die Phosphat über ihre Blätter aufnehmen. (»Blätter nutzen Phosphor aus Wüstenstaub«, Forschung aktuell, »Spektrum« August 2021, S. 26)

Frank Vincentz, Kluse: Mir scheint, hier werden bekannte Tatsachen als neues Wissen angeboten. Jeder Gemüsegärtner kennt die Blattdüngung, und jeder Liebhaber von Tillandsien weiß, dass diese Pflanzen sämtliche Nährstoffe über die Blätter aufnehmen. Auch der nährstoffarme Regenwald des Amazonas wird durch Saharastaub versorgt, der natürlich auch Phosphorverbindungen enthält.

Antwort des Autors Michael Denk:

Die Betonung beim Artikel liegt nicht auf der Nährstoffaufnahme durch Blätter, sondern konkret auf der Aufnahme von Phosphorverbindungen aus Wüstenstaub über das Blattwerk. Der Prozess wurde in der Studie zum ersten Mal demonstriert. Dass Pflanzen Mineralstoffe über Blätter erhalten, ist durchaus bekannt. Dies galt jedoch nicht in Bezug auf Phosphorquellen aus Wüstenstaub. Die Nährstoffaufnahme über Blätter ist im Allgemeinen sehr begrenzt – ausgenommen hiervon sind Spezialisten, wie die erwähnten Tillandsien oder karnivore Pflanzen.

Die Aussage zum Regenwald des Amazonas irritiert mich, schließlich bedeutet die Anwesenheit eines Stoffs in

Leserbriefe sind willkommen!

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

einem Medium mitnichten, dass er auch durch Organismen verwendet werden kann. Beispielsweise sind Stickstoffverbindungen in sauren Böden für die meisten Pflanzen nicht bioverfügbar, obwohl fast alle Gefäßpflanzen Stickstoffverbindungen über ihre Wurzeln aufnehmen können. Es mag trivial klingen, dass besagter Sahara-Wüstenstaub ebenfalls Phosphorverbindungen enthält, und wahrscheinlich werden einige Pflanzen im Amazonas in der Lage sein, diese zu nutzen – gezeigt wurde dies bisher jedoch nicht, und das ist entscheidend.

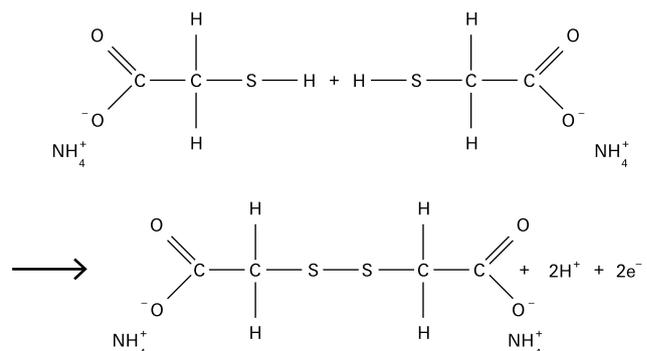
ERRATA

»Das größte Auge der Welt«, »Spektrum« August 2021, S. 56

Auf S. 63 steht, die Feinstrukturkonstante ließe sich »bis zur zehnmillionsten Nachkommastelle genau bestimmen«. Wie aufmerksamen Lesern aufgefallen ist, ist das vielmehr nur bis auf zehn Stellen nach dem Komma möglich.

»Eine haarige Angelegenheit«, Chemische Unterhaltungen, »Spektrum« August 2021, S. 52

Bei »Chemie der Dauerwelle« auf S. 55 muss in Reaktionsgleichung C die 2 auf der linken Seite gestrichen werden; ein Molekül Wasserstoffperoxid reicht, um zwei Hydroxidionen entstehen zu lassen. Gleichung E zeigt ein Cysteinmolekül als Reaktionspartner, es reagieren aber zwei Moleküle Ammoniumthioglykolat miteinander. Wir danken unserer Leserin Rose Rathmann für die Hinweise. Korrekt sieht Gleichung E folgendermaßen aus:



Apokalypse A1

Autonomer Stau mit Sicherheitslücke. Eine Kurzgeschichte von Uwe Post

Max schreit ins Handy, besser gesagt: in die Freisprechanlage. Denn im Auto braucht man beide Hände zum Hupen.

