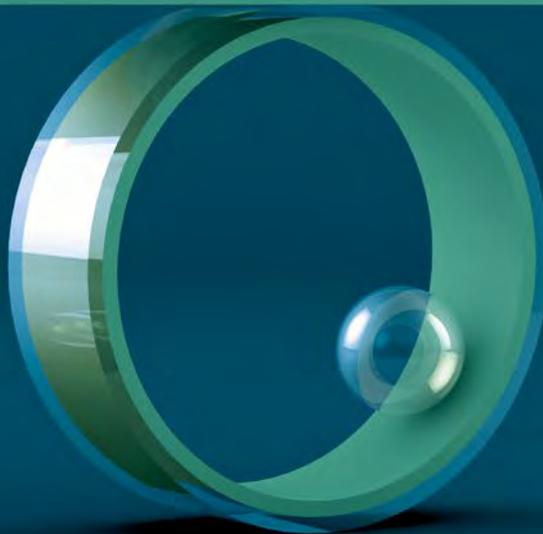
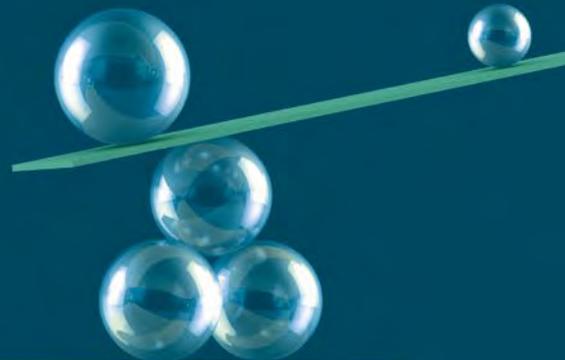


Spektrum

der Wissenschaft

Eine Waage für das Vakuum

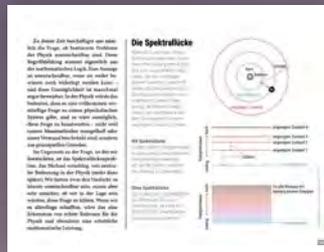
Wie das »Archimedes-Experiment« das Nichts präziser denn je vermessen soll



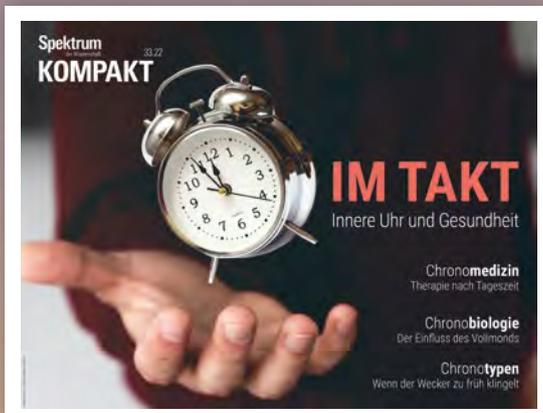
Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



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 EIN ETWAS ANDERES LABOR

Manon Bischoff, Redakteurin
m.bischoff@spektrum.de

► Weiße Wände, kühle Luft, blank geputzter Edelstahl: Solche Assoziationen kommen mir in den Kopf, wenn ich an Hochpräzisionsmessung denke. Das Labor, das ich auf Sardinien besuchte, hätte unterschiedlicher nicht sein können. In einer alten Lagerhalle, die sich die Forscher mit Minenarbeitern teilen, soll eine der bedeutendsten Fragen der Physik beantwortet werden. Neben riesigen Maschinen, rostigen Autos und angestaubten Werkzeugen wollen ambitionierte Wissenschaftler das Unmögliche wagen: das Gewicht des Vakuums bestimmen.

Als ich im Frühjahr von dem geplanten Experiment erfuhr, musste mich die Redaktion nicht lange überreden, die Anlage vor Ort näher zu betrachten. Auch wenn das Vorhaben gewagt klingt, stecken namhafte Größen hinter dem Projekt: Verantwortliche wie Enrico Calloni und Paola Puppo waren maßgeblich an der Entwicklung des Gravitationswellendetektors Virgo beteiligt. Wenn jemand weiß, wie man winzige Signale auffängt und verarbeitet, dann sind sie es.

Calloni war extra aus Neapel angereist, um mir das Labor zu zeigen. Tatsächlich arbeitet niemand dauerhaft vor Ort. Auch für die Italiener vom Festland ist der Versuchsort nicht nur einen Katzensprung entfernt. Mit Flugzeug oder Fähre gelangen sie nach Olbia, einer Hafenstadt im Norden Sardinien. Mit dem Auto fährt man von dort aus etwa eine Stunde lang – wenn man die Geschwindigkeitsbegrenzungen flexibel interpretiert – auf kurvigen Straßen, vorbei am sardischen Hügelland mit graugrüner Macchie und leuchtend weißen Granitfelsen.

Die Forscher haben sich Sardinien nicht wegen der malerischen Umgebung ausgesucht – obwohl das ein schöner Nebeneffekt ist. Die Insel ist eine der seismologisch ruhigsten Regionen Europas. Damit die Fachleute die schwachen Signale auffangen können, darf es kaum Erschütterungen geben. Deshalb soll das Experiment in einer stillgelegten Mine, 110 Meter unter der Erde, stattfinden.

Doch die Messungen werden bislang nur oberirdisch durchgeführt. Nach einer abenteuerlichen Fahrt durch die unterirdischen Schächte sah ich, warum: Noch ist der Versuchsraum leer. Bis Stromleitungen, Luftschächte und Ähnliches installiert sind, gehen die Forscher einer der wichtigsten Fragen der Physik in der oberirdischen Lagerhalle nach. Was sie bei ihrem Experiment herausfinden werden, ist ungewiss. Aber egal, wie es ausgeht, das Ergebnis wird für die Fachwelt extrem spannend. Warum, erfahren Sie ab S. 12 in diesem Heft.

Herzlich Ihre



NEU AM KIOSK!

In **Spektrum SPEZIAL** Physik – Mathematik – Technik 3.22 dreht sich alles um die Frage, wie Mathematiker mit unendlich großen Zahlen und Mengen umgehen.

IN DIESER AUSGABE



DAVID PFENNIG

Der Evolutionsexperte forscht an der University of North Carolina in Chapel Hill. Seiner Meinung nach wird zu wenig beachtet, dass Änderungen im Erscheinungsbild von einer Generation zur nächsten nicht immer genetisch bedingt sind (S. 34).



CLAUDIA RAPP, GIULIA ROSSETTO UND DAMIANOS KASOTAKIS

Was vor Jahrhunderten Schreiber ausradierten, machen die Byzantinistinnen und der Bildgebungsexperte wieder sichtbar. Ab S. 78 schildern sie, wie sie mit Hilfe moderner Fototechnik Pergamenttexte vom Sinai entziffern.

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM
- 24 FORSCHUNG AKTUELL
Gefiederte Flugsaurier
Nicht nur Dinosaurier besaßen Federn.
Nuklearwaffen
Droht der Einsatz taktischer Atombomben?
Plastik gezielt abbauen
Neue Enzyme zersetzen Kunststoff effizient.
- 32 SPRINGERS EINWÜRFE
Wie wir zusammenfinden
Aufstiegschancen brauchen soziale Durchmischung.
- 50 IMPRESSUM
- 51 FREISTETTERS FORMELWELT
Surreale Zahlen
... erweisen sich als erstaunlich nützlich.
- 60 SCHLICHTING!
Das Gegenteil einer Seifenblase
Unter Wasser können Tropfen von Luft umschlossen werden.
- 76 ZEITREISE
- 84 REZENSIONEN
- 95 LESERBRIEFE
- 96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE
- 98 VORSCHAU

12 GRAVITATION **EINE WAAGE FÜR DAS VAKUUM**

Es ist die ungenaueste Vorhersage der Physik: Mehr als 120 Größenordnungen liegen Quantenphysik und Kosmologie bei ihren Berechnungen der Energiedichte des Vakuums auseinander. Mit dem »Archimedes-Experiment« wollen Forschungsteams auf Sardinien das Nichts jetzt präziser denn je vermessen.

Von Manon Bischoff

34 EVOLUTION **JENSEITS DER GENE**

Lebewesen werden nicht ausschließlich von ihren Erbanlagen gesteuert, sondern verändern ihr Erscheinungsbild auch infolge von Umwelteinflüssen. Die gängige Evolutionstheorie berücksichtigt das möglicherweise nicht hinreichend.

Von David Pfennig

46 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **BLAUE ROSEN**

Eine blaue Rose zu züchten, gilt als unerreichbar. Mit chemischen Tricks lassen sich die Blütenblätter jedoch eindrucksvoll färben – und gleichzeitig als Reagenz für Experimente nutzen. Denn sie besitzen Farbstoffe mit verblüffenden Eigenschaften.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

52 LARGE HADRON COLLIDER **HOFFUNGSVOLLER NEUSTART**

Nach jahrelanger Pause läuft sie wieder: Technisch verbessert soll die größte Teilchenschleuder der Welt in ihrer dritten Betriebsphase den Ursachen für Ungereimtheiten im Standardmodell nachspüren.

Von Elizabeth Gibney

Serie Kryptografie Teil 2

62 KOMPLEXITÄT **UNKNACKBARE FUNKTIONEN**

Ob es überhaupt möglich ist, Daten völlig sicher zu verschlüsseln, hängt von einer der bedeutendsten Fragen der theoretischen Informatik ab: Wie effizient lässt sich beurteilen, ob eine Zeichenfolge zufällig entstanden ist?

Von Erica Klarreich

70 ZAHLENTHEORIE **EIN FUNDAMENT FÜR POLYNOME**

Nach mehr als 100 Jahren harter Arbeit ist es Mathematikern nun gelungen, die Grundbausteine spezieller Zahlensysteme zu finden – aber sie sind völlig anders als erwartet.

Von Kelsey Houston-Edwards

78 ALTE SCHRIFTEN **ANTIKE GÖTTER IN DER KLOSTERBIBLIOTHEK**

Unter manchen Handschriften des Katharinenklosters auf dem Sinai verbergen sich ausradierte Texte. Mittels modernster digitaler Fototechnik haben Fachleute diese Aufzeichnungen sichtbar gemacht und so verlorene Texte der Antike wiederentdeckt.

Von Claudia Rapp, Giulia Rossetto und Damianos Kasotakis



12

TITELTHEMA
DAS VAKUUM WIEGEN

MAURIZIO PERGIBALLI, ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE (INFN)



34

EVOLUTION
GENE SIND NICHT ALLES

JANI PROBE HAUGSETH (COMMONS), VIKAR MEDIA (CREATIVE COMMONS), FLEISCHER, PETERMAN, HÄGERUS (WIKI), URSI / CC BY-SA 3.0 (CREATIVE COMMONS), ORG (LICENSE BY SA 3.0), LEGA (DOI)

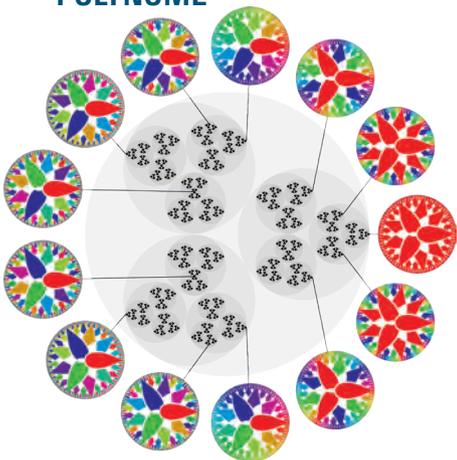


52

LHC
HOFFNUNGS-
VOLLER NEUSTART

MAXIMILIEN BRICE, JULIEN MARIUS ORIANI, CERN

70 ZAHLENTHEORIE
FUNDAMENT FÜR
POLYNOME



MELCHIOR (COMMONS), WIKIMEDIA, ORG (WIKILEA), ADIC, INTEGERS, WITH, DUAL, COLORING(SVI) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVE COMMONS), ORG (LICENSE BY SA 3.0), LEGA (DOI)



78

ALTE SCHRIFTEN
DIE PALIMPSESTE VOM SINAI

DAMIANUS KASSTRAIS, FOTOFISCH, IMAGINE, GRABER, VON, JOHN, STOKES, KAMERA, VON, MEGANSON, LICHT, TOBELLEN, VON, EQUI, POISE



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

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

SPEKTROGRAMM

SCHACHT IN DIE UNTERWELT

Im ägyptischen Abusir haben Archäologen eine außergewöhnliche Grabanlage frei gelegt. Von einer quadratischen Grube gehen ein großer und mehrere kleine Schächte ab. Ersterer misst 6,5 mal 3,3 Meter und führt 16 Meter hinunter. An seinem Grund steht ein Doppelsarkophag. Es ist die Ruhestätte von Wahibre-meri-Neith, einem militärischen Befehlshaber aus der Zeit um 500 v. Chr.

Von der Mumie des Verstorbenen fehlt jede Spur. Wahrscheinlich haben Grabräuber sie mitgenommen, nachdem sie den Doppelsarkophag aufgebrochen hatten. Wie die Forscher um Miroslav Barta von der Prager Karls-Universität vermuten, geschah der Einbruch im 4. oder 5. Jahrhundert n. Chr. Das legen zwei Gefäße aus jener Zeit nahe, die im Schacht lagen.

In den Sarkophagen selbst entdeckten die Archäologen nur wenige Beigaben – nebstan jedoch unter anderem zwei Kisten mit 402 Uschebtis. Das sind Helferfiguren, die dem Verstorbenen im Jenseits diverse Arbeiten abnehmen sollten. Zudem ist der innere Sarkophag mit Sprüchen aus dem ägyptischen Totenbuch beschriftet. Sie sollten dem Verstorbenen den Weg durch die Unterwelt erklären.

*Pressemitteilung der Prager Karls-Universität,
15. 7. 2022*



RAUMFAHRT EIN GUTER PLATZ FÜR MONDSTATIONEN?

► In der Region Mare Tranquillitatis nahe dem Mondäquator gibt es Bodenvertiefungen und möglicherweise Höhlen, in denen relativ gleich bleibend um die 17 Grad Celsius herrschen könnten. Das berichten der Geophysiker Tyler Horvath von der University of California in Los Angeles und sein Team. Damit könnten diese Orte vielleicht künftigen Forschungsbasen einen Platz bieten.

Die offene Mondoberfläche weist Temperaturschwankungen zwischen minus 170 und plus 150 Grad Celsius auf. Ein Mondtag dauert fast 15 Erdtage, was bei andauernder Sonneneinstrahlung zu immenser Aufheizung führt; umgekehrt kühlt es sich in einer Mondnacht mit entsprechend langer Dunkelphase überaus stark ab. Für den Betrieb einer Mondstation stellt das eine enorme Herausforderung dar.

Krater oder Höhlen, in denen kein so extremes Auf und Ab herrscht, bieten eventuell bessere Standorte für eine Mondstation. Die Bodenvertiefungen im Mare Tranquillitatis sind seit 2009



SCHATTENWELT Ein Mondkrater im Mare Tranquillitatis, auf dessen Grund teilweise Finsternis herrscht.

bekannt. Forscher vermuten schon länger, dass sie mit Höhlen verbunden sein könnten, die einen gewissen Schutz vor den harschen Bedingungen bieten. 16 der bisher bekannten rund 200 Gruben sind laut Horvath wahrscheinlich eingestürzte Lavaröhrengänge. Manche bieten Schatten spendende Überhänge; einer scheint in einen großen Hohlraum zu führen.

Horvath und sein Team analysierten Wärmebilder, welche die NASA-Mondsonde »Lunar Reconnaissance Orbiter« aufgenommen hatte. Diese werteten sie mit einem Computermodell unter Berücksichtigung der entsprechenden Wärmekapazitäten aus. Laut den Ergebnissen schwanken die Temperaturen in dauerhaft beschatteten Vertiefungen nur geringfügig

und bleiben im Schnitt gemäßigt. Das könnte ebenso für angeschlossene Höhlensysteme gelten, vermuten die Forscher. Zudem böten unterirdische Hohlräume einen gewissen Schutz vor kosmischer Strahlung und kleinen Meteoriten.

Nicht jeder Mondkrater eignet sich freilich als Ort für eine Mondbasis. Manche sind so tief und dunkel, dass nie Sonnenlicht hineinfällt. In ihnen ist es mit geschätzt minus 200 Grad Celsius so kalt, dass Wasser dort in steinhart gefrorener Form überdauern kann. Falls es wirklich solche Eisvorkommen gibt, könnten sie wiederum Trinkwasser für eine Mondstation liefern.

Geophysical Research Letters
10.1029/2022GL099710, 2022

ÖKOLOGIE KLIMAWANDEL VERBREITET INFEKTIONSKRANKHEITEN

► Der Klimawandel fördert die Verbreitung der meisten Krankheitserreger, die dem Menschen gefährlich werden können. Zu diesem Ergebnis kommt ein Forschungsteam um Camilo Mora von der University of Hawaii. Die systematische Auswertung einschlägiger empirischer Studien belegt demnach: Von rund 300 untersuchten Infektionskrankheiten werden 78 Prozent klimabedingt in ihrer Ausbreitung verstärkt, 19 Prozent werden – abhängig von den jeweiligen Bedingungen – entweder verstärkt oder abgeschwächt und nur drei Prozent werden ausschließlich abgeschwächt. Das geschehe durch die Erwärmung an sich, aber auch durch extreme Wetterphänomene wie

Dürren, Überschwemmungen oder Hitzewellen.

Die Forscher fanden mehr als 1000 Pfade, über die Klimafaktoren auf Krankheitserreger wie Viren, Bakterien, Pflanzenpollen oder Pilze einwirken. Wetterextreme beispielsweise schwächen über Stress oder Mangelernährung das menschliche Immunsystem und erhöhen die Infektionsanfälligkeit. Dürren wiederum sorgen dafür, dass Mensch und Tier enger zusammenleben, was die Gefahr von Zoonosen erhöht. Besorgt blicken die Experten vor allem auf Erreger, die von so genannten Vektoren wie Mücken und Zecken verbreitet werden. Etliche dieser Überträger wandern infolge der weltweiten Erwär-

mung in neue Verbreitungsgebiete ein und nehmen dabei ihre Keime mit.

Auch in Deutschland führt der Klimawandel zur Ausbreitung von Vektoren, beispielsweise Asiatischen Tigermücken und *Hyalomma*-Zecken. Viele davon transportieren virale, bakterielle und parasitäre Erreger – unter anderem Zika-, Dengue-, Chikungunya- und Krim-Kongo-Viren. Fachleute befürchten zudem eine Rückkehr der Malaria, die von einzelligen Parasiten hervorgerufen wird.

Das Team um Mora hält angesichts dieser Risiken »aggressive Maßnahmen zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen« für nötig.

Nature Climate Change 10.1038/s41558-022-01426-1, 2022

BIOPHYSIK WARUM *T. REX* SO KLEINE AUGEN HATTE

► Fleisch fressende Dinosaurier wie *Tyrannosaurus rex* hatten Augen, die bezogen auf ihren Kopfumfang winzig erscheinen. Hierfür gab es handfeste Gründe, wie der Paläobiologe Stephan Lautenschlager von der University of Birmingham schreibt. Die Augenhöhle (die Schädelgrube, in der das Auge liegt) war bei diesen Tieren eingengt und verkleinert, was mit einem gering dimensionierten Augapfel und einer hohen mechanischen Belastbarkeit des Schädels einherging. Infolgedessen konnten sie enorm kraftvoll zubeißen.

Lautenschlager untersuchte Fossilien diverser Saurierarten des Erdmittelalters. Dabei zeigte sich: Die frühen Spezies besaßen überwiegend kreisrunde oder elliptische Augenhöhlen. Im späten Erdmittelalter jedoch erschienen Arten wie *T. rex*, bei denen die Schädelgruben wie Schlüsselöcher geformt waren. Diese Gestalt-

änderung trat bei Tieren auf, deren Kopf mehr als einen Meter lang war, und betraf nahezu ausschließlich Fleischfresser.

Mit Computermodellen berechnete Lautenschlager die Kräfte im Knochen, wenn Druck- und Zugbelastungen auf die Struktur des Dinosaurierschädels einwirkten. Hierbei nahm er für die Augenhöhlen unterschiedliche Formen an und kalkulierte jeweils die mechanischen Spannungen. Schädel mit schlüssellochförmigen Öffnungen schnitten besser ab – egal ob sie senkrecht oder waagrecht gequetscht oder verbogen wurden.

Berechnungen speziell für den Körperbau des *T. rex* ergaben: Dank seiner eingengten Augenhöhlen verringerte sich der mechanische Stress im Knochengewebe, wenn das Tier zubiess. Im damaligen Alltag war das wohl dringend nötig: Der Fleischfresser schloss seine Kiefer schät-



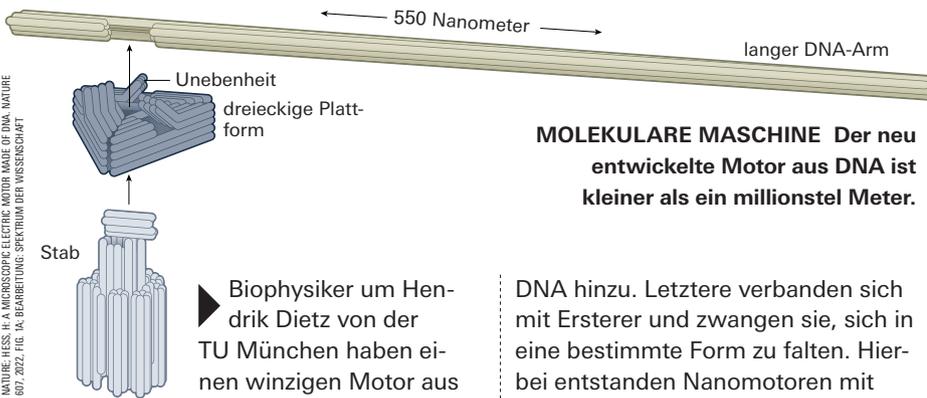
STEPHAN LAUTENSCHLAGER, UNIVERSITY OF BIRMINGHAM

AUGENMASS Schädelform (oben) und rekonstruiertes Aussehen (unten) des *T. rex*. Links: Originaler Schädel mit schlüssellochförmiger Augenhöhle; der Augapfel beanspruchte darin nur die obere Ausbuchtung und war deshalb relativ klein. Rechts: Hypothetischer Schädel mit kreisrunder Augenhöhle, die proportional mit dem übrigen Organismus mitgewachsen ist; das Auge fällt erheblich imposanter aus.

zungsweise acht- bis zehnmals kraftvoller als heutige Krokodile. Pro Zahn entsprach das einem Gewicht von mehreren Tonnen.

Communications Biology 10.1038/s42003-022-03706-0, 2022

BIOTECHNOLOGIE WINZIGER MOTOR KOMPLETT AUS DNA



MOLEKULARE MASCHINE Der neu entwickelte Motor aus DNA ist kleiner als ein millionstel Meter.

► Biophysiker um Hendrik Dietz von der TU München haben einen winzigen Motor aus DNA-Strängen gebaut. Er speichert kurzzeitig Energie, indem er eine DNA-»Feder« aufwickelt. Damit könnten sich Nanofabriken für die chemische Synthese oder zielgerichtete Verabreichung von Medikamenten konstruieren lassen.

Dietz' Team züchtete einzelsträngige DNA in Bakterien heran und gab sie zu kurzen Strängen synthetischer

DNA hinzu. Letztere verbanden sich mit Ersterer und zwangen sie, sich in eine bestimmte Form zu falten. Hierbei entstanden Nanomotoren mit Ratschenmechanismen, ähnlich Uhrwerken, die Drehungen nur in eine Richtung zulassen. Angetrieben werden sie von der brownischen Molekularbewegung – dem ständigen zufallsbedingten und temperaturabhängigen Herumflitzen von Molekülen und anderen kleinen Teilchen.

Die Motoren enthalten je eine dreieckige Plattform aus DNA, 30 mal

40 Nanometer (milliardstel Meter) groß, aus deren Mitte eine Art Stab ragt. Lange DNA-Arme sind so daran befestigt, dass sie sich um den Stab drehen können. Um einen Ratscheneffekt zu erzeugen, besitzt die Plattform mehrere Unebenheiten. Die von der brownischen Bewegung übertragenen Stöße ermöglichen es den Armen, diese Hindernisse zu überwinden. Eine angelegte Wechselspannung verändert fortlaufend die Energielandschaft, der die Arme ausgesetzt sind, und begünstigt so eine der beiden möglichen Drehrichtungen.

Wie das Team zeigte, lässt sich ein zusätzlicher DNA-Strang am Rotor befestigen, den die Drehbewegung wie eine Spiralfeder aufrollt. Die dabei gespeicherte Energie kann dazu dienen, weitere molekulare Vorgänge anzutreiben.

Nature 10.1038/s41586-022-04910-y, 2022

NATURE, HESS, H. A. MICROSCOPIC ELECTRIC MOTOR MADE OF DNA, NATURE 607, 2022, FIG. 1A, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ASTROPHYSIK MAGNETFELD DER SUPERLATIVE

► In rund 22 000 Lichtjahren Entfernung von der Erde kreist ein Neutronenstern, dessen Magnetfeld alles bisher Bekannte in den Schatten stellt. Seine Feldstärke beträgt 1,6 Milliarden Tesla – zum Vergleich: Handelsübliche Hufeisenmagneten bringen es auf 0,1 Tesla, leistungsstarke MRT-Geräte auf 3 Tesla. Eine Arbeitsgruppe um Ling-Da Kong von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften beobachtete das Objekt im Bereich der Röntgenstrahlung und ermittelte so seine Eigenschaften.

Der Himmelskörper gehört zu einem Doppelsternsystem namens J0243.6+6124. Astronomen entdeckten es 2017 als Ursache eines extrem hellen und energiereichen Strahlenausbruchs. Analysen ergaben, dass es sich bei dem Neutronenstern um einen ultraleuchtstarken Pulsar handelt. Von seinem Begleitstern fällt Materie auf ihn.

Um den Pulsar näher zu untersuchen, nahm das Team ihn in den Fokus des chinesischen Röntgenteleskops Insight-HXMT. Die dabei gewonnenen Daten zeigen eine auffällige Absorptionslinie im Röntgenspektrum der Pulsarstrahlung. Zudem weist das Spektrum charakteristische Merkmale einer so genannten Zyklotron-Reso-

nanzstreuung auf. Dazu kommt es, wenn Elektronen im Magnetfeld eines Himmelskörpers beschleunigt werden. Treffen sie auf Röntgenstrahlen, absorbieren sie diese zum Teil. Die Lage der Absorptionslinie verrät etwas über die Flussdichte des Magnetfelds nah am Pulsar.

Kong und Co maßen diesbezüglich extrem hohe Werte, was auf ein gigantisches Magnetfeld hinweist. Astronomen haben bislang nichts Vergleichbares beobachtet. Weitere Untersuchungen belegen, dass der Pulsar kein zweipoliges Magnetfeld wie die Erde besitzt, sondern ein mehrpoliges.

The Astrophysical Journal Letters
10.3847/2041-8213/ac7711, 2022

PHYSIKALISCHE CHEMIE MOLEKULARE WASSERSTRUKTUR DIREKT ABGEBILDET

► Zwei Besonderheiten der Wasserstruktur, die auch die Produktion von grünem Wasserstoff betreffen, haben Fachleute nun erstmals mit einem Mikroskop abgebildet. Ye Tian von der Universität Peking und sein Team haben Rasterkraftmikroskopauf-

nahmen angefertigt, die so genannte Zundel- und Eigendefekte zeigen. Das sind Abweichungen im regelmäßigen Netzwerk, zu dem sich Wassermoleküle zusammenlagern. Verursacht werden sie von frei beweglichen Protonen.

Wie die Arbeitsgruppe berichtet, treten diese Strukturdefekte auf Gold- beziehungsweise Platinelektroden unterschiedlich häufig auf. Sie beeinflussen, wie leicht Protonen bei Elektronenzugabe zu molekularem Wasserstoff reagieren – und damit, wie viel elektrische Energie man für dessen Herstellung braucht.

Um Wasserstoff mittels Elektrolyse zu erzeugen (der entscheidende Schritt in einer Wasserstoffwirtschaft), pumpt man Strom in dünne H₂O-Schichten, die sich auf Elektroden gebildet haben. Was dann genau passiert, ist nicht klar. Unterm Strich nehmen Protonen Elektronen auf und Wasserstoff- und Sauerstoffatome lösen ihre Bindungen. Das kostet viel Energie, die sich womöglich teils einsparen lässt, wenn man steuert, wie die Protonen in die Wasserschicht an der Elektrode eingebettet sind.

Das Forschungsteam dampfte im Hochvakuum eine einzelne Schicht

Wassermoleküle auf Metall auf. Sie ordneten sich zu einem sechseckigen Netzwerk an, in dem jedes Molekül von drei weiteren umgeben war und mit diesen Wasserstoffbrücken bildete. Anschließend gaben die Wissenschaftler zusätzliche Protonen hinzu. Die dabei entstehende Struktur machte ein Rasterkraftmikroskop sichtbar, das die Oberfläche des Netzwerks nanometerfein abtastete und darin wirkende atomare Kräfte registrierte. Das Mikroskop erreichte die nötige räumliche Auflösung, um zwischen kovalenten Bindungen und schwächeren Wasserstoffbrückenbindungen zu unterscheiden.

Die Arbeiten zeigen zum einen, dass sich Zundel- und Eigendefekte in der Wasserstruktur direkt abbilden lassen. Zum anderen belegen sie, dass Wassermoleküle in der Nähe solcher Defekte leicht vom Untergrund abgehoben sind, wie auch aus theoretischen Berechnungen hervorgeht. Außerdem hängt das Zahlenverhältnis der beiden Defektypen davon ab, auf welcher metallischen Oberfläche sich die Wasserstruktur bildet. Möglicherweise helfen diese Erkenntnisse, die Wasserstoffproduktion zu verbessern.

Science 10.1126/science.aba082, 2022

ZUNDELDEFEKTE Hydratisierte Protonen (hellblau) zwischen H₂O-Molekülen (rot-weiß) auf einer Goldoberfläche (gelb; Illustration).





AUSGESTATTET Anhänger aus menschlichen und tierischen Knochen schmückten einen Toten vor 8200 Jahren (Illustration).

ARCHÄOLOGIE STEINZEITLICHER SCHMUCK AUS MENSCHLICHEN KNOCHEN

Während der europäischen Mittelsteinzeit war es offenbar üblich, sich mit geschnitzten Menschenknochen zu schmücken. Das belegen Untersuchungen an Schmuckanhängern von einem zirka 8200 Jahre alten Friedhof. Der Begräbnisplatz liegt auf einer Insel im russischen Onegasee und diente Jäger-und-Sammler-Kulturen als Bestattungsort.

Wie ein Team um Kristiina Mannermaa von der Universität Helsinki berichtet, sind einige der dort gefundenen Anhänger aus menschlichem Gebein. Sie waren zusammen mit ihren tierischen Pendants bereits in

den 1930er Jahren ausgegraben worden. Die jeweilige Herkunft des Materials ermittelten Mannermaa und ihre Arbeitsgruppe mit Hilfe eines Massenspektrometers. Dabei stellte sich heraus: Zwölf Stück bestehen aus menschlichen Skeletteilen. Bei den übrigen handelt es sich um Schnitzereien aus tierischen Zähnen und Knochen – etwa von Elchen, Braunbären oder Bibern.

Bruchkanten an den Anhängern lassen darauf schließen, dass sie einst aus frischen Menschenknochen gefertigt worden sind. Man hatte sie genauso bearbeitet wie das tierische

Material und ihnen auch ähnliche Formen gegeben. Vielleicht sollten die Artefakte gar nicht mehr als menschlich zu erkennen sein, spekuliert das Team um Mannermaa. Beides miteinander zu kombinieren, könnte die Vorstellung symbolisiert haben, dass sich Mensch und Tier ineinander transformieren können, heißt es in der Studie. Solche Denkweisen seien durch ethnologische Untersuchungen belegt.

Wahrscheinlich wurden die Knochenornamente – menschliche wie tierische – an Umhängen oder Kopfbedeckungen befestigt oder als Ketten getragen. Darauf lässt die Fundlage schließen. Vielleicht hatte man sie auch auf Taschen, Körbe oder Decken genäht. Abnutzungsspuren zeigen, dass sie auf Leder oder Textilien aufgebracht gewesen waren.

Von welchen Menschen das Knochenmaterial stammt, ist unbekannt. Hinweise auf Kannibalismus, etwa in Form von Schnittspuren, fehlen.

Journal of Archeological Science 10.1016/j.jasrep.2022.103488, 2022

GEOWISSENSCHAFTEN GIGANTISCHER ERDRUTSCH IM OZEAN

Mehr als 1100 Kilometer weit und bis in 4500 Meter Tiefe haben sich Sedimentmassen unlängst vor der afrikanischen Küste gewälzt: einer der gewaltigsten Erdbeben, die je vermessen worden sind. Die Ergebnisse haben jetzt Peter Talling von der Durham University und sein Team vorgestellt.

Der Rutsch riss zahlreiche Messbojen in der Region aus ihren Verankerungen. Zwar waren diese genau wegen solcher Ereignisse installiert worden und dafür ausgelegt, über den Ozean zu driften, falls ihre Befestigung nicht hält. Allerdings warf es Probleme auf, die jeweils fußballgroßen Schwimmkörper wiederzufinden – zumal Wind und Strömungen sie in unterschiedliche Richtungen verfrachteten. Dank internationaler Zusammenarbeit und mit viel Glück gelang es trotzdem, die besondern Geräte mit Schiffen einzusammeln.

Talling und sein Team hatten die Messbojen nur fünf Monate vor dem Abgang der Sedimentlawine entlang des Kongo-Canyons im Atlantik installiert. Die unterseeische Schlucht bildet die Fortsetzung des Flusses Kongo. Am 14. Januar 2020 setzten sich die Erdmassen dort mit rund 18 Kilometer pro Stunde in Bewegung und beschleunigten im weiteren Verlauf auf bis zu knapp 30 Kilometer pro Stunde. Teilweise wurden 20 bis 30 Meter dicke Schichten abgetragen. Das Volumen des Materials, das in die Tiefsee glitt, schätzen die Forscherinnen und Forscher auf 2,7 Kubikkilometer – und seine Masse auf bis zu 2700 Megatonnen. Zum Vergleich: Der Fluss Kongo spült jährlich rund 40 Megatonnen Sediment ins Meer.

Derartige Erdbeben könnten eine bislang unterschätzte Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf spielen. Eingelagert ins Sediment, transportie-

ren sie große Mengen organischer Materie in die Tiefe, darunter abgestorbenes Plankton, die Überreste von Landlebewesen oder Pflanzenteile, die der Kongo aus dem Inneren Afrikas heranbefördert.

Die Arbeitsgruppe um Talling vermutet, heftige Regenfälle im Kongobecken könnten für den Erdbeben mitverantwortlich gewesen sein. Sie führten dem Kongo überdurchschnittlich viel Wasser zu, das zudem im Küstengebiet auf besonders starke Gezeiten traf. Beides zusammen löste möglicherweise Turbulenzen aus, die den Untergrund in Bewegung versetzten. Dabei rissen sich nicht nur Messbojen los, sondern es wurden auch zwei wichtige Unterwasserkabel zerstört. Infolgedessen fiel in großen Teilen Afrikas die Internetverbindung aus.

Nature Communications 10.1038/s41467-022-31689-3, 2022



GRAVITATION EINE WAAGE FÜR DAS VAKUUM

Es ist die ungenaueste Vorhersage der Physik: Mehr als 120 Größenordnungen liegen Quantentheorie und Kosmologie bei der Berechnung der Energiedichte des Vakuums auseinander. Mit dem »Archimedes-Experiment« wollen Forschungsteams das Nichts jetzt präziser denn je vermessen.

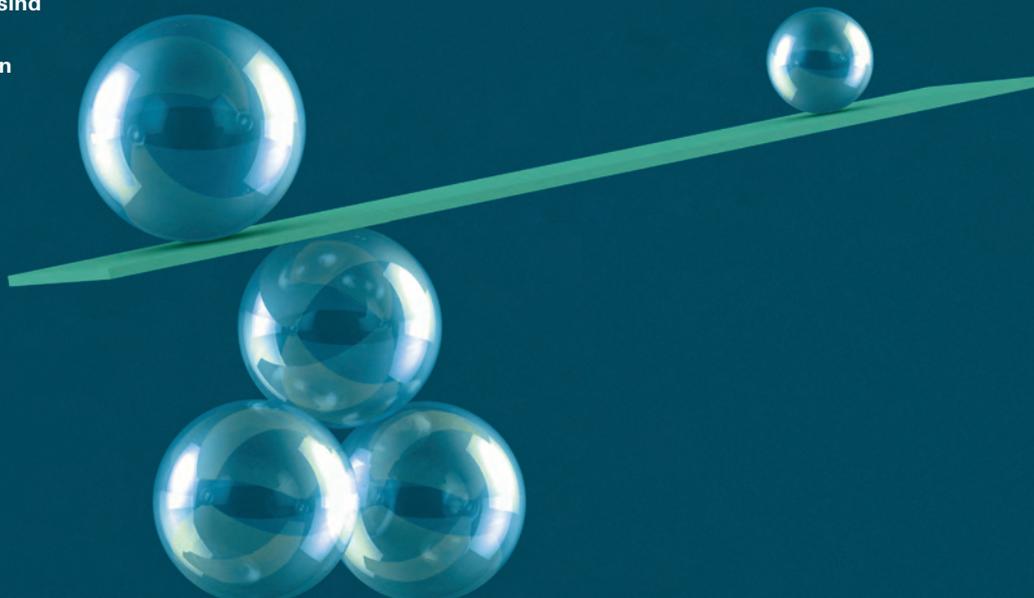


Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» [spektrum.de/artikel/2049303](https://www.spektrum.de/artikel/2049303)

HÖCHSTE GENAUIGKEIT

Dass das Vakuum etwas wiegen könnte, darüber sind sich Physiker einig. Die Messung eines so kleinen Werts ist allerdings eine Herausforderung.



AUF EINEN BLICK WIE SCHWER IST DAS »NICHTS«?

- 1** Seit den Anfängen der Quantenmechanik wissen Physiker, dass es keinen völlig leeren Raum gibt. Überall wimmelt es vor seltsamen Teilchen, die kurzzeitig auftauchen und wieder verschwinden.
- 2** Grund dafür sind Vakuumfluktuationen: Die Energie des Vakuums kann um winzige Werte variieren. Diese Schwankungen haben enorme Auswirkungen: Sie beeinflussen, wie sich das All ausdehnt.
- 3** Doch die Vorhersagen von Quantenphysik und Kosmologie liegen weit auseinander. Daher wollen Forschungsteams das Vakuum wiegen – mit nichts anderem als einer Balkenwaage.

»Das macht schon was mit einem, wenn man zum ersten Mal hier reinfährt«, sagt Enrico Calloni, als das Auto holpernd in den schmalen Tunnel der Mine abtaucht. Nach der gleißenden Hitze an der Oberfläche könnte der Kontrast kaum größer sein. Innerhalb weniger Sekunden dringt feuchte, kühle Luft in den Wagen, während dieser sich den Weg immer weiter hinab in die Tiefe bahnt. »Klaustrophobisch sollte man nicht sein.«

Der Fahrer, Luca Loddo, fährt derweil selbstsicher auf dem unebenen Boden weiter und lacht. Ein enger Schacht, 110 Meter unter der Erde, fast vollkommene Dunkelheit – das ist nichts für jedermann. »Wir müssen das Experiment so gestalten, dass man die meiste Zeit an der Oberfläche arbeiten kann und nur für wichtige Änderungen hinabsteigen muss«, betont Calloni.

Das Auto hält an, Loddo steigt aus und stattet uns alle mit Helm und Taschenlampe aus. Die letzten Meter legen wir zu Fuß zurück, immer tiefer in den Schacht hinein. Wir passieren eine Tür, hinter der Seismografen installiert sind, welche die Bewegungen der Umgebung aufzeichnen. Als schließlich eine Art Höhle zu erkennen ist, die sich auf der linken Seite des Tunnels befindet, bleiben wir stehen. Ein Scheinwerfer ist darauf gerichtet. »Hier soll es stattfinden«, erklärt Calloni. Das erscheint unglaublich: Genau hier, in einer feuchten Höhle, wollen italienische Forschungsgruppen ein Hochpräzisionsexperiment durchführen.

Von einem Versuchslabor hat die Umgebung wenig. Doch tatsächlich gibt es in Europa kaum einen geeigneteren Ort für das Projekt, das sich die ambitionierten Physiker



LAGE Die Sos-Enattos-Mine befindet sich im Nordwesten Sardinien, in der Nähe des kleinen Orts Lula.

und Physikerinnen vorgenommen haben. Denn die Mine Sos Enattos befindet sich auf der mediterranen Insel Sardinien, die laut seismografischen Untersuchungen zu den ruhigsten Orten der Welt zählt. Dort wollen Forschungsteams um den Wissenschaftler Enrico Calloni vom Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Nationales Institut für Kernphysik, kurz INFN) der schlechtesten theoretischen Vorhersage in der Geschichte ihres Fachs nachgehen.

Kosmologie und Quantenphysik liegen bei der Berechnung eines bestimmten Werts nämlich um mehr als 120 Größenordnungen (eine 1 mit 120 Nullen) auseinander. Als wäre diese Abweichung nicht schon schlimm genug, handelt es sich bei der betreffenden Größe um eine der fundamentalsten des Universums: das Gewicht des Vakuums. Die Forscherinnen und Forscher möchten sich daher die ruhige Lage der Mine Sos Enattos in der Nähe des sardischen Dorfs Lula zu Nutze machen und dort Hochpräzisionsmessungen vornehmen. Sie haben kein geringeres Ziel, als das »Nichts« zu wiegen.

Anders, als viele annehmen, ist das Vakuum nicht völlig leer. Grund dafür ist die Quantenphysik, wie so oft, wenn es um kontraintuitive physikalische Phänomene geht. Ein bekanntes Beispiel ist die heisenbergsche Unschärferelation: Man kann die Position und die Geschwindigkeit eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen. Die Unschärferelation gilt aber auch für andere Messgrößen, etwa Energie und Zeit. Diese lassen sich ebenso wenig zeitgleich präzise auflösen. Das hat erhebliche Folgen: Die Natur kann sich kurzzeitig Energie »borgen« – je kürzer der Zeitraum, desto höher der mögliche Energiebetrag.

Dadurch schwirren im Vakuum etliche »virtuelle« Teilchen herum, die aus dem Nichts auftauchen und sogleich wieder verschwinden. Allerdings müssen dabei einige Regeln gewahrt werden: Im gesamten System kann etwa nicht plötzlich eine elektrische Ladung entstehen. Also können bloß neutrale Partikel wie Photonen oder Teilchen und Antiteilchen – etwa ein Elektron-Positron-Paar – den (gar nicht mehr so) leeren Raum kurzzeitig bevölkern. In der Physik spricht man von virtuellen Teilchen, weil sie sich nicht messen lassen; die kurzlebigen Erscheinungen entziehen sich Detektoren. Doch auch wenn man sie nicht direkt nachweisen kann, sind ihre Auswirkungen sehr wohl messbar.