»Was soll das heißen: sofort in die Firma kommen? Seid ihr bescheuert? Kollaps? Was für ein ...? Hallo?«

»Die Verbindung wurde getrennt.«

Max steht im Stau. Im größten Stau aller Zeiten. Auf der A1 bei Volmarstein.

Die ausnahmslos autonom fahrenden Lastwagen blockieren lückenlos die rechte Spur, niemand kann von der Autobahn ab- oder auffahren, die Pkw sind auf der linken Spur gefangen und können lediglich immer weiterfahren.

Oder hupen.

»Schlaumeier!«, ruft Max. Sein Codewort, um den Smartphone-Assistenten zu aktivieren.

»Ich kann leider im Moment keine Verbindung zur Cloud herstellen«, erklärt Schlaumeier. Mit einem Hauch Verzweiflung in der Stimme, wie Max zu erkennen glaubt. Aber wahrscheinlich bildet er sich das nur ein.

Es klopf an die Scheibe. Draußen steht mitten auf der Überholspur eine grauhaarige Frau. Max fährt das Fenster herunter. Die Frau beugt sich zu ihm.

»Könnten Sie bitte aufhören zu hupen? Meine Enkeltochter kann ihre Kinderserie nicht mehr verstehen.«

Max hört auf zu hupen. »Geht ja eh nicht weiter.«

»Ja, da vorn ist ein Unfall, da kommt keiner vorbei. Möglicherweise selbst dann nicht, wenn man hupt.«

»Mist«, sagt Max.

»Ach was«, gibt die Frau zurück. »Sie haben's doch gut! Bei Ihnen quengelt kein ungeduldiges Kind auf dem Rücksitz, das zu spät zum Reiten kommt.«

»Ich dachte, sie guckt eine Serie.«

Die Frau schaut Max mitleidig an. »Sie kennen sich mit Kindern nicht besonders aus, oder?«

Max öffnet den Mund, um etwas zu entgegnen, als sein Schlaumeier flötet. Es erscheint eine altmodische Textmitteilung: »Ein Bug in der autonomen Fahrsoftware wurde identifiziert. Die Fahrzeuge fahren ohne Abstand.«

»Erzählt mir was Neues!«, blafft Max. Wie als Antwort flötet das Handy erneut. Max liest: »Leider kann derzeit kein Update eingespielt werden, weil das Mobilfunknetz überlastet ist.«

Max schließt die Augen.

Seine Kollegin Carla bekommt jede Sekunde ihr Baby, Dr. Walters erholt sich auf Java von einem Herzinfarkt, und Lasse-Hennes ist mal wieder in der Entzugsklinik für Fortnite-Süchtige. Max ist der Einzige, der mit seinem biometrischen Fingerabdruck das Update für die Lkw-Software einspielen könnte. Bloß kommt er nicht in die Firma, weil die rechte Spur der Autobahn blockiert ist.

Natürlich hat er einen Laptop dabei, aber an eine stabile Internetverbindung ist nicht zu denken. Das hört er deutlich am Gekreische der Enkeltochter im Auto vor ihm. Weder Reiten noch Serie – die Apokalypse auf der A1.

Max steigt aus dem Auto und streckt sich. Ein paar hundert Meter in Gegenrichtung überspannt eine Betonbrücke die Autobahn. Oben parkt das Technische Hilfswerk und gestikuliert geschäftig. Womöglich plant man eine Notversorgung oder Evakuierung mit Seilwinden.

Auf der Gegenseite versuchen ein paar Autofahrer, unter den stehenden Lastwagen hindurchzukriechen, um dann querfeldein die Zivilisation zu erreichen.