BERGWERK Die Mine Sos Enattos auf Sardinien wurde wegen ihrer Vorkommen von Bleiglanz und Zinkblende bereits in der Römerzeit genutzt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BESCHLOFF

Dass virtuelle Partikel nicht nur eine mathematische Konstruktion sind, sondern Realität, haben inzwischen viele Experimente belegt. So etwa die spontane Emission: Ein angeregtes Atom kann gemäß den Gesetzen der Physik nur in den Grundzustand zurückkehren, wenn es sich in einem elektromagnetischen Feld befindet – es also mit einem Photon wechselwirkt. Erst dann ist das Atom in der Lage, Energie loszuwerden, indem es seinerseits ein Lichtquant ausstrahlt. In Wirklichkeit zeichnet sich allerdings ein anderes Bild ab: Auch im Vakuum kann ein angeregtes Teilchen spontan ein Photon emittieren. Um das zu erklären, braucht man die Quantenphysik.

Wegen der Unschärferelation schwankt die Vakuumenergie um winzige Werte. Diese reichen aus, damit kurzzeitig ein virtuelles Lichtteilchen entsteht, das dem angeregten Atom ermöglicht, die überschüssige Energie loszuwerden und in den Grundzustand zurückzukehren. Es ist, als würde man einen Stift senkrecht auf der Fingerspitze balancieren: Hat man die Balance gefunden, könnte der Stift theoretisch für immer so stehen bleiben. Doch kein Mensch ist in der Lage, dauerhaft regungsfrei zu verharren. Eine winzige Bewegung wird irgendwann zwangsläufig dazu führen, dass der Stift herunterfällt.

Tatsächlich ist die spontane Emission verantwortlich für den Großteil des Lichts, das uns umgibt. Eine erste Erklärung dafür fand Albert Einstein 1916, aber erst zehn Jahre später konnte sein Kollege Paul Dirac das Phänomen vollständig beschreiben, als die Quantenmechanik ein solides theoretisches Fundament besaß. Virtuelle Teilchen scheinen also real zu sein. Doch um sie wiegen zu können, nutzt man einen anderen Effekt, der mit ihnen zusammenhängt.

Eine mysteriöse Kraft drückt zwei Platten zusammen
Dabei handelt es sich um eines der faszinierendsten Ereignisse, das die Beschaffenheit des Vakuums verdeutlicht: den so genannten Casimir-Effekt, den der niederländische Physiker Hendrik Casimir bereits 1948 vorhergesagt hat. Seinen Berechnungen zufolge sollten sich zwei gegenüberstehende Metallplatten im luftleeren Raum anziehen – auch wenn man die Schwerkraft, die sie aufeinander ausüben, nicht berücksichtigt.

Grund dafür sind wieder die Fluktuationen der Vakuumenergie. Die im Vakuum stehenden Platten setzen den virtuellen Teilchen gewisse Grenzen: Zwischen den beiden Objekten können beispielsweise nicht beliebige Lichtquanten entstehen, sondern sie müssen die Regeln der Elektrodynamik befolgen. Denn die Metallplatten wirken wie Spiegel, welche die Photonen hin- und herreflektieren und manche Wellenlängen unterdrücken, während sie andere verstärken. Dadurch können nur virtuelle Teilchen mit bestimmten Energiewerten auftauchen. Außerhalb der zwei Platten können hingegen alle Formen der geisterhaften Partikel entstehen.

Innerhalb der leitenden Flächen gibt es also weniger Möglichkeiten – und damit auch weniger virtuelle Teilchen. Selbst wenn diese nur kurzzeitig existieren, üben sie Druck aus: Die beiden Leiterplatten werden von den im äußeren Bereich befindlichen virtuellen Teilchen zusammengepresst. Der Effekt ist in der Tat messbar. Allerdings dauerte

es knapp 50 Jahre, bis Steven Lamoreaux das Phänomen 1997 an der University of Washington experimentell bestätigen konnte. In den Jahrzehnten zuvor gab es zwar zahlreiche Bemühungen und einige Hinweise darauf, doch die Messinstrumente waren nicht präzise genug, um die geringe Anziehungskraft der Platten zweifelsfrei nachzuweisen.

Nun möchten Calloni und seine Kolleginnen und Kollegen den Casimir-Effekt nutzen, um das Nichts zu wiegen. Aber warum sollte man das tun? Schließlich scheinen quantenmechanische Experimente alle Modelle zu bestätigen. Die Quantenelektrodynamik gilt gemeinhin sogar als die am besten überprüfte Theorie der Naturwissenschaften: Die Messwerte stimmen teilweise bis zur achten Nachkommastelle mit den Rechenergebnissen überein.

Sobald man sich jedoch in ein Grenzgebiet begibt, in dem auch die Schwerkraft relevant wird, kommt es zu Problemen. Bisher gibt es noch keine Quantengravitationstheorie, weshalb man mikroskopische Phänomene mit Hilfe von Quantenfeldtheorien beschreibt, während man auf kosmologischer Skala die 1915 von Einstein eingeführte allgemeine Relativitätstheorie heranzieht. In den allermeisten Fällen klappt das auch sehr gut, da Quanteneffekte bei riesigen Objekten wie Sonnensystemen und Galaxien keine

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / AMANON BIRSCHOFF



LABOR Bislang ist der Versuchsraum in der Mine nicht fertig gestellt, daher finden die Experimente noch an der Oberfläche statt.

Rolle spielen; bei winzigen Teilchen wie Atomen oder Quarks hingegen ist die Schwerkraft vernachlässigbar.

Beim Vakuum ist das allerdings anders: Schließlich handelt es sich dabei um eine grundlegende Eigenschaft des Raums. Wenn das Nichts eine nicht verschwindende Energie besitzt, dann hat das schwer wiegende Auswirkungen – unabhängig davon, wie klein diese sein mag. Um zu verstehen, warum das so ist, muss man die Feldgleichungen von Einstein kennen, die der allgemeinen Relativitätstheorie zu Grunde liegen. Sie beschreiben, wie Energie (beispielsweise in Form von Masse) die Raumzeit krümmt und wie das die Bewegung der Energieträger (etwa Teilchen) beeinflusst. Sprich: Ein Sonnensystem krümmt den Raum, und das führt wiederum dazu, dass sich die Himmelskörper auf Bahnkurven bewegen.

Demnach wirken sich aber auch Vakuumfluktuationen, die kurzzeitig die Energie des Vakuums ändern, auf die Form und die Entwicklung unseres Universums aus – und zwar auf ganz bestimmte Weise, worauf Kosmologen und Kosmologinnen anfangs noch Hoffnung setzten. Denn

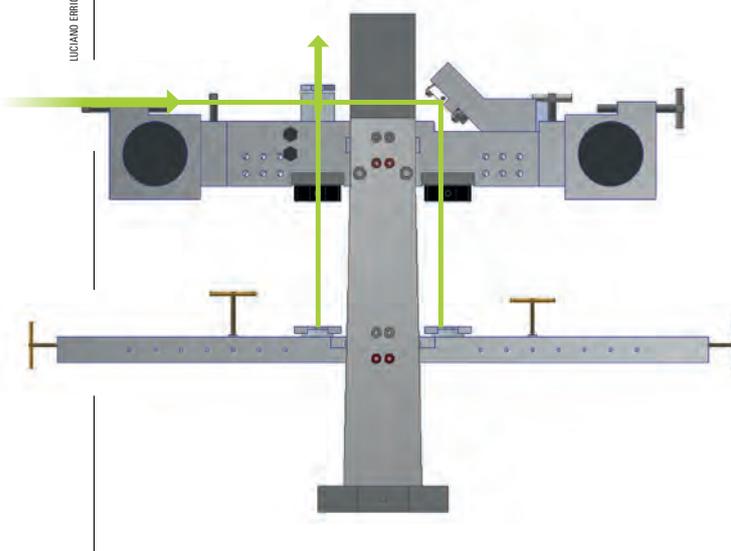
zunächst schien es, als könne die Quantenphysik ein bedeutendes Rätsel ihres Fachs lösen: das der kosmologischen Konstante.

Drei Jahre nachdem Einstein die allgemeine Relativitätstheorie entwickelt hatte, stellte er fest, dass er eine so genannte kosmologische Konstante zu seinen Gleichungen addieren konnte, ohne die grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu ändern. Denn die Feldgleichungen erlauben unzählige Lösungen – und somit mögliche Universen. Die richtigen Anfangsbedingungen zu finden, damit man ein All wie unseres beschreibt, stellte eine Herausforderung dar. Einstein ging zu Beginn davon aus, der Kosmos sei statisch: Der Raum habe eine feste, unveränderliche Größe. Um ein solches Ergebnis zu erhalten, muss man eine kosmologische Konstante in die Gleichungen einführen, die mit einem geeigneten Zahlenwert dafür sorgt, dass sich das Universum weder ausdehnt noch zusammenzieht.

Doch 1931 erkannte der Astronom Edwin Hubble, dass der Raum wächst. Darum verwarf Einstein die Idee der kosmologischen Konstante – oftmals wird behauptet, er habe sie als die »größte Eselei« seines Lebens bezeichnet. 1998 kam eine erneute Wendung: Zwei Forschungsteams konnten durch die Beobachtung weit entfernter Supernovae unabhängig voneinander nachweisen, dass sich das Universum nicht gleichmäßig, sondern sogar beschleunigt ausdehnt.

Interferometer

Ein Laserstrahl (grün) wird von links auf einen Strahlteiler geführt, wo er sich in zwei Strahlen spaltet. Der erste wird nach unten abgelenkt und trifft auf einen Spiegel des unteren Balkens, was ihn geradewegs nach oben reflektiert. Dort landet er in einem Detektor. Der zweite Strahl setzt seinen Weg nach rechts fort, wo er durch einen Spiegel nach unten auf den rechten Teil des unteren Balkens reflektiert wird. Auch dieser wird anschließend so geleitet, dass er auf den Detektor trifft. Falls der untere Balken – an dem im Versuch die zwei Proben hängen – auch nur leicht verkippt ist, ändert sich dadurch der Weg der beiden Strahlen und somit auch das Signal im Detektor.



LUCIANO EBRICI, ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE (INFN); BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Was treibt das Universum auseinander?

Die treibende Kraft, die den Raum immer weiter auseinanderzieht, wird seither als Dunkle Energie bezeichnet. Sie wirkt demnach wie eine Art Gegenstück zur Gravitation, die verhindert, dass alle massiven Objekte irgendwann in einem Ort zusammenstürzen. Laut theoretischen Vorhersagen macht der Anteil der Dunklen Energie etwa 68 Prozent der Energie im All aus. Zwar ist die Dichte der Dunklen Energie extrem klein; weil diese jedoch über den gesamten Raum verteilt ist, addiert sie sich zu einem riesigen Wert auf.

Es gibt zwei verbreitete Erklärungsansätze, woher diese mysteriöse Energieform stammen könnte. Ersterer basiert auf bisher noch nicht nachgewiesenen Quantenfeldern, die einer neuen Grundkraft angehören würden. Neben der elektromagnetischen, der starken sowie der schwachen Kernkraft und der Gravitation gäbe es demzufolge eine fünfte fundamentale Kraft. Hinweise darauf wurden allerdings noch nicht gefunden. Eine andere Erklärung liefert dagegen eine kosmologische Konstante, die sich durch die Energie des Vakuums ergibt. Denn Vakuumfluktuationen tragen in den einsteinschen Feldgleichungen zum Wert der geheimnisvollen Konstante bei.

Zunächst zeigte sich die Fachwelt erfreut darüber: Zwei verschiedene Bereiche der Physik schienen die beschleunigte Ausdehnung des Universums auf gleiche Weise zu erklären.

Doch die Freude währte nicht lange. Als man den energetischen Beitrag des Vakuums quantenfeldtheoretisch berechnete, fiel dieser wesentlich größer aus als der Wert der kosmologischen Konstante, der sich aus den astronomischen Beobachtungen ergibt. Tatsächlich ist der Unter-

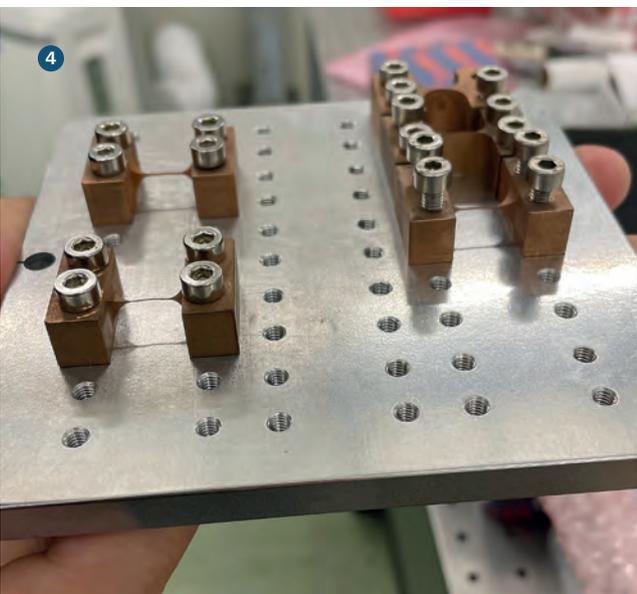
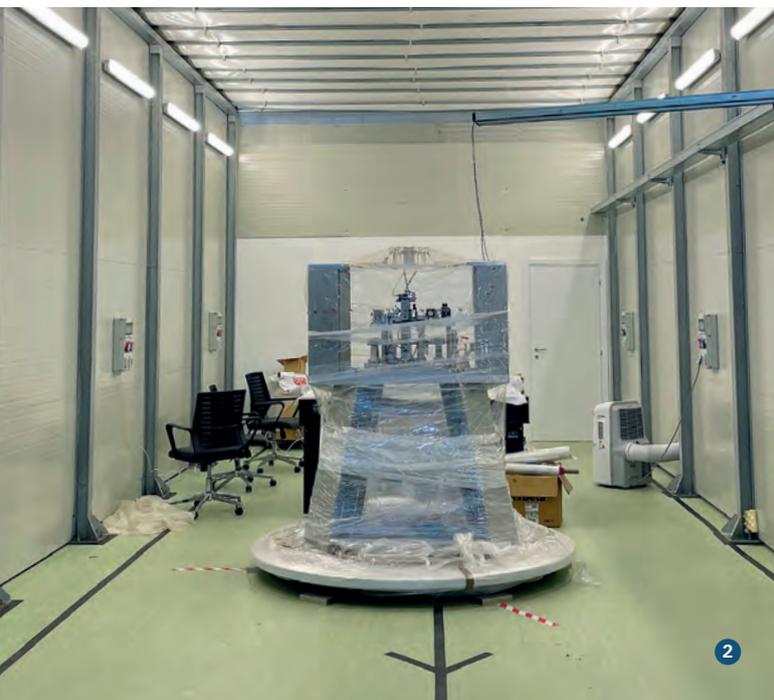


1 LAGERHALLE Das vorläufige Labor befindet sich in einer Lagerhalle, die sich die Forschungsteams mit den Minenarbeitern teilen.

2 ARCHIMEDES-EXPERIMENT Die Forscherinnen und Forscher wickeln die Geräte mit Folie ein, um den Staub fernzuhalten.

3 WAAGE Der Aufbau ist noch nicht beendet, doch beide Balken sowie das Interferometer sind schon angebracht.

4 FEINARBEIT Für den Versuch werden präzise Bauteile benötigt, hier etwa schmale Kupfergelenke.



schied riesig: Die quantenphysikalische Vorhersage fällt um etwa 120 Größenordnungen höher aus!

»Um das Jahr 2000 herum las ich einen älteren Fachaufsatz des Nobelpreisträgers Steven Weinberg zu diesem Thema«, erinnert sich Calloni. »Da kam mir erstmals die Idee für das Archimedes-Experiment.« Dass Vakuumfluktuationen existieren, ist spätestens seit dem Nachweis des Casimir-Effekts allgemein akzeptiert. Und auch die vorhergesagte Stärke der Fluktuationen kann nicht völlig danebenliegen, da Laborversuche die Theorie bisher extrem gut bestätigen.

Aber es wurde noch nie untersucht, wie sich virtuelle Teilchen in Bezug auf die Schwerkraft verhalten. In Wirklichkeit könnten die mysteriösen Partikel und damit auch die Vakuumfluktuationen anders mit der Gravitation wechselwirken, als wir es von gewöhnlicher Materie gewohnt sind. Um das zu überprüfen, möchte Calloni mit seinen Kolleginnen und Kollegen den Casimir-Effekt nutzen und das Unmögliche wagen: die virtuellen Teilchen mit Hilfe einer simplen Balkenwaage wiegen.

»Die dafür benötigten Grundlagen kennen wir im Prinzip schon seit Jahrzehnten«, erklärt der Postdoc Luciano Errico, der an der Durchführung des Archimedes-Experiments beteiligt ist. »Ich habe mich anfangs selbst gewundert, warum es so lange gedauert hat, bis man diese Aufgabe in Angriff nimmt.« Bereits 1929 fragte sich Richard Tolman, ob man bestimmte Energieformen (er fokussierte sich dabei auf Wärme) wiegen könnte.

Ähnlich keimte Anfang des Jahrtausends in Calloni eine Idee für eine experimentelle Umsetzung auf. Dafür müsste man bloß das archimedische Prinzip nutzen: Wenn virtuelle Teilchen ein Gewicht haben, dann sollte ein Hohlraum aus Metallplatten im Vakuum eine Auftriebskraft erfahren. Denn im Inneren entstehen weniger virtuelle Partikel als außerhalb des Hohlraums. Daher würde dieser einer Boje im Meer ähneln, die wegen des Auftriebs nach oben gedrückt wird. Da die Kraft von der Dichte der virtuellen Teilchen abhängt, hat man somit auch deren Gewicht bestimmt.

Calloni begann 2002 in Zusammenarbeit mit Kollegen und Kolleginnen ein theoretisches Modell zu entwickeln, um die Stärke der Auftriebskraft für verschiedene Systeme zu berechnen – und somit den geeignetsten Versuchsaufbau auszumachen. Wie die Fachleute vermuten, läge die Kraft in realistischen Umsetzungen bei etwa 10^{-16} Newton. Das ist, als wolle man die DNA in einer Zelle wiegen. Dafür

sind extrem sensible Messapparate nötig. »Das erklärt, warum es bis heute noch niemand versucht hat«, so Errico. Tatsächlich wurden erst in den letzten Jahren Systeme entwickelt, die solche winzigen Werte detektieren können. Grundlage für die technischen Fortschritte gaben Gravitationswellendetektoren wie VIRGO, an dessen Aufbau Calloni maßgeblich beteiligt war. »Erst durch die empfindlichen Instrumente, die für Präzisionsmessungen von Gravitationswellen hergestellt wurden, ist all dies möglich«, erläutert Errico. »Danke, LIGO, danke, VIRGO!«

Doch selbst mit solchen ausgeklügelten Messsystemen ist eine Umsetzung des Archimedes-Experiments alles andere als einfach. Dabei ist die grundlegende Idee simpel: Die Forscher greifen auf eine der ältesten Methoden zurück, um das Gewicht eines Objekts zu bestimmen: eine Balkenwaage.

Herausforderung: Eine winzige Auftriebskraft messen

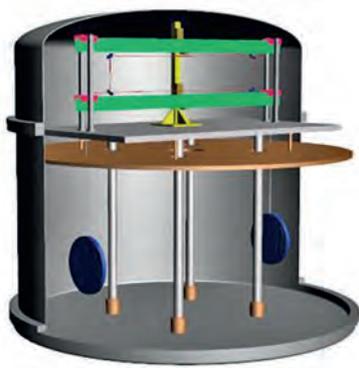
Daran sollen zwei Proben hängen, aber nur in einer findet der Casimir-Effekt statt. Hierfür erwärmt man beide Materialien in regelmäßigen Abständen um etwa vier Grad Celsius und kühlt sie anschließend wieder ab. Diese Temperaturdifferenz genügt, damit eine der Proben zwischen einer supraleitenden und einer isolierenden Phase hin- und herwechselt. Die andere bleibt hingegen stets ein Isolator. Durch die veränderte Leitfähigkeit variiert auch die Anzahl der möglichen virtuellen Teilchen innerhalb der ersten Probe. Die Auftriebskraft nimmt dann periodisch zu und ab. Somit müsste die Waage in regelmäßigen Zeitabständen schwingen, wie eine Wippe, auf der zwei Kinder sitzen.

Der Ausschlag wird durch die geringe Kraft jedoch sehr klein ausfallen. Zudem entstehen im Messapparat lauter andere Schwingungen, hervorgerufen durch Störungen aus der Umgebung wie seismische Erschütterungen oder thermische Schwankungen. Daher ist es wichtig, die Waage so gut es geht von der Außenwelt abzuschirmen. Als Ausgangspunkt braucht man einen Versuchsort, an dem es möglichst wenig seismische Aktivität gibt.

Bei der Suche nach einem passenden Kandidaten kamen die Forschungsteams schnell auf Sardinien. Denn es ist schon lange bekannt, dass die Mittelmeerinsel aus geologischer Sicht sehr leise ist. Zudem ist sie nicht allzu dicht besiedelt, was auch den anthropogenen Lärm gering hält. Darüber hinaus verfügt die Insel wegen ihrer Bodenschätze über mehr als 250 Minen. Solche Orte sind geradezu ideal für Hochpräzisionsexperimente. Denn im Untergrund gibt es noch weniger Erschütterungen als an der Erdoberfläche. Und auch die Temperatur ist im Inneren einer Mine äußerst stabil, was die Messungen ebenfalls erleichtert. Deshalb haben das INFN sowie das INGV (Nationales Institut für Geophysik und Vulkanologie) eine Kollaboration mit der italienischen Region Sardinien und den Universitäten in Sassari und Cagliari gestartet, um auf der Insel gravitative Experimente durchzuführen.

»Wir haben etliche Minenbetreiber angeschrieben und von unserem Vorhaben erzählt«, so Calloni. »Doch es war sehr schwer, jemanden zu finden, der sich dazu bereit erklärte, uns aufzunehmen.« Ein Grund dafür sei womöglich der Name eines der beiden Institute, die am Archimedes-Projekt beteiligt sind, schätzt der Physiker: das Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. »Ich glaube, die Menschen vor Ort be-

AUFBAU Die Archimedes-Waage besteht aus zwei Balken (grün). Am oberen ist das Lasersystem befestigt (rot), am unteren hängen die fast identischen Proben (blaue Scheiben). Das Lasersystem kann kleinste Auslenkungen des unteren Balkens vermessen.



ANDREA BASTI, ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE (INFN)

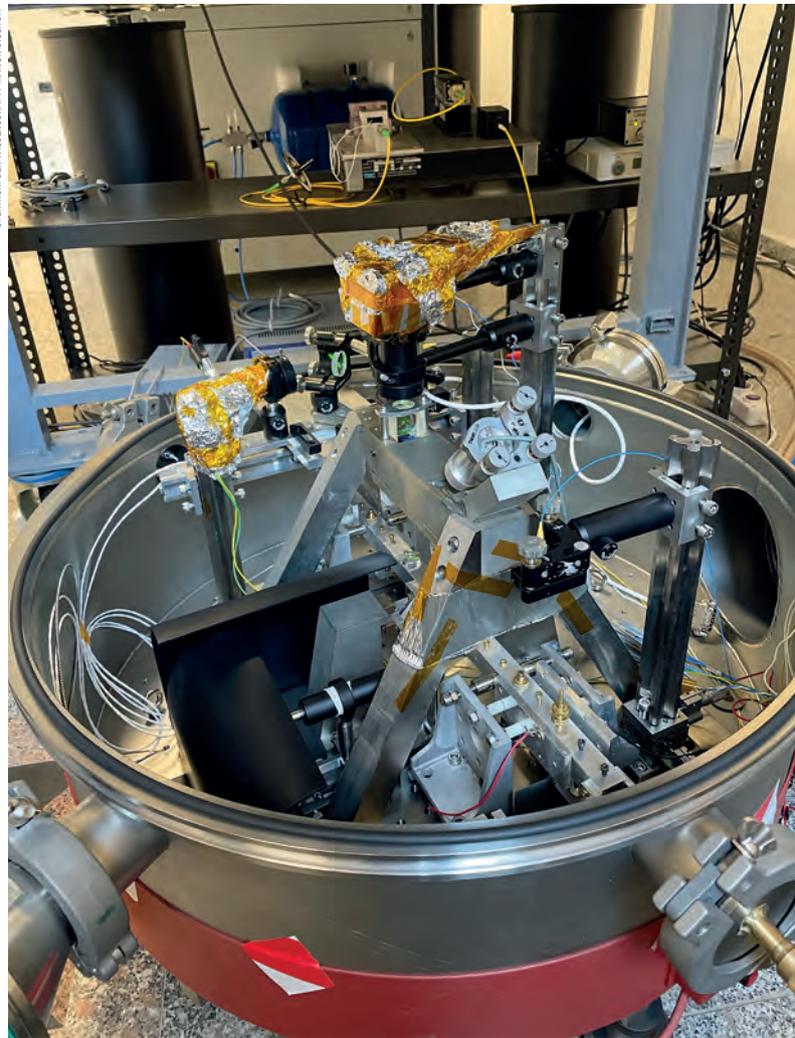


PROTOTYP Um zu testen, ob sich eine so empfindliche Balkenwaage überhaupt realisieren lässt, haben die Forscherinnen und Forscher zunächst einen Prototyp entworfen, der etwas kleiner und einfacher gehalten ist als der endgültige Aufbau.

fürchteten, wir würden nach einem Lager für radioaktive Abfälle suchen.«

Schließlich fanden sie einen passenden Ort für das Experiment: Die italienische Bergbaugesellschaft IGEA, die für die seit den 1990er Jahren stillgelegte Mine Sos Enattos im Osten der Insel verantwortlich ist, erklärte sich zu einer Zusammenarbeit bereit. Die Mine blickt auf eine lange Geschichte zurück: Bereits in der Antike bauten die Römer die darin befindlichen Erze ab. Heute ist Luca Loddo für die Schächte zuständig, früher hat er selbst als Techniker in der Mine gearbeitet. »Kurz bevor sie geschlossen wurde, waren nur noch etwa 30 Leute dort beschäftigt. Die haben sich dann darum gekümmert, die unterirdischen Gänge so umzubauen, dass man sie als Museum nutzen kann«, erzählt Loddo, während er uns durch die Mine begleitet.

Einige Jahre später übernahm er die Leitung und organisierte Führungen. In manchen Bereichen findet man lehrreiche Installationen, die die verschiedenen Arbeitsschritte der Minenarbeiter darstellen: hier eine Figur, die einen Karren mit Gesteinen füllt, dort jemand, der Sprengsätze an eine Wand anbringt, und an anderer Stelle ein kunstvoller Nachbau eines Arbeiters, der einen funktionsfähigen Druckluftbohrer betätigt. »Inzwischen dient die



Mine nur noch dem wissenschaftlichen Betrieb«, sagt Loddo, nachdem wir wieder hinaufgestiegen sind.

Er führt uns durch das ehemalige oberirdische Museum, eine Halle, in der sich viele Ausstellungsstücke befinden. Dabei zeigt der Minenleiter stolz auf die Poster, die Forschungsprojekte wie das Archimedes-Experiment oder das Einstein-Teleskop (ein geplanter europäischer Gravitationswellendetektor) vorstellen. Denn durch die besondere geologische Lage wird Sos Enattos als möglicher Ort für das gigantische Einstein-Projekt gehandelt, das Gravitationswellen genauer vermessen soll denn je. Auch Fotografien von Calloni und anderen Physikerinnen und Physikern, welche die Mine besucht haben, hängen an der Wand.

Der vorgesehene Versuchsraum innerhalb der Mine ähnelt allerdings mehr einem archäologischen Fundort als einem Labor. »Anfangs war die Ausbuchtung, in der das Experiment ablaufen soll, winzig. Der ganze Raum wurde bereits ziemlich vergrößert – doch es steht noch viel Arbeit an«, erklärt Calloni. Der Raum ist noch nicht groß genug, es fehlt ein Lüftungsschacht, es muss ein richtiger Boden verlegt werden und vieles mehr. Da die beteiligten Forschungsteams planen, schon im Jahr 2024 erste

Ergebnisse des Archimedes-Projekts präsentieren zu können, werden diese Messungen wohl eher an der Oberfläche stattfinden, gibt Calloni zu. »Wir müssen die Versuche dann etwas länger laufen lassen, aber auch hier oben sollte es unseren Berechnungen zufolge möglich sein, das gewünschte Signal zu messen«, so der Physiker.

Wie verwandelt man eine stillgelegte Mine in ein Hochpräzisionslabor?

Das ist allerdings nicht die einzige Schwierigkeit, mit der die Forscher und Forscherinnen zu kämpfen haben. Innerhalb einer stillgelegten Mine ein Versuchslabor aufzubauen, in dem Hochpräzisionsmessungen gemacht werden, ist alles andere als einfach. Die Fachleute dürfen die Hälfte einer Lagerhalle der Minenarbeiter für ihre vorläufigen Experimente nutzen. »Da gab es anfangs nichts – nicht einmal eine Toilette«, erinnert sich Calloni. Sie mussten dort zunächst Büroräume, eine möglichst passende Laborumgebung und natürlich sanitäre Anlagen errichten. »Inzwischen haben wir hier so ziemlich alles Nötige.« Postdoc Errico ergänzt daraufhin: »Dennoch muss man jedes Mal, wenn man hierher fährt, prüfen, ob man alles Wichtige dabei hat. Wenn ich etwa einen Schraubenzieher vergesse, kann das echt nervig werden. Wo soll man hier auf die Schnelle einen herbekommen?«

Vor Ort sind noch acht Minenarbeiter inklusive Loddo tätig. Sie kümmern sich um die Instandhaltung der Mine. Mittlerweile hat sich zwischen ihnen und den Physikern eine rege Zusammenarbeit entwickelt. »Sie unterstützen uns, wo sie nur können«, schwärmt Calloni. »Wenn wir etwa eine Halterung aus Stahl brauchen, haben sie bis zu unserem nächsten Aufenthalt eine für uns zusammengebaut.« Die meisten beteiligten Forscherinnen und Forscher wohnen auf dem italienischen Festland und reisen regelmäßig nach Sardinien. »Wir versuchen uns so zu organisieren, dass so oft wie möglich jemand vor Ort ist und Messungen vornehmen kann«, so Calloni.

Die Messgeräte stehen aktuell in der oberirdischen Lagerhalle. Die stellt einen auffälligen Kontrast zur anderen Hälfte des Gebäudes dar, dem Teil der Minenarbeiter: Dort stehen alte, riesige Maschinen, die früher genutzt wurden, um Granitblöcke zu zerkleinern – inzwischen aber nicht mehr funktionieren. Darum herum befinden sich allerlei andere Geräte wie Werkzeuge und Fahrzeuge. Die Hälfte des Archimedes-Experiments wirkt dagegen fast leer. Nur zwei große, zeltartige Gebilde stehen im Raum. An einem hängt ein Schild mit dem Logo, eine Balkenwaage. »Die Zelte sind da, um den Staub fernzuhalten«, erklärt Calloni. Als er die hinter den Zelten befindlichen Büroräume betritt, fügt er hinzu: »Eigentlich ist unsere erste Handlung, wenn wir ankommen, den Boden zu wischen, um auch hier den Staub zu entfernen.«

In der Lagerhalle finden schon Messungen statt, denn selbst an der Oberfläche ist die sardische Umgebung wesentlich ruhiger als das italienische Festland. Bislang handelt es sich allerdings um Probemessungen, die beispielsweise bestimmen, wie empfindlich die Waage ist. Die eigentlichen Untersuchungen an den Proben werden erst im Jahr 2023 beginnen.

Anders, als man etwa eine Banane im Supermarkt wiegt, werden die Physikerinnen und Physiker jedoch nicht bloß eine Gewichtsmessung vornehmen. Stattdessen erwärmen und kühlen sie die Proben immer wieder in festen Zeitabständen. Damit erhalten sie nicht nur ein einziges Ergebnis, sondern ein periodisches Signal. Das macht es einfacher, an der passenden Stelle in den Aufzeichnungen danach zu suchen. Denn auch wenn man die Apparatur von der Umgebung abschottet, treten Störungen auf. »Da wir die Frequenz kennen, mit der die Waage schwingen sollte, können wir nach genau solchen Ausschlägen Ausschau halten«, erklärt der Postdoc Errico. »Das Signal sollte auch an der Oberfläche zu sehen sein. Im Untergrund wäre es aber deutlicher sichtbar.«

Um ein derart präzises Instrument zu bauen, braucht es einige ausgeklügelte Ideen, selbst wenn der grobe Aufbau einer Balkenwaage zunächst einfach klingt. Doch die Realität ist komplizierter: Die Waage hängt frei im Raum; die winzigen Ausschläge werden von Lasersystemen gemessen; zudem muss sich die gesamte Apparatur in einem Vakuum befinden und auf weniger als 90 Kelvin (knapp minus 180 Grad Celsius) gekühlt werden. Darüber hinaus benötigt man geeignete Proben, die sich gleichmäßig und schnell erwärmen sowie abkühlen lassen und einen starken Casimir-Effekt aufweisen.

Allein aus mechanischer Sicht stellt das eine Herausforderung dar: Wie schafft man es, die Waage so zu befestigen, dass sie möglichst wenige Erschütterungen aus der Umgebung aufzeichnet – und gleichzeitig präzise genug ist,



kleinste Gewichtsveränderungen zu detektieren? Wie kann man Justierungen von außerhalb vornehmen, ohne jedes Mal die Vakuumkammer zu öffnen? Ähnliche Anforderungen mussten bereits die Gravitationswellendetektoren LIGO und VIRGO erfüllen. Neben Calloni haben auch viele der anderen am Archimedes-Projekt beteiligten Forscher und Forscherinnen an der Entwicklung von VIRGO mitgewirkt. Ihr dort erlangtes Wissen können sie nun auf den neuen Versuch übertragen.

Gravitationswellendetektoren als Inspiration

Zum Beispiel haben sie seitlich von beiden Enden der Balkenwaage je zwei Metallplatten angebracht, welche die Waage aber nicht berühren. Damit die Schwingung nicht zu stark ausfällt oder sich verstärkt, dämpfen die stromdurchflossenen Platten durch Induktion die entstehende Bewegung. Solche Prozesse fallen in den Bereich der so genannten Kontrolltheorie, die durch die Gravitationswellenforschung erhebliche Fortschritte gemacht hat. Dabei geht es darum, Störeffekte aus der Umgebung gering zu halten, indem man auf das Messsystem einwirkt.

Man muss allerdings so behutsam wie möglich vorgehen, um die Aufzeichnung nicht zu beeinflussen. Deshalb verwendet man beispielsweise Induktion, um die Bewegung zu dämpfen, anstatt das Gerät direkt zu berühren. Denn eine solche Handlung würde die Messung verfälschen.

Um die winzigen Ausschläge überhaupt detektieren zu können, nutzen die Fachleute zwei verschiedene Laser-

systeme. Das erste ist ein Interferometer, das selbst kleinste Kippwinkel aufzeichnet: Durch einen Strahlteiler leitet man einen Laserstrahl auf beide Enden der Waage, wo sie von angebrachten Spiegeln reflektiert werden (siehe »Interferometer«, S. 16). Die Strahlen werden danach durch weitere Spiegel wieder zusammengeführt und treffen auf einen Detektor. Ist der Balken in Balance, haben die zwei Strahlen genau die gleiche Distanz zurückgelegt. Ist der Arm hingegen leicht in eine Richtung geneigt, unterscheidet sich die überwundene Strecke. Die Wellenberge und -täler der Laserstrahlen treffen im Messgerät versetzt aufeinander und erzeugen dadurch eine andere Intensität. Somit lassen sich kleinste Abweichungen vom Gleichgewicht aufzeichnen.

Das zweite Lasersystem ist dagegen nicht präzise genug, um den exakten Kippwinkel zu bestimmen. Man braucht es jedoch, um herauszufinden, in welche Richtung sich der Arm neigt, wenn der Ausschlag groß ist und zurück in die Ausgangslage gebracht werden muss. Dafür lässt man den Strahl unterhalb des Balkens auf dessen Mittelpunkt treffen, wo er reflektiert wird und dann ein Messgerät erreicht. Ist der Arm leicht verschoben, landet das Licht versetzt auf dem Detektor. Bei den winzigen Kippwinkeln, die im Experiment auftreten, genügt dieser Versatz nicht, um die Neigung präzise zu bestimmen; die Richtungsänderung lässt sich dennoch erkennen. Dazu ist das Interferometer bei großen Ausschlägen nicht in der Lage.

Um zu testen, ob eine solche Waage auch in der Praxis präzise genug arbeitet, hat Errico in seiner Masterarbeit zusammen mit Calloni und dessen Kollegen vor einigen Jahren zunächst einen Prototyp entwickelt. Im Unterschied zur finalen Archimedes-Apparatur hängt dieser noch nicht frei in der Luft, sondern ist fest mit dem Boden verbunden; er arbeitet bei Raumtemperatur und ist kleiner als die endgültige Version. Wie sich aber herausstellte, lassen sich bereits mit dem vereinfachten Versuchsaufbau seismische Aktivitäten extrem präzise messen. »Meines Wissens handelt es sich um das präziseste Seismometer, das aktuell verfügbar ist«, so Calloni. Weil es so gut funktioniert, haben die Physiker beschlossen, einen zweiten Prototyp anzufertigen und im Versuchslabor von VIRGO zu platzieren, um die dortigen seismischen Erschütterungen aufzuzeichnen. »Tatsächlich kann man daraus auch den teuersten Blitzler der Welt bauen«, sagt der Doktorand Luca Pesenti lachend, der ebenfalls am Archimedes-Projekt beteiligt ist. »Weil das Gerät so gut funktioniert, konnten wir die Bewegungen der am Labor vorbeifahrenden Autos in Sassari sehr akkurat bestimmen.«

Inzwischen haben die Forscherinnen und Forscher auch die endgültige Version der Archimedes-Waage aufgebaut und nach Sardinien verschifft. Der Aufbau ist bisher knapp zwei Meter groß und etwa 1,50 Meter breit. Er besteht aus zwei Balken, die frei schwingen können, also keinen Kontakt zum Boden haben. Am unteren Arm werden die Proben angebracht, während der obere als Referenz dient. An diesem sind die Spiegel und Strahlteiler für das Lasersystem befestigt. Zudem sind die Balken von zahlreichen Schrauben durchsetzt, mit denen man den Schwerpunkt

VAKUUMKAMMER Die Dimensionen des Experiments stellen eine Herausforderung dar. Die Vakuumkammer wurde mit einem Lkw angeliefert und musste mit einem Kran abgeladen werden.

DAVIDE RIZZA, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI



der Waage genau justieren kann: Man kann sie ein klein wenig weiter herein- oder herausdrehen, um das Gewicht umzuverteilen. Einige der Schrauben lassen sich darüber hinaus maschinell verstellen, damit man sie aus der Ferne ansteuern kann. Das ist wichtig, denn wenn der Aufbau erst einmal in der Vakuumkammer steckt, kommt man nur noch schlecht heran.

Auch das Interferometer haben die Fachleute angebracht. »Für die detaillierte Planung des Aufbaus habe ich etwa sechs Monate gebraucht«, erzählt Errico. »Wo soll welche Stellschraube hin; wie sieht der ideale Strahlteiler aus, und wo positioniert man ihn? Es hat dann etwa ein Jahr gedauert, bis alle Teile eingetroffen sind und ich sie zusammensetzen konnte.« Und die Kalibrierung, damit der Laser die ganzen Vorrichtungen exakt trifft? »Das hat nur 30 Minuten gedauert. Ich hatte alles so geplant, dass es nur wenige Freiheitsgrade gab. Als alles wirklich so geklappt hat, wie ich es mir vorgestellt hatte, habe ich vor Freude fast geweint!«

Doch Errico hat noch viel Arbeit vor sich. Aktuell ist er damit beschäftigt, die Waage weiter zu verkabeln. »Das ist zwar nicht die unterhaltssamste Aufgabe, aber es muss gemacht werden.« Er muss eine ganze Menge Draht ordnen und anbringen, damit die vielen Instrumente von außen angesteuert werden und Signale hinaus schicken können. Vor einigen Jahren hätte sich Errico wohl kaum träumen lassen, dass er seine Arbeitszeit auf diese Weise verbringen würde. Denn zunächst hatte er die Laufbahn eines theoretischen Physikers eingeschlagen. »Dann besuchte ich jedoch eine Vorlesung von Calloni und wusste, dass ich mit ihm zusammenarbeiten wollte«, erklärt Errico. Bei so einem spannenden Thema lohne es sich, auch mal technische Arbeiten zu übernehmen.

Ein Aufbau wie eine Matroschka

Dabei ist höchste Sorgfalt angesagt. Denn der verdrahtete Aufbau wird anschließend, ähnlich wie eine Matroschka, nacheinander in drei riesige Metallbehälter gepackt. Den ersten bildet die Vakuumkammer. Sie steckt man in eine zweite Hülle, die mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist. Und diese muss man wiederum in einen dritten, luftleeren Behälter stecken, der wie eine Thermoskanne wirkt. Ohne ihn würde sich die zweite Schicht zu schnell erhitzen.

Die Vakuumkammer ist bereits am Versuchsort eingetroffen – die anderen beiden Hüllen befinden sich noch in der Produktion. Und auch diese Schritte sind mit Schwierigkeiten verbunden. Eine Vakuumkammer solchen Ausmaßes ist nicht einfach herzustellen, genauso wenig ein so großer Kryostat (der physikalische Fachausdruck für die gigantische Thermoskanne). Der gesamte Aufbau wird am Ende etwa fünf Meter hoch, breit und tief sein und mehrere Tonnen wiegen. Es gibt nur wenige Anlaufstellen, die solche Behälter überhaupt produzieren können. Denn man braucht nicht nur riesige Metallhüllen – durch sie müssen zudem viele Kabel führen, die den extremen Bedingungen standhalten sollen.

Auch der Prozess, die drei Behälter ineinanderzustecken, ist mit Problemen verbunden. Gerade der Füllvorgang mit Stickstoff bereitet den Fachleuten noch Sorgen. Denn wenn



KRYOSTAT Die Experimentatoren haben getestet, wie man einen so großen Aufbau mit flüssigem Stickstoff kühlen kann. Dafür haben sie eine große Styroporwanne mit dem Kühlmittel gefüllt und die Vakuumkammer langsam hinabgelassen.

man den Vakuumbehälter, der Raumtemperatur hat, in flüssigen Stickstoff eintaucht, verdampft die Kühlflüssigkeit schnell. Um niemanden zu gefährden, wird der Vorgang deshalb in einem Raum mit guten Belüftungsmöglichkeiten stattfinden, damit sich darin nicht zu viel Gas in der Luft sammelt.

In einem Probedurchlauf vor der Lagerhalle in Sos Enattos haben die Kollegen um die Physikerin Paola Puppo vom INFN in Rom deshalb schon einmal den Füllvorgang geübt: Sie haben eine riesige Styroporwanne langsam mit flüssigem Stickstoff gefüllt und dabei nach und nach die leere Vakuumkammer hineingetaucht. Die Kühlflüssigkeit begann dadurch schlagartig zu verdampfen, was sich eindrucksvoll in großen Nebelwolken ausdrückte, die den Vakuumbehälter beim Eintauchen umgaben. »Der gesamte Prozess wird sehr lange dauern – mehrere Tage bis Wochen.« Aber der Probedurchlauf hat bestätigt, dass die Idee der Forscher und Forscherinnen durchaus umsetzbar ist.

Eine weitere Schwierigkeit stellten die Proben dar. Als Calloni erstmals über das Archimedes-Experiment nachdachte, wollte er geschichtete Supraleiter einsetzen. In diesen Stoffen findet der Casimir-Effekt statt: Die Materialien bestehen aus drei Schichten, wobei die obere und die untere supraleitend werden – sie bilden damit das Äquivalent zu den Metallplatten im ursprünglichen Casimir-Modell. Zudem besitzt das Material eine feste Kristallstruktur.

tur, das heißt, der Abstand zwischen den beiden leitenden Ebenen bleibt unverändert. Deshalb sollte eine Auftriebskraft auf derartige Proben wirken.

Allerdings beträgt die Dicke solcher Stoffe etwa 200 Nanometer, was zwar sehr dünn ist, aber für den Versuch ein Problem darstellt. »Um den Effekt zu verstärken, würden wir etliche Supraleiter-Schichten aufeinander stapeln, so dass wir am Ende ein Material hätten, das mehrere Zentimeter dick ist«, erklärt Calloni. Und es ist so gut wie unmöglich, einen Festkörper dieser Größe gleichmäßig aufzuwärmen und abzukühlen – geschweige denn innerhalb der kurzen Zeitabstände, die für den Versuch anvisiert sind.

Vor einigen Jahren stieß Calloni jedoch zufällig auf eine Veröffentlichung von Achim Kempf von der University of Waterloo. Darin berechnete der theoretische Physiker die Stärke des Casimir-Effekts in bestimmten supraleitenden Kristallen. Wie Calloni erkannte, schien die Kraft ausgeprägt genug, um im Archimedes-Experiment genutzt zu werden. Und das Besondere an den Kristallen: Sie sind nur wenige Nanometer dick. Damit könnte man, wenn man sie übereinanderschichtet, eine Probe erhalten, die bloß ein paar Millimeter misst.

Ein viel versprechender Kristall als Rettung

Das klingt fast zu schön, um wahr zu sein. Calloni erzählte seinen Kolleginnen und Kollegen davon und fragte sie, ob sie die Ergebnisse des theoretischen Physikers bestätigen könnten. Denn die Theorie des Casimir-Effekts in Supraleitern ist bisher kaum erforscht. Grund dafür ist unter anderem, dass supraleitende Stoffe noch viele Fragen aufwerfen – vor allem wenn es um solche geht, die bei (verhältnismäßig) hohen Temperaturen arbeiten. Um Kempfs Berechnungen dennoch zu überprüfen, wählte Luigi Rosa, der auch beim INFN arbeitet, einen anderen theoretischen Ansatz. Und er war erfolgreich. »Da nun zwei verschiedene Modelle zum gleichen Ergebnis führen, sind wir zuversichtlich«, sagt Calloni.

Inzwischen haben sie schon erste Kristallproben zur Verfügung: Es handelt sich um Scheiben mit einem Durchmesser von etwa zehn Zentimetern, die nur mehrere Millimeter dick sind. Nun mussten die Forschungsteams noch eine Methode finden, mit der sie die Proben gleichmäßig schnell erhitzen und wieder abkühlen konnten. Und natürlich durften sie dabei kaum in den Aufbau eingreifen, denn die Wärmezufuhr sollte die Waage möglichst wenig beeinflussen. Also werden die Fachleute die Proben in eine schwarze Box packen, die wie eine Art Ofen funktioniert. Von außen mit einem Laser beschienen, erhitzt sie sich und gibt die Wärme gleichförmig von allen Seiten an den Kristall ab. Wird der Laser ausgeschaltet, kühlt der flüssige Stickstoff das System wieder ab. Dieser Wechsel lässt sich relativ schnell vollführen, binnen Zehntelsekunden.

Wichtig ist hierbei, dass der Phasenübergang in den Kristallstrukturen dem Prozess folgen kann. Daher muss der Übergang vom isolierenden in den supraleitenden Zustand möglichst ruckartig verlaufen. Innerhalb von höchstens einem Grad Celsius sollte der Supraleiter zum Isolator werden. Wenn die Proben bei der Produktion allerdings nicht rein genug sind – Fehlstellen entstehen bei Herstellungsprozessen immer –, dann kann sich der Übergang fließend über mehrere Grad Celsius ziehen. Die Versuchsleiter arbeiten daher eng mit dem Unternehmen zusammen, das die Kristalle herstellt. Durch mehrfaches Ausprobieren haben sie nun gemeinsam den geeignetsten Kandidaten aus der Kristallfamilie, die Kempf beschrieben hatte, gefunden.

Damit sind die einzelnen Komponenten für das Archimedes-Experiment alle bereit – im Prinzip steht dem Versuch also nichts mehr im Weg. Und die Vorbereitungen sind schon in vollem Gang. Die beteiligten Forscher sind sehr gespannt, was dabei herauskommen wird. Falls die Messungen den bisherigen Erwartungen entsprechen, virtuelle Teilchen also wie gewöhnliche Materie gravitativ wechselwirken, dann weiß man definitiv, dass die Vakuumfluktuationen die Einstein-Feldgleichungen beeinflussen müssen. Demzufolge hätten sie wohl sehr starke Auswirkungen. In diesem Fall läge die Aufgabe, zu erklären, was den Einfluss der Vakuumenergie im Universum unterdrückt, bei Kosmologen.

Wenn hingegen die Ausschläge der Waage anders ausfallen als erwartet, öffnet das – vorausgesetzt, Calloni und sein Team haben keine Fehler gemacht – einen Weg zu einer völlig neuen Physik. Dann bleibt herauszufinden, ob virtuelle Teilchen überhaupt mit der Schwerkraft wechselwirken. Oder hängen Energie und Masse bei ihnen auf andere Weise zusammen? Und wenn ja, wie und warum?

»Wir möchten noch keine Hypothese formulieren, um den Versuch nicht zu verfälschen«, erklärt Calloni. »Aber egal welches Ergebnis wir erhalten, es wird auf jeden Fall spannend.« ◀

◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



PETER JURIK / STOCK.ADOBE.COM

QUELLEN

Allocca, A. et al.: Measuring the influence of Casimir energy on superconducting phase transitions: A cross-correlation data analysis. ArXiv 1205.2478, 2012

Allocca, A. et al.: Picoradiant tiltmeter and direct ground tilt measurements at the Sos Enattos site. European Physical Journal Plus 136, 2021

Calloni, E. et al.: Vacuum fluctuation force on a rigid Casimir cavity in a gravitational field. Physics Letters A 297, 2002

Calloni, E. et al.: Towards weighing the condensation energy to ascertain the Archimedes force of vacuum. Physical Review D 90, 2014

Calloni, E. et al.: High-bandwidth beam balance for vacuum-weight experiment and Newtonian noise subtraction. European Physical Journal Plus 139, 2021

PALÄONTOLOGIE GEFIEDERTE FLUGSAURIER

Seit Langem ist bekannt, dass bereits die Vorfahren heutiger Vögel, die Dinosaurier, Federn besaßen. Die mit ihnen verwandten Pterosaurier sollten dagegen stets unbefiedert gewesen sein. Ein Irrtum.

► Gemäß einer einfachen Regel besitzen Vögel Federn, Säugetiere Haare und Reptilien – darunter die Dinosaurier – Schuppen. Die Welt ist allerdings nicht einfach. Seit mehr als 25 Jahren wissen wir, dass zumindest einige Dinosaurier ebenfalls befiedert waren. Eine 2019 aufgestellte These, nach der das einst auch für Pterosaurier galt, blieb umstritten. Doch jetzt gibt es neue Hinweise auf befiederte Flugsaurier. Und nicht nur das: Möglicherweise war das Keratinkleid dieser Tiere sogar bunt und diente damit als Signal für Artgenossen.

Zu den Pterosauriern gehörten mehr als 100 Arten flugfähiger Reptilien. Trotz ihrer Verwandtschaft zu den Dinosauriern unterschieden sie von diesen deutlich. Beide sind durch 230 bis 66 Millionen Jahre alte Fossilien belegt; ihre Existenz erstreckte sich also von der späten Trias bis zum Massenaussterben am Ende der Kreidezeit. Flugsaurier besaßen riesige Köpfe mit spitzen Schnauzen; an einem mitunter winzigen Körper saß ein imposanter Hals sowie ein mehr oder weniger lang gezogener Schwanz; die Armknochen bildeten mit dem verlängerten vierten Finger die »Anströmkante« des Hautflügels (siehe »Spektrum« November 2020, S. 12). Seit den ersten Entdeckungen dieser Kreaturen wissen wir, dass ihr Körper mit einem Flaum aus kurzen, haarähnlichen Strukturen bedeckt war, die wahrscheinlich der Wärmeisolierung dienten. Aber handelte es sich hierbei um Federn?

Das Team um Aude Cincotta vom Königlichen Belgischen Institut für Naturwissenschaften in Brüssel präsentierte im April 2022 verdächtige Oberflächenstrukturen auf einem 113 Millionen Jahre alten Schädel des Flugsauriers *Tupandactylus* aus der

frühen Kreidezeit Brasiliens. Einerseits stießen die Forscher auf so genannte Monofilamente, also einzelne Fasern, andererseits auf federartig verzweigte Gebilde. Das spricht dafür, dass es sich hierbei nicht etwa um Hautfetzen oder andere Gewebereste handelt, sondern tatsächlich um Federn.

Zusätzlich lassen sich innerhalb der Strukturen so genannte Melanosomen erkennen – Pigmentkörperchen, die typischerweise in Federn oder Haaren auftreten und Melanine enthalten. Die Farbenpracht heutiger Vögel und Säugetiere beruht meist auf einer Kombination der beiden chemisch

TUPANDACTYLUS Die Illustration des vor 113 Millionen Jahren im heutigen Brasilien lebenden Pterosauriers *Tupandactylus* zeigt den prächtigen Kopfkamm, mit dem sich das Tier einst schmückte. Wahrscheinlich trug der Kamm bunte Federn. Deren Farbe ist allerdings unbekannt.

BOB NICHOLS 2022 / ROYAL BELGIAN INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES (WWW.EURKALEPT.ORG/MULTIMEDIA/314311 / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/4.0/LEGALCODE))



unterschiedlich gebauten Pigmente Eumelanin, das schwarz-braune Töne hervorbringt, sowie dem rötlichen Phäomelanin. Da Pigmente auch in der Haut und in vielen inneren Organen vorkommen, muss man sich vergewissern, wo genau die Melanosomen liegen. In diesem Fall sind sie eindeutig in die ursprünglich keratinhaltigen Strukturen der Federn integriert.

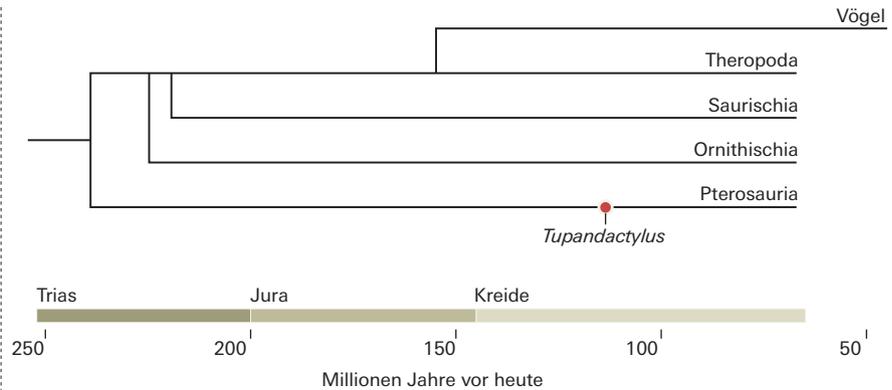
Die Wissenschaftler haben sich die Form dieser Melanosomen genauer angeschaut. Demnach waren sie in charakteristischer Weise sowohl in den Federn als auch in den Hautgeweben der Fossilien angeordnet, was auf eine gefleckte Färbung hinweist.

Tupandactylus war ein stattliches Tier mit einer geschätzten Flügelspannweite von fünf Metern. Sein riesiger, mit einem zahnlosen Kiefer ausgestatteter Kopf trug zwei lange Knochenstangen, die an Maste eines Segelschiffs erinnern: Eine ragte gerade nach hinten heraus, die andere bildete eine fast senkrechte Vorderkante. Dazwischen spannte sich wohl beim lebenden Tier eine Membran aus fleckig gezeichneter Haut mitsamt einem kurzen Flaum bunter Federn (siehe »*Tupandactylus*«).

Farbenfroher Auftritt

Solche unregelmäßig gefärbten Kopfkämme gelten als typisch für die verschiedenen *Tupandactylus*-Arten und ihre Verwandten. Fachleute gehen davon aus, dass die Individuen damit bei Paarungsritualen Signale untereinander austauschten, so wie heutige Vögel mit ihren bunten Flügeln, Schwanzfächern oder Kämmen Geschlechtspartner anlocken. Die gemusterten Federn an Schwanz, Flügeln und Kopf einiger Dinosaurier werden ebenfalls als Kommunikationsmittel interpretiert. Moderne Vögel sind bekannt für die Vielfalt und Komplexität ihres farbenfrohen Auftritts, der eine maßgebliche Rolle für die sexuelle Selektion gespielt hat; das Gleiche können wir für ausgestorbene Tiere wie Dino- oder Pterosaurier annehmen.

Die Arbeit von Cincotta und ihren Kollegen lässt einen wesentlichen Schluss zu: Federn sind in der Evolution – egal ob als Isoliermaterial oder



AVEMETATARSALIA Vögel, Dinosaurier und Pterosaurier gehören zur Klade der Avemetatarsalia, die erstmalig in der Trias vor etwa 250 Millionen Jahren auftauchten. Offensichtlich gab es in allen Gruppen befiederte Arten. Demnach existierten Federn bereits beim gemeinsamen Vorfahren – und damit 100 Millionen Jahre früher als bislang gedacht.

als Signalgeber – nur einmal entstanden, und zwar bereits in der Klade der Avemetatarsalia, zu der Dinosaurier, Vögel und Pterosaurier gehören (siehe »Avemetatarsalia«). Auch wenn eine unabhängige Entstehung in mehreren Dinosaurier- und Pterosauriergruppen denkbar bleibt, sprechen doch die übereinstimmende Struktur der Pigmente, das vermutlich gemeinsame genetische Erbe sowie ähnliche Abläufe bei der Individualentwicklung dieser Tiere für einen einmaligen Ursprung.

Wenn dem so ist, lag der Ausgangspunkt wahrscheinlich in der frühen Trias vor ungefähr 250 Millionen Jahren. Somit erweisen sich Federn als 100 Millionen Jahre älter als der älteste bekannte Vogel *Archaeopteryx*, der vor rund 150 Millionen Jahren im heutigen Deutschland lebte. Bei der Diskussion über die Ursprünge der Federn hat man sich bislang zu stark auf die Entwicklung des Flugs konzentriert, der bei der Dinosauriergruppe der Theropoden während des mittleren bis späten Juras vor etwa 165 Millionen Jahren auftrat. Die neuen Erkenntnisse dürften den Fokus zurück auf die Isoliereigenschaften des Gefieders lenken, die wohl vor allem die

Entwicklung antrieb, wobei sich die Eignung als Kommunikationsmittel hinzugesellte.

Wenn die Avemetatarsalia Federn tatsächlich zur Isolierung nutzten, dann waren die Vorfahren der Flug- und Dinosaurier einschließlich der Vögel mehr oder weniger warmblütig. Sie lebten agiler als viele andere Reptilien ihrer Zeit, konnten den ganzen Tag über aktiv bleiben und länger schnell laufen. Das Zeitfenster für die Entstehung der Federn fällt in eine Periode, in der sich das Leben nach dem Massenaussterben am Ende des Perms, bei dem mehr als 90 Prozent der Arten an Land und im Meer verschwanden, wieder erholte. Die noch zu den Reptilien zählenden Vorfahren der Säugetiere, die Synapsiden, liefen damals schon auf vier Beinen, waren bis zu einem gewissen Grad warmblütig und besaßen vielleicht Haare. Meiner Meinung nach lieferten sich in dieser Zeit Synapsiden und Avemetatarsalia einen evolutionären Wettkampf, bei dem beide als Pflanzen- und Fleischfresser miteinander konkurrierten und gleichzeitig die Wurzeln für eine neue Körperphysiologie legten. ◀

Michael J. Benton ist Professor für Wirbeltierpaläontologie an der britischen University of Bristol.

QUELLE

Cincotta, A. et al.: Pterosaur melanosomes support signalling functions for early feathers. *Nature* 604, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 604, S. 630–631, 2022

FRIEDENSFORSCHUNG TAKTISCHE ATOMWAFFEN BEDROHEN DEN WELTFRIEDEN

Russlands völkerrechtswidriger Angriff auf die Ukraine erhöht das Risiko eines Atomkriegs. Fachleute warnen vor einer unkontrollierbaren Eskalation durch taktische Kernwaffen.

Der Einsatz von Kernwaffen war seit dem Ende des Kalten Kriegs kaum noch ein Thema, jedenfalls in der öffentlichen Debatte. Russlands Einmarsch in die Ukraine rückt ihn nun wieder in den Fokus. »Ich möchte Sie daran erinnern, dass Russland eine der größten Atommächte der Welt ist«, sagte der russische Präsident Wladimir Putin nach der Annexion der Krim 2014 in einer Rede vor Jugendlichen. Und am 27. Februar 2022, drei Tage nach Beginn des Überfalls auf die Ukraine, ließ er die Atomstreitkräfte seines Landes in Alarmbereitschaft versetzen.

Aktuell geht es nicht so sehr um strategische Atomwaffen, die – montiert auf Interkontinentalraketen – rund um den Planeten ganze Städte auslösen können. Sondern um taktische Sprengköpfe. Das sind Atombomben geringerer Sprengkraft, die meist auf Trägersystemen mit bis zu etwa 100 Ki-

lometer Reichweite installiert sind. Diese so genannten Gefechtsfeldwaffen sollen Truppen oder Infrastruktur nahe der Front vernichten – im Prinzip wie konventionelle Artillerie.

Doch selbst wenn sie meist kleiner sind: Für den Weltfrieden stellen diese Waffen nach Einschätzung vieler Fachleute eine größere Gefahr dar als strategische Atomraketen. Letztere dienen der Abschreckung, ein realer Einsatz ist unwahrscheinlich. Taktische Nuklearwaffen dagegen »haben die Schwelle für den Einsatz von Atomwaffen verringert und auch die möglichen Gründe für ihren Einsatz diffuser gemacht«, erklärt Götz Neuneck, Senior Research Fellow am Institut für Friedensforschung und Sicherheitspolitik der Universität Hamburg.

1991 sah es nach einer Initiative des damaligen US-Präsidenten George

H. W. Bush zunächst so aus, als würden diese Waffen an Bedeutung verlieren. Nach dem Zusammenbruch des Ostblocks ging Bush verschiedene einseitige Verpflichtungen ein, taktische US-Atomwaffen aus anderen Nato-Staaten zurückzuziehen und abzurüsten. Diese »Presidential Nuclear Initiatives« (PNIs) verringerten die Zahl entsprechender Kriegsgeräte der Supermächte deutlich – eine endgültige Lösung war das aber nicht. Bis heute hat die Nato rund 180 B61-Bomben auf Flugplätzen unter anderem in Deutschland stationiert.

Russland besitzt laut Schätzungen der Nuklearexperten Hans M. Kristensen und Matt Korda vom Nuclear Information Project derzeit 1912 nicht-strategische Atomsprengköpfe. Die USA haben nach offiziellen Angaben rund 230 taktische Atomwaffen. Eine beträchtliche Zahl solcher Kriegsgeräte besitzt überdies Pakistan, vermutlich machen sie ungefähr ein Drittel seines gesamten Nukleararsenals von rund 200 Sprengköpfen aus. Frankreich wiederum besitzt 50 von Flugzeugen abfeuerbare Lenkraketen, die als Gefechtsfeldwaffen über relativ kurze Distanz eingesetzt werden können; eine vergleichbare Ausstattung nimmt man für Israel an. Nordkorea möchte nach eigener Aussage solche Waffen entwickeln.

Eine gefährliche Idee aus dem Kalten Krieg kommt derzeit wieder auf: dass ein Atomkrieg geführt und gewonnen werden könne. Das ist eine Abkehr von der jahrzehntelang vorherrschenden Sicht auf Nuklearwaffen als reines Abschreckungsmittel. »Es gibt diese Denkschule in den USA und anderswo, die sagt: Wenn wir diese Atomwaffen haben, und die sind so wirkungsvoll, warum setzen wir sie eigentlich nicht ein?«, schildert Neuneck.



BÜCHSE DER PANDORA Ein Kampfflugzeug vom Typ »B-2 Spirit« wirft eine B61-Bombe ab. Die frei fallende Fliegerbombe lässt sich mit einem Nuklearsprengkopf bestücken. Bis heute hat die Nato rund 180 solcher »taktisch« einsetzbaren Atomwaffen auf Flugplätzen stationiert.

DBP / PICTURE ALLIANCE

Der Weg in den Abgrund

Atomwaffen »taktisch« einzusetzen, wäre nur möglich, wenn sich ihre Wirkung auf einen definierten Rahmen beschränken ließe. Das ist aber realitätsfern, wie diverse Studien belegen. Selbst ein regional begrenzter Einsatz, bei dem vergleichsweise wenige Sprengköpfe explodieren, hätte Folgen für den gesamten Planeten, so das Fazit dieser Arbeiten.

Die Ingenieurwissenschaftler Joshua Pearce von der Aalto-Universität (Finnland) und David Denkenberger von der Tennessee State University haben analysiert, wie sich ein nuklearer Angriff der USA auf einen bevölkerungsreichen Staat wie China auswirken würde. Die Wissenschaftler rechneten drei Szenarien durch: eine Attacke mit 7000, eine mit 1000 und eine mit 100 Sprengköpfen. Dabei gingen sie von extrem optimistischen Annahmen aus – etwa, dass keinerlei Gegenschlag erfolgt und der Aggressor nicht von radioaktivem Fallout betroffen ist. Sogar in diesem unrealistisch günstigen Fall müssten die USA mit hunderttausenden bis Millionen eigenen Toten rechnen, sobald mehr als 100 Bomben in China detonieren, so die Autoren. Denn der Ruß, der dann in die Atmosphäre gelangte, würde die Sonne verdunkeln, eine globale Abkühlung herbeiführen, die Ozonschicht schädigen, den Niederschlag reduzieren und die Nahrungsmittelproduktion um bis zu 20 Prozent einbrechen lassen, was weltweit Hungersnöte zur Folge hätte.

Drastische Ernteauffälle

Ein Team um die Atmosphärenforscherin Lili Xia von der Rutgers University kam zu ähnlichen Schlüssen. In Modellrechnungen zeigte es: Ein regionaler Atomkonflikt zwischen Indien und Pakistan, bei dem bis zu 100 Sprengköpfe explodieren, zöge eine globale Ernährungs- und Klimakrise nach sich. Es käme zu einem nuklearen Winter, der etwa in China – einem der weltgrößten Getreideproduzenten – die Reisernte um ein Drittel schrumpfen ließe, den Maisertrag um ein Fünftel und die Weizenpro-

duktion um die Hälfte. Die Ernten blieben mindestens zehn Jahre lang deutlich reduziert. Insgesamt wären eine Milliarde Menschen vom Verhungern bedroht.

Nicht nur die Landwirtschaft, auch die Fischerei hätte unter einem regionalen Atomkrieg schwer zu leiden. Das berichtet eine Arbeitsgruppe um die Umweltwissenschaftlerin Nicole Lovenduski von der University of Colorado. Die Forscher haben verschiedene Szenarien am Computer simuliert und festgestellt: Ein Nuklearkonflikt zwischen Indien und Pakistan würde die chemischen Verhältnisse in den Ozeanen verändern. Die Wassertemperaturen würden sinken, die pH-Werte nach kurzzeitigem Anstieg wieder fallen und die Löslichkeit von Kalziumkarbonat zunehmen. Schalenweich- und Krebstiere, Kalkalgen und Korallen hätten es dadurch schwerer, ihre Kalkschalen aufzubauen – mit mutmaßlich weit reichenden Konsequenzen für die marinen Ökosysteme.

Bei alledem ist noch nicht berücksichtigt, dass selbst ein begrenzter Kernwaffeneinsatz verheerende gesellschaftliche Auswirkungen hätte mit einer potenziell horrenden Zahl weiterer Opfer. Zu rechnen wäre mit schweren sozialen Unruhen, weltweiten Verteilungskämpfen beispielsweise um Nahrungsmittel, einer drastischen Zunahme von Kriegen und Terroranschlägen sowie unkontrollierbaren Flucht- und Migrationsbewegungen.

Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum«.

QUELLEN

Lovenduski, N. S. et al.: The potential impact of nuclear conflict on ocean acidification. *Geophysical Research Letters* 47, 2020

Pearce, J. M., Denkenberger, D.: A national pragmatic safety limit for nuclear weapon quantities. *Safety* 4, 2018

Xia, L. et al.: Decadal reduction of Chinese agriculture after a regional nuclear war. *Earth's Future* 3, 2015

Der Friedensforscher meint damit die Vorstellung eines »begrenzten nuklearen Konflikts«, wonach Feldschlachten mit Atombomben geführt werden könnten. Und das, so die Idee, ohne den vernichtenden Gegenschlag mit hunderten Interkontinentalraketen auszulösen, der während des Kalten Kriegs stets drohte. Doch niemand weiß, ob sich Atomkriege auf diese Weise begrenzen lassen – unter anderem deshalb nicht, weil unklar ist, was

taktische Atomwaffen eigentlich sind. »Das ist zunächst eine künstliche Kategorie«, sagt Neuneck.

Einen eindeutigen technischen Unterschied zwischen taktischen und strategischen Nuklearwaffen gibt es nicht. Erstere haben nicht grundsätzlich weniger Sprengkraft; zudem lässt sich bei modernen Atomsprengköpfen zwischen mehreren Explosionsstärken wählen. Etwa, indem man bei der Explosion kleine Mengen Fusions-

brennstoff einspritzt oder zusätzliche Neutronen zum Intensivieren der Kettenreaktion. Bei Wasserstoffbomben wiederum lässt sich die erste Stufe, in der die Kernspaltung stattfindet, von der Fusionsstufe trennen, so dass nur die schwächere Fission stattfindet.

Zwar kann man solche Waffen nach Art der Trägersysteme einteilen, aber nicht eindeutig. Am ehesten gelingt eine Unterscheidung mit Blick auf Interkontinentalraketen, die Städte in

tausenden Kilometer Entfernung treffen können. In einem Konflikt zwischen Nachbarstaaten wie Indien und Pakistan verschimmen diese Unterschiede allerdings: Dort können die gleichen Waffen sowohl Schlachtfelder als auch feindliche Einrichtungen erreichen.

Eine zentrale Rolle spielt die Nukleardoktrin eines Landes, das heißt die öffentlich erklärten Bedingungen, unter denen ein Land Atomsprengköpfe einsetzen würde. Bisher hat mit China lediglich ein Land kategorisch ausgeschlossen, als Erstes Atomsprengköpfe einzusetzen (»no first use«). Indien verfolgt eine ähnliche Politik – mit dem kleinen Unterschied, dass sich das Land vorbehält, auf chemische und biologische Angriffe nuklear zu reagieren. Bei dieser Doktrin spielen taktische Atomwaffen keine Rolle. Der erklärte Zweck des Kernwaffenarsenals ist Abschreckung in Form eines drohenden Gegenschlags auf das Territorium des Angreifers. Einen begrenzten nuklearen Konflikt gibt es in diesem Szenario nicht, und damit auch nicht die Option, Atombomben auf dem Schlachtfeld einzusetzen.

Genau andersherum ist die Situation in Pakistan. Dort spielen taktische Atomwaffen eine zentrale Rolle: Sie sollen in einem Konflikt mit Indien dessen konventionelle Überlegenheit ausgleichen. Rund ein Drittel des pakistanischen Nukleararsenals ist auf Kurzstreckenraketen mit nur einigen Dutzend Kilometer Reichweite verteilt, die bei einem indischen Einmarsch auf die vorrückenden Einheiten abgefeuert werden sollen, um sie zu stoppen.

Die sowjetische Staatsführung hatte sich 1982 ebenfalls zu »no first use« bekannt, nach dem Ende des Kalten Kriegs rückte Russland davon aber wieder ab. Seit dem Jahr 2010 behält sich der Staat vor, auf Attacken mit Massenvernichtungswaffen nuklear zu reagieren, ebenso wie auf konventionelle Angriffe, welche die staatliche Existenz gefährden. Dass Putin jetzt mit der Atommacht seiner Streitkräfte droht, widerspricht der erklärten Abschreckungspolitik seines Landes.

Die Nato-Staaten USA, Großbritannien und Frankreich behalten sich aus-

drücklich vor, konventionelle Angriffe auf Staatsgebiet der Verbündeten mit Nuklearschlägen zu beantworten. Das geht zurück auf Sowjetzeiten, als das Militärbündnis davon ausging, die zahlenmäßig überlegenen Truppen des Warschauer Pakts nur mit taktischen Atomwaffen besiegen zu können.

Nach dem Ende des Kalten Kriegs reduzierten die Atommächte die Bestände ihrer taktischen Waffen deutlich. Dieser Trend kehrt sich nun wieder um. Das zeigt sich nicht bloß darin, dass die betroffenen Staaten diese Kriegsgeräte und ihre Trägersysteme modernisieren. Mindestens ebenso wichtig ist, dass sich der politisch-militärische Diskurs verschiebt, weg von der nicht gewinnbaren Apokalypse und hin zu »begrenzten nuklearen Konflikten«.

»So etwas wie eine taktische Atomwaffe gibt es nicht«

James Mattis

Die Situation ist schwieriger geworden, da es inzwischen mehr Nuklearstaaten gibt und sich – mit Ende der bipolaren Konfrontation der Supermächte – komplexere Konflikte auf tun. »Es ist natürlich ein Unterschied, ob man Atomwaffen oder strategische konventionelle Waffen gegen einen Atomwaffenstaat oder einen Nichtatomwaffenstaat einsetzt«, sagt Neuneck. Der Überfall Russlands auf die Ukraine veranschaulicht das Problem. Dort kämpft ein Nuklearstaat gegen einen Nichtnuklearstaat – und es besteht (Stand: August 2022) zumindest die Möglichkeit, dass Russland verliert. Taktische Nuklearwaffen könnten in so einer Situation genutzt werden, um die Überlegenheit auf dem Schlachtfeld wiederherzustellen, ohne einen Gegenschlag befürchten zu müssen.

Im Falle Indiens und Pakistans droht sogar ein nuklearer Erstschlag. Denn indische Militärplanungen sehen im Kriegsfall rasche Vorstöße auf das feindliche Gebiet vor, die der Gegner

mit taktischen Atomwaffen kontern könnte. Die Entscheidung für den Kernwaffeneinsatz müsste dann sehr schnell erfolgen, womit die Chance eines verhängnisvollen Irrtums erheblich stiege.

Welche Dynamik solch ein Szenario annähme, ist völlig unklar. Der Einsatz eines nuklearen Sprengkopfs – egal wie kurz die Reichweite oder wie klein die Explosionswirkung – würde jeden Konflikt fundamental und unvorhersehbar verändern. »So etwas wie eine taktische Atomwaffe gibt es nicht. Jede Atomwaffe, die zu irgendeinem Zeitpunkt eingesetzt wird, ist ein strategischer Gamechanger«, sagte 2018 der damalige US-Verteidigungsminister James Mattis gegenüber dem Kongress.

Um die von taktischen Atomwaffen ausgehende Gefahr zu mindern, gibt es nur ein wirksames Rezept: Abrüstung. Die kommt derzeit aber nicht voran. »Die Presidential Nuclear Initiatives von 1991/1992 hat man nie in einem Vertrag niedergelegt, wahrscheinlich weil man sich damals nicht einigen konnte«, sagt Neuneck. Es habe immer wieder Initiativen gegeben, diese Waffen in die Rüstungskontrolle einzubeziehen, unter anderem von deutschen Außenministern. Das sei auf Grund der üblichen, wechselseitigen Vorwürfe jedoch nicht passiert. »Das Thema ist vertagt – ad infinitum.« ◀

Lars Fischer ist Redakteur bei »Spektrum.de«.

QUELLEN

Arms Control Association: The Presidential Nuclear Initiatives (PNIs) on tactical nuclear weapons at a glance. 2017. <https://www.armscontrol.org/factsheets/pnigance>

Kristensen, H.M., Korda, M.: Russian nuclear weapons. Bulletin of the Atomic Scientists 78, 2022

Kristensen, H.M., Korda, M.: Tactical nuclear weapons. Bulletin of the Atomic Scientists 75, 2019

Jordan, J.K.: Limited nuclear war: The 21st century challenge. Livermore Papers on Global Security 4, 2018. http://jar2.com/Files/Nuclear/Limited_Nuclear_War.pdf



GAFFANINI / GETTY IMAGES / ISTOCK

POLYMERCHEMIE PASSGENAUE ENZYME FÜR DAS KUNSTSTOFFRECYCLING

Bislang ließen sich die wenigsten Gegenstände aus PET zu hochwertigen Materialien wiederverwerten, die zum Verpacken von Lebensmitteln geeignet sind. Ein neu entdecktes Enzym könnte das ändern.

Wir nutzen Kunststoffe für alle denkbaren Konsumgüter und Verpackungen. Derweil verschmutzen Kunststoffabfälle zunehmend Land und Ozeane. Im Prinzip ließe sich das Plastikmüllproblem durch Recycling vermeiden. Viele Kunststoffprodukte sind dafür jedoch nicht konzipiert. Daher entsteht durch das Schmelzen und Wiederaufbereiten der Rohstoffe beim Recyclingprozess meist ein Material, das im Vergleich zum ursprünglichen minderwertig ist.

Theoretisch lassen sich Gegenstände, die überwiegend aus einem einzigen Polymer bestehen, in die molekularen Bausteine zerlegen, aus denen das Polymer ursprünglich zusammengesetzt wurde (die Monomere). Das funktioniert beispielsweise bei dem weit verbreiteten Verpackungskunststoff Polyethylenterephthalat (PET). Anschließend werden die Monomere gereinigt und wieder zu einem neuen Kunststoff polymerisiert – ein geschlossener Kreislauf.

Die gängigen chemischen Verfahren zur Depolymerisation brauchen

große Mengen an Energie, Basen und Säuren. Weder wirtschaftlich noch ökologisch sind sie daher sonderlich sinnvoll. Das Problem lässt sich lösen, wenn man Enzyme einsetzt, die das Plastik abbauen. Leider mangelt es aber bisher an Enzymen, die so aktiv sind, dass sie Kunststoffe im industriellen Maßstab depolymerisieren können. Eine Forschungsgruppe um Hongyuan Lu von der University of Texas in Austin (USA) hat jetzt jedoch ein Enzym so verändert, dass es PET schneller und effizienter in seine Bestandteile zerlegt. Die Vision eines geschlossenen Kreislaufs für PET-Produkte rückt damit in greifbare Nähe.

Eine große Vielfalt an Verpackungen wird aus PET hergestellt, etwa Schalen, Becher und Blisterverpackungen. Die Nachfrage nach transparentem, für Lebensmittelverpackungen geeignetem Recycling-PET (rPET) ist in den letzten 20 Jahren stark gestiegen. Das rPET mit der höchsten Qualität erhält man aus Getränkeflaschen, die über Pfandsysteme gesammelt werden, denn diese Flaschen sind für die

BERG AUS PLASTIK Zum Recyceln gesammelte Plastikflaschen. Während man bei der Wiederverwertung von Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) hochwertiges PET erhält, muss man bei anderen Produkten aus dem Material qualitative Abstriche machen. Fortschritte sind jetzt in Sicht.

Wiederverwertung konzipiert, und die Sammelmethode verhindert Sortierfehler. Immer mehr Länder führen solche Pfandsysteme ein, so dass weltweit stetig mehr hochwertiges rPET produziert wird.

Weil das jedoch nicht ausreicht, um den Bedarf zu decken, ist es essenziell, auch die anderen PET-Verpackungen zu sammeln und aus ihnen wieder transparentes rPET herzustellen, das für Lebensmittel geeignet ist. Um die erforderliche Qualität des Materials zu erreichen, gibt verschiedene Ansätze. Einige Unternehmen verarbeiten beispielsweise Schalen, die speziell für das Recycling entwickelt wurden, also neben PET keine weiteren Polymere enthalten. Andere haben chemische Recyclingverfahren entwickelt, wie etwa die Depolymerisation, Filtration und Repolymerisation farbiger PET-Flaschen. Beide Rohstoffe stehen aber nicht in großer Menge zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu sind gesammelte und sortierte PET-Schalen in zunehmenden Mengen kostenlos in verschiedenen europäischen Ländern

Weitere Wege zum PET-Abbau

Das berühmteste PET abbauende Enzym ist wohl die PETase. 2016 haben japanische Wissenschaftler es in Bakterien in der Nähe eines Recyclingbetriebs für Plastikflaschen aufgespürt. Jetzt hat eine Forschungsgruppe um Bhumrapee Eiamthong vom Vidyasirimedhi Institute of Science and Technology in Thailand ein weiteres Enzym aufgespürt, das den Kunststoff zersetzen kann, und zwar an einem viel weniger exotischen Ort: im menschlichen Speichel.

Wo Kunststoffe gehäuft vorkommen, so der Grundgedanke, bilden sich früher oder später Mikroorganismen aus, die ihren Stoffwechsel an die neue Nahrungszufuhr angepasst haben. Solchermaßen spezialisierte Enzyme könnten auch Mikroben im menschlichen Verdauungstrakt entwickelt haben, vermutete das Forschungsteam um Eiamthong. Denn weil viele unserer heutigen Lebensmittelverpackungen aus PET bestehen, sind wir dem Polymer ständig ausgesetzt.

Um geeigneten Kandidaten auf die Spur zu kommen, durchforsteten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Datenbanken mit der Gesamtheit des Erbguts der Mikroorganismen im menschlichen Verdauungstrakt.

Und sie wurden fündig: Sie entdeckten eine neue PET-Hydrolase, also ein Enzym, das PET hydrolytisch spaltet, und nannten sie MG8. Das Enzym gehört zu den gramnegativen Bakterien, die sich im menschlichen Speichel ansiedeln können. Diese Bakterien ähnelten genetisch wiederum solchen Stämmen, die in der Nähe der riesigen Plastikstrudel in den Ozeanen gefunden wurden und die ebenfalls Enzyme zur PET-Spaltung besitzen, schreibt das Autorenteam.

Einen gänzlich anderen Weg, PET abzubauen, wählte eine internationale Forschungsgruppe um Yufang Wu von der South China University of Technology in Guangzhou. Statt durch ein Enzym zerlegte es das Polymer mit Hilfe einer so genannten metallorganischen Gerüstverbindung namens UiO-66. Darin sind Zirkoniumatome über organische Verbindungsmoleküle dreidimensional zu einem gleichmäßigen, porösen Netzwerk verknüpft. In ihrer Anwesenheit zersetzte sich PET aus gebrauchten Getränkeflaschen in 24 Stunden zu Terephthalsäure und Monomethylterephthalat – beides Bausteine, aus denen sich das Polymer wieder zusammensetzen lässt. Mit 98 Prozent Ausbeute geht auch hier fast kein Material verloren. Die Reaktion läuft an den Metallzentren ab; die Porengröße bestimmt, welche Moleküle dorthin vordringen und wieder hinausgelangen können.

UiO-66 lässt sich einfach und günstig in großen Mengen herstellen und hat daher Potenzial für die industrielle Anwendung. Dabei verändert der Katalysator während der Reaktion seine Struktur und wandelt sich durch Einlagerung von Terephthalsäure-Molekülen (einem Grundbaustein von PET) in MIL-140A um, eine andere metallorganische Gerüstverbindung, welche die PET-Zerlegung ebenfalls katalysiert. Sie ist dabei zwar nicht ganz so effizient wie UiO-66, bleibt dafür aber während mehrerer aufeinander folgender Katalysezyklen stabil und lässt sich daher problemlos wiederverwenden. Außerdem arbeitet sie auch mit gefärbtem PET sowie in Anwesenheit anderer Kunststoffe wie Polyethylen oder Polypropylen gleich bleibend gut.

Verena Tang ist Redakteurin bei »Spektrum.de«.

verfügbar – mitunter werden Betriebe, die diesen Abfall wiederverwerten, dafür sogar bezahlt. Solcher PET-Abfall besteht aus einer Mischung von Schalen und anderen Lebensmittelverpackungen sowie Bechern, Schalen und Blisterverpackungen. Die am häufigsten verwendeten PET-Schalen nutzt man für unter Schutzatmosphäre verpacktes Fleisch, Fisch und Käse. Die PET-Folie trägt dabei zusätzlich eine Schicht aus Polyethylen.

Diese ist wichtig für die Lebensmittelsicherheit, denn sie ermöglicht es, die Packung schnell und zuverlässig zu versiegeln. Sie erschwert jedoch das mechanische Recycling, weil sie sich während des Vorgangs mit dem

transparenten PET zu einem undurchsichtigen Gemisch verbindet. Zwar lassen sich daraus ebenfalls noch Schalen herstellen, aber nicht das am häufigsten nachgefragte transparente rPET in Lebensmittelqualität.

Versuche, sortierte PET-Schalen mit Hilfe chemischer Verfahren zu recyceln, waren bisher erfolglos. Bei einem solchen Vorgehen – einem Prozess namens Verseifung – kocht man den Kunststoff üblicherweise bei 195 Grad Celsius in Ethylenglykol zusammen mit alkalischen Katalysatoren. Allerdings gelieren Rückstände von anderen Materialien (etwa Polyethylen, Druckfarben oder Etiketten) im siedenden Ethylenglykol, was die Filtration und

Weiterverarbeitung des verseiften PETs behindert.