»Früher wäre das nicht passiert«, hört Max hinter sich. Es ist wieder die Oma des zeternden Mädchens.

Max kann da nur zustimmen. »Allerdings gab es auch noch keine Tablets, mit denen Enkel ruhiggestellt werden konnten«, gibt er zu bedenken.

»Keine Ahnung, wie wir das überlebt haben«, entgegnet die Oma trocken. »Ich bin übrigens Stefanie.«

Max stellt sich vor. »Ihre Enkelin schreit nicht mehr«, bemerkt er dann. »Haben Sie sie geknebelt?«

»Ich habe ihr gedroht, sie zum Kaffeekranz der Katernberger Kabelfernsehen-Nostalgiker mitzunehmen. Statt Reiten.«

»Grausam«, meint Max.

»Sehen Sie die Kerle da drüben?«

Max späht über die Leitplanke. Drei Männer machen sich an einem verlassenen Mercedes zu schaffen. Einer der Männer winkt fröhlich mit einem Wagenheber. Der andere kippt gerade einen Rucksack aus.

»Mein Mann war früher Fernfahrer«, bemerkt Stefanie zusammenhanglos.

»Diesen anstrengenden Job macht jetzt zum Glück die autonome Fahrsoftware«, erwidert Max.

»Ja«, sagt Stefanie. »Zum Glück. Es hätte meinen Mann fast den Job gekostet.«

Max will etwas entgegnen, aber die Bande Plünderer hat offenbar drüben auf der anderen Seite ein nacktes Pärchen in dessen SUV aufgeschreckt. Ein großes Gelächter und Gekreische heben für ein paar Minuten die Stimmung. Stefanie eilt zu ihrem Auto, um ihre Enkeltochter zu bändigen, die neugierig den Kopf aus dem Fenster streckt.

»He, Sie da!« Ein wild gestikulierender Glatzkopf nähert sich Max durch die ungefähr anderthalb Meter breite Rettungsgasse. »Steigen Sie lieber wieder ein!«

»Weshalb?«, fragt Max.

»Sehen Sie den Tankklaster da vorne?«, erwidert der Mann hastig und zeigt hinter sich. Max sieht ihn.

»Ein paar Bekannte von mir haben Feuer gelegt. Die Kiste geht gleich in die Luft. Bringen Sie sich besser in Sicherheit.«

»Aber ...«

»Dann gibt es eine Lücke auf die Standspur und ...«
Weiter kommt der Mann nicht.

Max duckt sich, als der Tank explodiert. Er spürt die Hitzewelle trotz der Entfernung. Die Antwort ist ein begeistertes Hupkonzert, das aber schnell abflaut.

»Ich bin gespannt, wie Sie jetzt die glühenden Trümmer durchqueren wollen«, sagt Max.

Der Glatzköpfige steht eine Weile mit offenem Mund da, bevor er endlich abzieht.

»Mein Mann ist nicht arbeitslos«, erzählt Stefanie, die schon wieder lautlos hinter Max aufgetaucht ist.

»Freut mich«, antwortet Max.

»Er ist tot.«

Max schluckt.

Nach einem Nicken fährt Stefanie fort: »Ein explodierter Tanklaster. Steht sogar in Wikipedia. War damals das letzte Todesopfer eines Lkw-Unfalls in Deutschland. Unmittelbar bevor die Software auch das letzte Steuer übernahm.«

»Tut mir leid«, sagt Max leise.

»Zusammengerechnet stand er ungefähr zwei Jahre seines Lebens im Stau«, erzählt Stefanie. »Dann die sexuellen Übergriffe an überfüllten Raststätten. Ein mieser, schlecht bezahlter Job. Aber das hier ...« Sie zeigt auf die stehenden Selbstfahrlaster. »Das ist auch nicht das Wahre. Ich wüsste gerne, wer da Riesenbockmist gebaut hat.«

»Technik ist nur so perfekt wie die Menschen, die sie bauen«, erklärt Max vorsichtig.