Recycling mit Hilfe des enzymatischen Abbaus von PET könnte dieses Problem lösen. Es wurden bereits Enzyme und Mikroorganismen entdeckt, die den Kunststoff in seine molekularen Bestandteile zerkleinern, darunter ein viel versprechendes Bakterium, das mit einigen verschiedenen Enzymen arbeitet. Das funktionierte bislang aber nur für biegsame PET-Folien. Enzyme können diese amorphen PET-Formen verarbeiten. Sobald das Material jedoch einen gewissen Grad an Härte aufweisen soll, muss es auch kristalline Anteile besitzen, und diese ließen sich bisher



SPRINGER'S EINWÜRFE WIE WIR ZUSAMMENFINDEN

Wo deutliche Unterschiede zwischen Arm und Reich herrschen, hängen Aufstiegschancen vom Grad der sozialen Durchmischung ab.

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

» spektrum.de/artikel/2049321

Die Welt, in die Kinder hineinwachsen, ist von sozialen Unterschieden geprägt. Wer das Glück hat, aus »guten Verhältnissen« zu stammen, hat es in der Regel später leichter als jemand, der mit dem Stigma der Armut aufwächst. Lässt sich unter diesen Bedingungen überhaupt annähernde Chancengerechtigkeit herstellen?

Kein Mensch ist eine Insel. Um die individuelle Verbundenheit mit anderen Menschen zu charakterisieren, hat der französische Soziologe Pierre Bourdieu (1930–2002) den Begriff des sozialen Kapitals geprägt. Wer im Lauf seines Lebens Freunde gewinnt, kollegiale Kontakte oder geschäftliche Beziehungen knüpft, der akkumuliert soziales Kapital – und je nachdem wachsen seine Aussichten auf privaten und beruflichen Erfolg.

Nur: Wie lässt sich das quantifizieren? Für Kapital im üblichen Sinn bildet sein Geldwert die Messgröße. Bloß wie misst man den Grad gesellschaftlicher Verbundenheit?

Den Versuch hat ein US-Team um den Stanford-Wirtschaftswissenschaftler Raj Chetty unternommen. Als Datenbasis dienten 21 Milliarden »Freundschaften«, die gut 72 Millionen Menschen in den USA auf dem sozialen Netzwerk Facebook eingegangen waren. Die Forscher analysierten die Verbindungen nach dem Vernetzungsgrad (inwiefern sind die Freunde des Nutzers wiederum untereinander befreundet), nach dem ehrenamtlichen Engagement der Einzelnen sowie nach der Messgröße der »ökonomischen Verbundenheit« (*Nature 608*, S. 108–121, 2022).

Das letztere Kriterium erwies sich als entscheidend. Es drückt das Ausmaß aus, in dem eine wohlhabende Person mit ärmeren Menschen befreundet ist oder umgekehrt. Es heißt ja nicht ohne Grund: Gleich und Gleich gesellt sich gern. Jemand, der – um Soziologendeutsch zu gebrauchen – über einen gehobenen sozioökonomischen Status verfügt, tauscht sich vorzugsweise mit seinesgleichen aus, und für finanziell schwächer Gestellte gilt sinngemäß dasselbe.

Gäbe es von dieser Regel keine Ausnahmen, dann wäre die Ungleichheit zementiert. Die Chance, dass eine gewisse soziale Mobilität herrscht und wenigstens ansatzweise eine Durchmischung der Einkommensschichten stattfindet, hängt somit von der Größe der ökonomischen Verbundenheit im oben definierten Sinn ab.

Nachdem Chettys Team im ersten Teil der Untersuchung dieses Ergebnis gesichert hatte, fragte es sich in einem zweiten Artikel: Was prägt den schichtenübergreifenden Austausch? Wie kann man ihn fördern (*Nature 608*, S. 122–134, 2022)?

Den analysierten Facebook-Daten zufolge stößt die Durchmischung auf zweierlei Hindernisse: institutionelle und habituelle. Zum einen sind manche Einrichtungen an sich sozial weniger durchlässig als andere. Die Auswertung für die USA bescheinigt beispielsweise den Kirchen, egalitärer zu sein als Schulen in gut situierten Stadtvierteln. Ähnliches ließe sich wohl für Europa über Vereine und Parteien sagen, in denen jeder und jede, ob arm ob reich, gleichermaßen willkommen ist – zumindest auf den ersten Blick.

Denn wie die Forscher finden, trägt der Schein. Selbst wenn die Institution von sich aus keine Barrieren aufstellt, etablieren sich in ihr die in der Gesamtgesellschaft üblichen Gegensätze, und anstatt dass über Einkommensgrenzen hinweg neue Freundschaften entstehen, gesellt sich drinnen wie gehabt Reich zu Reich und Arm zu Arm.

Die ökonomische Verbundenheit steigt nicht von selbst, betonen die Autoren der Studie. Zum Beispiel sollten Schulen gezielt Lehrer aus unterprivilegierten Schichten einsetzen und Stadtplaner Wohnbezirke entwerfen, die weder Slumbildung noch Gentrifizierung zulassen. Und Politiker sollten Begegnungen zwischen Menschen organisieren, die normalerweise kaum ein Wort miteinander wechseln.

Neugierig auf morgen?



Jeden
Monat
neu!

Tipp:

**SCHNELLER SCHLAU –
ein Podcast von P.M.**

Jetzt bei **Audio Now** und überall wo es Podcasts gibt.





ZWIEGESTALTIG Gebirgs-Schauelfußkröten, die amerikanische Wüsten besiedeln, laichen dort oft in kurzlebigen Regenwasserpfützen (großes Bild) ab. Ihre Kaulquappen treten üblicherweise als oval geformte Allesfresser in Erscheinung (im kleinen Bild links). Frisst eine solche Kaulquappe aber Fleisch, nimmt sie die Gestalt eines Karnivoren an (im kleinen Bild rechts) – ein Beispiel für phänotypische Plastizität.



EVOLUTION JENSEITS DER GENE

Lebewesen werden nicht ausschließlich von ihren Erbanlagen gesteuert, sondern verändern ihr Erscheinungsbild auch infolge von Umwelteinwirkungen. Das verschafft ihnen Flexibilität, um sich an wechselnde Umgebungen anzupassen – und spielt vermutlich eine große Rolle in der Evolution.



David Pfennig arbeitet als Professor für Biologie an der University of North Carolina, Chapel Hill. Er hat mehrere Sachbücher über die Evolution verfasst und einschlägige Beiträge in zahlreichen Pressemedien publiziert.

» [spektrum.de/artikel/2049306](https://www.spektrum.de/artikel/2049306)



DAVID PFENNIG

VERWANDLUNGSKÜNSTLER Die Kaulquappen der Schaufelfußkröten verändern ihre Gestalt und ihr Verhalten, je nachdem welche Nahrung sie bekommen, und eignen sich daher zum Untersuchen der phänotypischen Plastizität.

► Bekommen Rotwangen-Schmuckschildkröten (*Trachemys scripta elegans*) Nachwuchs, wird es spannend.

Dessen Geschlecht hängt nämlich davon ab, wohin die Weibchen ihre Eier legen. Deponieren sie ihr Gelege an schattigen und kühlen Plätzen, schlüpfen männliche Tiere; platzieren sie es hingegen an sonnigen und warmen Orten, gehen daraus Weibchen hervor.

Bei Gebirgs-Schauelfußkröten (*Spea multiplicata*) bestimmt dagegen die Nahrung darüber, welche Gestalt sie annehmen und wie sie sich verhalten. Ihre Kaulquappen fressen zumeist Algen und Planktonorganismen – und treten dann als gesellige, langsam schwimmende Allesfresser mit schmalem Kopf auf. Erbeuten sie jedoch kleine Krebstiere, entwickeln sie sich zu einzelgängerischen, wuchtigen und schnellen Fleischfressern. Wilde Rettichpflanzen wiederum, die von Kohlweißlingraupen befallen werden, fahren binnen weniger Stunden ihre Produktion von Abwehrstoffen drastisch hoch und halten die Larven so auf Abstand.

In allen drei Beispielen entwickeln Lebewesen unabhängig von ihrem Erbgut unterschiedliche Merkmale, je nachdem, welche Umweltfaktoren – Temperatur, Nahrungsangebot, Fressfeinde – auf sie wirken. Anders ausgedrückt: Die Umgebung prägt in diesen Fällen das Erscheinungsbild (den »Phänotyp«) des Organismus. Wir haben es hier mit der so genannten phänotypischen Plastizität zu tun, dem Variieren des Erscheinungsbilds je nach äußeren Einwirkungen.

Biologen interessieren sich zunehmend für dieses Thema, weil es zentral für das Bemühen ist, die Evolution des Lebens zu verstehen. Wie neuere Forschungsergebnisse zeigen, entstehen fast alle Eigenschaften eines Organismus aus dem Zusammenspiel von Genen und Umweltfaktoren; umweltbedingte Veränderungen des Erscheinungsbilds werden manchmal an die Nachkommen weitergegeben; und die phänotypische Plastizität beschleunigt und verändert mitunter die stammesgeschichtliche Entwicklung.

Warum und inwieweit sich die Mitglieder ein und derselben Spezies in ihren Merkmalen unterscheiden, ist eine Kernfrage der Biologie. So befassen sich die ersten beiden

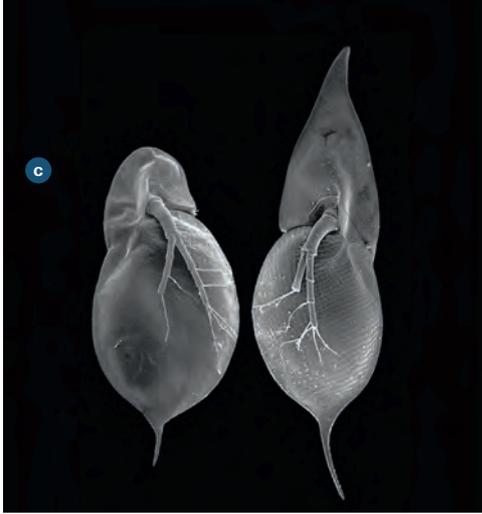
AUF EINEN BLICK UNTERSCHÄTZTE FLEXIBILITÄT

- 1 Phänotypische Plastizität liegt vor, wenn Umwelteinflüsse zu deutlichen Unterschieden im Erscheinungsbild eines Individuums führen. Sie ist allgegenwärtig.
- 2 Inwiefern sie an evolutionären Prozessen mitwirkt, ist unklar. Sie könnte helfen, das Fortbestehen von Populationen zu fördern und versteckte genetische Varianten aufzudecken.
- 3 Das derzeitige Theoriegebäude der Evolutionsbiologie weist Umwelteinflüssen möglicherweise nicht genügend Bedeutung zu, indem es die Rolle der Plastizität zu wenig anerkennt.



Kapitel von Charles Darwins berühmtem Werk »Über die Entstehung der Arten« ausschließlich mit den Ursachen dieser Variabilität. Darwin (1809–1882) hielt es für entscheidend, das zu klären. Er hatte verstanden, dass Variation – neben Fortpflanzung und Vererbung – erforderlich ist, damit es zu einer Entwicklung durch natürliche Auslese kommt. Diese bringt dann an die Umwelt angepasste Merkmale hervor, wie sie für Lebewesen typisch sind. Bis an sein Lebensende rang der Naturforscher um eine Erklärung, wie die Variation entstehe. Kurz vor seinem Tod schrieb er: »Es gibt in der Biologie kaum eine wichtigere Frage als die nach der Natur und der Ursache der Variabilität.«

Ironischerweise hatte fast zwei Jahrzehnte bevor Darwin diese Worte verfasste, ein weithin unbekannter mährisch-österreichischer Priester eine kurze Abhandlung veröffentlicht, die genau dieses Problem betraf und wichtige Hinweise lieferte, wie Variation entsteht. In jener Arbeit zeigte Gregor Mendel (1822–1884), dass Eltern unsichtbare Informationsträger an ihre Nachkommen weitergeben, die deren Eigenschaften vorhersagbar beeinflussen. Mendels Aufsatz wurde zunächst ignoriert, geriet aber im Jahr 1900 in den Fokus, als Wissenschaftler binnen weniger Monate unabhängig voneinander mehrere Studien durchführten, die seine Aussagen bestätigten. Kurz darauf gab der dänische Biologe Wilhelm Johannsen (1857–1927) den mendelschen Erbfaktoren einen Namen: Gene. Die Disziplin, die sich mit ihnen befasst, erlebte im 20. Jahrhundert einen enormen



WAS UMWELTEINFLÜSSE BEWIRKEN Veränderungen der Umgebungstemperatur und der Tageslänge lassen den Kreuzblütler *Moricandia arvensis* unterschiedliche Blüten hervorbringen **a**. Bei Spitzmäusen **b** schrumpft das Gehirn im Winter, so dass es weniger Energie benötigt. Wasserflöhe **c** bilden entweder normale (links) oder, wenn Fressfeinde in der Nähe sind, behelmschirmartige Formen (rechts). Die Ernährung bestimmt darüber, ob männlichen Mistkäfern Hörner wachsen **d** oder nicht. Alpenschneehühner ändern die Farbe ihres Federkleids jahreszeitenabhängig **e**.

Aufschwung und prägte bald den Blick auf evolutionäre Vorgänge. In den 1930er und 1940er Jahren verschmolzen Darwins Ideen mit der Genetik und weiteren Fachgebieten zur so genannten Synthetischen Evolutionstheorie, die heute noch gängig ist. Die Erbanlagen gelten mittlerweile als Faktoren, die maßgeblich darüber bestimmen, welche Merkmale ein Organismus hervorbringt.

Wie die obigen Beispiele jedoch zeigen, geben nicht Gene allein die Eigenschaften eines Individuums vor. Als Johannsen ihren Namen prägte, entwickelte er zugleich die Begriffe »Genotyp« für die genetische Ausstattung eines Organismus und »Phänotyp« für dessen Erscheinungsbild, sprich seine morphologischen und physiologischen Merkmale sowie sein Verhalten. Letzterer, betonte Johannsen, entstehe im Zusammenspiel zwischen Genen und Umwelt. Etwa zur gleichen Zeit führte der schwedische Biologe Herman Nilsson-Ehle (1873–1949) den Begriff »phänotypische Plastizität« ein. Darunter verstehen wir heute die Fähigkeit eines Organismus (beziehungsweise Genotyps), in Reaktion auf wechselnde Umweltbedingungen unterschiedliche Phänotypen hervorzubringen.

Wie passt die phänotypische Plastizität zur verbreiteten Auffassung, das Erscheinungsbild eines Lebewesens sei vorrangig das Produkt seines Genotyps? Diese Frage beschäftigt mich seit mittlerweile drei Jahrzehnten. Empirisch untersuche ich sie mit Hilfe verschiedener Ansätze, vor allem anhand der erwähnten Schaufelfußkröten. Die Arbeiten meines Teams und vieler anderer Arbeitsgruppen

deuten darauf hin, dass phänotypische Plastizität die evolutionäre Weiterentwicklung entscheidend fördern könnte. Sie in die moderne Evolutionstheorie einzubeziehen, dürfte helfen, zahlreiche komplexe Phänomene zu erklären – vom Entstehen neuer Merkmale bis hin zur Frage, wie Organismen in sich schnell wandelnden Umwelten überleben können.

Andere Umwelt, andere Merkmale

Phänotypische Plastizität ist untrennbar mit evolutionären Prozessen verknüpft. Lebewesen – von Bakterien bis hin zu Säugern – reagieren auf Veränderungen ihrer Umwelt mit einer Änderung ihrer Eigenschaften. Das geschieht manchmal sehr auffällig, wie bei den oben beschriebenen Schildkröten und Kaulquappen. Oft jedoch findet es nur auf molekularer Ebene statt und lässt sich auf den ersten Blick nicht erkennen. Forschungsarbeiten der zurückliegenden zehn Jahre haben gezeigt, dass die Umgebungsbedingungen häufig beeinflussen, wie aktiv einzelne Gene sind – wie sehr also der Organismus bestimmte genetische Bauanleitungen in Proteine übersetzt. Umweltbedingte Veränderungen der Genaktivität ermöglichen es Lebewesen, die Produktion von Eiweißen hochzufahren, die in der jeweils aktuellen Situation benötigt werden. Bei praktisch allen Spezies lässt sich beobachten, dass Genaktivitäten von äußeren Bedingungen abhängen – ein starker Hinweis darauf, dass phänotypische Plastizität allgegenwärtig vorkommt.

(C) ABRANVA, A. ET AL. - TRANSGENERATIONAL INDUCTION OF DIFFERENCES IN ANIMALS AND PLANTS. NATURE 01. 1998. FIG. 2. NUTZUNG: GENEHMIGT VON SPRINGER NATURE / CCC: (D) CSIRO / IAN WALKER / SCIENCEIMAGE / CSIRO / IMAGE / IAN WALKER / CCC: BY 3.0 / (E) CREATIVE COMMONS / ORG / LICENSES / BY / SA / 4.0 / (F) J. H. HANSEN / HANSEN / COMMONS / WIKIMEDIA / ORG / WIKI / FILE / ROCK, PHARMACAN, LAGOPUS, MITAI, JRG / CC BY-SA 3.0 / (G) CREATIVE COMMONS / ORG / LICENSES / BY / SA / 4.0 / (H) LEGALCODEI



FOTOLIA / HLPHOTO

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Warum ist das so? Zunächst einmal bietet eine flexible Ausprägung des Phänotyps manche Vorteile. Sie kann zwar eine unvermeidbare Folge chemischer oder physikalischer Einwirkungen und dann schädlich sein; beispielsweise führt eine schlechte Ernährung bei den meisten Organismen zu verkümmertem Wachstum. Viele Formen der Plastizität erhöhen aber die evolutionäre Fitness eines Individuums. Ein Beispiel hierfür ist die eingangs erwähnte Abwehrreaktion wilder Rettichpflanzen nach Raupenbefall.

Von Dauer ist nur der Wandel

Natürliche Umgebungen variieren sowohl zeitlich als auch räumlich. Zudem sieht sich praktisch jeder Organismus im Lauf seines Lebens mit Umweltschwankungen konfrontiert, etwa wenn er einem Wechsel der Jahreszeiten ausgesetzt ist oder sich in verschiedenen Biotopen bewegt. Diese Änderungen bergen zumeist ein Risiko, da sie zu einer schlechteren Übereinstimmung zwischen Phänotyp und Umwelt führen. Zwar kann die natürliche Selektion den Einklang wieder verbessern, aber nur von einer Generation auf die nächste. Folglich hinkt die »natürliche Zuchtwahl« immer mindestens eine Generation hinterher, wenn es darum geht, auf eine sich schnell wandelnde Umwelt zu reagieren. Phänotypische Plastizität hingegen erlaubt Änderungen des Erscheinungsbilds innerhalb ein und derselben Generation und kann daher mit raschen Umweltveränderungen besser Schritt halten. Vermutlich erklärt das, warum sie sich überall beobachten lässt.

Nicht alle Arten – und nicht sämtliche Merkmale innerhalb einer Spezies – zeigen sich gleichermaßen formbar. Einige hängen stärker von Umgebungsfaktoren ab, können sich also besser anpassen, bei anderen ist das weniger der Fall. Zudem können Variationen kontinuierlich oder diskret (abgestuft) auftreten. Welche Bedingungen begünstigen ein hohes beziehungsweise niedriges Maß an Plastizität, und was entscheidet ihre Form?

Evolutionstheoretiker wie Samuel Scheiner von der U.S. National Science Foundation haben mathematische Modelle entwickelt, um diese Fragen zu untersuchen. Laut den Ergebnissen entwickelt sich ein hoher Grad an Plastizität, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind: 1) Die Vorteile phänotypischer Plastizität überwiegen ihre Nachteile; 2) es existiert eine hinreichende genetische Variation, die Veränderungen des Erscheinungsbilds ermöglicht; 3) der Organismus ist wechselnden Umweltbedingungen ausgesetzt; 4) es gibt kein festes Merkmal, das unter allen Bedingungen, mit denen ein Individuum konfrontiert sein kann, optimal abschneidet; und 5) Individuen können die relevanten Umgebungsfaktoren verlässlich registrieren.

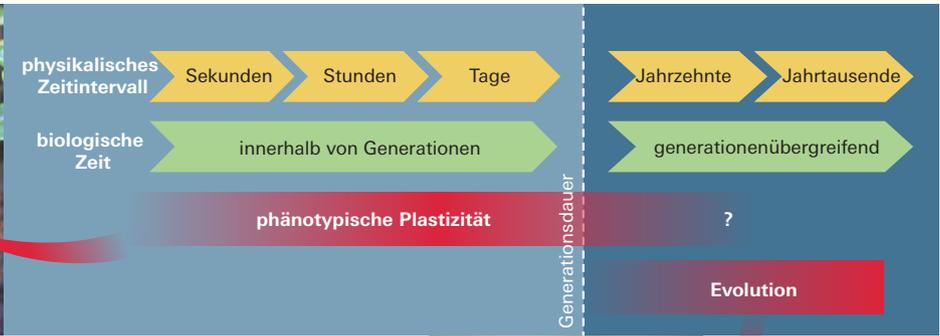
Ist dies bei Arten, die ein hohes Maß an Plastizität zeigen, tatsächlich gegeben? Forscherinnen und Forscher untersuchen seit Jahrzehnten, mit welchen Kosten es für Organismen einhergeht, phänotypische Plastizität zu zeigen – und finden meist keine bedeutsamen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Vorteile eines variablen Erscheinungsbilds üblicherweise seine Nachteile überwiegen (Bedingung 1). Zudem hat der Ökologe Anthony Bradshaw (1926–2008) in einer bahnbrechenden Arbeit der 1960er Jahre aufgezeigt, dass sich verschiedene Genotypen meist darin unterscheiden, welche Reaktionen auf Umweltwirkungen sie dem Organismus erlauben. Das bedeutet, es sollte üblicherweise genügend genetische Variation vorhanden sein, um ein variables Erscheinungsbild zuzulassen (Bedingung 2).

Für die verbleibenden drei Punkte kann man die umweltabhängige Festlegung des Geschlechts näher betrachten – eine häufige Form der Plastizität, bei der die Umgebung, in der sich ein Individuum entwickelt, seinen Sexus vorgibt. Gemäß der oben umrissenen Theorie sollte sie eintreten, wenn die betroffenen Organismen wechselnden äußeren Bedingungen unterworfen sind (Bedingung 3); wenn das jeweilige Umfeld sich unterschiedlich auf die Fitness von Männchen und Weibchen auswirkt (Bedingung 4) und wenn Individuen die relevanten Umweltfaktoren wahrnehmen (Bedingung 5).

Dass dem in der Tat so ist, haben Studien an verschiedenen Spezies belegt. Eine davon befasst sich mit dem Flohkrebs *Gammarus duebeni*, der in Sümpfen der gemäßigten Breiten vorkommt. Bei dieser Art wird das Geschlecht durch die Tageslänge determiniert, wobei Männchen bevorzugt in der frühen Paarungszeit entstehen, wenn die Tage kürzer sind, und Weibchen vorzugsweise in einer späteren Phase mit einer großen Spanne zwischen Sonnenauf- und -untergang. Die Männchen erscheinen somit eher und haben mehr Zeit zum Wachsen; sie profitieren von einem imposanten Leib stärker als die Weibchen; und der Organismus der Flohkrebse ist in der Lage, die Tageslänge zu registrieren. Zusammengenommen macht das die umweltabhängige Festlegung des Geschlechts bei dieser Art zu einer vorteilhaften Anpassung, was erklärt, warum sie sich durchgesetzt hat.

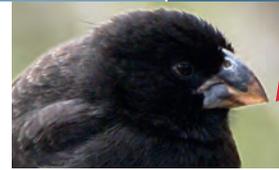
Sobald phänotypische Plastizität vorliegt, kann sie Merkmalsvariationen hervorbringen, die kontinuierlich oder diskret verteilt sind. Der erste Fall tritt häufiger ein und erlaubt es Lebewesen, ihre Reaktion auf Umweltwirkungen fein abzustimmen. So entwickeln Kaulquappen vieler Froscharten in Gegenwart von Raubtieren

Phänotypische Plastizität ermöglicht Anpassung innerhalb ein und derselben Generation

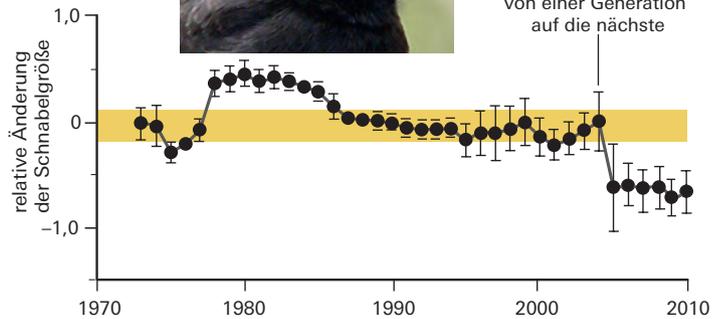


Plastische Reaktion bei der Venusfliegenfalle: Die Blätter schließen sich innerhalb von 40 Millisekunden, sobald ein Umweltstimulus die Fühlborsten triggert.

SCHNELLE ANTWORT, LANGSAME ANTWORT
Phänotypische Plastizität ermöglicht es Organismen, bereits innerhalb ihrer Lebenszeit auf Umwelteinflüsse zu reagieren. Evolution, die auf genetischen Änderungen basiert, erlaubt solche Reaktionen hingegen nur von einer Generation auf die nächste. Mitunter geben Lebewesen phänotypische Veränderungen, die sie durch Plastizität erlangt haben, an ihre Nachkommen weiter.



Schnelle Evolution bei Grundfinken der Galapagosinseln: von einer Generation auf die nächste



leistungsfähigere Ruderschwänze, was ihr Überleben verbessert. Der Schwanz ist dabei umso größer, je höher das Risiko ist, erbeutet zu werden. Liegt hingegen eine diskontinuierliche Merkmalsausprägung vor, sprechen Fachleute von Polyphänismus. Beispiele hierfür sind umweltabhängig festgelegte Geschlechter, Kasten bei sozialen Insekten oder saisonal wechselnde Erscheinungsbilder. Polyphänismus entwickelt sich vermutlich aus kontinuierlich variierenden Phänotypen, wenn die natürliche Selektion einige ihrer Ausprägungen begünstigt, die jeweils an spezifische Umgebungsbedingungen angepasst sind.

Die Selektion kann phänotypische Plastizität nicht nur verstärken, sondern ebenso verringern. Dabei entwickeln Merkmale sich so, dass sie weniger auf Umweltveränderungen reagieren – in manchen Fällen so weit, dass ihre Variabilität verschwindet. Dazu kommt es, wenn eine der fünf oben genannten Bedingungen nicht mehr zutrifft. Wird eine zuvor plastische Eigenschaft zu einer fixierten, spricht man von genetischer Assimilation. Dieses Phänomen hat erstmals der Genetiker Conrad Waddington (1905–1975) in den 1950er Jahren mittels Laborexperimenten nachgewiesen. Mittlerweile kennen wir zahlreiche Beispiele aus natürlichen Populationen. Der Grad der Plastizität kann sich somit evolutionär verändern.

Biologen rätseln schon seit Langem, wie phänotypische Plastizität das Evolutionsgeschehen beeinflusst. Viele sind der Meinung, sie sei eher hinderlich, falls sie überhaupt eine Rolle spiele. Denn wenn ein einziger Genotyp als Reaktion auf wechselnde Umweltbedingungen mehrere verschiedene Phänotypen hervorbringen kann, sind genetische Veränderungen weniger notwendig, um sich an neue Umstän-

de anzupassen. Plastizität sollte daher – so die vorherrschende Meinung – die natürliche Selektion ein Stück weit aushebeln.

Andere Fachleute stellen die gegenteilige Hypothese auf. Die renommierte Evolutionsbiologin Mary Jane West-Eberhard vom Smithsonian Tropical Research Institute beispielsweise argumentiert, dass »die meisten evolutionären Veränderungen des Phänotyps mit umweltbedingten Abwandlungen des Erscheinungsbilds beginnen ... Gene sind Mitläufer oder Nachfolger der phänotypischen Evolution, nicht notwendigerweise ihre Anführer«.

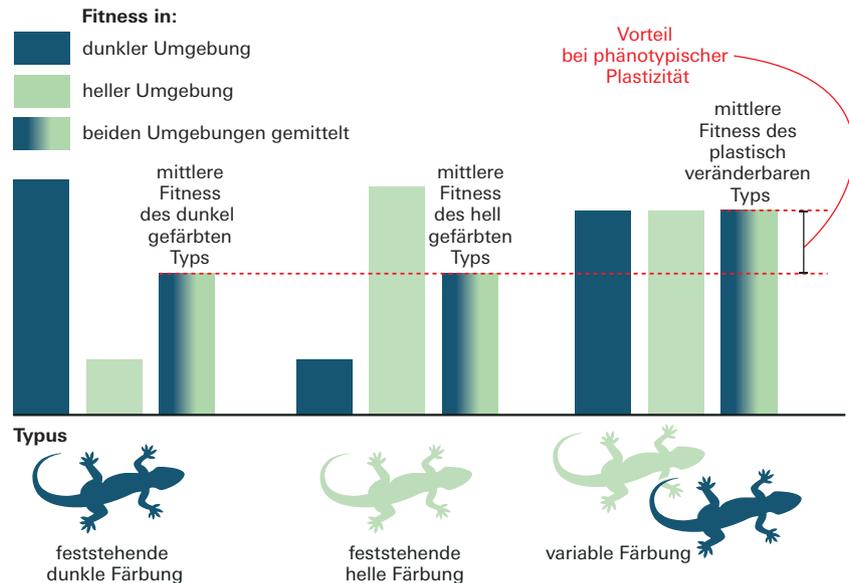
Der Evolution wertvolle Zeit erkauf

Wie kann Plastizität der Evolution ihren Stempel aufdrücken? Erstens könnte sie das Fortbestehen von Populationen fördern. Da sie die individuelle Fitness in sich schnell wandelnden Umgebungen verbessert, sollte sie ein Stück weit verhindern, dass Organismengruppen unter Stresseinwirkung aussterben. Dafür spricht etwa die empirische Beobachtung, dass Vogelarten, die einen vergleichsweise hohen Grad an Plastizität zeigen – indem sie stärker zu innovativen Verhaltensweisen neigen –, ein geringeres Aussterberisiko tragen als Spezies mit geringer Variabilität. Bleiben Populationen auf diese Weise länger erhalten, gewinnen sie Zeit, um neue genetische Varianten hervorzu bringen. Das erhöht wiederum die Wahrscheinlichkeit, sich erfolgreich an andersartige Umgebungen anzupassen. So gesehen sollte jeder Prozess, der das Aussterberisiko mindert, das Evolutionsgeschehen begünstigen.

Die meisten Evolutionsbiologen neigen zu der Annahme, phänotypische Plastizität würde Populationen auf diese Weise wertvolle Zeit erkaufen. Doch es fehlt an direkten

Hell und dunkel

Phänotypische Plastizität steigert die evolutionäre Fitness in einer sich wandelnden Welt. Organismen mit feststehendem Phänotyp haben in Umgebungen, auf die sie spezialisiert sind (etwa dunkel gefärbte Eidechsen in einem lichtarmen Lebensraum), oft eine höhere Fitness als solche mit plastischem (variablem) Erscheinungsbild. Letztere schneiden aber besser ab, sobald sich die Umgebungsbedingungen ändern. Da eine unbeständige Umwelt eher die Regel als die Ausnahme ist, ergibt sich im Schnitt ein Vorteil für plastisch veränderbare Phänotypen.



empirischen Belegen dafür. Man könnte die Hypothese prüfen, indem man verschiedene Organismengruppen beobachtet, die sich im Grad der Plastizität unterscheiden. So erhielte man Hinweise darauf, ob die variableren in einer neuen Umgebung eher überleben als die weniger wandelbaren.

Daneben könnte Plastizität das evolutionäre Geschehen begünstigen oder möglich machen, indem sie eine breitere Palette an Reaktionen erlaubt. Um zu verstehen, wie das funktioniert, muss man sich vor Augen halten, dass die meisten natürlichen Populationen eine große genetische Bandbreite (sprich einen umfangreichen Genpool) haben. Dieses Potenzial kommt normalerweise nicht in den Phänotypen zum Ausdruck, da die Erbanlagen des Pools bei Weitem nicht alle gleichzeitig aktiv sind. Der inaktive, »verborgene« Anteil des Genpools kann aber sichtbar werden, wenn Lebewesen ungewöhnlichen und stressigen Bedingungen ausgesetzt sind. Dann nämlich werden Gene angeworfen, die zuvor ruhten, und bringen ungewöhnliche Merkmale hervor. Die phänotypische Ausprägung dieser Gene ist von entscheidender Bedeutung, da die natürliche Selektion auf Phäno- und nicht auf Genotypen einwirkt. Und ausgewählt werden können nur solche, die realisiert worden sind. Sofern sie eine gute Anpassung an die neue Umgebung zeigen, werden sie sich durchsetzen.

Je nachdem, ob ein variables Erscheinungsbild nach einer solchen Selektion weiterhin begünstigt wird oder nicht, kann die phänotypische Vielfalt entweder zunehmen bis hin zum Polyphänismus oder abnehmen bis zur genetischen Assimilation. In beiden Fällen erscheinen Merkmale, die in der ursprünglichen Population nicht da waren – zumindest nicht in angepasster Form. Wichtig ist vor allem, dass hier ein wesentlicher Unterschied zur mutationsgelei-

teten Evolution besteht, dem Auftauchen neuer Phänotypen infolge vorangegangener Änderungen im Genom. Denn bei evolutionären Vorgängen, die durch phänotypische Plastizität begünstigt werden, entstehen neue Phänotypen auf Grund von Umwelteinflüssen.

Wichtige Fleischfresser

In den zurückliegenden Jahrzehnten habe ich solche Phänomene bei einer faszinierenden Gruppe von Amphibien untersucht: den Gebirgs-Schaukeelfußkröten (*Spea multiplicata*). Die Tiere sind in den gesamten USA und Nordmexiko verbreitet und leben sogar in Wüsten. Um mit der trockenen Umgebung dort zurechtzukommen, haben sie zahlreiche Anpassungen entwickelt. Dazu gehört, dass ihre Kaulquappen eine bemerkenswerte Spielart der Plastizität aufweisen: Normalerweise wachsen sie zu Allesfressern mit ovaler Körperform heran, doch wenn sie Fleisch fressen – etwa Kiemenfußkrebse –, wandeln sie sich zu wuchtig gebauten Karnivoren. Letztere haben einen großen Kopf, einen gezackten Hornschnabel und einen kurzen Darm. Da sie sich schneller entwickeln als ihre »normalen« Verwandten, ist es wahrscheinlicher, dass sie austrocknenden Teichen entkommen, bevor das Wasser völlig verschwunden ist.

Um zu prüfen, ob die Fleisch fressende Kaulquappenvariante auf evolutionären Mechanismen beruht, die durch Plastizität ermöglicht werden, haben mein Team und ich mehrere Krötenspezies untersucht, die verschiedene Evolutionsstufen der karnivoren Form darstellen. Wir konzentrierten uns auf fünf Arten beziehungsweise Populationen: *Scaphiopus couchii* und *Scaphiopus holbrookii*, die keinen Fleisch fressenden Phänotyp ausprägen; *Spea bombifrons* und *Spea multiplicata*, die das im Zuge eines Polyphänis-

mus tun; sowie einige Populationen von *Spea bombifrons*, die nur die karnivore Variante ausbilden (sie ist in diesen Gruppen offenbar genetisch assimiliert).

Als wir Kaulquappen verglichen, die mit der pflanzlichen Kost von Allesfressern beziehungsweise den Beutetieren von Fleischfressern aufgezogen wurden, fanden wir bei beiden untersuchten *Scaphiopus*-Arten eine subtil ausgeprägte, aber klar vorhandene ernährungsbedingte Variabilität des Erscheinungsbilds. Und das, obwohl beide keinen karnivoren Typ hervorbringen. Man darf daher vermuten, dass jene *Spea*-Arten, die heute Fleisch fressende Kaulquappen bilden, von Vorfahren abstammen, bei denen eine entsprechende Plastizität ebenfalls bereits vorhanden war. Weiterhin stießen wir auf Hinweise für eine fortschreitende Ausprägung dieser Variabilität bei beiden untersuchten *Spea*-Spezies: Sie verwenden sowohl pflanzliche als auch tierische Kost gleichermaßen gut; die *Scaphiopus*-Arten dagegen tun sich mit

fleischlicher Nahrung eher schwer. Einen zusätzlichen Beleg für eine evolutionäre Entwicklung lieferten uns jene *Spea-bombifrons*-Populationen, die nur Fleischfresser hervorbringen: Sie erwiesen sich den Karnivoren aller anderen untersuchten Populationen und Arten im Konkurrenzkampf überlegen. Wir versuchen jetzt, die Gene zu identifizieren, die an diesen Entwicklungsvorgängen mitwirken.

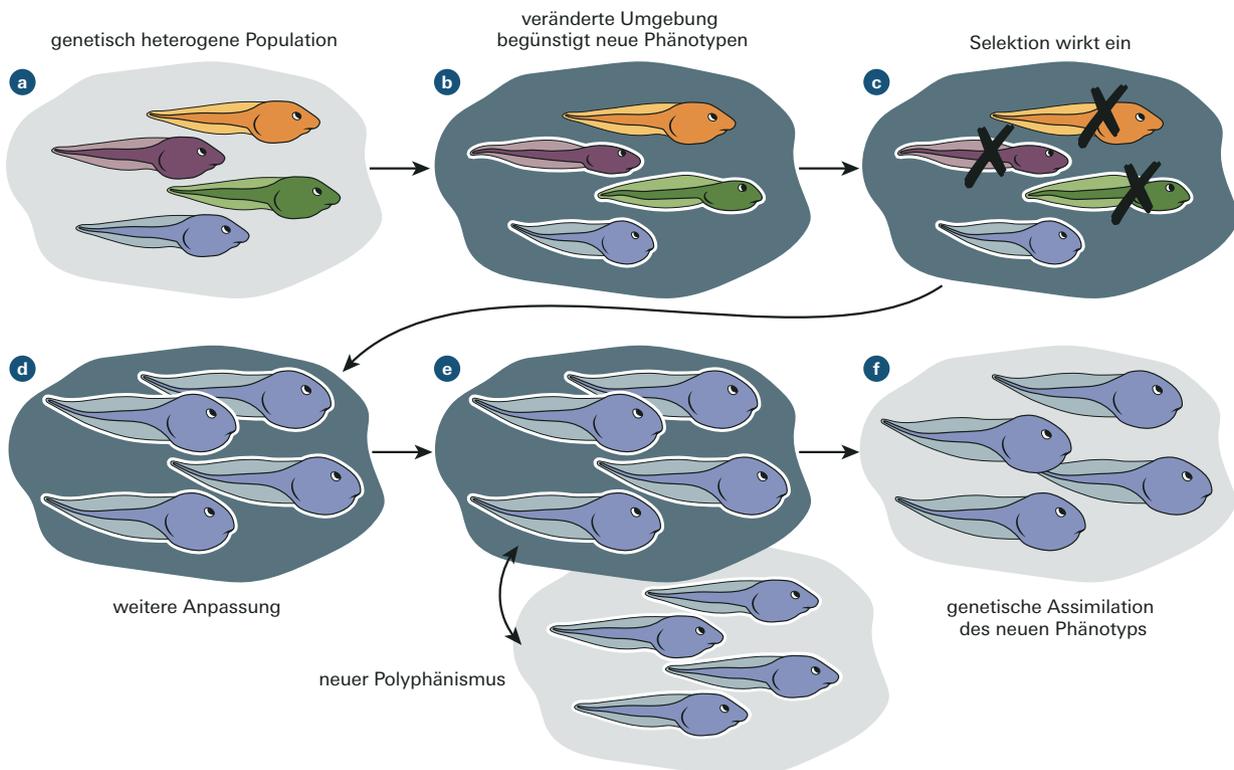
Unsere Arbeiten stützen die These, wonach Evolution in natürlichen Populationen auf phänotypischer Plastizität beruhen kann. Zahlreiche weitere Teams haben ebenfalls entsprechende Belege gefunden. Evolution, die durch Plastizität zu Stande kommt, ist bei so unterschiedlichen Organismen wie Bakterien und Schlangen dokumentiert und darüber hinaus mit wichtigen evolutionären Ereignissen in Verbindung gebracht worden, etwa der Entwicklung der Vielzelligkeit. Kurz: Sie könnte von entscheidender Bedeutung sein.

Das Verborgene aufdecken

Ein Beispiel für durch Plastizität ermöglichte Evolution: Eine genetisch heterogene Kaulquappen-Population (a, die Farben stehen für unterschiedliche Genotypen) wird mit einer veränderten Umwelt konfrontiert, die neue Phänotypen begünstigt (b). Die verschiedenen Genotypen der Population

bringen diverse Erscheinungsbilder hervor (dargestellt durch unterschiedliche Körperformen), die für die neue Umgebung mehr oder weniger gut geeignet sind. Die Selektion bevorzugt Genotypen, die gut angepasste Phänotypen hervorbringen (c). Handelt es sich hierbei um solche, die in

der früheren Umgebung mangels Fitness nicht ausgeprägt wurden, kommt eine zuvor verborgene genetische Variation zum Vorschein. Die weitere Anpassung des bevorzugten Phänotyps (d) kann entweder zu einem neuen Polyphänismus (e) oder zu genetischer Assimilation (f) führen.



INNOVATIONEN DER NATUR Evolutionäre Anpassungen, die durch phänotypische Plastizität ermöglicht wurden, sind für die Entstehung zahlreicher neuer Merkmale verantwortlich. Dazu zählen (von links nach rechts): Stickstofffixierung bei Zyanobakterien, invasive Verbreitung bei Mexikanischen Sonnenblumen, die verschiedenen Kasten bei Ameisen und die Rasseln der Klapperschlangen.



DAVID PFENNING

Eine der umstrittensten Fragen in der Evolutionsbiologie lautet, ob variable Ausprägungen des Erscheinungsbilds an die Nachkommen weitergegeben werden. Kann ein Elternteil Eigenschaften, die es während seines Lebens durch phänotypische Plastizität erlangt hat, an die Kinder weiterreichen? Die These, wonach erworbene Merkmale vererbt werden, hat maßgeblich der französische Gelehrte Jean-Baptiste Lamarck (1744–1829) verfochten. Sie war von vielen Naturforschern seiner Zeit akzeptiert, einschließlich Charles Darwin. Dieser schrieb in »Über die Entstehung der Arten«: »Ich glaube, es gibt keinen Zweifel, dass bei unseren Haus- und Nutztieren der zunehmende Gebrauch bestimmter Körperteile diese gestärkt und vergrößert hat und der Nichtgebrauch sie schwinden ließ und dass solche Modifikationen vererbt worden sind.«

Mäuse mit halbiertem Schwanz

Der deutsche Biologe Friedrich Leopold August Weismann (1834–1914) gilt als derjenige Wissenschaftler, der das widerlegt hat. In den 1880er Jahren schnitt er Mäusen die Schwänze auf halber Länge ab und tat das über insgesamt fünf Generationen hinweg. Dann prüfte er, ob die Nachkommen einen verkürzten Schwanz ausbildeten; überraschenderweise war das bei keinem einzigen Tier der Fall. Aus diesem Experiment sowie aus detaillierten Beobachtungen der Embryonalentwicklung schloss der Wissenschaftler, die Verbesserung eines Organs über die Generationen hinweg resultiere nicht aus der Summierung aller individuellen Lebensweisen, sondern aus der Summierung vorteilhafter genetischer Faktoren. Nach Weismanns Arbeiten war die Idee, erworbene Eigenschaften würden vererbt, für lange Zeit erledigt.

Seit einiger Zeit häufen sich aber die Belege dafür, dass Informationen ebenso auf nicht genetischem (nicht die DNA-Sequenz betreffendem) Weg von einer Generation zur nächsten gelangen. Das schließt Merkmale ein, die sich umweltbedingt verändert haben. Elterntiere stattdessen ihre Keimzellen und damit ihre Nachkommen oft mit Informationen aus, die sie aus der Außenwelt erhalten haben. Einer der am besten untersuchten Mechanismen hierbei ist die DNA-Methylierung, bei der das Anfügen von Methylgruppen (CH_3) an bestimmte Stellen der DNA die dort befindlichen Gene in ihrer Aktivität beeinflusst. DNA-Methylierungen werden oft durch Umweltfaktoren wie Ernährung oder Stress ausgelöst. Es ist erwiesen, dass sie – und die mit ihnen einhergehenden phänotypischen Änderungen – manchmal über mehrere Generationen hinweg vererbt werden, ohne dass sich dabei die DNA-Sequenz selbst ändert.

Wenn Zellen ihre DNA vor einer Zellteilung vervielfältigen, geschieht es mitunter, dass spezialisierte Enzyme eine DNA-Methylierung vom Eltern- auf den Tochterstrang kopieren. Dadurch können die neuen Zellen Eigenschaften erben, die ihre Vorgänger im Lauf des Lebens durch phänotypische Plastizität erworben haben. Manchmal gelangen diese Informationen sogar in die Keimbahn, wie etwa eine kürzlich durchgeführte Studie von Elizabeth O'Brien vom QIMR Berghofer Medical Research Institute in Australien ergab. Demnach werden umweltbedingte Änderungen an RNA-Molekülen im Gehirn von Mäusen in die Keimbahn der Tiere und darüber schließlich auf die Nachfahren übertragen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Gene nicht die einzigen Faktoren sind, die Informationen von einer Generation zur nächsten weitergeben. Wir wissen zwar nicht, wie häufig und wie dauerhaft Merkmale, die auf phänotypischer Plastizität beruhen, in natürlichen Populationen ver-



erbt werden – aber wir wissen, dass es passiert. Zu verstehen, wann und wie es dazu kommt, ist enorm wichtig für die Evolutionsbiologie und die medizinische Forschung.

Manche Wissenschaftler tun sich allerdings schwer damit, die phänotypische Plastizität in das bestehende Theoriegebäude zu integrieren. Evolutionsbiologen wie Kevin Laland von der University of St Andrews (Schottland) und Armin Moczek von der Indiana University in Bloomington haben vorgeschlagen, die gängige Synthetische Evolutionstheorie zu diesem Zweck zu erweitern. Brauchen wir eine solche Überarbeitung (siehe »Spektrum« Mai 2021, S. 12)?

Eine Antwort ist nicht einfach. Die oben vorgestellten Thesen fügen sich in vielerlei Hinsicht problemlos in die bestehende Evolutionstheorie ein. Mary Jane West-Eberhard etwa meint, phänotypische Variation sei schon im derzeitigen theoretischen Rahmen von zentraler Bedeutung für die adaptive Evolution. Denn evolutionäre Anpassung erfordere die Weitergabe veränderter Merkmale durch Selektion; Selektion setze an phänotypischer Variation an; und diese wiederum komme durch Einflüsse sowohl der Gene als auch der Umwelt zu Stande. Daher sei die Plastizität des Erscheinungsbilds – als Reaktion von Entwicklungsvorgängen auf Umgebungsfaktoren – bereits seit Langem ein Teil der etablierten Evolutionstheorie, selbst wenn sie nicht ausdrücklich als solche anerkannt werde.

Andere Aspekte passen aber weniger gut ins bestehende Theoriegebäude. Zuvorderst ist hier die Weitergabe erworbener Merkmale an die Nachkommen zu nennen. Oberflächlich betrachtet verstößt sie nicht gegen die Grundprinzipien der Evolutionsbiologie, denn Darwins Theorie sagt nichts über den Vererbungsmechanismus aus: Dem Naturforscher war die Existenz der Gene nicht bekannt. Trotzdem entwickelte er eine Theorie, die sich angesichts des rasan-

ten Erkenntnisfortschritts als erstaunlich beständig erwiesen hat. Wie der Evolutionsbiologe John Maynard Smith (1920–2004) betonte, erfordert Darwins adaptive Evolution lediglich, dass »Gleiches durch Gleiches« entsteht – unabhängig davon, wie der Vererbungsprozess abläuft. Prägt aber neben den Genen auch die Umwelt der Vorfahren den Phänotyp – wenn etwa durch phänotypische Plastizität erworbene Eigenschaften auf die Nachkommen übergehen –, dann können wir nicht mehr unbedingt davon ausgehen, dass die Individualentwicklung vom Genotyp vorgegeben wird. Genau das setzen viele Evolutionsbiologen aber voraus.

Die Mechanismen der Anpassung verstehen

So oder so kann die phänotypische Plastizität unser Verständnis evolutionärer Mechanismen verbessern, indem sie begreifen hilft, wie Umwelteinwirkungen variable Erscheinungsbilder erzeugen und selektieren. Das zeigt sich an folgenden drei Punkten.

Erstens: Wie die Untersuchungen meines Teams an Schaufelfußkröten zeigen, erklärt phänotypische Plastizität das Entstehen neuer, komplexer Merkmale. Evolutionäre Neuerungen können zweifellos durch genetische Mutation entstehen – doch bei Eigenschaften, die auf Plastizität beruhen, ist ein adaptiver »Fortschritt« besonders wahrscheinlich. Denn da sie infolge von Umwelteinwirkungen entstehen, werden sie in der Regel von vielen Individuen gleichzeitig ausgeprägt und verbessern oft den Anpassungsgrad. Es gibt immer mehr Hinweise auf Merkmale von Organismen, die ursprünglich als plastische Reaktionen entstanden sind – mit anderen Worten, dass hier Evolution stattgefunden hat, die durch phänotypische Plastizität ermöglicht wurde.

Praktische Anwendungen der phänotypischen Plastizität

1) Vorhersage evolutionärer Reaktionen auf den Klimawandel.

Phänotypische Plastizität zu berücksichtigen, kann bestimmen helfen, welche Spezies von den anthropogenen Umweltveränderungen profitieren werden und welche nicht.

2) Optimierung landwirtschaftlicher Produktion.

Beim Züchten von Nutzpflanzen ist es wichtig, die Plastizität zu verringern, um sicherzustellen, dass Sorten in verschiedenen Regionen mit unterschiedlichen Umweltbedingungen gleich bleibend hohe Erträge liefern.

3) Erforschung nichterblicher Geburtsfehler, die auf äußeren

Einwirkungen (so genannten Teratogenen) beruhen.

Schätzungsweise zwei bis fünf Prozent der menschlichen Säuglinge kommen mit Fehlbildungen auf die Welt, ebenso die Nachkommen zahlreicher anderer Tiere. Viele dieser Anomalien werden durch Umweltfaktoren ausgelöst.

4) Klärung der evolutionären Ursachen ernährungsbedingter Krankheiten.

Phänotypische Plastizität infolge variabler Nährstoffzufuhr ist beim Menschen weit verbreitet und kann zu Fettleibigkeit und damit zusammenhängenden Erkrankungen führen. Die gefährlichste Form ist die übermäßige

Zunahme des so genannten viszeralen Fetts, das in der Bauchhöhle eingelagert ist. Einige Fachleute vermuten, der Aufbau dieses Fettgewebes sei eine Fehlanpassung bei Individuen, die in jungen Jahren unter Nahrungsentzug litten: Ihr Organismus beuge so Mangelzuständen im Erwachsenenalter vor.

5) Hirnforschung. Als Reaktion auf Umweltveränderungen kann das Gehirn synaptische Verbindungen modifizieren und neu anlegen. Die so genannte Neuroplastizität ermöglicht es dem Nervengewebe unter anderem, Verletzungen und Krankheitsschäden zu kompensieren.

Zweitens: Phänotypische Plastizität hilft, schnellen evolutionären Wandel begreiflich zu machen. Obwohl genetische Veränderungen grundsätzlich das Potenzial haben, rasch Neuerungen hervorzubringen, ist das nicht sehr wahrscheinlich: Vorteilhafte Mutationen sind selten, sie betreffen zunächst nur ein einzelnes Individuum und dessen unmittelbare Nachkommen, und sie verbreiten sich üblicherweise nur langsam in einer Population. Plastizitätsbedingte Merkmale hingegen treten bei vielen Organismen gleichzeitig auf, gehen häufig mit einer verbesserten Anpassung einher – und haben somit das Potenzial, Evolution zu beschleunigen. In einer Welt, die sich infolge menschlicher Einwirkungen immer schneller verändert, könnte das zunehmend wichtig werden.

Drittens: Plastizität trägt dazu bei, die so genannte konvergente Evolution zu erklären, bei der verschiedene Arten unabhängig voneinander ähnliche Merkmale hervorbringen. Fachleute gehen im Allgemeinen davon aus, dass es zu Konvergenz kommt, wenn der gleiche Selektionsdruck auf zufällig entstandene Mutationen wirkt und übereinstimmende Eigenschaften auswählt. Organismen, die in vergleichbarer Umgebung leben, entwickeln jedoch oft ähnliche Attribute auf Grund von phänotypischer Plastizität. Beispielsweise reagieren viele Pflanzenarten auf Lichtmangel, indem sie breitere Blätter ausbilden – und zahlreiche Tiere prägen bei Fleischverzehr einen kürzeren Darm aus. Wenn derartige durch äußere Einwirkung hervorgerufenen Merkmale genetisch assimiliert werden, kommt es zu konvergenter Evolution. Im Einklang mit dieser Hypothese weisen bei Organismen, die eine solche Entwicklung durchlaufen, die konvergierenden Merkmale oft Plastizität auf. Evolution könnte somit durch genetische Veränderungen erfolgen, welche

die ursprünglich plastischen Reaktionen stabilisieren und im Erbgut fixieren.

Ein tieferes Verständnis der phänotypischen Plastizität würde sich auf die gesamte Biologie auswirken. Es setzt allerdings voraus, dass sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit zwei komplexen Aspekten biologischer Systeme auseinandersetzen, die häufig ignoriert werden: dass erstens die meisten phänotypischen Merkmale aus dem Zusammenspiel zwischen Genen und Umwelt entstehen und dass zweitens phänotypische Plastizität eher die Regel als die Ausnahme ist. Diesem oft unterschätzten Phänomen mehr Aufmerksamkeit zu schenken, verspricht neue Erkenntnisse nicht nur in der Evolutionsforschung, sondern auch in der Biomedizin und im Naturschutz. ◀

QUELLEN

Bonduriansky, R., Day, T.: Extended heredity: A new understanding of inheritance and evolution. Princeton University Press, Princeton 2018

Levis, N.A. et al.: Morphological novelty emerges from pre-existing phenotypic plasticity. *Nature Ecology & Evolution* 2, 2018

Pfennig, D.W. (Hg.): Phenotypic plasticity and evolution: Causes, consequences, controversies. CRC Press, Boca Raton 2021

West-Eberhard, M.J.: Developmental plasticity and evolution. Oxford University Press, New York 2003

AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

Lenovo macht Schule.

Smarter
technology
for all

Lenovo

Smarter



Getestet für die Verwendung unter erschwerten Bedingungen wie Spritzwasser, Erschütterungen oder Staub – was auch immer der Schulalltag bringt. **Wir beraten Sie gerne, Tel. 0201 22099 844.**

 **Windows 11**

A more focused Start experience

www.lenovo.com/EDUCATION

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

BLAUE ROSEN

Über Jahrhunderte hinweg waren blaue Rosen ein (Wunsch-) Traum vieler Rosenzüchter. Dank der Gentechnik ist man diesem Ziel in den letzten zwei Jahrzehnten sehr nahe gekommen. Doch mit chemischen Tricks lassen sich auch die Pigmente der roten Rosen ganz einfach umfärben.



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/2049324](https://www.spektrum.de/artikel/2049324)

► Eine blaue Rose zu finden, gilt als als Ding der Unmöglichkeit. Gelegentlich bieten Blumenhändler zwar blaue Schnitrosen an, allerdings sind das eigentlich weiße Rosen, die mit blauer Tinte eingefärbt wurden. Nicht eine der rund 50 000 Gartenrosen, die bislang auf konventionellem Weg gezüchtet wurden, trägt blaue Blütenblätter.

Daran änderte auch eine Ausschreibung der belgischen und britischen Horticultural Societies (Gartenbaugesellschaften) im Jahr 1840 nichts, nach welcher der Züchter der ersten blauen Rose die seinerzeit gigantische Summe von 500 000 Francs erhalten sollte. Heute weiß man: Ein entsprechender Stoffwechselweg, der zu einer blauen Blütenfarbe führen könnte, ist schlichtweg nicht vorhan-

CHEMISCHER TRICK Eine tiefrote Rose (links) färbt sich in mit Ammoniak angereicherter Atmosphäre blauviolett (rechts).



MATTHIAS DUCCI

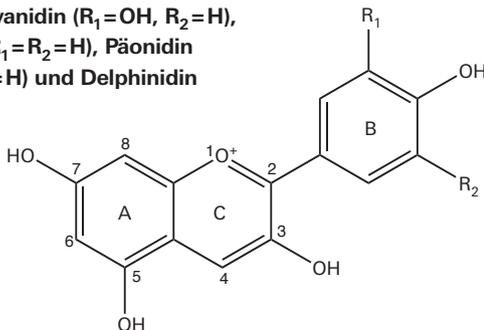
den. Die alten europäischen Sorten waren weiß, rosa oder rot, ab etwa 1820 hielt Gelb Einzug in die Farbskala der Gartenrosen.

Auf Grund ihrer symbolischen Bedeutung – und der Aussicht auf Profit – wurde die Züchtung blauer Rosen ab den 1990er Jahren mit Hilfe gentechnischer Verfahren weiter vorangetrieben. 2004 schließlich präsentierte der japanische Misch- und Biotechnologie-Konzern Suntory die weltweit erste bläuliche Rose und brachte sie 2009 unter dem Namen »Applause« auf den Markt. Die Forscher schalteten mit Hilfe des RNA-Antisense-Verfahrens die Gene aus, die für die Stoffwechselwege zu roten und orangefarbenen Blütenblättern entscheidend sind (»gene silencing«). Anschließend bauten sie spezielle Gene ein, die in Stiefmütterchen und Schwertlilien vorhanden sind, um die Bildung blauer Pigmente zu ermöglichen. Das Unterfangen war jedoch nicht auf ganzer Linie erfolgreich, denn Applause ist eher fliederfarben als blau.

Ein unter Chemikern bekanntes Wortspiel lautet: »Chemiker haben für alles eine Lösung!« Das trifft auch in diesem Kontext zu. So gibt es tatsächlich eine (wässrige) Lösung, welche die Farbe von Rosen verändern kann. Das dazugehörige Experiment zeigt das eindrucksvoll – Achtung, nur fachkundige Personen sollten den Versuch durchführen. Man benötigt dazu eine tiefrote Rose, einen 1000 Milliliter fassenden Standzylinder mit Deckglas, ein 100-Milliliter-Becherglas, Aceton und konzentrierte Ammoniak-Lösung. Zunächst füllt man fünf bis zehn Milliliter der Ammoniak-Lösung in den Standzylinder und legt das Deckglas darauf. Die Rose wird mit ihren Blütenblättern in das Becherglas mit Aceton getaucht, hin und her bewegt und dann wieder herausgenommen. Nachdem die Blütenblätter getrocknet sind, hängt man die Rose kopfüber in den Standzylinder – jedoch nur so weit, dass die Blütenblätter nicht in die Ammoniak-Lösung eintauchen. Dann sollte der Zylinder so gut wie möglich wieder abgedeckt werden. Nach ein bis zwei Minuten ist es so weit: Die Blütenblätter haben eine intensive blauviolette Farbe angenommen!

Die rote Farbe der Rose ist auf Anthocyanidine zurückzuführen. Mit Zuckermolekülen verknüpft, bilden diese farbgebenden Moleküle die Pflanzenfarbstoffklasse der Anthocyane. Die Bezeichnung »Anthocyan« geht vermut-

VIELFÄLTIGE FARBGEBER Das Grundgerüst ist gleich, nur die chemischen Gruppen an den Stellen R_1 und R_2 (am Ring B) unterscheiden sich: Strukturformeln von Cyanidin ($R_1=OH$, $R_2=H$), Pelargonidin ($R_1=R_2=H$), Päonidin ($R_1=OCH_3$, $R_2=H$) und Delphinidin ($R_1=R_2=OH$).



MATTHIAS BÜCCI



MATTHIAS BÜCCI

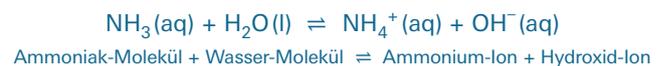
EINE LÖSUNG FÜR ALLES
Der Universalindikator nach McCrumb färbt sich je nach pH-Wert rot, gelb, grün oder blau.

lich auf den deutschen Apotheker L. C. Marquart zurück, der in seiner Abhandlung »Die Farben der Blüten« aus dem Jahr 1835 schrieb: »Anthokyan [...] ist der färbende Stoff in den blauen, violetten, rothen und vermittelt ebenfalls die Farbe aller braunen und vieler pomeranzenfarbigen Blumen.«

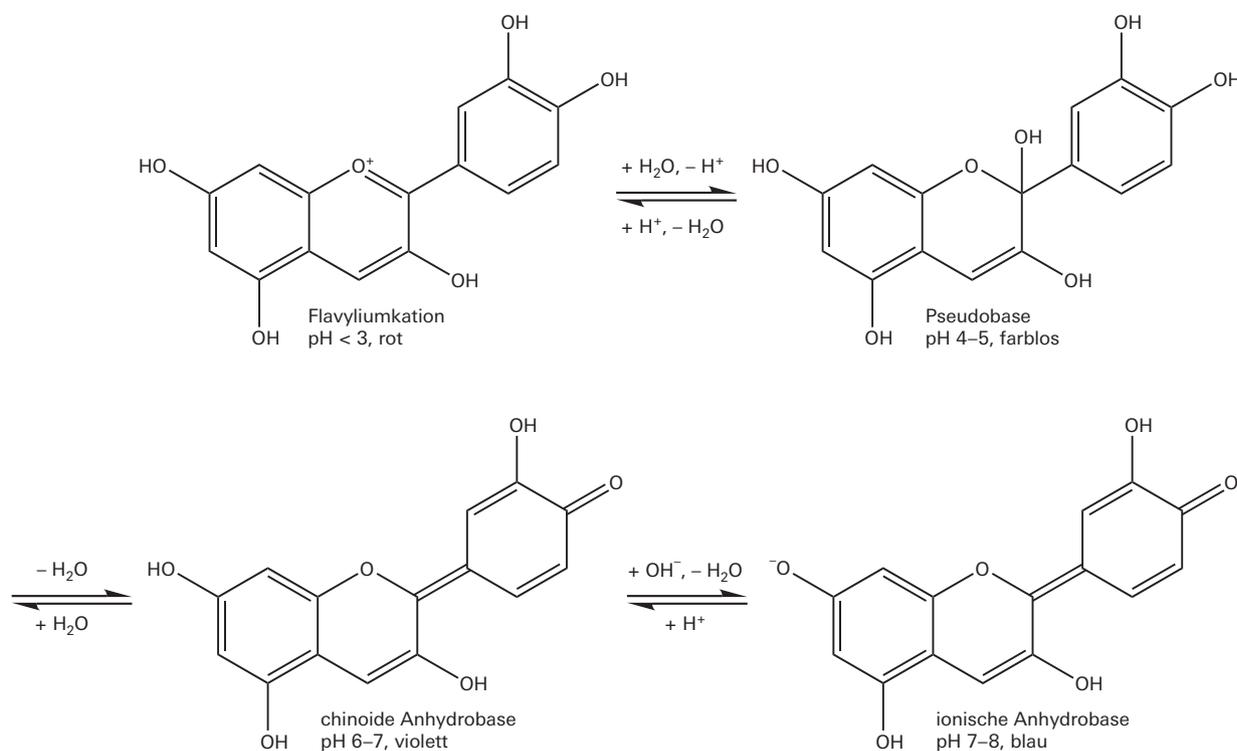
Der wichtigste Farbstoff in roten Rosen ist das Cyanin, bei dem Cyanidin mit zwei Glucosemolekülen zu Cyanidin-3,5-O-diglucosid verbunden ist. Oft begleiten es kleinere Mengen von Chrysanthemmin (Cyanidin-3-O-glucosid, also Cyanidin mit nur einem Glucosemolekül). Darüber hinaus kommen in vielen scharlachroten Rosen Pelargonin (Pelargonidin-3,5-O-diglucosid; fast immer in Gemeinschaft von Cyanin) und Päonin (Päonidin-3,5-O-diglucosid) vor (siehe »Vielfältige Farbgeber«). Die gelben Rosen erhalten ihre Farbe hingegen durch Carotinoide, die wiederum eine andere Gruppe sekundärer Pflanzenstoffe darstellen.

Die Struktur von Cyanidin (und seiner Glycoside) verändert sich mit dem pH-Wert der umgebenden Lösung. Damit schlägt auch die Farbe um, denn die unterschiedlichen Strukturen absorbieren Licht verschiedener Wellenlängen. So erscheint Cyanidin im sauren Vakuolensaft der Rose rot, im Alkalischen (bei $pH > 8$) bläulich.

Im Experiment sind die Ammoniak-Moleküle, die aus der konzentrierten Ammoniak-Lösung ausgasen, für den Anstieg des pH-Werts verantwortlich. Sie können die Zellmembranen leicht überwinden und gelangen so ins Innere der Pflanzenzellen. Dort bilden sie das folgende Gleichgewicht aus (die Symbole »aq« und »l« stehen für »in Wasser gelöst« sowie »flüssig«):



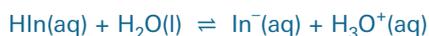
Diese »Chemiker-Lösung« des Problems zur Herstellung blauer Rosen ist jedoch nicht praktikabel: Die Haltbarkeit der Rosen wird stark verkürzt, und der Duft von Ammoniak ist nicht gerade angenehm.



MATTHIAS DUCCI

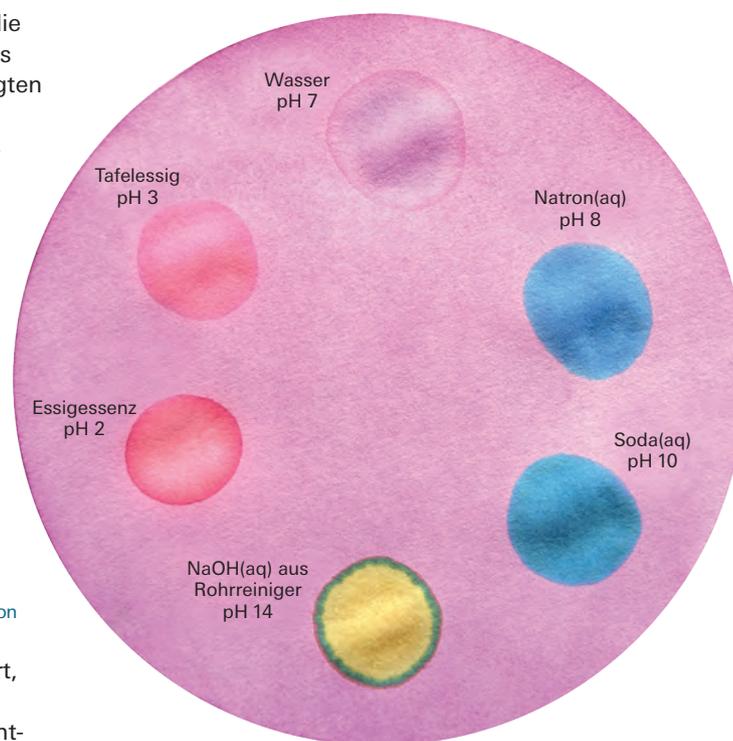
Daher werfen wir noch einmal kurz einen Blick auf die Arbeit der Gentechniker von Suntory: Sie schalteten das Gen aus, das zur Synthese von Cyanidin führt, und sorgten für die Bildung eines anderen Anthocyanidins, nämlich des Delphinidins (siehe »Vielfältige Farbgeber«). Dieses kommt nämlich in verschiedenen bläulichen Blütenblättern vor, etwa der Petunie.

Farbstoffe, die abhängig vom pH-Wert einer Lösung ihre Farbe ändern, bezeichnet man als pH-Indikatoren. Zu ihnen gehören demnach die Anthocyane. Allgemein sind pH-Indikatoren schwache organische Säuren. Unabhängig von ihrer genauen Konstitution kann man sie mit der Formel HIn angeben (»H« bezeichnet ein gebundenes Wasserstoff-Atom, »In« steht kurz für »Indikator«). In wässrigen Lösungen bilden sie das folgende Protolysegleichgewicht aus:



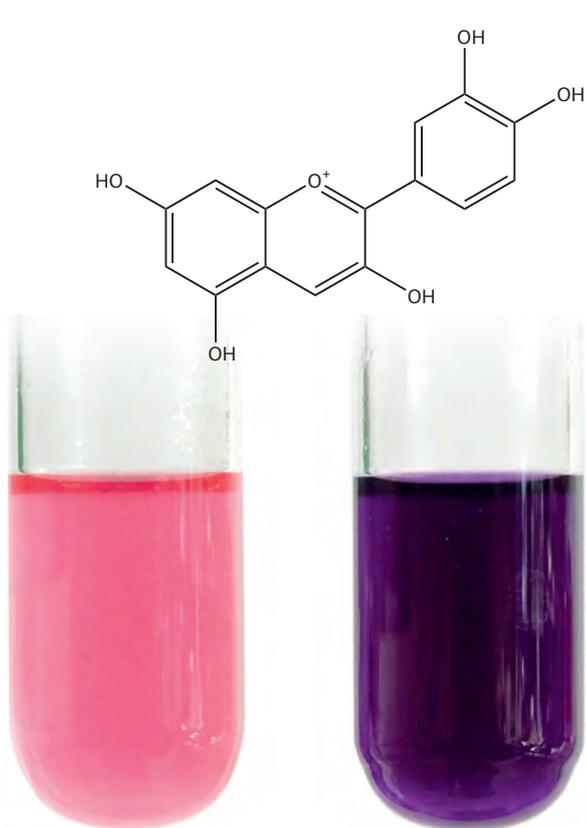
Indikator-Molekül + Wasser-Molekül = Indikator-Anion + Oxonium-Ion

Die Lage des Gleichgewichts ist abhängig vom pH-Wert, das heißt der Konzentration der Oxonium-Ionen in der umgebenden Lösung. Ist der pH-Wert hoch (die Konzentration der Oxonium-Ionen gering), verschiebt es sich nach links und umgekehrt. Die Protonierung von In⁻ sowie die Deprotonierung von HIn verändert jeweils das System der delokalisierten Elektronen (π-Elektronensystem) im Molekül oder Molekül-Ion – und der Farbstoff absorbiert Licht einer anderen Wellenlänge. Verschiebt sich die absorbierte Wellenlänge innerhalb des sichtbaren Bereichs, wechselt die Farbe. Wird hingegen das Absorptionsmaximum aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich herausgeschoben,



MATTHIAS DUCCI

BLÜTEN-INDIKATOR Mit Rosenextrakt gefärbtes Filterpapier nach dem Benetzen mit den Probelösungen. Mit dem pH-Wert ändert sich die Struktur von Cyanidin, was die unterschiedliche Farbgebung erklärt. Oberhalb von pH 10 öffnet sich der mittlere Ring (nicht gezeigt). Es bildet sich ein Chalkon, das für die gelbe Farbe bei der Rohrreiniger-Probe verantwortlich ist.



KOMPLEXFÄRBUNG Salzsäure (links) und Aluminiumchlorid-Lösung (rechts) mit dem Rosen-Indikator. Obwohl beide Lösungen einen pH-Wert von 3,5 aufweisen, unterscheiden sich die Farben deutlich. Die Strukturformeln oben offenbaren den Grund für die tiefblauviolette Farbe: Der Farbstoff Cyanidin bildet mit den Aluminium-Ionen einen Komplex (oben rechts ein Ausschnitt davon).

entfärbt sich die Lösung; ebenso kann eine vorher farblose Lösung durch Verschiebung in den sichtbaren Spektralbereich plötzlich farbig erscheinen.

Viele pH-Indikatoren weisen nur einen einzigen Farbumschlag auf und im Umschlagsbereich gegebenenfalls eine weitere Mischfarbe. Der Bereich unterscheidet sich von Farbstoff zu Farbstoff. In der analytischen Chemie nutzt man pH-Indikatoren, um die Wasserstoffionen-Konzentration von Probelösungen zu ermitteln. Beispiele sind der Azofarbstoff Methylorange, der im pH-Bereich 3 bis 4 von Rot auf Gelborange umschlägt oder der Triphenylmethanfarbstoff Phenolphthalein, der in wässrigen Lösungen bis etwa pH 8 farblos ist und darüber rosa-violett erscheint (zirka ab pH 13 ist er wieder farblos).

Um den pH-Wert einer Lösung ohne genauere Untersuchung schnell einschätzen zu können, sind einzelne pH-Indikatoren somit nicht praktikabel. Daher setzt man in der analytischen Chemie oder in der Schule Mischindikatoren ein, die mehrere pH-Indikatoren enthalten. Sie eignen sich nicht für maßanalytische Bestimmungen, sondern dienen zum groben Abschätzen des pH-Werts einer Lösung. Ein Beispiel hierfür beschrieb F.R. McCrumb im Jahr 1931. Er mischte die pH-Indikatoren Methylrot, Phenolphthalein, Thymolblau und Bromthymolblau in Ethanol. In stärker sauren Lösungen mit pH 1 bis 3 ist der McCrumb-Indikator rot und geht bei pH 4 bis 6 in Orange über. Im neutralen und schwach alkalischen Bereich um pH 7 bis 8 dominieren Grüntöne, stärker alkalische Lösungen von pH 9 bis 12 erscheinen blau-violett.

Spannend ist nun die Frage, ob sich aus den Blütenblättern der roten Rose ebenfalls ein pH-Indikator gewinnen

lässt – und falls ja, welche (Farb-)Eigenschaften er besitzt. Hierzu reißt man die Blütenblätter von zwei bis drei tiefroten Rosen in kleine Stücke und verreibt sie mit zwei Teelöffeln Sand intensiv in einem Mörser. Dadurch werden die Zellmembranen der Blütenblätter zerstört, und der Farbstoff tritt aus den Zellen aus. Man gibt 100 Milliliter Brennspiritus hinzu und lässt das Gemisch unter gelegentlichem Rühren mit einem Glasstab 10 bis 15 Minuten lang stehen. Nach dem Filtrieren erhält man eine tiefviolette Lösung.

Damit lassen sich verschiedene Haushaltsprodukte untersuchen: Man legt einen Rundfilter oder weißen Kaffeefilter zirka eine Minute lang in eine Glasschale mit Rosenextrakt, nimmt ihn wieder heraus und trocknet ihn mit einem Fön. Die Prozedur wiederholt man mindestens zweimal. Nun ist das Filterpapier violett gefärbt. Anschließend gibt man jeweils einen Tropfen verschiedener Probelösungen darauf: Wasser, in Wasser gelöstes Natron (Natriumhydrogencarbonat, NaHCO_3), in Wasser gelöstes Soda (Natriumcarbonat, Na_2CO_3), in Wasser gelösten Rohrreiniger (enthält Natriumhydroxid, NaOH), Tafelessig (5-prozentige Essigsäure-Lösung) und Essigessenz (25-prozentige Essigsäure-Lösung).

Beim Auftropfen der Lösungen ändert sich mit Ausnahme der Wasserprobe die Farbe des »Indikatorpapiers«. Rosenextrakt ist also ein natürlicher Universalindikator. Demnach muss Cyanin mehrere pH-abhängige Gleichgewichte ausbilden (siehe »Blüten-Indikator«).

Bereits 1914 machte der deutsche Chemiker und Nobelpreisträger Richard Willstätter (1872–1942) die überraschende Entdeckung, dass auch die blaue Kornblume das Pigment Cyanin enthält. Den Farbunterschied zu roten Rosen führte er auf unterschiedliche pH-Werte der jeweiligen Milieus zurück. Diese pH-Wert-Theorie stellte der japanische Botaniker Keita Shibata (1877–1949) aber schon 1919 in Frage. Seiner Ansicht nach bildeten die Anthocyan-Komplexe mit Metall-Ionen, etwa Magnesium-Ionen, und verursachten dadurch die blaue Farbe. Und er behielt

Recht: 1958 gelang es dem deutschen Chemiker Ernst Bayer (1927–2002), ein für das Blau in Kornblumen verantwortliches Metalloanthocyan, Protoctyanin, zu isolieren. Allgemein bestehen derartige Komplexverbindungen aus einem oder mehreren Zentralteilchen (ein Atom oder Ion von Übergangsmetallen), die von Liganden umgeben sind. Alle Elektronen in den Bindungen zwischen Zentralteilchen und Ligand stammen von Liganden – anders als bei einer kovalenten Bindung in Molekülen. Der Aufbau dieses Pigments hat sich als außerordentlich kompliziert erwiesen. Die japanischen Wissenschaftler Toshio Goto und Tadao Kondo fanden 1991 heraus, dass im Protoctyanin sechs Anthocyan- und sechs Flavon-Moleküle (Flavone sind eine weitere Gruppe von Pflanzenfarbstoffen) mit einem Eisen- und einem Magnesium-Ion sandwichartige Strukturen ausbilden. Seit 2005 ist die gesamte Struktur aufgeklärt. Demnach sind auch zwei Kalzium-Ionen beteiligt, so dass schließlich ein tetrametallischer Komplex entsteht.

In einem einfachen Experiment lässt sich die Eigenschaft der Anthocyane nachvollziehen, mit bestimmten Metall-Ionen farbige Komplexe zu bilden. Hierzu wird zunächst der pH-Wert einer farblosen, 0,1-molaren Aluminiumchlorid-Lösung ($\text{AlCl}_3(\text{aq})$) gemessen: Er liegt bei zirka 3,5. Zum Vergleich bereitet man eine verdünnte Salzsäure mit demselben pH-Wert vor, die keine Aluminium-Ionen enthält. Beide Lösungen sollten mit dem Rosen-Indikator theoretisch eine rote Farbe annehmen. Bei der Salzsäure ist das auch der Fall. Gibt man jedoch einige Tropfen des

Rosenextrakts zur Aluminiumchlorid-Lösung, färbt sich Letztere tiefblauviolett, weil die Anthocyan-Moleküle einen Komplex mit den Aluminium-Ionen bilden.

Diesen Mechanismus nutzt man, um rote oder rosafarbene Hortensien blau zu färben. In deren Blütenblättern findet sich Delphinidin. Die Gartenprodukte mit Namen wie »Blaumacher für Hortensien« oder »Hortensien-Blau« enthalten Aluminiumsalze wie etwa Alaun (Kaliumaluminiumsulfat-Dodecahydrat, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$) oder Aluminiumsulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Löst man diese Salze in Wasser und gießt damit die Blumen, so bilden sich blaue Metalloanthocyane in den Blütenblättern. Die Farbänderung ist umkehrbar: Wenn nicht mehr genügend Aluminium-Ionen zur Verfügung stehen, färben sich die Blütenblätter zurück. Bei roten Rosen funktioniert der Trick allerdings nicht. Vermutlich liegt das an den hohen Konzentrationen von Tanninen (Gerbstoffen), die ihrerseits einen Komplex mit den Metall-Ionen bilden. ◀

QUELLEN

Eugster, C. H., Märki-Fischer, E.: Chemie der Rosenfarbstoffe. Angewandte Chemie 103, 1991

Goto, T., Kondo, T.: Struktur und molekulare Stapelung von Anthocyanen – Variation der Blütenfarben. Angewandte Chemie 103, 1991

Marquart, L. C.: Die Farben der Blüten. T. Habicht, 1835

Shiono, M. et al.: Structure of the blue cornflower pigment. Nature 436, 2005

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Natalie Schäfer, Bärbel Wehner

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

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

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Sebastian Vogel

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

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

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

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

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

Einem Teil der Auflage liegt Werbung von Plan International Deutschland e. V. bei.

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom 1.1. 2022.

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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





FRANZI SCHÄBEL (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.AT/SHOW_CONTENT.PHP?ID=81 / CC BY-SA 4.0 CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/FR-SA/4.0/LEGAL/0001)

FREISTETTERS FORMELWELT SURREALE ZAHLEN

Bei all den Kategorien von Zahlen, die Mathematiker definieren, verliert man schnell den Überblick. Von surrealen Zahlen haben viele nie gehört – aber sie erweisen sich als erstaunlich nützlich.

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

► spektrum.de/artikel/2049327

Das es unterschiedliche Arten von Zahlen gibt, lernt man schon in der Schule. Zuerst begegnet man den natürlichen Zahlen, die man zum Zählen verwendet: 1, 2, 3 und so weiter. Wie man jedoch schnell feststellt, genügen sie nicht: Möchte man etwa 3 von 2 abziehen oder 1 durch 2 dividieren, braucht man andere Mengen. So entdeckt man die ganzen (inklusive negativer), die rationalen (inklusive Brüchen) und später reelle (inklusive irrationaler) und komplexe (inklusive Wurzeln aus negativen) Zahlen. Die Mathematik macht da aber noch lange nicht Halt. Zum Beispiel beschreibt auch diese Formel eine Zahl:

$$\varepsilon = \{0 | 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots\}$$

Um zu verstehen, was es damit auf sich hat, müssen wir uns mit der Arbeit des britischen Mathematikers John Horton Conway (1937–2020) beschäftigen. Bei der Untersuchung des Strategiespiels Go habe er, so formulierte er es, die »surrealen Zahlen« entdeckt. Eine derartige Zahl wird durch die Angabe zweier Mengen definiert, welche die Zahl von oben (O) und unten (U) eingrenzen: $x = \{U|O\}$. U enthält somit ausschließlich Zahlen, die kleiner sind als x , und in O findet man nur solche, die größer sind.

Damit kann man surreale Zahlen Schritt für Schritt erzeugen. Die simpelste Zahl wird durch $\{ | \}$ definiert, wobei U und O jeweils die leere Menge sind. Wenn man das Ergebnis 0 nennt, kann man hieraus neue surreale Zahlen konstruieren, etwa $x = \{0| \}$: x kann nicht kleiner als 0 sein. Der naheliegendste Wert, der diese Bedingung erfüllt, ist die 1. Wenn man $x = \{0|1\}$ betrachtet, kann man das $\frac{1}{2}$ nennen – und so weiter. Die exakte

mengentheoretische Herleitung der surrealen Zahlen ist ein wenig komplexer, doch das Prinzip sollte klar sein.

Surreale Zahlen sind nicht nur eine aufwändige Methode, um bekannte Mengen aufzuschreiben. Tatsächlich kann man damit weit über den üblichen Zahlenbegriff hinausgehen, wie im Beispiel von ε aus der Formel klar wird. ε muss demnach größer als null sein, aber gleichzeitig kleiner als jeder reelle Wert. Es handelt sich um eine infinitesimale Zahl, also eine beliebig kleine, die dennoch positiv ist. Ein solches ε wird in vielen mathematischen Theoremen und Beweisen verwendet.

Andererseits kann man ebenso $\omega = \{0, 1, 2, 3, \dots | \}$ definieren. Dieses ist größer als jede ganze Zahl – daher könnte man es ∞ nennen. Doch spätestens seit der Arbeit von Georg Cantor (1845–1918) ist bekannt, dass es Mengen wie die reellen Zahlen gibt, die »mehr als unendlich« viele Elemente enthalten. Solche Sammlungen lassen sich nicht durch natürliche Zahlen nummerieren: Selbst wenn man unendlich weit zählen würde, bleiben immer noch reelle Zahlen übrig.

Derartige überabzählbare Mengen kann man ebenfalls durch Conways surreale Zahlen darstellen, zum Beispiel durch $\{\omega | \}$. Zudem kann man für diese Objekte Rechenregeln definieren, um sie zu addieren und zu multiplizieren. Das führt unter anderem zu dem Resultat $\omega \cdot \varepsilon = 1$.

Und ganz nebenbei kann man mit surrealen Zahlen auch das machen, was Conway ursprünglich vorhatte: nämlich Spiele wie Go beschreiben. Die Mengen U und O enthalten dann beispielsweise alle möglichen Positionen, die in der aktuellen Situation von den zwei Spielern erreichbar sind. Je nachdem, wie die darüber definierte surreale Zahl aussieht, lässt sich vorhersagen, wer am Ende gewinnt. Conways Entdeckung hat die Mathematik allemal bereichert – man kann nämlich nie genügend Zahlen haben!

LARGE HADRON COLLIDER HOFFNUNGSVOLLER NEUSTART

Nach jahrelanger Pause läuft sie wieder: Technisch verbessert und leistungsfähiger als je zuvor soll die größte Teilchenschleuder der Welt in ihrer dritten Betriebsphase den Ursachen für Ungereimtheiten im Standardmodell nachspüren.



Elizabeth Gibney ist Wissenschaftsjournalistin in London.