»Also gar nicht«, meint Stefanie. »Mein Auto kann ohne mein Zutun seitwärts einparken, aber vorwärts komme ich damit jetzt trotzdem nicht.«

Nun muss Max wirklich grinsen. »Das bringt mich auf eine Idee. Helfen Sie mir?«

»Nur, wenn Sie nichts in die Luft sprengen.«

Max zeigt auf die Fahrspur mit den Lastwagen. »Suchen Sie nach einem Fahrzeug mit Seitlichfahren-Warnaufklebern. Gehen Sie in Fahrtrichtung, ich entgegengesetzt.«

»Aber um das glühende Wrack mache ich einen Bogen.«

»Okay. Rufen Sie mich, wenn Sie fündig werden.«

Max läuft zum nächsten Lkw, einem blauen Großraum-Umzugswagen ohne Spur von Warnaufklebern. Dahinter steht ein schwarzer Lieferwagen eines Saugroboterherstellers. »Zum Jubiläum mit drei eingebauten Games gratis«, verkündet feierlich die feuerrote Werbeaufschrift.

Max hört seinen Namen, dreht sich um und sieht Stefanie aufgeregt winken. Rasch trabt er zu ihr.

»Sind das die gesuchten Aufkleber?«, fragt sie und zeigt auf den Lastwagen neben ihr. Anscheinend ein Gemüsetransporter, wenn man nach dem aufgemalten »Iss dich tomatig gesund!«-Slogan geht.

Max nickt. Er zückt sein Smartphone.

Stefanie schüttelt den Kopf. »Ich dachte, wir haben hier kein Netz?«

»Bluetooth geht immer«, meint Max. Er startet eine Scanner-App und stellt sich neben das Cockpit des Fahrzeugs. »Treffer«, sagt er und zwinkert Stefanie zu, die mit zweifelndem Blick neben ihm steht und bisweilen zu ihrem nicht weit entfernten Auto hinüberschaut. Ihre Enkeltochter fachsimpelt gerade mit einem Plünderer auf der anderen Straßenseite über den Wert bestimmter Kuschtiere.

»Die Steuerung hat eine bekannte Sicherheitslücke«, erklärt Max. »Die Herstellerfirma hat sie, äh, noch nicht geschlossen.«

»Das ist aber riskant«, meint Stefanie. »Arbeiten da denn nur Idioten?«

Max grinst säuerlich. »Wahrscheinlich.« Er tippt auf seinem Gerät herum, bis auf dem Bildschirm eine Art Steuerpult erscheint und der Lkw anfängt, warnend zu piepen.

»Bitte zur Seite treten«, sagt Max. Dann steuert er unter den Blicken einer zunehmenden Anzahl Schaulustiger den Lkw seitwärts aus der Schlange, so dass eine Lücke entsteht, durch die der erlösende Standstreifen sichtbar wird.

Jemand zupft an Max' Ärmel. Es ist Stefanies Enkelin. »Darf ich auch mal damit fahren?«, fragt sie.

Applaus, Jubel und Hupkonzert! Max hat die Welt gerettet! Oder zumindest tausende Autos auf der A1.

Dann ertönt ein sanfter, tiefer Hupton.

»Neiiiiin!«, schreit die Menge wie aus einem Mund.

Max fährt herum. Der nächste Lastwagen setzt sich in Bewegung! Mit offenem Mund sieht Max dem Schauspiel zu. Ein Lkw nach dem anderen gibt einen kurzen Warnlaut von sich, rollt los – und bleibt unmittelbar darauf wieder stehen, sobald er die Lücke vor sich geschlossen hat.

»War ja klar«, sagt Max und seufzt.

Stefanie greift nach seinem Arm. »Da!«, ruft sie und zeigt auf die Trümmer des explodierten Tankwagens, der jetzt allmählich an der Reihe wäre, aufzuschließen.

Max, Stefanie und die Schaulustigen warten und warten – aber das Wrack macht keine Anstalten, sich in Bewegung zu setzen.