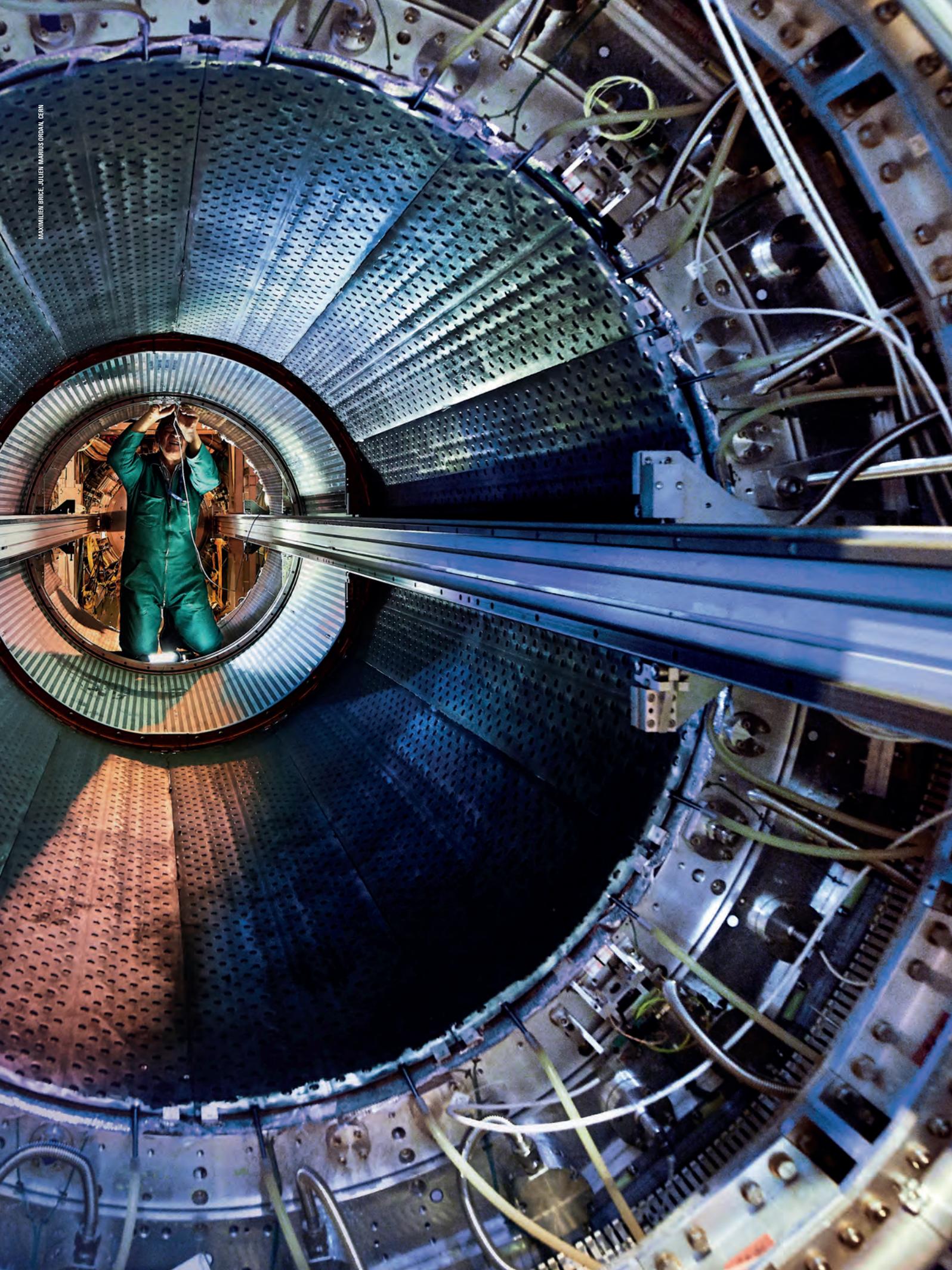
» spektrum.de/artikel/2049309

AUF EINEN BLICK DIE SUCHE GEHT WEITER

- 1** In seinen ersten beiden Betriebsphasen zwischen 2009 und 2018 half der Large Hadron Collider dabei, zentrale Aspekte der Modelle zum Mikrokosmos zu bestätigen, bis hin zur Entdeckung des Higgs-Bosons.
- 2** Doch das Theoriegebäude ist unvollständig. Es haben sich bereits diverse Ungereimtheiten angesammelt; eine eindeutige Entdeckung zuvor unbekannter Teilchen blieb bisher allerdings aus.
- 3** Neue Technik und Software erlauben nun präzisere und umfangreichere Vermessungen bei höheren Energien. Das soll entscheidende Hinweise auf ein besseres Weltmodell bringen.

UMRÜSTPHASE

Während Umbauarbeiten zwischen 2018 und 2022 wurden unter anderem Detektoren am ALICE-Experiment erneuert.



Die Jagd nach neuer Physik geht wieder los. Der Large Hadron Collider (LHC) ist die leistungsfähigste Maschine der Welt, mit der sich enorm energiereiche Teilchen aufeinanderschießen lassen. Nun ist er nach einer mehr als dreijährigen Unterbrechung wieder in Betrieb. Seit Juli 2022 sausen erneut Protonenstrahlen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch die 27 Kilometer lange, unterirdische Rundstrecke am CERN, dem europäischen Labor für Teilchenphysik in der Nähe von Genf.

Die erste Betriebsphase des LHC lief von 2009 bis 2013, die zweite von 2015 bis 2018. Hier loteten zahlreiche Forschungsgruppen die Tiefen des so genannten Standardmodells aus, der derzeit besten theoretischen Beschreibung aller Teilchen und Kräfte im Universum. Insgesamt bestätigten die Experimente dessen Voraussagen. Ein gefeierter Triumph war die triumphale Entdeckung des lange gesuchten Higgs-Bosons 2012. Obschon zuletzt diverse kleinere Ungereimtheiten aufgetaucht sind, gibt es noch keinen eindeutigen Beweis für unbekannte Teilchen.

Nun hoffen alle Beteiligten darauf, dass es diesmal anders wird. Der »Run 3« verspricht viel mehr Daten, bessere Detektoren und innovative Methoden. Darüber hinaus gibt es nun sozusagen eine Schatzkarte auf Basis der bisher gefundenen kleineren Anomalien. Sie lassen Hinweise darauf erahnen, wo sich die Suche nach Teilchen jenseits des Standardmodells am ehesten lohnen könnte.

Nach der umfassenden Umrüstung kann die dritte Version des LHC Protonen bei 13,6 Billionen Elektronvolt (TeV) kollidieren lassen (ein Elektronvolt ist die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es mittels einer Spannungsdifferenz von einem Volt beschleunigt wird). Das ist etwas mehr als bei der zweiten Betriebsphase, während der 13 TeV

»VERTEX LOCATOR« Der Detektor, hier von zahlreichen Leitungen verdeckt, befindet sich in einem Abstand von lediglich drei Millimetern zum Strahl des LHC. Er hilft dabei, den Punkt zu bestimmen, an dem die Protonen kollidiert sind.

möglich waren. Die impulsreicheren Zusammenstöße steigern die Chance, dass sich dabei Teilchen bemerkbar machen, für deren Erzeugung viel Energie nötig ist. Außerdem sind die Protonen in den Strahlen des LHC jetzt zu kompakteren Teilchenpaketen zusammengefasst, wodurch sie häufiger aufeinanderprallen, statt aneinander vorbeizufiegen. Letztlich sollen die Experimente in Run 3 so viele Daten liefern wie die ersten beiden Läufe zusammen.

Zur Bewältigung der Teilchenflut wurden auch die Detektoren der Maschine aufgerüstet. Das sind dicke Schichten spezialisierter Sensoren, die bei den Kollisionen entstandene Partikel einfangen und deren Energie, deren Impuls und andere Eigenschaften messen (siehe »Datenlawine«).

Schon in der Vergangenheit war die Unmenge an dabei einströmenden Daten bloß mit Tricks zu bewältigen. Es finden 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde statt, und jedes Mal, wenn ein Proton auf ein anderes Proton stößt, können Hunderte von Teilchen entstehen. Besondere Systeme, so genannte Trigger, filtern vorab die potenziell interessantesten dieser Ereignisse heraus und verwerfen den Großteil der Daten. Bei CMS beispielsweise – einem der vier Hauptexperimente des LHC – bewertet ein in die Hardware integrierter Trigger Eigenschaften wie die Energie der Teilchen und trifft danach eine grobe Auswahl von etwa 100000 Ereignissen pro Sekunde. Unter diesen wiederum entscheidet sich eine Software für zirka 1000. Nur sie werden für weitere Analysen herangezogen.

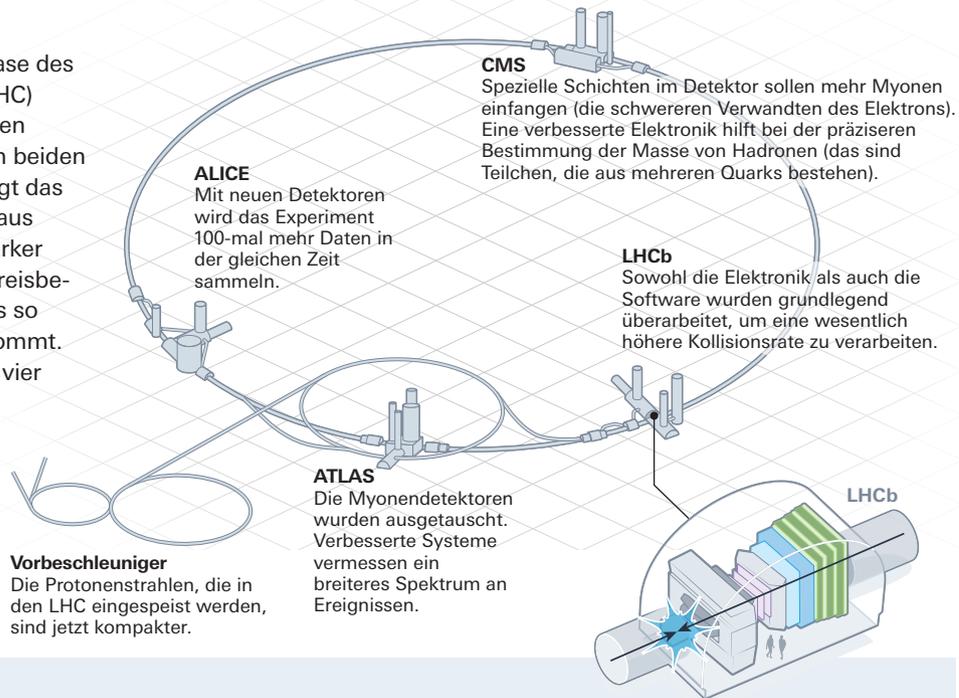
Mehr Daten erfordern leistungsfähigere Trigger, die in kürzerer Zeit besser vorsortieren können. Dabei erweisen sich bestimmte Computerprozessoren als hilfreich, die ursprünglich für Videospiele entwickelt wurden, so genannte GPUs. Diese können die vollständigen Bahnen der Teilchen außerordentlich effizient aus den einzelnen Signalen im Detektor rekonstruieren und der Software schneller mehr Kriterien für eine Detailauswahl liefern. Dadurch werden möglicherweise bedeutsame Kollisionen entdeckt, die man zuvor übersehen hätte.

An einem weiteren Hauptexperiment, dem LHCb-Detektor, haben die Teams insbesondere die Elektronik überarbei-



Datenlawine

In der dritten Betriebsphase des Large Hadron Collider (LHC) werden so viele Messdaten anfallen wie in den ersten beiden zusammen. Einerseits liegt das daran, dass die Strahlen aus Protonen stabiler und stärker konzentriert durch den Kreisbeschleuniger laufen und es so häufiger zu Kollisionen kommt. Andererseits wurden die vier Hauptexperimente CMS, ATLAS, ALICE und LHCb mit ihren großen Detektoren technisch aufgerüstet.



Bessere Detektoren

Die großen Experimente, hier der LHCb-Komplex, wurden vor dem Neustart des LHC umfangreich aufgerüstet. Die Aufsicht zeigt, wie Teilchen, die von links kommend bei Kollisionen entstehen, durch verschiedene Schichten wandern, wo ihre Eigenschaften genau vermessen werden.

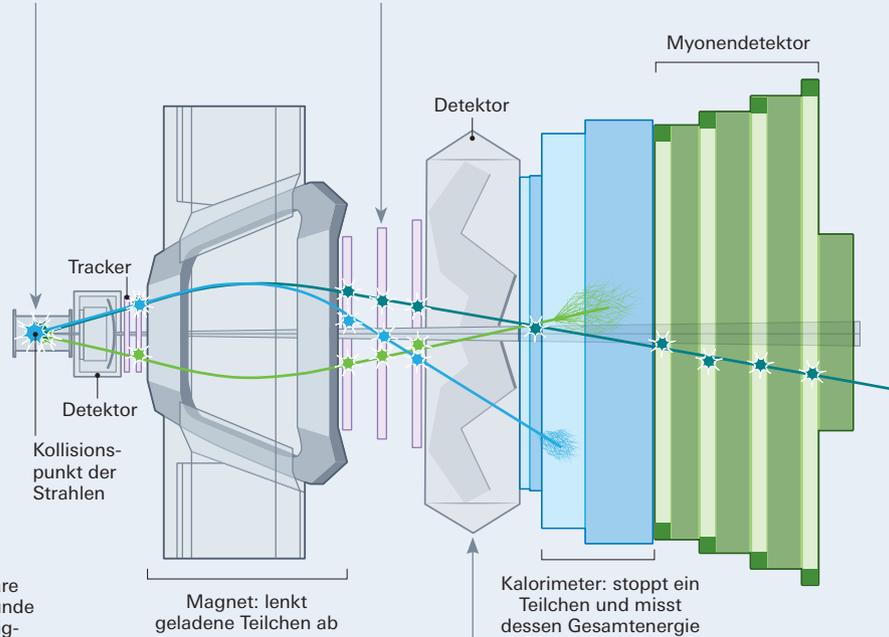
Lokalisierung

Bei den Kollisionen der Protonenstrahlen entstehen kurzlebige B-Hadronen. Nur wenige Millimeter vom Ort ihrer Erzeugung entfernt zerfallen sie wieder. Ein neuer »Vertex Locator« wird den Punkt genauer bestimmen.

Verfolgung

So genannte Tracker dienen dazu, ein Teilchen auf seinem Weg zu verfolgen. Zwei neue Detektoren können nahezu identische Pfade besser auseinanderhalten und von trügerischem Hintergrundrauschen trennen.

- geladenes Hadron (etwa ein Pion oder Proton)
- Elektron
- Myon



Elektronik

Neue Bauteile und Software erlauben es nun, pro Sekunde 40 Millionen Kollisionsereignisse nach interessanten Anomalien zu durchsuchen. Zuvor war die Auswahl durch einen Hardware-Trigger auf eine Million begrenzt.

Identifizierung

Weitere Detektorschichten ermitteln beispielsweise die Geschwindigkeit geladener Partikel genauer als zuvor. Zusammen mit dem zurückgelegten Pfad lässt das Rückschlüsse auf die Art des Teilchens zu.

NIK SPENCER/NATURE, MACH/CEEN, GIBNEY, E. HOW THE REQUIPped LARGE HADRON COLLIDER WILL HUNT FOR NEW PHYSICS, NATURE BUS, 2022; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

tet. Hier gibt es keinen in der Hardware verankerten Trigger mehr, der nach festen Kriterien manche Kollisionen vorab aussortieren würde. Stattdessen wird künftig nur noch Software nach außergewöhnlichen Ereignissen suchen. Insgesamt soll das verbesserte Experiment in Run 3 pro Sekunde mindestens zwei Gigabyte Daten speichern – viermal mehr als beim letzten Mal. Es sei »fast ein völlig neuer Detektor«, schwärmt Yasmine Amhis, LHCb-Physikerin vom Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie im französischen Orsay.

Ludovico Pontecorvo, technischer Koordinator am ATLAS-Detektor, dem dritten großen Experiment am LHC, weist darauf hin, dass in Run 3 auch genauere Vermessungen der Eigenschaften bekannter Teilchen wie dem Higgs-Boson anstehen. Das allein würde möglicherweise schon zu Ergebnissen führen, die im Widerspruch zur bekannten Physik stünden. So könnte eine genauere Messung manche Fehlerbalken so weit schrumpfen lassen, dass die Werte plötzlich außerhalb der Vorhersagen des Standardmodells liegen.

Kleine Hinweise, noch keine große Spur

Darüber hinaus gibt es aus den vergangenen Messungen bereits diverse merkwürdige Ergebnisse, die dem Standardmodell zu widersprechen scheinen. Die Befunde sind noch nicht eindeutig – es könnte sich um statistische Ausreißer handeln, aber auch um echte Anomalien (siehe »Hinweise auf neue Physik?«). In diesem Fall könnten die Daten dazu beitragen, einige Lücken im Verständnis des Universums zu schließen. Denn das Standardmodell ist in mancherlei Hinsicht unvollständig. So gibt es dort zum Beispiel keine Erklärung für Phänomene wie die Dunkle Materie.

Ein jüngerer Beispiel stammt aus dem Tevatron-Beschleuniger am Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) in Batavia, Illinois, der 2011 abgeschaltet wurde. Seitdem hat eine Forschungsgruppe die angehäuften Daten des dortigen CDF-Experiments näher ausgewertet. Im April 2022 berichtete sie, die Masse eines Elementarteilchens namens W-Boson sei deutlich höher als vom Standardmodell vorhergesagt. In diesem ist das W-Boson Überträger einer fundamentalen Kraft – der schwachen Kernkraft – und etwa an radioaktiven Zerfällen beteiligt.

Der Befund vom Fermilab passt nicht zu den LHC-Daten, wenngleich die entsprechenden Messungen bei ATLAS und LHCb weniger genau waren. Das CMS-Team arbeitet an einer eigenen Auswertung mit Erkenntnissen aus der zweiten Betriebsphase. Die Daten von Run 3 könnten eine endgültige Antwort liefern, allerdings wird das einige Zeit benötigen, da die Masse des W-Bosons erfahrungsgemäß schwer zu bestimmen ist.

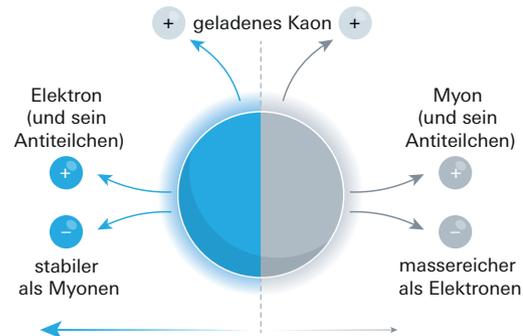
Am LHC haben sich weitere Ausreißer bemerkbar gemacht. Insbesondere sammeln sich seit knapp einem Jahrzehnt Hinweise auf ein seltsames Verhalten von »B-Mesonen« an. Diese flüchtigen Teilchen sind aus einem Paar von Elementarteilchen namens Quarks zusammengesetzt und zerfallen schnell. Einer der Bestandteile ist ein Bottom oder Beauty genanntes Quark – daher die Bezeichnung des Mesons. Laut LHCb-Analysen entstehen beim Zerfall von B-Mesonen häufiger Elektronen als deren schwerere Verwandten, die Myonen. Das sollte nicht der Fall sein.

Hinweise auf neue Physik?

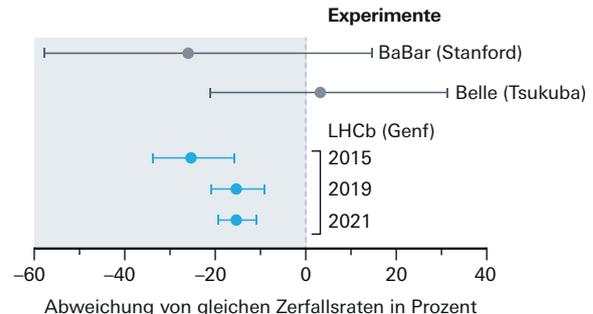
Einige Messergebnisse scheinen nicht mit den Vorhersagen des Standardmodells der Teilchenphysik übereinzustimmen. Die Daten reichen allerdings noch nicht aus, um von einer Entdeckung zu sprechen – bei näherem Hinsehen könnten die Anomalien auch wieder verschwinden.

B-Mesonen

Das B-Meson ist ein kurzlebiges Teilchen, das auf zwei Weisen zerfallen kann. Beide sollten ähnlich oft auftreten.



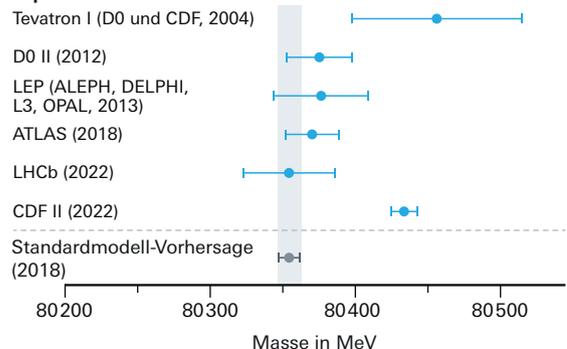
Am LHCb-Detektor wurde der Zerfallsweg zum Elektron etwa 15 Prozent häufiger beschritten. Das ließe sich durch den Einfluss von unbekanntem Teilchen erklären. Der Befund passt zu den Ergebnissen anderer Experimente.

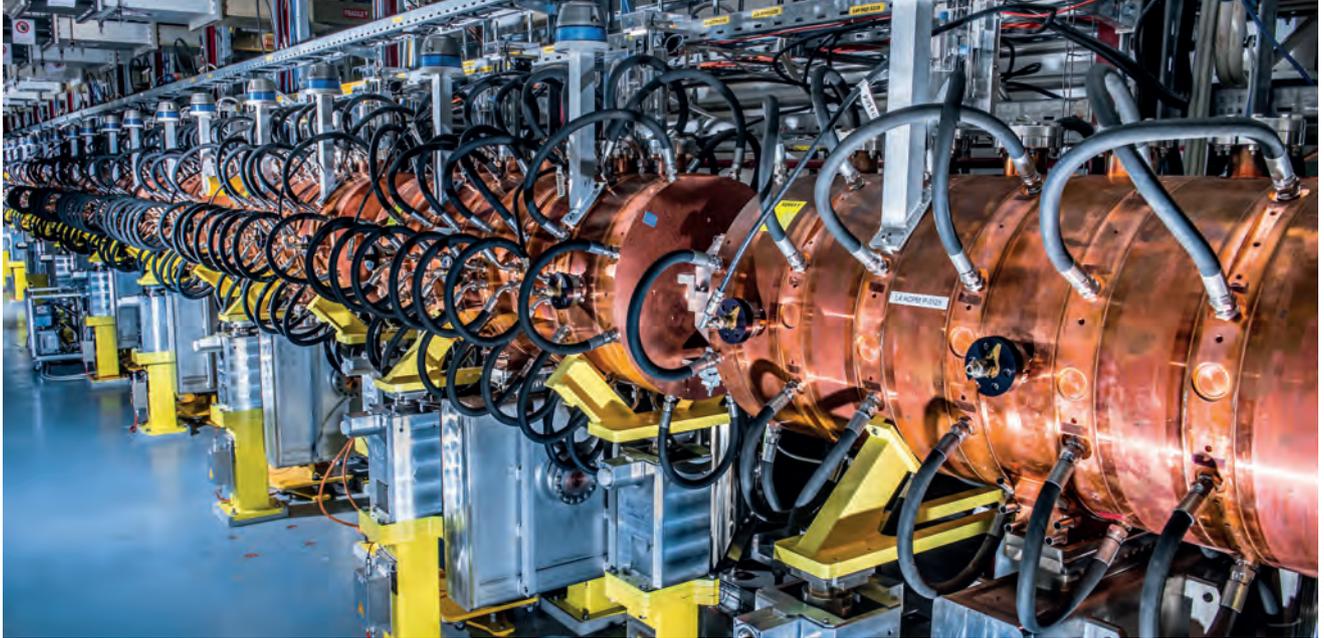


W-Bosonen

Im CDF-Detektor am Teilchenlabor Tevatron in den USA scheint das W-Boson schwerer zu sein als vom Standardmodell vorhergesagt und bei anderen Experimenten gemessen.

Experimente





ROBERT HRAJIL, CERN

»LINAC4« Der 86 Meter lange Linearbeschleuniger produziert seit 2020 die Protonenstrahlen für den Large Hadron Collider.

Eigentlich zieht das Standardmodell die einen nicht den anderen vor, erklärt LHCb-Physikerin Tara Shears von der englischen University of Liverpool. Dennoch: »Myonen werden zu etwa 15 Prozent seltener produziert, und das ist völlig bizarr.«

Das Ergebnis unterscheidet sich von den Vorhersagen des Standardmodells mit einer Signifikanz von etwa drei Sigma. Das ist ein Maß für die Abweichung vom erwarteten Mittelwert und entspricht einer Wahrscheinlichkeit von lediglich 0,3 Prozent, dass die Diskrepanz allein auf Zufall beruht. Weitere Daten müssen zeigen, ob der Effekt real oder nur eine statistische Fluktuation ist. Er könnte auch auf falsch interpretierten Messungen etwa wegen unverständlicher technischer Details beruhen. Dann dürfte die nächste Phase der Datenerfassung eine Gegenprüfung erlauben, glaubt Shears. Immerhin wurden viele der maßgeblichen Teile am LHCb-Detektor ersetzt. »Wir wären geknickt, wenn die Anomalie verschwindet. Aber so etwas passiert, so ist das Leben in der Wissenschaft.«

Hypothetischer Vermittler zwischen den Familien

Allerdings besteht Grund zur Hoffnung, dass doch etwas Neues dahintersteckt. Es gibt ähnlich feine Abweichungen bei anderen Wechselwirkungen von Bottom-Quarks am LHCb; sie zeigen sich ebenso bei Experimenten in Japan und den USA. Diese Art von Nachforschungen ist genau das Metier von LHCb. Der Detektor wurde speziell dafür entwickelt, die Zerfälle von Teilchen mit schweren Quarks im Detail zu untersuchen und indirekte Hinweise auf exotische Phänomene zu sammeln, die sich darauf auswirken. CMS und ATLAS sind hingegen allgemeiner ausgelegt.

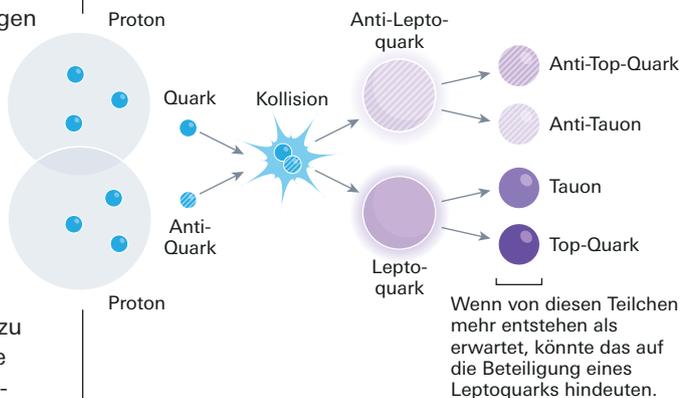
Dafür ermöglichen CMS und ATLAS im Gegensatz zu LHCb eine direkte Suche nach exotischen Teilchen, die theoretisch die noch unbestätigten Anomalien verursachen könnten. Ein solches hypothetisches Objekt heißt Leptoquark. Es soll bei hohen Energien Eigenschaften von

zwei sonst unterschiedlichen Teilchenfamilien annehmen, einerseits den Leptonen, zu denen Elektronen und Myonen gehören, und andererseits den Quarks (siehe »Zerfallsprozesse«). Das Hybridteilchen stammt aus Modellen, die drei fundamentale Wechselwirkungen – die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft – als Aspekte ein und derselben Grundkraft betrachten. Das Leptoquark könnte die LHCb-Ergebnisse erklären. Es passt außerdem zu einem anderen seltsamen Befund des Experiments »Muon g-2« am Fermilab. Dort schien sich laut einer Veröffentlichung vom April 2021 die magnetische Ausrichtung von Myonen anders zu verhalten als erwartet (siehe »Spektrum« Juli 2021, S. 22).

Im März 2022 präsentierten CMS-Teammitglieder auf einer Konferenz im italienischen La Thuile Hinweise auf

Zerfallsprozesse

Der Einfluss kurzlebiger, schwerer Teilchen lässt sich anhand der stabileren, leichteren Exemplare feststellen, in die sie zerfallen. Beispielsweise könnte das hypothetische Leptoquark, das in sich Eigenschaften von Leptonen und Quarks vereint, produziert und wieder vernichtet werden.



NIK SPENCER/MITRE, GENEVY, E. HOW THE BEWAMPED LARGE HADRON COLLIDER WOULD HUNT FOR NEW PHYSICS, NATURE 606, 2022, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



CMS-UPGRADES Während der Umbauarbeiten wurden am CMS-Detektor Technologiedemonstratoren installiert. Das soll Erfahrungswerte für den zukünftigen High-Luminosity LHC liefern.

mehrere neuartige Phänomene, darunter ein Lepton jenseits des Standardmodells. Dieses Teilchen würde mit Leptoquarks wechselwirken und wird von einigen Leptoquark-Theorien vorhergesagt. Es gab einen leichten Überschuss an Teilchen, in die das vorgeschlagene Lepton zerfallen könnte, nämlich Bottom-Quarks und Tauonen (das sind die massereichsten Geschwister von Elektronen und Myonen). Die statistische Signifikanz beträgt allerdings lediglich 2,8 Sigma, das entspricht einer Wahrscheinlichkeit eines Zufallbefunds von etwa einem halben Prozent.

Ein weiteres faszinierendes Ergebnis stammt von ATLAS, wo Ismet Siral von der University of Oregon in Eugene nach hypothetischen schweren Teilchen sucht. In einer über drei Jahre gesammelten Datenmenge aus Billionen von Kollisionen fanden Siral und sein Team sieben Kandidaten bei rund 1,4 TeV. Das entspricht etwa dem Achtfachen der Masse des Tauons, des schwersten bekannten Elementarteilchens. Hier liegt die Signifikanz bei 3,3 Sigma, und vorerst bleibt rätselhaft, um was für ein Teilchen es sich genau handeln könnte. »Wir wissen nicht, ob wirklich etwas dahintersteckt, wir brauchen mehr Daten. Hier kommt Run 3 ins Spiel«, sagt Siral.

Es befindet sich noch ein viertes großes Experiment am LHC: ALICE. Es ist auf die extremen Bedingungen zugeschnitten, die bei Kollisionen zwischen Bleikernen auftreten. Diese schweren Ionen lässt der LHC zusammenprallen, wenn er nicht gerade mit Protonen arbeitet. Laut den Analysen aus den ersten beiden Betriebsphasen zeigt die dabei entstehende heiße, dichte Suppe aus Fundamentarteilchen gewisse Merkmale eines so genannten Quark-Gluon-Plasmas. In solch einem Zustand hat sich die Materie vermutlich unmittelbar nach dem Urknall befunden. Wie der LHCb wurde auch ALICE umfassend aufgerüstet und erhielt unter anderem einen schnelleren, rein software-

basierten Trigger. Das Experiment wird dank verschiedener Verbesserungen nun 100-mal mehr Ereignisse registrieren können als bei den beiden vorherigen Betriebsphasen.

Mit Run 3 kommen außerdem völlig neue Experimente an den LHC. So befindet sich FASER nur einen halben Kilometer von ATLAS entfernt. Es wird leichten und schwach wechselwirkenden Teilchen nachspüren, darunter Neutrinos und Kandidaten für die Dunkle Materie. Solche Teilchen würden von ATLAS nicht registriert, da sie den Kollisionen auf einer Flugbahn entkommen, die sich dicht an den Strahlverlauf des LHC schmiegt, wo sich keine Detektoren befinden.

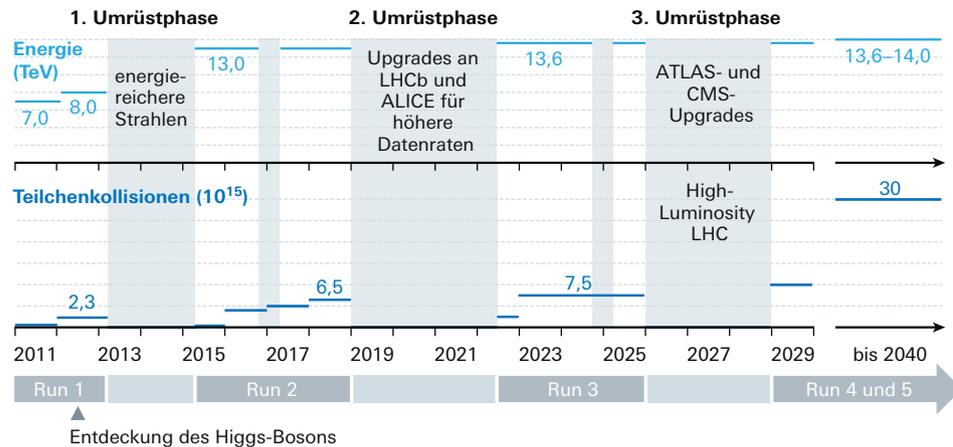
Unterdessen arbeiten ATLAS und CMS jetzt zwar mit verbesserter Technik, sie erhalten jedoch bis zur nächsten längeren Abschaltung keine größeren Hardware-Upgrades. 2026 wird der LHC dann noch einmal generalüberholt. Das wird die »Luminosität« weiter steigern – der Begriff ist in der Teilchenphysik ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Beschleunigers und hängt davon ab, wie dicht die Teilchenpakete sind und wie oft sie zusammenstoßen. Danach soll der LHC als »High-Luminosity LHC« den Betrieb 2029 wieder aufnehmen (siehe »Zeitplan des LHC«) und wiederum zehnmal produktiver sein als während aller vorherigen Betriebsphasen zusammen. Dafür wird bei CMS und ATLAS anhand von Prototypen die nötige Technologie erforscht.

Die gleichen Pfade besser kartieren – oder ganz neue Wege gehen?

Physiker wie Siral wollen aber nicht nur mehr Daten sammeln, sondern grundsätzlich die Art und Weise ändern, wie am LHC nach neuen Teilchen gesucht wird. Bisher bestand ein Großteil der Forschung darin, konkrete Vorhersagen zu überprüfen (etwa während der Suche nach dem Higgs-Teilchen) oder bestimmte Hypothesen über neue Physik zu testen. Das galt lange als eine fruchtbare Strategie, da es gute Anhaltspunkte für eine Suche gab. Viele erwarteten, bald nach dem Start des LHC neue schwere Teilchen zu finden, wie sie von so genannten supersymmetrischen Theorien postuliert wurden. Bis heute wurden allerdings keine entdeckt. Inzwischen scheint kaum noch eine be-

Zeitplan des LHC

Der Large Hadron Collider (LHC) wird zwischen 2026 und 2029 ein weiteres Mal aufgerüstet, um mehr Teilchenkollisionen bei höheren Energien zu ermöglichen, und dann noch ein Jahrzehnt betrieben werden.



NIK SPENCER/NATURE, NACH CERN, GIBNEY, E.: HOW THE REVAMPED LARGE HADRON COLLIDER WILL RUN FOR NEW PHYSICS, NATURE 605, 2022; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

stimmte Erweiterung des Standardmodells vielversprechender zu sein als irgendeine andere.

Alternative Herangehensweisen sind weniger durch Erwartungen eingeschränkt. Sowohl bei ATLAS als auch bei CMS laufen zum Beispiel Fahndungen nach langlebigen Teilchen, die über mehrere Kollisionsvorgänge hinweg bestehen bleiben. Doch solche Analysestrategien bedeuten oft, so Siral, dass man eine völlig neue Software schreiben muss, die einige der sonst üblichen Annahmen verwirft.

Vermutlich kann das maschinelle Lernen bei alledem helfen. Viele LHC-Experimente nutzen die Technologie bereits, um bestimmte Arten von Kollisionen vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden. Dabei handelt es sich um »überwachtes« Lernen: Dem Algorithmus wird ein Muster vorgegeben, nach dem er suchen soll. Zunehmend werden jedoch »unüberwachte« Spielarten des maschinellen Lernens populär. Sie erfassen ohne vorab aufgestellte Thesen ein breites Spektrum an Anomalien. So kann ein neuronales Netz beispielsweise Ereignisse mit einer Simulation des Standardmodells vergleichen. Wenn diese den Vorgang nicht nachbilden kann, handelt es sich um eine Anomalie. Obwohl solche Ansätze noch nicht systematisch angewendet werden, »wird es in diese Richtung gehen«, glaubt Sascha Caron von der Radboud-Universität Nimwegen in den Niederlanden, der an derartigen Auswertungen der ATLAS-Daten arbeitet.

Um die Suche weniger voreingenommen zu gestalten, sind die Trigger, die Ereignisse vorab als interessant klassifizieren, von entscheidender Bedeutung. Bei den modernen GPUs können viel mehr verschiedene Kriterien berücksichtigt werden. Darüber hinaus setzt das CMS-Experiment auf eine Strategie namens Scouting. Dabei handelt es sich um eine Auswertung von groben Rekonstruktionen aller etwa 100 000 Ereignisse, die ursprünglich ausgewählt, aber nicht in allen Einzelheiten gespeichert wurden.

Auch die Trigger selbst greifen bei ihrer Entscheidungsfindung eventuell bald auf maschinelles Lernen zurück. Die CERN-Physikerin Katya Govorkova hat mit ihrem Team einen schnellen Algorithmus entwickelt, der unter den 40 Millionen Ereignissen pro Sekunde diejenigen identifizie-

ren kann, die nicht zum Standardmodell passen. In Run 3 soll das Programm anhand der CMS-Kollisionen trainiert und mit dem konventionellen Trigger des Experiments verglichen werden. Laut Govorkova wird eine Herausforderung darin bestehen, zu wissen, wie man Ereignisse analysiert, die der Algorithmus als anomal klassifiziert – denn er kann nicht sagen, warum etwas außergewöhnlich ist, sondern nur erkennen, dass dem so ist.

Yasmine Amhis vom LHCb betont, nun komme es darauf an, aufgeschlossen zu sein. Die Spur, die zu einer Theorie jenseits des Standardmodells führe, könne überall zu finden sein. Die gegenwärtigen Anomalien mögen faszinierend sein, doch in der Vergangenheit erwiesen sich bereits zahlreiche verführerische Ausreißer als statistische Fluktuationen. Sie verschwanden, sobald mehr Daten vorlagen. Darum sei es jetzt wichtig, die Physik in ihrer ganzen programmatischen Breite voranzutreiben, meint Amhis. »Wir dürfen nicht alles auf eine Karte setzen.« ◀

QUELLEN

Abi, B. et al.: Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm. *Physical Review Letters* 126, 2021

ATLAS Collaboration: Search for heavy, long-lived, charged particles with large ionisation energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS experiment and the full Run 2 dataset. *ArXiv* 2205.06013, 2022

CDF Collaboration: High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector. *Science* 376, 2022

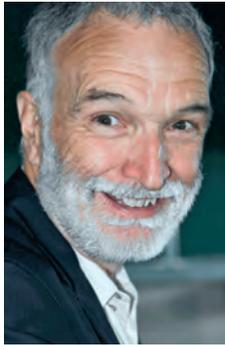
Govorkova, E. et al.: Autoencoders on field-programmable gate arrays for real-time, unsupervised new physics detection at 40 MHz at the Large Hadron Collider. *Nature Machine Intelligence* 4, 2022

LHCb Collaboration: Test of lepton universality in beauty-quark decays. *Nature Physics* 18, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 605, S. 604–607, 2022

SCHLICHTING! DAS GEGENTEIL EINER SEIFENBLASE



Ein Tropfen, der in eine Seifenlösung fällt, kann sich beim Eintauchen mit einer dünnen Luftschicht umschließen und gemeinsam mit dieser langsam absinken. Ob das klappt, hängt davon ab, wie genau die Luft beim ersten Kontakt der Flüssigkeiten verdrängt wird.

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/2049330

Wer fragt die These und die Antithese, ob sie eine Synthese werden wollen?

Stanisław Jerzy Lec (1909–1966)

► Wenn man jemanden fragt, was das Gegenteil einer Blase ist, so bekommt man oft zu hören, das sei ein Tropfen. Das klingt zunächst plausibel – ist es aber nicht. Denn eine Blase besteht aus einer Luftpuppe mit einer Wasserhülle und befindet sich in der Luft. Das genaue Gegenteil wäre eine Wasserpuppe mit einer Luftpuppe unter Wasser. Solche »Antiblasen«, gelegentlich nach dem englischen Begriff als Antibubbles bezeichnet, gibt es tatsächlich. Manchmal werden sie sogar zufällig hervorgebracht, wenn Tropfen in eine Flüssigkeit fallen.

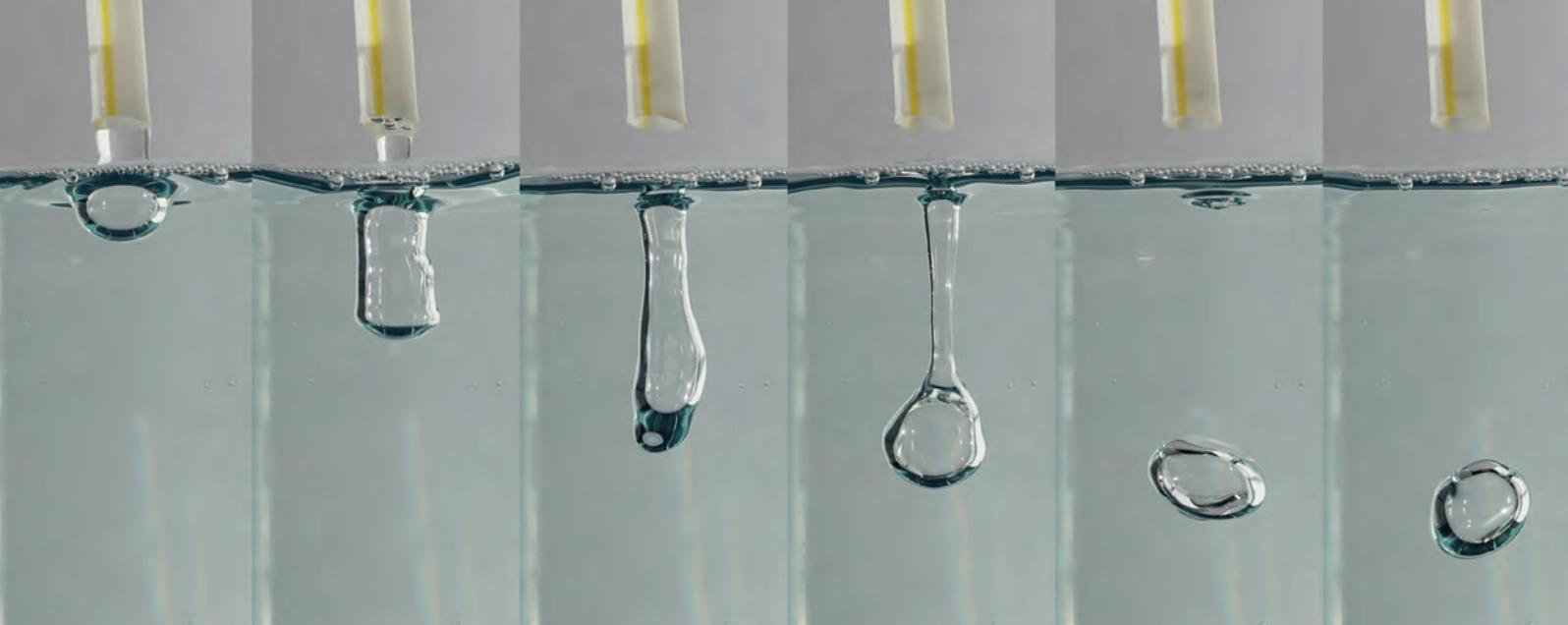
Um nicht auf sein Glück warten zu müssen, kann man Antiblasen gezielt herstellen. Ähnlich wie bei Seifenblasen gelingt das am leichtesten in Wasser, dem man einige Tropfen Spülmittel zugefügt hat. Allerdings ist ein wenig Übung erforderlich. Dazu braucht man einen Trinkhalm, den man ein paar Zentimeter tief in die Lösung (etwa ein Gramm Spülmittel pro Liter Leitungswasser) taucht. Dann verschließt man ihn oben mit einem Finger und hebt ihn einige Millimeter über die Oberfläche. Wenn man die Öffnung frei gibt, schießt die Füllung heraus und erzeugt nach etwas Ausprobieren eine zirka einen Zentimeter große Antibubble.

Der Prozess läuft prinzipiell ähnlich ab wie bei einer Seifenblase. Diese entsteht, indem eine dünne Seifen-schicht von einem Luftstrom ausgebeult wird und das fili-

grane, schlauchförmige Gebilde sich bei einer kritischen Länge zu einer Kugel abschnürt (»Spektrum« Juni 2016, S. 44). Zur Herstellung einer Antibubble reicht der kurze Fall eines Tropfens aus, die beim Aufprall auf der Flüssigkeitsoberfläche zusammengepresste Luftschicht beim Eintauchen ins Wasser gewissermaßen mitzunehmen. Dabei beult er sie ballonartig aus, bis es ebenfalls zu einer Abschnürung kommt – in diesem Fall des Luftfilms, der die eingetauchte Wasserportion umhüllt.

Um sich den Vorgang im Detail vorzustellen, hilft das Bild einer Wasserschicht, die unter dem Einfluss der Schwerkraft auf die Wasseroberfläche trifft. Zwischen den beiden befindet sich Luft, die zur Seite abgedrängt wird.

Das ist kein Problem, solange sie frei strömen kann. Sobald jedoch ein gewisser Abstand unterschritten wird, bestimmen immer mehr typische Grenzflächenkräfte das Fließverhalten der entweichenden Luft. Sie wird im zunehmend schmalen Spalt zugleich verdrängt und zusammengedrückt. Deswegen können sich die Gasteilchen nicht mehr frei und unabhängig voneinander im Raum bewegen. Vielmehr entsteht das Profil einer laminaren Strömung. Das heißt, die Luftmoleküle an der Grenze zum Wasser bleiben daran haften, während ihre Geschwindigkeit zur Mitte hin zunimmt. Hinzu kommt, dass mit geringerer Spaltbreite die Zähigkeit der Luft an Einfluss gewinnt. Das äußert sich in einer gesteigerten Reibungskraft, die den Luftstrom verlangsamt. Anschaulich gesprochen verfestigen sich dadurch die Verhältnisse in der Hülle und sie werden gegenüber störenden Einflüssen stabilisiert.



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

Die Begrenzungen der auf diese Weise gequetschten Luft sind jedoch nicht unbeweglich wie bei festen Wänden, sondern flüssig. Das umliegende Wasser könnte also infolge der Reibungskraft mitgeführt werden. Der Luftstrom würde dann nicht gebremst, sondern bliebe schnell, dünn und fragil. Das stünde der Entstehung einer Antibubble entgegen.

An der Stelle kommen die mit dem Spülmittel verarbeiteten Tenside ins Spiel. Das sind lang gestreckte Moleküle mit einem dem Wasser zugewandten (hydrophilen) und einem Wasser abweisenden (hydrophoben) Ende. Sie sammeln sich an der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit. Das minimiert die dortige Energie und

ANTIBLASE Die Bildfolge zeigt in Abständen von vier hundertstel Sekunden die Erzeugung einer mit Flüssigkeit gefüllten Lufthülle.

stabilisiert den Luftstrom: Ein Mitreißen der flüssigen Grenzschicht würde die Konzentration der dort versammelten Tensidmoleküle verringern und die Oberflächenspannung erhöhen. Dem wirkt das System entgegen, indem es eine Gegenströmung antreibt, welche die Tensidkonzentration in der Grenzschicht aufrechterhält. Die gegensätzlichen Tendenzen versteifen die Wände sozusagen.

Antibubbles haben nicht nur eine physikalisch komplizierte Geburt, obendrein ist ihre Lebensdauer ebenso wie die von Seifenblasen begrenzt. Um die Grenzflächenenergie zu minimieren, streben beiderlei Gebilde eine Kugelgestalt an. Weiterhin wird dadurch Energie an die Umgebung abgegeben, dass der Schwerpunkt der Blasen sinkt. Bei einer Seifenblase rinnt die Flüssigkeit in der Haut schwerkraftbedingt hinab, bis diese schließlich an der dünnsten Stelle reißt. Auch bei der Antibubble spielt die Gravitation eine Rolle. Hier drückt die innere Wasserkugel mit ihrem Gewicht auf die Lufthülle und presst allmählich Luft hoch. Dadurch wird die gasförmige Schicht unten irgendwann so fein, dass sie platzt. Das ganze Schauspiel endet bei der Seifenblase mit umherfliegenden Bruchstücken aus Lauge, die sich zu Tröpfchen zusammenziehen und zu Boden fallen. Bei der Antibubble ist es wieder umgekehrt: Die Fetzen der Lufthülle schrumpfen zu Bläschen im Wasser und steigen zu seiner Oberfläche auf.



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

AUFSTIEG Die Luft aus der Hülle strebt nach oben und sammelt sich dort in einer kleinen Aufwölbung. Somit ist die Antibubble nicht mehr ganz kugelförmig. Das Licht wird an der Luftschicht total reflektiert, darum ist nur der mittlere Bereich durchsichtig.

QUELLE

Suhr, W.: Invertierte Seifenblasen: Antibubbles. Physik in unserer Zeit 2, 2022

WEBLINK

www.youtube.com/watch?v=SeKDD-plkbU

Das Video demonstriert den Herstellungsprozess mit einem Trinkhalm und das physikalische Verhalten der Antiblasen.

KOMPLEXITÄT AUF DER JAGD NACH UNKNACKBAREN FUNKTIONEN

Ob es überhaupt möglich ist, Daten völlig sicher zu verschlüsseln, hängt von einer der bedeutendsten Fragen der theoretischen Informatik ab: Wie effizient lässt sich beurteilen, ob eine Zeichenfolge zufällig entstanden ist?



Erika Klarreich hat in Mathematik promoviert und ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley (Kalifornien).

» [spektrum.de/artikel/2049312](https://www.spektrum.de/artikel/2049312)

Das Kinderbuch »Alice im Wunderland« steckt voller verschlüsselter Anspielungen auf anspruchsvolle politische Inhalte. Und tatsächlich beschäftigte sich der Autor, Lewis Carroll, der eigentlich Charles Dodgson hieß, auch in seiner Forscherkarriere mit Verschlüsselungen. Wahrscheinlich würde er sich freuen, dass »Alice« inzwischen in der Informationstheorie als Synonym für einen Sender oder einen Empfänger genutzt wird.

Im Jahr 1868 war Dodgson überzeugt, den heiligen Gral der Kryptografie ausgemacht zu haben: Er erklärte die seit dem 16. Jahrhundert verwendete Vigenère-Chiffre (siehe »Vigenère-Chiffre«) als unknackbar. Er konnte das zwar nicht beweisen, hatte jedoch gute Gründe für die Aussage. Denn nach mehr als 300 Jahren war seines Wissens noch immer keine effiziente Methode bekannt, um die Chiffre zu brechen.

Es gab nur ein kleines Problem: Fünf Jahre vor Dodgsons wagemutiger Behauptung hatte der preußische Infanteriemajor Friedrich Kasiski die Vigenère-Chiffre in seinem damals kaum beachteten Buch »Die Geheimschriften und die Dechiffrier-Kunst« geknackt.

Kryptografen spielen dieses Katz-und-Maus-Spiel – das Erfinden und Knacken von Codes – schon so lange, wie Menschen geheime Informationen teilen. »Seit Tausenden

von Jahren versuchen wir herauszufinden, ob man den Kreislauf durchbrechen kann«, so der Computerwissenschaftler Rafael Pass von der Cornell University.

Vor etwa 50 Jahren kam man einer Antwort auf die Frage erstmals merklich näher. Wie Fachleute damals gezeigt haben, ist es durchaus möglich, nachweislich sichere Chiffren zu erstellen – vorausgesetzt, man hat Zugang zu einer wichtigen Zutat: einer »Einwegfunktion«, die leicht auszuführen, aber nicht oder zumindest nur sehr schwer umzukehren ist. Seitdem haben Forscherinnen und Forscher eine breite Palette an Einwegfunktionen entwickelt, die auf einfacher Multiplikation basieren oder komplizierte geometrische sowie logarithmische Verfahren nutzen und sich aus heutiger Sicht nicht in absehbarer Zeit umkehren lassen. Internetprotokolle wie Transport Layer Security (kurz: TLS) hängen von diesen Funktionen ab; mit ihnen kann man vertrauliche Daten wie Kreditkartennummern oder Anmeldedaten sicher übermitteln.

All das hat das Katz-und-Maus-Spiel allerdings nicht beendet – im Gegenteil: Es hat es nur verschärft. Anstatt sich auf jeden einzelnen Aspekt eines Verschlüsselungsschemas zu fokussieren, mussten sich Kryptografen bloß noch um die zu Grunde liegende mathematische Funktion bemühen. Doch für keines der derzeit verwendeten Beispiele ließ sich endgültig beweisen, dass es sich tatsächlich um eine Einwegfunktion handelt. Schlimmer noch: Man weiß nicht einmal, ob echte Einwegfunktionen existieren. Sollte das nicht der Fall sein, ist jede Art der Kryptografie im Prinzip angreifbar.

Mangels Hinweisen hoffen Programmierer daher einfach darauf, dass die Funktionen, die bisherigen Angriffen standgehalten haben, auch wirklich sicher sind. Es gibt keinen einheitlichen Ansatz, um die Sicherheit der mathematischen Probleme zu untersuchen, »weil jede Variante aus

SERIE

Kryptografie

Teil 1: September 2022

Schutz vor Quantenhackern

Manon Bischoff

Teil 2: Oktober 2022

Auf der Jagd nach unknackbaren Funktionen

Erica Klarreich

Teil 3: November 2022

Datenschutz in der Welt von Big Data

Edd Gent

KRYPTOGRAFIE Fachleute suchen nach speziellen Funktionen, die Informationen verschleiern. Die Chiffre muss aber auch wieder entzifferbar sein.

AUF EINEN BLICK VERSCHLÜSSELN MIT EINWEGFUNKTIONEN

- 1 Die Kryptografie basiert auf mathematischen Problemen, die einfach zu berechnen, allerdings schwer umzukehren sind: so genannten Einwegfunktionen.
- 2 Bisherige Verschlüsselungen haben sich bewährt: Man kennt noch keine effiziente Methode, um sie zu knacken. Aber beweisen, dass sie wirklich sicher sind, konnte man nicht.
- 3 Ob echte Einwegfunktionen überhaupt existieren, ist unklar. Die Frage hängt mit einem bedeutenden Rätsel der Informatik zusammen, bei dem es um die Erzeugung echter Zufallszahlen geht.

einem anderen Bereich und von einer anderen Experten-
gruppe stammt«, erklärt der Kryptograf Yuval Ishai vom
Technion in Haifa, Israel.

In der Kryptografie fragt man sich seit Langem, ob man
auch anders vorgehen könnte, statt sich bloß auf Erfah-
rungswerte zu stützen. »Gibt es ein Schlüsselargument,
etwa ein Problem, das uns verrät, ob sichere Kryptografie
möglich ist?«, so Pass. Darauf hat er nun zusammen mit
Yanyi Liu, seinem Doktoranden an der Cornell University,
eine eindeutige Antwort gefunden: Ja. Ob echte Einweg-

funktionen existieren, so bewiesen sie, hängt von einem der
ältesten und zentralsten Probleme eines anderen Bereichs
der Computerwissenschaft ab, der Komplexitätstheorie.
Dabei geht es um die so genannte Kolmogorow-Komplexi-
tät, die ein Maß dafür darstellt, wie schwer es ist, zufällige
Zahlenfolgen zu identifizieren.

Liu und Pass haben gezeigt: Wenn eine bestimmte
Version der Kolmogorow-Komplexität schwer zu berechnen
ist, dann existieren echte Einwegfunktionen. In diesem Fall
liefern die beiden Informatiker sogar ein Rezept, um solche

Vigenère-Chiffre

Diese Art der Verschlüsselung
basiert auf der berühmten Cäsar-
Chiffre, also einer Verschiebung der
Buchstaben des Alphabets. Bei der
Vigenère-Verschlüsselung wendet
man eine solche Substitution aller-
dings mehrmals auf die Zeichen
einer Nachricht an. Dafür notiert
man zunächst alle möglichen
Cäsar-Chiffren in einer Tabelle.
Anschließend wählt man einen
Schlüssel, zum Beispiel »Spektrum«.
Wenn Sie nun eine Nachricht, etwa
»Kryptografie ist toll«, verschlüsseln
möchten, gehen Sie folgenderma-
ßen vor: Sie notieren den Schlüssel
oberhalb der Nachricht und wieder-
holen ihn, bis Sie jedem Buchstaben
des Texts je einen des Schlüssel-
worts zugeordnet haben:

SPEKTRUMSPEK TRU MSPE
KRYPTOGRAFIE IST TOLL

Der Buchstabe des Schlüssels gibt
an, welche Verschiebung des
Alphabets Sie verwenden, um das
zugehörige Zeichen der Nachricht
zu chiffrieren. Sie gehen also die
Zeilen der Tabelle durch, bis Sie
beim entsprechenden Buchstaben
des Schlüssels gelandet sind. Als
Spalte wählen Sie den zu verschlüs-
selnden Buchstaben des Textes und
erhalten so das codierte Zeichen.
Damit ergibt sich schließlich:

CGBZMFADSUMO BJN FGAP

Wie der preußische Infanteriemajor
Friedrich Kasiski 1863 herausfand,
existiert eine Methode, einen auf

diese Weise verschlüsselten Text zu
knacken – insbesondere wenn er
lang ist. Dafür sucht man nach
wiederholt auftretenden Zeichenfol-
gen, die bestimmten Wörtern wie
Artikeln entsprechen könnten und
mehrmals in einem Text vorkom-
men. Damit lässt sich die Länge n
des Schlüsselworts bestimmen.
Wenn man sie kennt, kann man
nach jedem n -ten Zeichen einen
Zeilenumbruch einfügen. Damit hat
man eine Tabelle mit n Spalten
erzeugt. Jede Spalte entspricht

einem Code mit einer einfachen
Cäsar-Chiffre, da in ihr das Alphabet
um jeweils dieselbe Distanz ver-
schoben ist. Ein solcher Code lässt
sich jedoch einfach mit einer Häu-
figkeitsanalyse knacken: Dafür
vergleicht man die Anzahl der
codierten Zeichen mit der Häufig-
keit, in der Buchstaben in der
verwendeten Sprache auftauchen.
Hat das Passwort hingegen nicht
viel weniger Zeichen als die versen-
dete Nachricht, ist diese Form der
Codierung sicher.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
| B | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A |
| C | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B |
| D | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C |
| E | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D |
| F | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E |
| G | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F |
| H | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G |
| I | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H |
| J | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
| K | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
| L | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
| M | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
| N | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
| O | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
| P | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
| Q | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| R | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q |
| S | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R |
| T | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S |
| U | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T |
| V | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U |
| W | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V |
| X | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W |
| Y | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X |
| Z | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y |

BRANDON T. FIELDS (DATED) / BRESHAM / MAT CRYPTID (COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE/VIGENERE%3AABRE_SQUARE_SHADING%2F%2FPUBLIC_DOMAIN)

Abbildungen zu konstruieren. Wenn sich die Komplexität hingegen leicht bestimmen lässt, sind Einwegfunktionen ausgeschlossen – und damit auch sichere Verschlüsselungsverfahren.

Anstatt weiter nach Kandidaten für unumkehrbare Funktionen zu suchen, können Fachleute dank dieser Erkenntnis ihre Bemühungen nun ganz auf die Kolmogorow-Komplexität konzentrieren. Zudem vereint die Arbeit von Pass und Liu zwei Bereiche der Informatik: die Komplexitätstheorie und die Kryptografie. Das hat Expertinnen und Experten aus den Gebieten dazu veranlasst, enger zusammenzuarbeiten, was zu vielen neuen Ansätzen geführt hat.

Die Suche nach den schwersten Problemen

In den meisten Forschungsbereichen stellt ein komplexes Problem ein Hindernis dar. Aber in der Kryptografie, wo man die Gegner mit möglichst unüberwindbaren Hürden konfrontieren möchte, ist es ein Segen. 1976 veröffentlichten Whitfield Diffie und Martin Hellman einen bahnbrechenden Aufsatz: Sie argumentierten, die besondere Schwierigkeit von Einwegfunktionen sei genau das, was die Informatik brauche, um den Anforderungen des heraufdämmernden Computerzeitalters gerecht zu werden. »Wir stehen heute an der Schwelle einer Revolution in der Kryptografie«, schrieben sie in ihrer Arbeit.

Diffie und Hellman entwickelten damals ein völlig neues Verschlüsselungsverfahren. Herkömmliche Methoden basieren darauf, dass zwei Parteien – meist Alice und Bob genannt – einen geheimen Schlüssel teilen und dann darüber sicher kommunizieren. Doch wie tauscht man diesen aus, ohne dass ein Gegner ihn abgreift? Im digitalen Zeitalter kann man sich nicht mit jeder Partei treffen, um im Vorhinein Informationen zu übergeben.

KOLMOGOROW-KOMPLEXITÄT Ein Maß für Zufälligkeit basiert darauf, wie einfach es ist, eine bestimmte Zahlenfolge zu beschreiben. Je einfacher das Programm ist, das die Ziffern erzeugt, desto geringer ist die Kolmogorow-Komplexität der Folge.

| Folge | Programm | Komplexität |
|---|--|---|
| 13579111315171 9212325272931 333537394143 | Drucke: die ersten 22 ungeraden Zahlen. |  |
| 99999999931415 9265358979323 846264338327 | Drucke: neun 9en und dann die ersten 30 Ziffern von Pi. | |
| 3238226618594 0767096401028 0409881234079 | Drucke: 323822661859407670964010280409881234079 | |

MERRILL SHERMAN / QUANTIA MAGAZINE, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die beiden Informatiker schlugen daher die »Public-Key-Kryptografie« vor: Bob besitzt zwei Schlüssel, einen privaten und einen öffentlichen. Wenn Alice ihm eine Nachricht schicken möchte, kann sie diese mit dem öffentlichen Schlüssel chiffrieren (in dieser Richtung lässt sich die Einwegfunktion einfach ausführen). Die Codierung ist nicht umkehrbar, ein Gegner kann aus den Zeichenfolgen nicht auf den ursprünglichen Inhalt schließen – selbst mit Kenntnis von Bobs öffentlichem Schlüssel. Erst sein privater Code ermöglicht es Bob, Alices Nachricht zu dechiffrieren.

Die Kolmogorow-Komplexität ist unberechenbar

Angenommen, es gäbe einen Algorithmus K , der die Kolmogorow-Komplexität für jede beliebige Zeichenfolge berechnen kann. Das Programm könnte zum Beispiel aus einer Million Zeichen bestehen. Nun sucht man nach der kürzesten Folge S , deren Kolmogorow-Komplexität doppelt so lang ist wie K , was also zwei Millionen entspricht. Das bedeutet, das kürzeste Programm, das S ausgibt, ist zwei Millionen Zeichen lang.

Dank des Algorithmus K lässt sich S einfach – wenn auch nicht unbedingt schnell – berechnen: Man kann dazu ein neues Programm P entwickeln: »Gehe alle möglichen Zeichenfolgen der Reihe nach durch und nutze K , um ihre Kolmogorow-Komplexität zu bestimmen. Falls die Komplexität zwei Millionen beträgt, gebe die Folge aus und halte an.« P hängt also von K ab, das aus einer Million Zeichen besteht. Doch so, wie wir P formuliert haben (und es war nicht einmal der effektivste Weg), enthält es bloß ein klein bisschen mehr als eine Million Zeichen. Das System liefert jedoch die Folge S , deren kürzester erzeugender Algorithmus laut Definition zwei Millionen Zeichen hat – wesentlich mehr als P . Man hat also einen Widerspruch: Denn man hat eine kürzere Folge S gefunden, als per Definition erlaubt wäre. Wegen dieses Widerspruchs muss die Annahme falsch sein: Es existiert also kein Programm K , das die Kolmogorow-Komplexität für jede beliebige Folge berechnen kann.

Der Widerspruch löst sich allerdings auf, wenn man nicht nach dem kürzesten Algorithmus sucht, sondern nach dem knappsten, der auch noch effizient ist. Schließlich braucht das oben beschriebene P extrem lange, um alle möglichen Ziffernfolgen durchzugehen. Wenn man solche langsamen Algorithmen verbietet, landet man bei der »zeitlich begrenzten« Kolmogorow-Komplexität. Diese ist berechenbar: Man kann sie für jede Zeichenfolge bestimmen – zumindest theoretisch. Und sie ist wesentlich realistischer als die ursprüngliche Variante.

In welcher kryptografischen Welt leben wir?

1995 beschäftigte sich der Computerwissenschaftler Russell Impagliazzo von der University of California, San Diego, mit den unterschiedlichen kryptografischen Möglichkeiten, die eine Welt bieten kann. Um seine Ergebnisse zusammenzufassen, beschrieb Impagliazzo fünf Universen, die er fantasievoll Algorithmica, Heuristica, Pessiland, Minicrypt und Cryptomania nannte. In ihnen haben mathematische Probleme verschiedene Schwierigkeitsgrade und Anwendungsspielräume, die sich für Verschlüsselungsverfahren eignen. Jedes einzelne beschriebene Universum könnte die Welt sein, in der wir leben. Welches wir tatsächlich bewohnen, ist bisher noch unklar.

Algorithmica

In dieser Welt sind alle Rechenaufgaben einfach, was Kryptografie unmöglich macht. Das heißt, die Menge der Probleme mit effizienten Lösungen – in der Informatik als »P« bezeichnet – enthält nicht nur die bisher bekannten Aufgaben, die wir schnell berechnen können. Vielmehr umfasst P in diesem Universum auch alle NP-Probleme; das sind solche, deren Ergebnisse sich leicht überprüfen lassen, wenn sie jemand liefert. Unter anderem fallen in diese Kategorie Aufgaben, die aktuell schwer zu lösen sind.

Auf den ersten Blick wirken P und NP sehr unterschiedlich: Zwar lässt sich die Lösung eines effizient lösbaren Problems wohl schnell verifizieren (P ist also Teil von NP) – umgekehrt ist das aber nicht immer der Fall. Ein Beispiel dafür ist das Packen eines Koffers. Wenn ihn eine andere Person füllt, kann man sich einfach versichern, ob alles hineingepasst hat. Man muss nur nachsehen, ob etwas vergessen wurde. Es handelt sich also um ein NP-Problem. Aber die Tasche selbst zu packen, ist wesentlich schwieriger, gerade wenn man viel verstauen möchte: Man muss vielleicht zahlreiche Anordnungen ausprobieren, bis es funktioniert. Gegenwärtig ist nicht klar, ob es einen effizienten Algorithmus gibt, dem das für alle möglichen Kombinationen von Gegenständen und Koffern gelingt. Wir wissen also nicht, ob das Problem in P liegt.

In Algorithmica sind P und NP gleich, das heißt, sie enthalten dieselben Aufgaben. Wenn das tatsächlich der Fall wäre, hätte man eine regel-

rechte Goldgrube entdeckt. Denn daraus würde folgen, dass es für schwierige Probleme wie das Kofferpacken und viele andere komplexe Beispiele aus NP schnelle Algorithmen gibt, die sie lösen. Das würde zahlreiche Anwendungen erleichtern – für Kryptografen wäre es hingegen eine Katastrophe. Denn ein weiteres Element von NP ist die Entschlüsselung kryptografischer Verfahren: Wenn jemand behauptet, eine chiffrierte Nachricht geknackt zu haben, kann man sich ganz leicht davon überzeugen, ob der entzifferte Text mit dem ursprünglichen übereinstimmt.

Die vorherrschende Auffassung in der Informatik ist, dass sich P und NP unterscheiden – aus dem einfachen Grund, dass es so viele Probleme in NP gibt, die man trotz jahrelanger aufwändiger Bemühungen nicht effizient lösen kann. Beweisen oder widerlegen konnte das bisher jedoch niemand. Tatsächlich gilt »P versus NP« seit mehr als fünf Jahrzehnten als die berühmteste Frage der theoretischen Informatik. Es ist eines der sieben Millennium-Probleme, für deren Lösung das Clay Mathematics Institute im Jahr 2000 jeweils eine Belohnung in Höhe von einer Million Dollar ausgeschrieben hat. »Abgesehen vom ständigen Scheitern der klügsten Köpfe gibt es allerdings keine Hinweise darauf, dass »P versus NP« schwer zu knacken ist«, meint Yuval Ishai vom Technion in Haifa, Israel.

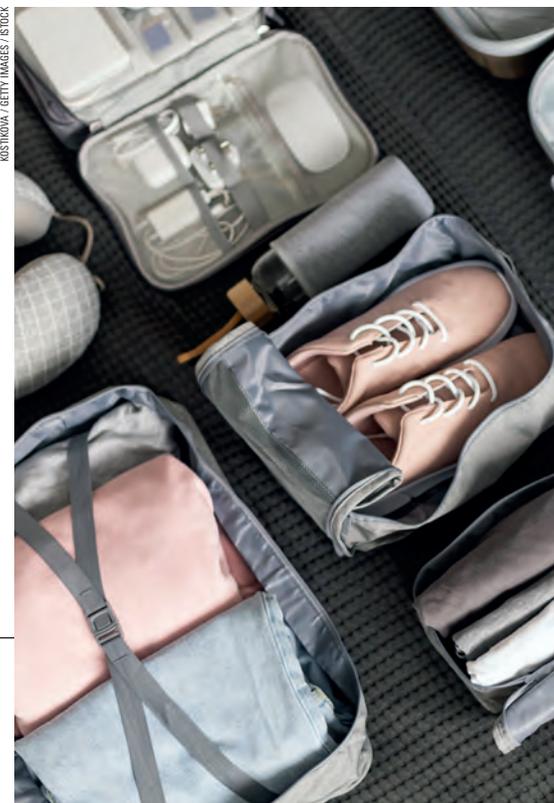
Heuristica

In dieser Welt gibt es NP-Probleme, die nicht einfach zu lösen sind, das heißt, allgemein gilt $P \neq NP$. Den-

noch sind die meisten Aufgaben aus NP zumindest durchschnittlich effizient berechenbar. In Heuristica könnte es zum Beispiel einen schnellen Algorithmus zum Kofferpacken geben, der fast immer funktioniert. Nur bei einigen wenigen Kombinationen aus Behältnissen und Gegenständen würde die Rechenvorschrift versagen. Solche effizienten und in der Regel erfolgreichen Algorithmen werden gemeinhin als »Heuristiken« bezeichnet, daraus leitet sich der Name des Universums ab.

Aus kryptografischer Sicht gibt es keinen großen Unterschied zu Algorithmica. Wenn man sich in Heuristica ein Verschlüsselungsverfahren ausdenkt, existiert eine

KOFFERPACKEN Viele Gegenstände in einem begrenzten Raum unterzubringen zählt zu den NP-Problemen.



schnelle Entschlüsselungsmethode, die mit fast jeder Nachricht umgehen kann. Damit ist Kryptografie in diesem Szenario für praktische Zwecke nutzlos.

Pessiland

Tatsächlich ist diese Welt die aus computerwissenschaftlicher Sicht schlechteste aller möglichen Optionen. Denn in Pessiland sind einige Probleme in NP zwar durchschnittlich schwer, aber sie erlauben keine Einwegfunktionen, die für die Kryptografie notwendig sind.

Dabei handelt es sich um mathematische Abbildungen, die sich einfach ausführen (so schafft man eine Verschlüsselung), allerdings nicht umkehren (entschlüsseln) lassen. Informatikerinnen und Informatiker haben gezeigt, dass sichere Verschlüsselungen Einwegfunktionen erfordern.

In diesem Universum versagt jeder effiziente Algorithmus nicht nur gelegentlich – wie in Heuristica –, sondern fast immer. Andererseits kann man aus den durchschnittlich schweren Aufgaben jedoch keine Funktionen konstruieren, um geheime Informationen zu verstecken. »Wir wollen definitiv nicht in Pessiland leben«, sagt Eric Allender von der Rutgers University. »Hier hat man

alle Nachteile hoher Komplexität, aber keinerlei Vorteile davon, wie etwa Kryptografie.«

Minicrypt

In jener Welt sind einige NP-Probleme durchschnittlich schwierig, wobei sich manche dafür eignen, den grundlegendsten Baustein der Kryptografie zu schaffen: eine Einwegfunktion. Diese ermöglicht kryptografische Verfahren mit geheimen Schlüsseln; digitale Signaturen, welche die Identität einer Person sicherstellen; und Pseudozufallszahlengeneratoren.

»Ob es Einwegfunktionen gibt, ist ohne Frage das wichtigste Problem der Kryptografie«, sagt Rafael Pass von der Cornell University. »Wenn wir sie nicht haben, können all diese Dinge gebrochen werden.«

Cryptomania

Das Universum bietet in diesem Szenario genügend Komplexität, um alle Anwendungen in Minicrypt zu ermöglichen – und sogar noch fortgeschrittenere kryptografische Protokolle. In Cryptomania lassen sich auch Verschlüsselungen mit Public-Key-Verfahren (durch die man chiffrierte Nachrichten übermitteln kann, ohne den geheimen Schlüssel zu kennen) realisieren, die im digitalen Zeitalter unerlässlich sind.

Yuval Ishai zufolge sind die meisten Informatikerinnen und Informatiker davon überzeugt, dass Kryptografie in unserer Welt zumindest teilweise existiert. Demnach leben wir höchstwahrscheinlich in Cryptomania oder Minicrypt. Ein eindeutiger Beweis liegt aber noch in weiter Ferne. Denn dafür müsste man die anderen drei Welten ausschließen – und allein um Algorithmica zu eliminieren, muss man das »P versus NP«-Problem lösen, mit dem sich die theoretische Informatik seit Jahrzehnten erfolglos herumschlägt.

Allerdings haben Rafael Pass und sein Doktorandanyi Liu im Jahr 2020 einen neuen Ansatz gefun-

den, um die möglichen kryptografischen Universen zu durchforsten. Dabei konnten sie zeigen, dass die zeitlich begrenzte Kolmogorow-Komplexität Welten mit und ohne Kryptografie eindeutig voneinander abgrenzt.

Wenn sich die genannte Komplexität durchschnittlich leicht berechnen lässt, gibt es gemäß Liu und Pass keine sichere Verschlüsselung. In diesem Fall befinden wir uns also in Algorithmica, Heuristica oder Pessiland. Ist die Aufgabe hingegen im Durchschnitt schwer zu lösen, lassen sich Einwegfunktionen konstruieren – wir wären dann zumindest in Minicrypt und möglicherweise sogar in Cryptomania.

Eine weitere Anstrengung könnte es ermöglichen, mit Hilfe der neuen Ergebnisse Pessiland – die schlimmste aller Welten – vollständig auszuschließen. Dafür müsste man beweisen, dass sich die durchschnittliche Einfachheit der zeitlich begrenzten Kolmogorow-Komplexität auf alle anderen Probleme in NP überträgt. Dann blieben nur vier mögliche Universen übrig: diejenigen, in denen Kryptografie möglich ist (Minicrypt und Cryptomania), und solche, in denen jedes Problem in NP im Durchschnitt leicht ist (Algorithmica und Heuristica).

Außerdem würden Informatiker und Informatikerinnen gerne Heuristica loswerden. Denn falls die zeitlich begrenzte Kolmogorow-Komplexität durchschnittlich einfach ist, wäre in Heuristica jedes NP-Problem immer leicht zu lösen – nicht nur im Durchschnitt.

Ließen sich beide Welten eliminieren, würden wir also entweder in Algorithmica leben, wo alles stets einfach ist, oder es gäbe genug Komplexität, um zumindest grundlegende Kryptografie zu erlauben.

QUELLE

Impagliazzo, R.: A personal view of average-case complexity. Proceedings of Structure in Complexity Theory. 10th Annual IEEE Conference, 1995



KOSTIKOVA / GETTY IMAGES / ISTOCK

In den folgenden Jahrzehnten fanden Forscherinnen und Forscher heraus, wie man Einwegfunktionen für Anwendungen nutzen kann, die über reine Verschlüsselung hinausgehen: etwa um digitale Signaturen zu entwickeln, welche die Identität einer Person verifizieren; um Zufallszahlen zu erzeugen oder »Zero-knowledge«-Beweise zu führen. Letzteres nutzt man, um jemanden zu überzeugen, dass eine Aussage wahr ist, ohne den Beweis selbst preiszugeben. Die Public-Key-Verfahren von Diffie und Hellman erwiesen sich als erstaunlich vielseitig. Aus dem einzigen Baustein der Einwegfunktionen gelang es den beiden Computerwissenschaftlern, zahlreiche bedeutende Prozesse zu entwickeln.

Um die unumkehrbaren Abbildungen besser zu verstehen, kann man sich eine praktische Aufgabe ansehen: etwa jene, zwei große Primzahlen miteinander zu multiplizieren wie 6547 und 7079. Um die Antwort (46346213) anzugeben, muss man zwar etwas Fleißarbeit leisten, aber das Ergebnis ist problemlos berechenbar. Würde man Ihnen jedoch die Zahl 46346213 nennen und nach den dazugehörigen Primteilern fragen, wären Sie höchstwahrscheinlich ratlos. Denn tatsächlich gibt es keinen – zumindest keinen bekannten – effizienten Weg, große Primfaktoren zu bestimmen. Das macht die Multiplikation zu einem möglichen Kandidaten für eine Einwegfunktion: Solange man von ausreichend hohen Primzahlen ausgeht, ist das Produkt leicht auszuführen, scheint aber schwer rückgängig zu machen. Gesichert ist das allerdings nicht. Jederzeit könnte jemand eine ausgeklügelte Methode finden, um auch große Zahlen schnell zu faktorisieren – so wie es Kasiski irgendwann gelang, die als sicher geltende Vigenère-Chiffre zu knacken.

Gibt es ein »Hauptproblem«?

Fachleute haben inzwischen zahlreiche mögliche Einwegfunktionen aus verschiedenen Bereichen der Mathematik zusammengetragen. Doch keine davon scheint besser geeignet als eine andere. Wenn man beispielsweise morgen eine Methode finden würde, um die Primfaktorzerlegung effizient auszuführen, würde das nichts über die Gültigkeit der übrigen in Frage kommenden Kandidaten aussagen. Kryptografen suchen schon lange nach einem solchen »Hauptproblem«: eine Funktion, die, wenn sie gebrochen wird, alle anderen Ansätze mit sich in den Abgrund reißt.

1985 fand der Informatiker Leonid Levin von der Boston University ein derartiges Problem – allerdings ein sehr abstraktes. Ihm gelang es, eine universelle, unumkehrbare Abbildung zu definieren, die diese Eigenschaft garantiert besitzt, falls es überhaupt Einwegfunktionen gibt. Könnte man zeigen, dass sein Ansatz gebrochen werden kann, wären auch alle anderen Kandidaten verloren. »Aber seine Funktion war sehr konstruiert«, so der Computerwissenschaftler Eric Allender von der Rutgers University. »Niemand würde sie aus einem anderen Grund studieren, als um ein solches Ergebnis zu erhalten.« Damit rückte man dem Rätsel also nicht wirklich näher.

Gesucht war eine universelle Funktion, die auf ein natürliches Problem zurückgeht – eines, das Aufschluss darüber

Das Problem mit dem Zufall: Man kann sich nie sicher sein, ob etwas wirklich zufällig ist

gibt, ob Einwegfunktionen überhaupt existieren. Und tatsächlich gab es einen viel versprechenden Kandidaten, den Informatiker schon länger ins Auge gefasst hatten: die Kolmogorow-Komplexität, die in den 1960er Jahren als eine Art Maß für Zufälligkeit entwickelt wurde.

2004 stieß Pass als Doktorand erstmals auf den möglichen Zusammenhang und war sofort fasziniert. Im Lauf der Jahre beschäftigte ihn neben seinen sonstigen Forschungsprojekten auch dieses Problem immer wieder, aber ohne viel Erfolg. Dennoch ließ es ihn nicht los. Er war sich sicher, dass die Kolmogorow-Komplexität etwas mit Einwegfunktionen zu tun haben musste. Die Fortschritte im Bereich der Komplexitätstheorie in den letzten Jahren bestärkten ihn, weiter daran zu arbeiten.

Pass versuchte mehrmals, seine Doktoranden zu überreden, die Frage mit ihm zu erforschen. Doch keiner war bereit, sich auf ein Projekt einzulassen, das sich höchstwahrscheinlich als Sackgasse herausstellen würde. Dann lernte er Yani Liu kennen, der sein Studium an der Cornell University absolvierte. »Er war furchtlos«, erinnert sich Pass. Gemeinsam stürzten sie sich ins Abenteuer.

Dafür mussten sie zunächst mehr über die Kolmogorow-Komplexität erfahren, die mit dem Konzept des Zufalls zusammenhängt. Zwar hat jeder eine Vorstellung davon, was mit Zufälligkeit gemeint ist. Dennoch ist das Phänomen schwer zu fassen. Es gibt einen »Dilbert«-Comic von Scott Adams, der die Schwierigkeit veranschaulicht. Darin zeigt der Büroleiter seinem Angestellten Dilbert den »Zufallszahlengenerator« der Buchhaltungsabteilung: ein Monster, das einfach nur die Zahl 9 wiederholt. »Sind Sie sicher, dass das wirklich zufällig ist?«, fragt Dilbert. »Das ist das Problem mit dem Zufall«, so der Leiter, »man kann sich nie sicher sein.« Damit hat er Recht: Wenn Ihnen jemand die Zahlenfolgen 99999999999999999999999999999999 und 03729563829603547134 zeigt und behauptet, beide seien zufällig erzeugt worden, können Sie das nicht widerlegen: Würden Sie aus einem Topf willkürlich Ziffern ziehen, dann ist die Wahrscheinlichkeit genauso groß, die erste Zeichenkette zu erzeugen wie die zweite. Dennoch fühlt sich die zweite zufälliger an. »Wir glauben zu wissen, was wir meinen, wenn wir über zufällige Phänomene sprechen«, sagt Allender. »Aber erst der Begriff der Kolmogorow-Komplexität hat gezeigt, dass es eine mathematisch sinnvolle Definition dafür gibt.«

Um zufällige Zahlenfolgen besser zu verstehen, beschloss der sowjetische Mathematiker Andrei Kolmogorow (1903–1987) in den 1960er Jahren, sich nicht auf den Prozess zu konzentrieren, der die Zahlen erzeugt, sondern auf die Art, sie zu beschreiben. 99999999999999999999999999999999 kann

man kurz und bündig als »20 Neunen« bezeichnen, wohingegen es für 03729563829603547134 womöglich keine Definition gibt, die knapper ist als die Zeichenfolge selbst.

Kolmogorow hat die Komplexität einer Folge als die Länge des kürzesten Algorithmus definiert, der sie erzeugt. Für Zeichenketten mit 1000 Ziffern können sehr knappe Programme existieren, wie »Gib 1000 Neunen aus«, »Gib die Zahl 2^{3319} aus« oder »Gib die ersten 1000 Ziffern von π unter Verwendung folgender Formel (...) aus«. Andere Folgen lassen sich dagegen nicht kurz beschreiben. Für sie gibt es keine Definition, die kürzer ist als jene, die alle Ziffern diktiert.

Die Kolmogorow-Komplexität entwickelte sich schnell zu einem Kernkonzept der Informatik. Der Begriff ist so grundlegend, dass gleich mehrere Personen ihn in den 1960er Jahren unabhängig voneinander entdeckten, darunter Ray Solomonoff und Gregory Chaitin. Namensgeber wurde aber Kolmogorow, da er den Ansatz als Erster veröffentlichte.

»Es ist ein tief greifendes Konzept, nicht nur in Bezug auf den Zufall und die Mathematik, sondern auch auf die Wissenschaft im Allgemeinen«, so Pass.

Eine unberechenbare Funktion

Allerdings hat die Kolmogorow-Komplexität einen erheblichen Nachteil: Sie ist nicht berechenbar. Das heißt, es gibt keinen Algorithmus, der die Komplexität jeder möglichen Folge berechnen kann. Glücklicherweise existiert eine schwächere Variante der Idee, die durchaus berechenbar ist. Die »zeitlich begrenzte« Kolmogorow-Komplexität gibt nicht zwangsweise das kürzeste Programm an, das eine Zeichenfolge erzeugt, aber dafür das knappste, das effizient ist. Denn der kürzeste Algorithmus könnte unter Umständen Millionen von Jahren brauchen, um die Beschreibung einer Folge zu finden. Solche Fälle schließt man in der abgeschwächten Version aus.

Man kann also für jede beliebige Zahlenfolge die zeitlich begrenzte Kolmogorow-Komplexität bestimmen. Nun stellt sich die für Computerwissenschaften typische Frage: Wie einfach lässt sich die Komplexität berechnen? Wie Liu und Pass herausgefunden haben, ist genau das der Schlüssel zum Beweis der Existenz von Einwegfunktionen.

Tatsächlich muss man bei der Aufgabe nicht ganz so streng sein: Es genügt, sich der zeitlich begrenzten Komplexität näherungsweise (man fordert keine exakte Genauigkeit) zu widmen – zudem möchte man sie nur für die meisten Zeichenketten bestimmen. Falls es einen effizienten Weg gibt, das zu tun, dann existieren keine echten Einwegfunktionen, wie Liu und Pass gezeigt haben. Und alle Kandidaten für unumkehrbare Funktionen wären nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Praxis schnell knackbar. Damit könnte es keine sichere Kryptografie geben.

Im umgekehrten Szenario existieren hingegen gemäß Pass und Liu echte Einwegfunktionen: wenn es unmöglich ist, für viele Zahlenfolgen die ungefähre zeitlich begrenzte Kolmogorow-Komplexität effizient zu berechnen. Für diesen Fall liefern die beiden Informatiker sogar eine Anleitung, nach der man eine unumkehrbare Abbildung erzeugen kann. In der jetzigen Form wäre sie jedoch zu kompliziert, um in realen Anwendungen eingesetzt zu werden. Aber wie Ishai betont, folgen auf einen theoretischen Durchbruch in

der Kryptografie oft praktische Konstruktionen. Daher ist die komplexe Herleitung der Einwegfunktion von Liu und Pass laut Ishai keine grundlegende Einschränkung.

Falls sich der Ansatz der beiden Computerwissenschaftler tatsächlich vereinfachen lässt, sollte man ihn den auf Multiplikation und anderen mathematischen Operationen basierenden Funktionen vorziehen. Denn bei Letzteren ist nicht sichergestellt, dass sie wirklich unumkehrbar sind.