»Na siehste«, sagt der glatzköpfige Sprengmeister, der mit einem Mal neben Max und Stefanie aufgetaucht ist und über beide Ohren grinst. »Gewalt ist doch eine Lösung!«

Stefanies Antwort geht im Hupkonzert der jubelnden Autofahrer unter, die sich sofort anschicken, die rettende Lücke zu nutzen.

Unterdessen verabschiedet sich Max von Stefanie und tauscht Kontaktdaten aus. Er verspricht, am Grab ihres Mannes Blumen niederzulegen.

Dann fährt er schnell ins Büro, um das dringend notwendige Update für die Fahrsoftware einzuspielen.

Die Backdoor lässt er drin. Sicherheitshalber. ◀

DER AUTOR

Uwe Post studierte Physik sowie Astronomie und arbeitet als Fachbuchautor und Softwareexperte. Seit den 1990er Jahren schreibt er satirische Sciencefiction. Im Herbst 2021 erscheint sein neuester Roman »Klima-Korrektur-Konzern«.

VORSCHAU



HELGA BREMAN / BETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DAS FUNDAMENT DER PHYSIK

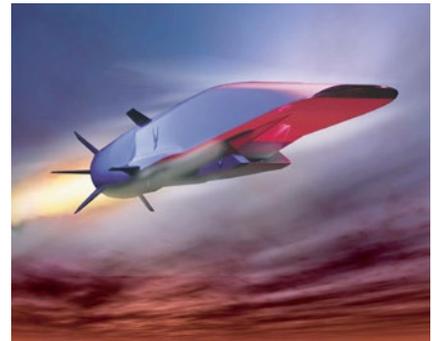
Von den Kernkräften und dem Elektromagnetismus bis zu Quarks und Elektronen: Abgesehen von der Gravitation lassen sich alle Grundkräfte und Elementarteilchen mit dem Standardmodell erklären, einer Quantenfeldtheorie. Doch aus mathematischer Sicht ist dieser Unterbau der physikalischen Beschreibung unserer Welt noch zu wenig verstanden.



JOHNCARMOLLA / BETTY IMAGES / ISTOCK

MYSTERIÖSER DINGO

Dingos entziehen sich der zoologischen Kategorisierung. Weder domestiziert noch vollkommen wild, gehen die Nachkommen von Hunden in Australien ihre eigenen Wege.



U.S. AIR FORCE GRAPHIC (WWW.AF.MIL/NEWSPHOTOS/PHOTO/200306050)

DER HYPERSCHALL-HYPE

Staaten investieren Milliarden in die Entwicklung neuer Lenkflugkörper mit vielfacher Schallgeschwindigkeit. Wegen schwer beherrschbarer physikalischer Effekte werden die Waffen die in sie gesetzten hohen Erwartungen kaum erfüllen.



JÖRG M. MATTER, LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY

IN STEIN GEGOSSEN

Im Oman verwandeln seltene Gesteinsformationen aus dem Erdmantel durch eine chemische Reaktion Kohlenstoffdioxid aus der Luft in Minerale. Wissenschaftler wollen den Prozess beschleunigen, um das lästige Klimagas im großen Stil zu binden.

NEWSLETTER

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

Registrierung unter:
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

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



Sie haben die freie Wahl

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



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

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

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **34** 26.08.2021

- > Unfertige Diamanten schreiben Erdgeschichte
- > Regen in Grönland weiteres Alarmsignal
- > Freunde leiden körperlich mit

TITELTHEMA: FEUER AM MITTELMEER

Was steckt hinter den heftigen Waldbränden?

Von Algerien bis in die Türkei brannten in den letzten Wochen Wälder rund um das Mittelmeer. Welche Rolle spielte die extreme Hitze dabei? Und werden die Waldbrände durch den Klimawandel wirklich häufiger? Ein Überblick.

WALDBRÄNDE
Wie Technik die Flammen erkennen soll

ASTROMYKOLOGIE
»Wir werden Pilze auf anderen Planeten finden«

HAITI
Die Revolution der Sklaven

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