Der Aufsatz von Pass und Liu hat eine regelrechte Flut von Forschungsarbeiten an der Schnittstelle zwischen Kryptografie und Komplexitätstheorie ausgelöst. Obwohl beide Disziplinen dasselbe Ziel haben, gehen sie die Frage von unterschiedlichen Standpunkten aus an, erklärt der Komplexitätstheoretiker Rahul Santhanam von der University of Oxford. Die Kryptografie sei schnelllebig und pragmatisch, die Komplexitätstheorie eher langsam und konservativ.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FOTOLIA / TOMASZ ZAJDA

Jeder Bereich bietet dem anderen eine neue Perspektive: Kryptografen haben gute Gründe zu glauben, dass es Einwegfunktionen gibt; gleichzeitig spricht für Komplexitätstheoretiker einiges dafür, dass die zeitlich begrenzte Kolmogorow-Komplexität schwierig zu bestimmen ist. Durch die neuen Ergebnisse von Liu und Pass stützen sich die beiden Hypothesen nun gegenseitig. Dennoch untersuchen Fachleute weiterhin, ob es neben der Kolmogorow-Komplexität noch andere »Hauptprobleme« gibt, die für unumkehrbare Funktionen ausschlaggebend sein könnten. Damit käme man dem Traum einer absolut sicheren Kommunikation vielleicht noch ein Stückchen näher. ◀

QUELLEN

Diffie, W., Hellman, M. E.: New directions in cryptography. IEEE Transactions on Information Theory 22, 1976

Levin, L. A.: One-way functions and pseudorandom generators. Proceedings of the 17th annual ACM symposium on Theory of computing, 1985.

Liu, Y., Pass, R.: On One-way Functions and Kolmogorov Complexity. ArXiv 2009.11514, 2020



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung der Artikel »Researchers Identify »Master Problem« Underlying All Cryptography« und »Which Computational Universe Do We Live In?« 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.

ZAHLENTHEORIE EIN FUNDAMENT FÜR POLYNOME

Nach mehr als 100 Jahren harter Arbeit ist es Mathematikern nun gelungen, die Grundbausteine spezieller Zahlensysteme zu finden – aber sie sind völlig anders als erwartet.



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

► spektrum.de/artikel/2049315

BAUSTEINE GESUCHT

Primzahlen ziehen die natürlichen Zahlen auf, aber welche Objekte können andere Zahlensysteme erzeugen?



AUF EINEN BLICK HILBERTS ZWÖLFTES PROBLEM

- 1** In David Hilberts berühmter Liste mit 23 mathematischen Fragen widmet sich eine den Grundbausteinen einfacher Gleichungen, so genannter Polynome.
- 2** Ähnlich wie Primzahlen die natürlichen Zahlen erzeugen, kann man aus den gesuchten Strukturen die Nullstellen von Polynomgleichungen berechnen.
- 3** Es hat drei Generationen von Mathematikern erfordert, um die lang ersehnten Objekte zu finden. Doch sie sehen ganz anders aus als das, was Hilbert im Sinn hatte.

Der Bau mittelalterlicher Kathedralen erforderte einen langen Atem: Über mehrere Generationen hinweg errichteten Handwerker verschiedene Strukturen, an denen ihre Nachfolger weiter anknüpften, bis das architektonische Meisterwerk irgendwann vollendet war. Ähnlich verhält es sich bei den interessantesten Fragestellungen der Mathematik. Hier kommt ebenfalls die jahrzehntelange Arbeit zahlreicher Fachleute zum Tragen, die nach und nach die wesentlichen Konzepte entwickeln, aus denen sich schließlich eine Lösung zusammensetzt.

Aufgaben dieser Art stellte der renommierte Mathematiker David Hilbert (1862–1943) in seiner berühmten Jahrhundertrede im Jahr 1900 vor dem internationalen Mathematikkongress in Paris vor. Dort präsentierte er eine Liste mit 23 ungelösten bedeutenden Problemen, von denen er hoffte, sie würden die Forschung des 20. Jahrhunderts inspirieren. Tatsächlich haben es einige seiner Fragen bis in unsere Zeit geschafft: Sie treiben auch heute noch die mathematische Arbeit voran – unter anderem, weil Hilbert manche Zusammenhänge absichtlich vage formulierte. »Es war eine Art Geniestreich, die Fragen offenzulassen«, sagt Henri Darmon von der McGill University in Montreal.

»Diese wirklich schwierigen Aufgaben stellen eine Art Leitlinie für das Fach dar.«

Kurz bevor Hilbert seine Auswahl bekannt gab, entdeckten seine Kollegen die Bausteine für eine bestimmte Sammlung von Zahlen. Das bildete die Grundlage für das zwölfte Problem auf der berühmten Liste: Gibt es ein Fundament für Zahlensysteme jenseits der bereits untersuchten?

Nach mehr als 50 Jahren vergeblicher Suche haben die Mathematiker Samit Dasgupta von der Duke University in North Carolina und Mahesh Kakde vom Indian Institute of Science in Bengaluru nun genau das für eine breite Familie von Zahlen gefunden. Ihre Lösung beruht auf neuartigen Konzepten, die es zu Hilberts Zeiten noch nicht gab. »Es ist völlig anders als das, was Hilbert ursprünglich im Sinn hatte«, so Benedict Gross, emeritierter Professor an der University of California in San Diego und der Harvard University. »Aber so ist die Mathematik nun einmal. Man kann nie vorhersagen, wie eine Aufgabe gelöst wird.«

Hilberts zwölftes Problem fußt auf der Zahlentheorie, einem Gebiet, das sich mit den grundlegenden arithmetischen Eigenschaften von Zahlen befasst. Doch neben den bekannten Mengen wie den natürlichen oder den reellen Zahlen gehören hierzu ebenso Sammlungen wie Lösungen von bestimmten Gleichungen. Besonders interessant sind dabei so genannte Polynome: Summen potenziertter Variablen, die man mit Koeffizienten multipliziert, etwa $x^3 + 2x + 3$. Fachleute untersuchen deren Nullstellen, die auch als Wurzeln bezeichnet werden – also die Werte von x , für die das Polynom null ergibt.

Zahlentheoretiker klassifizieren die Gleichungen oft nach der Art ihrer Koeffizienten. Häufig beschränkt man sich dabei auf rationale Zahlen, also Brüche aus ganzen Zahlen, da sie relativ einfach zu untersuchen sind. In diesem Fall können die Wurzeln der Polynome ebenfalls rational sein – müssen aber nicht. Deshalb arbeiten Mathematikerinnen und Mathematiker im Allgemeinen in erweiterten Zahlensystemen: den komplexen Zahlen, welche sowohl die reellen Zahlen enthalten, die den gesamten Zahlenstrahl umfassen, als auch die Quadratwurzeln negativer Werte, so genannte imaginäre Zahlen.

Symmetrische Muster in den Nullstellen

Markiert man die entsprechenden Nullstellen in der komplexen Ebene, mit reellen Werten auf der x - und imaginären auf der y -Achse, werden manchmal Symmetrien sichtbar. Dann lassen sich die Punkte neu anordnen, ohne das dazugehörige Polynom zu verändern. Wenn zum Beispiel die Wurzeln in einem Abstand von 20 Grad einen Kreis umschreiben, kann man jede davon um ein Vielfaches von

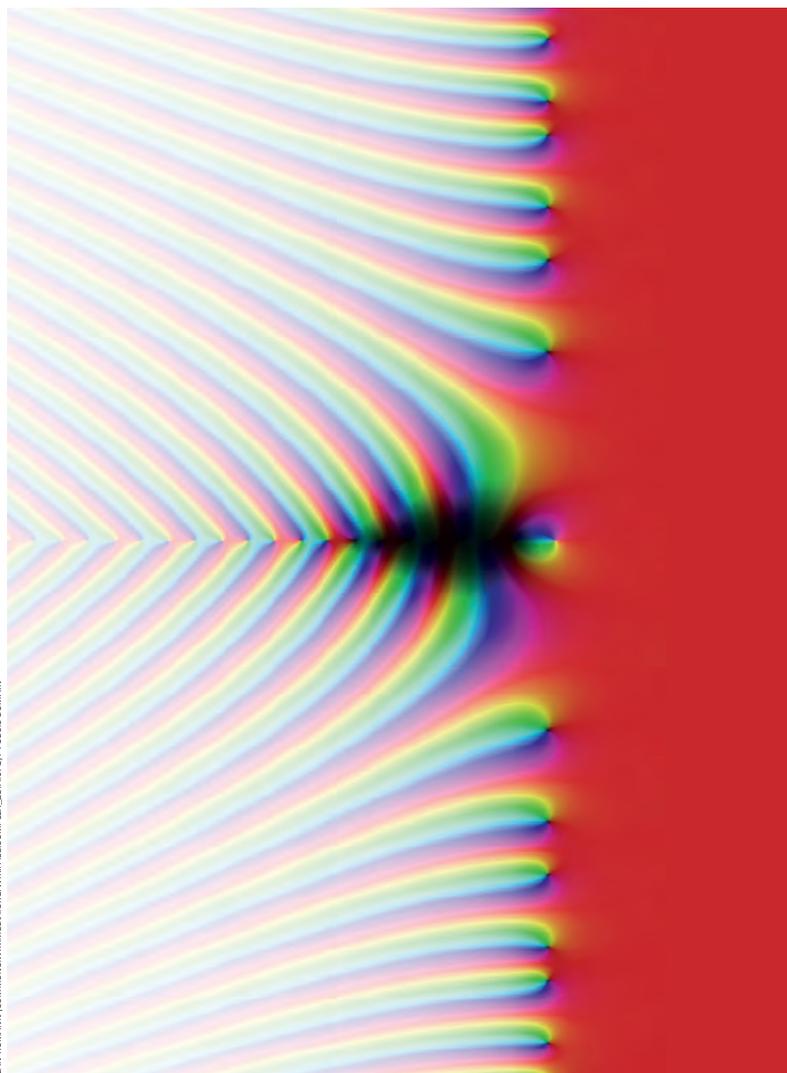
RIEMANNSCHE ZETA FUNKTION Wie genau man L-Funktionen definieren sollte, ist ein aktuelles Forschungsgebiet der Zahlentheorie. Die mysteriösen Funktionen sollen eine Verallgemeinerung der riemannschen Zetafunktion (siehe Bild) darstellen und einige ihrer wichtigsten Eigenschaften teilen.

20 Grad rotieren – die beschreibende Gleichung bleibt gleich.

Nun unterscheidet man zwischen zwei Klassen von Gleichungen: so genannte abelsche Polynome, bei denen es keine Rolle spielt, in welcher Reihenfolge man solche Symmetrietransformationen anwendet (etwa welchen Punkt man zuerst verschiebt), und nichtabelsche, bei denen die Reihenfolge das Ergebnis beeinflusst.

Allerdings ist nicht immer klar erkennbar, mit welchem Typ man es zu tun hat: Während $x^2 - 2$ zum Beispiel abelsch ist, trifft das auf $x^3 - 2$ nicht zu. »Man muss nicht sehr weit gehen, um die kommutativen Polynome zu verlassen«, erklärt die Mathematikerin Ellen Eischen von der University of Oregon. Weil sich die erste Klasse in der Regel einfacher untersuchen lässt, beschränken sich Zahlentheoretiker hauptsächlich auf vertauschbare Fälle.

Das ist aber nicht der einzige Vorteil, den abelsche Polynome bieten. Denn die Wurzeln von Polynomgleichungen lassen sich in der Regel nicht exakt berechnen. Bereits 1824 konnte der norwegische Mathematiker Niels Henrik Abel (1802–1829) beweisen, was viele seiner Kollegen schon seit Jahrzehnten befürchtet hatten: Sobald die Polynome Exponenten haben, die größer als vier sind, gibt



| Polynome | Wurzeln |
|---------------------|---|
| $x^2 - \frac{1}{4}$ | $-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ |
| $x^4 - 5x^2 + 6$ | $-\sqrt{3}, -\sqrt{2}, \sqrt{2}, \sqrt{3}$ |
| $x^3 - 2$ | $\sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2} \left(\frac{-1 + \sqrt{-3}}{2} \right), \sqrt[3]{2} \left(\frac{-1 - \sqrt{-3}}{2} \right)$ |

WURZELN Die Anzahl der Wurzeln eines Polynoms entspricht dem höchsten Exponenten. Zudem können sie einem anderen Zahlensystem entspringen.

es keine allgemeine Formel mehr, um ihre Nullstellen zu bestimmen. Sprich: Es existiert kein Pendant zur pq- oder Mitternachtsformel, die uns in der Schule begegnet. »Natürlich kann man solche Gleichungen mit Computerunterstützung lösen, um sich der Wurzel anzunähern«, so Eischen. »Aber wenn man sie explizit aufschreiben will – was viele als befriedigender empfinden würden –, haben wir nur begrenzte Möglichkeiten.«

Abelsche Polynome mit rationalen Koeffizienten bilden jedoch eine Ausnahme: Es gibt einen festen »Bausatz«, eine spezielle Sammlung von Zahlen, aus denen man ihre Nullstellen zusammensetzen kann – und zwar exakt. Diese Entdeckung erwies sich als so nützlich, dass sie Hilbert als Inspiration für sein zwölftes Problem diente. All das ist dank so genannter Einheitswurzeln möglich.

Das scheinbar einfache Konzept besitzt außergewöhnliche Fähigkeiten: Einheitswurzeln entsprechen den Lösungen einer potenzierten Variable, die mit eins gleichgesetzt wird, etwa $x^5 = 1$ oder $x^8 = 1$. Damit gehören sie zur Klasse der komplexen Zahlen, da sie auch imaginäre Werte annehmen können wie $i^4 = (-1)^2 = 1$. Um sie voneinander zu unterscheiden, benennt man sie nach dem Exponenten in der Gleichung, zum Beispiel sind die fünften Einheitswurzeln die fünf Lösungen von $x^5 = 1$.

Wenn man die Zahlen in der komplexen Ebene darstellt (wieder mit den reellen Werten auf der x- und den imaginären auf der y-Achse), dann liegen alle Einheitswurzeln auf einem Kreis mit Radius eins. Jede Gleichung der Form $x^n = 1$ besitzt die Lösung $x = 1$, der Punkt taucht also unendlich oft auf. Die übrigen Einheitswurzeln verteilen sich gleichmäßig auf dem Kreis.

Im 19. Jahrhundert, noch vor der Veröffentlichung von Hilberts Problemliste, entdeckten Mathematiker, dass die Zahlen als Bausteine dienen könnten, um bestimmte Zahlensysteme zu untersuchen: die Wurzeln von abelschen Polynomen mit rationalen Koeffizienten. Indem man Einheitswurzeln miteinander kombiniert (also addiert, subtrahiert und mit rationalen Zahlen multipliziert), kann man daraus jede Nullstelle derartiger Gleichungen erzeugen. Zum Beispiel lässt sich die Lösung von $x^2 - 5 = 0$, die positive und negative Quadratwurzel von fünf, als Summe von drei verschiedenen fünften Einheitswurzeln ausdrücken.

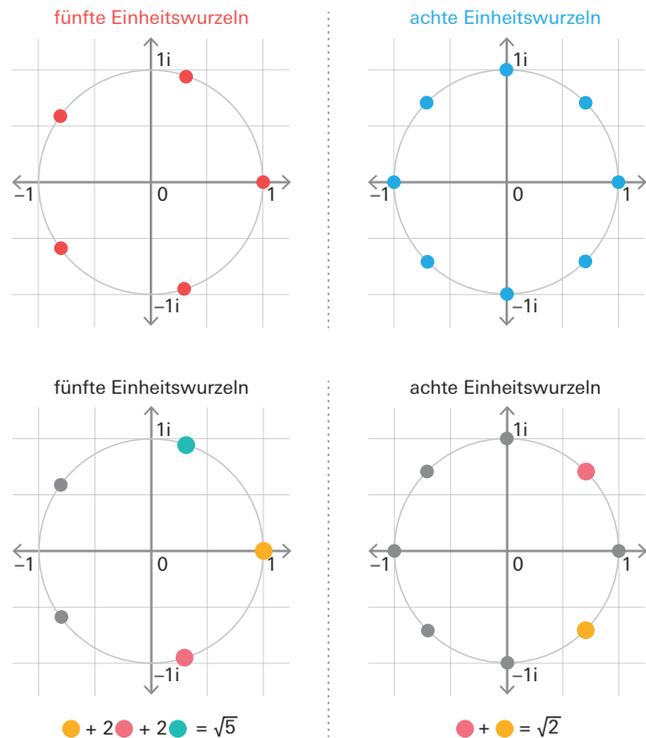
In ähnlicher Weise kann man eine Nullstelle von $x^2 - 2, \sqrt{2}$, aus den achten Einheitswurzeln bilden. Damit erinnern die Zahlen an Primzahlen, aus denen sich alle natürlichen Zahlen erzeugen lassen.

Einheitswurzeln sind die benötigten Bausteine, um die Wurzeln abelscher Polynome mit rationalen Koeffizienten umfassend zu beschreiben. Das Prinzip funktioniert auch umgekehrt: Wenn man Einheitswurzeln irgendwie miteinander kombiniert, erhält man zwangsläufig ein Ergebnis, das der Nullstelle einer solchen Polynomgleichung entspricht. Beide Strukturen sind also untrennbar verbunden.

Hilbert wollte über einfache Brüche hinaus

Hilberts Ziel war es, über die rationalen Zahlen hinauszugehen. Mit seinem zwölften Problem wollte er die Bausteine von Wurzeln abelscher Polynome finden, deren Koeffizienten aus anderen Zahlensystemen bestehen. Einfach ausgedrückt: Welche Analoga haben Einheitswurzeln?

Das Projekt erwies sich als ziemlich ehrgeizig – genau deshalb landete es auf Hilberts Liste. Dennoch war der ambitionierte Mathematiker überzeugt, dass es sich bewältigen ließe. Denn er hatte bereits eine Idee, wie man die Bausteine für ein gewisses Zahlensystem beschreiben könnte. Dabei handelte es sich um eine Art Erweiterung der rationalen Zahlen um die Wurzel eines negativen Werts: Der so genannte imaginäre quadratische Körper enthält alle rationalen Zahlen x und y sowie Zusammensetzungen aus $x + y\sqrt{-n}$, wobei n eine fest gewählte natürliche Zahl ist. Falls n beispielsweise 3 ist, dann enthält der Körper Werte wie $\frac{2}{3} + 3\sqrt{3}i$ und $5\sqrt{3}i$, aber nicht $3 + i$.



EINHEITSWURZELN Die Lösungen von Gleichungen der Form $x^n = 1$ liegen auf einem Einheitskreis und haben erstaunliche Eigenschaften.

Wie sich einige Jahrzehnte später herausstellte, lag Hilbert mit seiner Vermutung richtig. »Es gab genau zwei bewiesene Fälle: den der rationalen Zahlen und den der imaginären quadratischen Körper«, erklärt Alice Pozzi vom Imperial College London.

Der deutsche Mathematiker hatte erwartet, dass die Bausteine anderer Zahlensysteme den beiden bekannten Fälle ähneln würden. Deshalb konzentrierte er sich bei seiner weiteren Forschung zu dem Thema auf komplexe Zahlen, die sich bereits bewährt hatten.

Doch als die Fortschritte in den 1970er Jahren weiterhin ausblieben, wählte der US-amerikanische Zahlentheoretiker Harold Stark einen neuen Ansatz. Er wandte sich anderen Strukturen zu, so genannten L-Funktionen, die unendlich lange Summen von Zahlen beschreiben. Das wohl berühmteste Beispiel dafür ist die riemannsche Zetafunktion: $\zeta(s) = 1 + \frac{1}{2^s} + \frac{1}{3^s} + \frac{1}{4^s} + \frac{1}{5^s} + \frac{1}{6^s} + \frac{1}{7^s} + \dots$ Diese taucht ebenfalls in Hilberts Liste auf, allerdings in einem unterschiedlichen Zusammenhang, der mit der Verteilung von Primzahlen zu tun hat.

Fachleute wissen seit Jahrhunderten, dass L-Funktionen faszinierende Eigenschaften besitzen. Beispielsweise lässt sich dank ihnen beweisen, dass man mit unendlichen Folgen einfacher Brüche verschiedene Zahlen erzeugen kann, die mit Pi und weiteren wichtigen Konstanten verbunden sind.

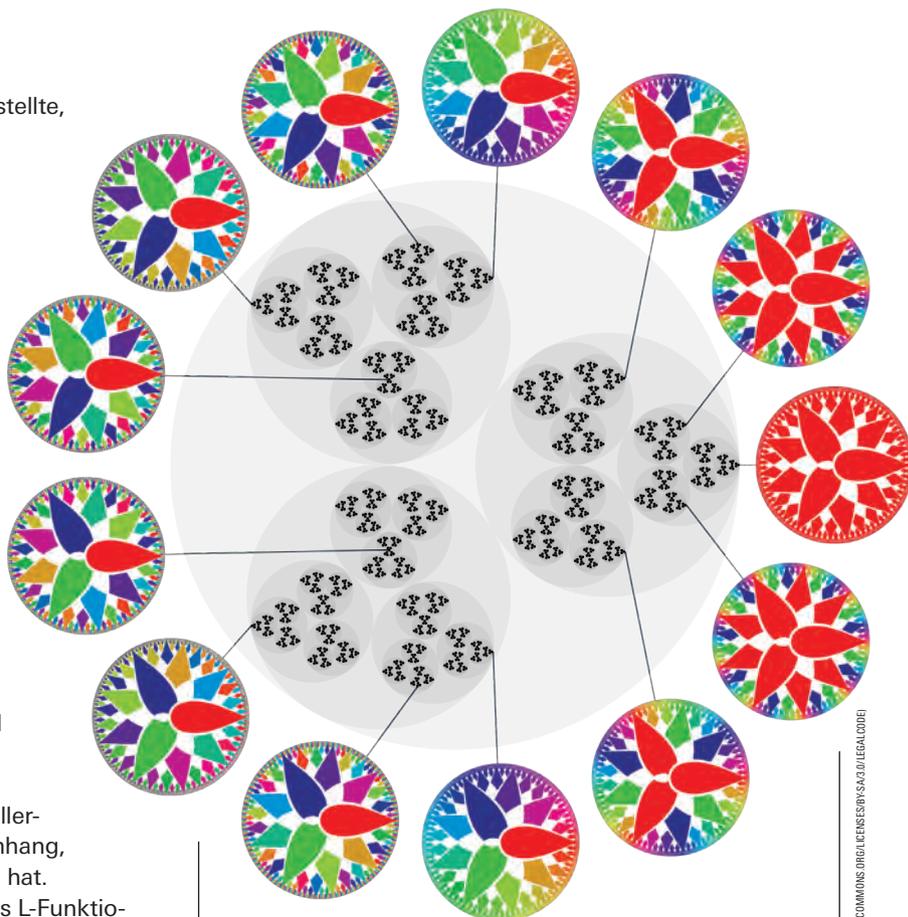
Stark war überzeugt, mit Hilfe von L-Funktionen ein Analogon von Einheitswurzeln für bestimmte Zahlensysteme gefunden zu haben. Computeranalysen bestätigten seinen Verdacht. Aber beweisen konnte er ihn nicht. Die meisten Mathematikerinnen und Mathematiker glaubten ebenfalls an Starks Vermutung. Doch auch ihnen gelang es nicht, sie zu belegen. »Es ist wirklich schwierig«, sagt Henri Darmon. »Es hat praktisch überhaupt keine Fortschritte gegeben – und das seit 50 Jahren.«

Wie kann man das Rezept vervollständigen?

Das Problem war allerdings nicht nur Starks unbewiesener Verdacht – der Wissenschaftler hatte zudem nur die Hälfte der potenziellen Lösung geliefert. Um die Bausteine exakt zu beschreiben, brauchte man weitere Informationen. Das ist so, als hätte man nur den Längengrad eines Orts. Ohne Breitengrad kann man keine Position ausmachen.

In den 1980er Jahren setzte Benedict Gross die Arbeit fort und veröffentlichte eine modifizierte Version von Starks Rezept, das er um neue Zutaten ergänzt hatte. Wie Hilbert hatte Stark bei seinen Analysen ebenfalls komplexe Zahlen genutzt, die er in die L-Funktionen einsetzte. Weil man damit aber nicht weiterkam, wandte sich Gross einem anderen Zahlensystem zu.

Er beschränkte sich auf die in der Zahlentheorie beliebten p-adischen Zahlen. Diese stellen eine gleichberechtigte Alternative zu den reellen Zahlen dar, besitzen jedoch



P-adische Zahlen

Reelle Zahlen drückt man häufig in der Dezimaldarstellung aus, etwa $0, x_1 x_2 x_3 \dots$, wobei x_i natürliche Zahlen sind. Das lässt sich als Summe definieren: $x = \sum_i x_i \cdot \frac{1}{10^i}$. Man muss Zahlen nicht zwingend zur Basis zehn angeben – man könnte auch die Zwei wählen, wodurch man eine Binärdarstellung erhält. In diesem Fall schreibt man eine reelle Zahl als: $x = \sum_i x_i \cdot \frac{1}{2^i}$, wobei x_i den Wert 0 oder 1 annimmt. Für eine allgemeine Basis b lautet die Schreibweise für eine Zahl also: $x = \sum_i x_i \cdot \frac{1}{b^i}$. Das erinnert schon stark an ein Polynom mit natürlichen Koeffizienten. Ebenso leitet sich die Idee für p-adische Zahlen ab: $x = \sum_i x_i \cdot p^i$ – anstatt unendlich viele Nachkommastellen zu besitzen, können p-adische Zahlen unendlich viele Ziffern vor dem Komma haben. Wenn man etwa die 5-adischen Zahlen betrachtet, dann ist ...444 eine Zahl mit unendlich vielen Vieren. Im Zahlkörper zur Basis fünf gilt $4 + 1 = 10$ (in Dezimaldarstellung ausgedrückt: $1 \cdot 5^1 + 0 \cdot 5^0 = 5$). Wenn man also ...444 + 1 rechnet, verschiebt sich der Übertrag der Eins immer weiter, bis in die Unendlichkeit. Man erhält also: ...444 + 1 = ...000 = 0. Daher ist ...444 = -1 für die 5-adischen Zahlen. Wie sich herausstellt, sind p-adische Zahlen genauso mächtig wie die reellen; man kann also alle gewohnten Konzepte auf sie übertragen.

MELCHIOR (COMMONS WIKIMEDIA ORG)/FILE:3-ADIC INTEGERS_WITH_DUAL_COLORINGS.SVG / CC BY-SA 3.0 (CREATIVE COMMONS ORG)/LICENSE:BYSA3.0/LEGALCODE

grundlegend andere Eigenschaften: Sie können zum Beispiel unendlich viele Ziffern vor dem Komma haben. Um zu beurteilen, welchen Abstand zwei p -adische Werte zueinander haben, braucht man eine völlig neue Definition von Distanz (bei reellen Zahlen berechnet man dafür einfach den Betrag der Differenz). »So kann man die gesamte Theorie der Infinitesimalrechnung von Grund auf neu aufbauen«, erklärt Samit Dasgupta. Denn wesentliche Elemente daraus wie Ableitungen oder Integrale sind durch Grenzwerte definiert, bei denen man die Abstände zwischen zwei Zahlenwerten gegen null gehen lässt.

Der deutsche Mathematiker Kurt Hensel (1861–1941) führte die bizarren Zahlen erstmals 1897 ein. Im Lauf der Jahrzehnte ist es Fachleuten gelungen, viele Konzepte durch p -adische Zahlen ausdrücken, so auch die L -Funktionen. In der modernen Zahlentheorie sind die ungewohnten Objekte mittlerweile etabliert. »Inzwischen finde ich reelle Zahlen viel verwirrender als p -adische Zahlen. Ich habe mich so sehr an sie gewöhnt, dass sich die reellen Zahlen jetzt seltsam anfühlen«, sagte Peter Scholze von der Universität Bonn 2018 in einem Interview mit »Quanta Magazine«.

Zunächst schien Gross' Idee jedoch nicht zu fruchten. Einem Beweis von Starks Vermutung war man damit nicht näher gekommen. »Ich dachte zuerst: »Das ist genauso schwierig wie die ursprüngliche Vermutung, nur in anderer Form«, so Gross. Glücklicherweise irrte er sich. Während Zahlentheoretiker in den folgenden Jahrzehnten die Theorie der p -adischen Zahlen weiterentwickelten, kristallisierte sich allmählich heraus, dass die neue Formulierung doch besser lösbar sein könnte als ihr komplexes Gegenstück.

P-adische Zahlen als Vereinfachung

»Inzwischen gibt es eine vielfältige p -adische Analysis, die bereits zu vielen interessanten Ergebnissen geführt hat«, erklärt Darmon. Wie sich herausstellte, lassen sich einige Aufgaben durch p -adische Zahlen besser lösen als mit komplexen Zahlen.

So auch Hilberts zwölftes Problem, wie Dasgupta und Kakde im März 2021 bewiesen. In ihrer Arbeit verwenden sie p -adische L -Funktionen, um Hilberts Frage erstmals für eine große Sammlung von Zahlensystemen zu beantworten: die total reellen Körper. Diese stellen ebenfalls eine Erweiterung der rationalen Zahlen dar, allerdings nicht um eine imaginäre Zahl, sondern um die Nullstelle eines bestimmten Polynoms. Das schließt wesentlich mehr Zahlensysteme ein als die imaginären quadratischen Körper, die Hilbert behandelt hatte: Sie können unter anderem auch reelle Quadratwurzeln und Wurzeln höherer Ordnung enthalten.

»Mein halbes Leben lang habe ich daran gearbeitet«, so Dasgupta. Denn die Formel – eine Verfeinerung von Gross' Vermutung – hatte er bereits 2004 in seiner Doktorarbeit aufgestellt. Zweifelsfrei nachweisen konnte er sie aber nicht.

Es dauerte zehn Jahre, bis es gelang, die ursprüngliche These von Gross mit Hilfe der neuesten Entwicklungen in der p -adischen Zahlentheorie zu beweisen. Damit besaß man nur die Hälfte der benötigten Informationen: Denn die Vermutung von Gross – ebenso wie die von Stark – liefert

lediglich eine von zwei Zahlen, die man braucht, um die Bausteine vollständig zu beschreiben.

Die Erweiterung des Konzepts nahm drei weitere Jahre in Anspruch. Dafür tat sich Dasgupta mit Kakde zusammen. »Vielleicht liegt es daran, dass wir beide sehr optimistisch sind«, sagt Letzterer. »Es gab Zeiten, da schienen die Hindernisse unüberwindbar. Und manchmal waren sie wirklich sehr groß, aber glücklicherweise haben wir immer wieder Fortschritte gemacht.«

2020 kam schließlich der Durchbruch. Die beiden Mathematiker bewiesen, dass die vermuteten Bausteine für total reelle Körper existieren. Mit anderen Worten: Sie wussten, dass die gesuchten Objekte irgendwo da draußen sind, und diese Erkenntnis führte sie in die richtige Richtung. Daraus konnten sie die ausschlaggebenden Gleichungen herleiten, um eine Formel zu entwickeln, welche die Bausteine vollständig beschreibt.

Um sich zu vergewissern, dass ihr Ergebnis korrekt war, nutzten sie die Hilfe von Computern. Zwei Studenten, die mit Dasgupta zusammenarbeiten, entwickelten ein Programm, das die Bausteine für ein gegebenes Zahlensystem berechnet. Sie setzten das Rezept also in der Praxis um – und konnten damit zeigen, dass es tatsächlich funktioniert. Neben dem theoretischen Beweis verdeutlicht das Computerprogramm die Richtigkeit der Formeln von Dasgupta und Kakde. Das ist ein besonders wichtiger Punkt bei der Lösung eines so abstrakten Problems, das fehleranfällig ist: Selbst in Hilberts ursprüngliche Teillösung hatte sich eine Ungenauigkeit eingeschlichen.

Ohne intensive Zusammenarbeit wäre das Ziel wohl unerreichbar geblieben. »Ich betrachte das als eine gemeinschaftliche Anstrengung«, so Dasgupta. Denn genau genommen ist die neue Arbeit das Ergebnis dreier Mathematiker-Generationen: Dasgupta war ein Schüler von Darmon, der wiederum sein Können bei Gross erlernt hat.

Ganz zufrieden stellend ist die Lösung aber nicht. Denn es gibt einen Haken: Hilbert hatte ausdrücklich verlangt, dass die Bausteine aus komplexen Zahlen bestehen. Die von Dasgupta und Kakde gelieferten Objekte sind hingegen p -adische L -Funktionen – komplexe Zahlen tauchen gar nicht auf. Damit lassen die zwei Forscher die ursprüngliche Aufgabe für künftige Mathematiker-Generationen offen. ◀

QUELLEN

Dasgupta, S., Kakde, M.: Brumer-Stark units and Hilbert's 12th problem. ArXiv 2103.02516, 2021

Dasgupta, S. et al.: Hilbert modular forms and the Gross-Stark conjecture. Annals of Mathematics 174, 2011

Dasgupta, S. et al.: On the Gross-Stark conjecture. Annals of Mathematics 188, 2018



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Mathematicians Find Long-Sought Building Blocks for Special Polynomials« 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.

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

WARUM DEUTSCHLAND IMMER TROCKENER WIRD

1922

»Es ist gefährlich, in die Wärmewirtschaft der Erde – die mit der Feuchtigkeitwirtschaft untrennbar zusammenhängt – einzugreifen. Es sei nur an den verderblichen Einfluß der Waldverwüstungen in Spanien erinnert, die man dem ungeheuren Verbrauch von Holz für die Schiffe nach Amerika verdankte. Mit dem Wald, der die Feuchtigkeit für längere Zeit aufstapelte, verschwanden weite Strecken fruchtbaren Landes. Mancher glaubt, die Verwandlung von Moor in Fruchtländ sei eine gute Tat. Das ist nicht immer so. Die Moore sind, ähnlich wie die Wälder, Feuchtigkeitssammler. Man hat es in Ostpreußen erlebt, daß nach Trockenlegung von Mooren der Grundwasserstand sank. Die Folge waren verminderte Ernteerträge. Sollte die Wirtschaft so fortgehen, so mag in einigen Jahrhunderten der Boden Deutschlands zum guten Teil unbewohnbar sein.« *Kosmos 10, S. 277*

PYRAMIDE: 2800 JAHRE UNTER ASCHE

»Eine Pyramide, die viele Jahrhunderte lang unter vulkanischer Asche begraben war, ist in dem Hügel San Cuicuilco in der Nähe von Mexiko City entdeckt worden. Die Ausgrabung des historischen Bauwerks hat ein Meisterwerk alter Baukunst zutage gefördert. In vier Terrassen erhebt sich die aus vulkanischen Felsen gebaute Pyramide zu einer Höhe von 35 Meter, während ihre Basis etwa 130 Meter im Durchmesser ist.« *Die Umschau 40, S. 634*

DAS NEUE PRAKTISCHE KLAPPRAD

»Dieses neue Fahrrad hat etwas kleinere Räder als das Durchschnittsrad, und sein Gestell ist zusammenlegbar. Es kann dadurch auf schlecht zu befahrenen Strecken getragen werden und läßt sich sogar in den Koffer packen. Erwachsene und Kinder können unverändert fahren. Es wird sich besonders nützlich erweisen bei großen Ausflügen und bei Radreisen, wo doch immerhin einmal ein holperiger Weg, ein schmaler Steg übers Wasser oder ein Strecke Sumpfland begegnet.«

Technische Monatshefte 10, S. 235



Tragbar: das zusammengeklappte Fahrrad.

KLEINER SAURIER BEZEUGT KONTINENTALDRIFT-THEORIE

1972

»Vor rund 200 bis 250 Millionen Jahren lebten viele Echsengruppen, die bereits am Ende des Erdaltertums ausgestorben sind. Einziger Vertreter einer solchen Gruppe ist der Mesosaurus, dessen Skelett die Reproduktion zeigt. Es stammt aus in die Perm-Periode gehörigen Iratí-Schiefen. Die Mesosaurier kommen nur in Iratí-Schiefen Südbrasilens und gleichaltrigen, ähnlichen Schiefen Südafrikas vor. Daß der gleiche kleine Saurier beidseitig des südatlantischen Ozeans vorkommt, sonst aber nirgends, zeigt, daß damals der Südatlantik zwischen Afrika und Südamerika noch nicht bestand. Der Mesosaurus [war] eines der Zeugnisse, auf die sich Wegener berief, als er die Kontinentaldrift-Hypothese aufstellte.« *Kosmos 10, S. *298*



Kopie eines versteinerten Mesosaurus-Skeletts.

GELD IST EINE BAZILLENSCHLEUDER

»Untersuchungen zweier Ärzte an Münzen und Banknoten ergaben, daß 13% der Geldstücke und 42% des Papiergeldes potentiell pathogene Erreger trugen. Die Isolate umfaßten *Staphylococcus*, *Escherichia coli*, *Klebsiella* [oder] *Aerobacter* sowie Pilze und Hefen. Je geringer der Wert der Münzen und Scheine war, desto stärker waren sie kontaminiert. Um eine mögliche Infektion zu vermeiden, [empfehlen] die Forscher: Lassen Sie Ihr Geld auf der Bank. Wenn Sie Geld bei sich tragen, dann nur große Scheine. Nehmen Sie kein Wechselgeld. Werden Sie Ihr Geld möglichst schnell wieder los. Vermeiden Sie das Halten eines Sparschweins.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 406*

ELEFANTEN KÜHLEN SICH ÜBER DIE OHREN

»Die Wärmeregulierung beim Elefanten erfolgt hauptsächlich mit Hilfe seiner Ohren. Die Innenfläche des Elefantenohres ist von einer Haut bedeckt, die ein Netzwerk von Arterien und Venen schützt. [Damit] kann [die] Körperwärme entfernt werden. Zwei Forscher fanden, daß während der warmen Tageszeit die Tiere häufig die Ohren ausbreiten und fächeln. Bei Wind bewegen [sie] ihre Ohren kaum. Bei Regen halten die Tiere die Ohren eng am Körper.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 404



Foto: picture-alliance

Nachhaltiger, digitaler und lebenswerter? Die Zukunft der Stadt im Spiegel der Wissenschaft

DHV-Symposium 2022

17. November

Präsenzveranstaltung in Bonn

Online-Teilnahme



Weitere Informationen und Anmeldung unter:
www.dhvseminare.de/symposium_2022

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**

ALTE SCHRIFTEN ANTIKE GÖTTER IN DER KLOSTERBIBLIOTHEK

Seit Jahrhunderten werden im Katharinenkloster am Berg Sinai wertvolle Handschriften aufbewahrt, insgesamt mehr als 4500 Stück. Unter manchen Texten verbergen sich alte ausradierte Schriften, die Fachleute mit Hilfe digitaler Multispektralfotografie wieder sichtbar machen – und dabei verlorene Göttergeschichten der Antike entdecken.



Claudia Rapp (links) ist Professorin für Byzantinistik an der Universität Wien. Sie leitete das Sinai Palimpsests Project, an dem die Byzantinistin **Giulia Rossetto** von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und der Fotografie- und Bildgebungsexperte **Damianos Kasotakis** von der Forschergruppe Early Manuscripts Electronic Library (EMEL) beteiligt waren.

» spektrum.de/artikel/2049318



AUF EINEN BLICK PERGAMENTRECYCLING IM MITTELALTER

- 1** Im Katharinenkloster auf dem ägyptischen Sinai lagern alte Pergamente, die im Mittelalter recycelt wurden: so genannte Palimpseste. Man entfernte die Schrift und beschrieb die Tierhaut neu.
- 2** Mit Licht verschiedener Wellenlängen durchleuchten Forscherinnen und Forscher die Textträger. Auf diese Weise können sie die ursprüngliche Schrift sichtbar machen und abfotografieren.
- 3** Auf den meisten Palimpsesten standen Texte christlichen Inhalts, auf wenigen Exemplaren finden sich aber auch Auszüge aus Werken der klassischen Antike.

AM BERG SINAI Das Katharinenkloster im Süden der Sinai-Halbinsel beherbergt eine der größten Sammlungen an spätantiken und mittelalterlichen Handschriften. Die Anlage ließ Kaiser Justinian I. in der Mitte des 6. Jahrhunderts errichten.

Im Süden der Sinai-Halbinsel ragt ein hohes Felsmassiv auf. Dort, auf dem Jebel Mousa – dem Berg Sinai –, soll Moses nach dem Auszug der Israeliten aus Ägypten einst die »Zehn Gebote« von Gott empfangen haben. Der spätromische Kaiser Justinian I. (482–565), der sich als großer Baumeister in seinem Reich hervortat, ließ am Fuß des geschichtsträchtigen Bergs eine große befestigte Anlage errichten: das Katharinenkloster. Die massiven Mauern fassten angeblich nicht nur den brennenden Dornbusch ein, in dem laut Bibelüberlieferung Moses glaubte die Stimme Gottes zu vernehmen, sondern auch eine der größten frühchristlichen Basiliken. In dem Bau, der mit prachtvollen Mosaiken ausgestattet ist, hängen die ältesten erhaltenen Ikonen der Welt.

Seit der Spätantike verwendeten und verwahrten die Mönche im Kloster handgeschriebene Bücher auf Tierhaut, also auf Pergament. Daher beherbergt das Katharinenkloster eine der wenigen Manuskriptsammlungen, die seit über einem Jahrtausend in ungebrochener Tradition am selben Ort besteht. Selbst nachdem die Region im 7. Jahrhundert unter islamische Herrschaft kam und Arabisch die Gebrauchssprache wurde, existierte das Kloster samt seiner Bibliothek weiter.

Welche Manuskripte im Katharinenkloster lagern

Am Fuß des Jebel Mousa sind heute mehr als 4500 Handschriften untergebracht. Viele haben die Mönche selbst vor Ort hergestellt, andere haben Pilger als Geschenk hinterlassen. Im Jahr 1975 erweiterte sich der Bestand wesentlich: In einem bis dahin unbeachteten Lagerraum entdeckte man dutzende Handschriften, die heute unter der Bezeichnung Neufunde bekannt sind.

Die Mönche haben die meisten Manuskripte in griechischer Sprache verfasst, später auch auf Arabisch und Syrisch, ebenso finden sich Pergamente auf Georgisch und in anderen Sprachen. Bis heute sind diese reichen Bestände nicht vollständig in Katalogen erfasst, obwohl gelehrte, wissbegierige Männer und Frauen aus dem Westen schon seit dem 18. Jahrhundert in das Kloster gereist sind. Ihr Ziel war es, die ältesten Texte des Christentums aufzuspüren und Erkenntnisse über die frühchristliche Schriftkultur zu gewinnen. So brachte der Theologe Konstantin von Tischendorf (1815–1874) eine großformatige Bibelhandschrift aus dem 5. Jahrhundert aus der Klosterbibliothek in seinen Besitz, die heute als »Codex Sinaiticus« in der British Library aufbewahrt wird.

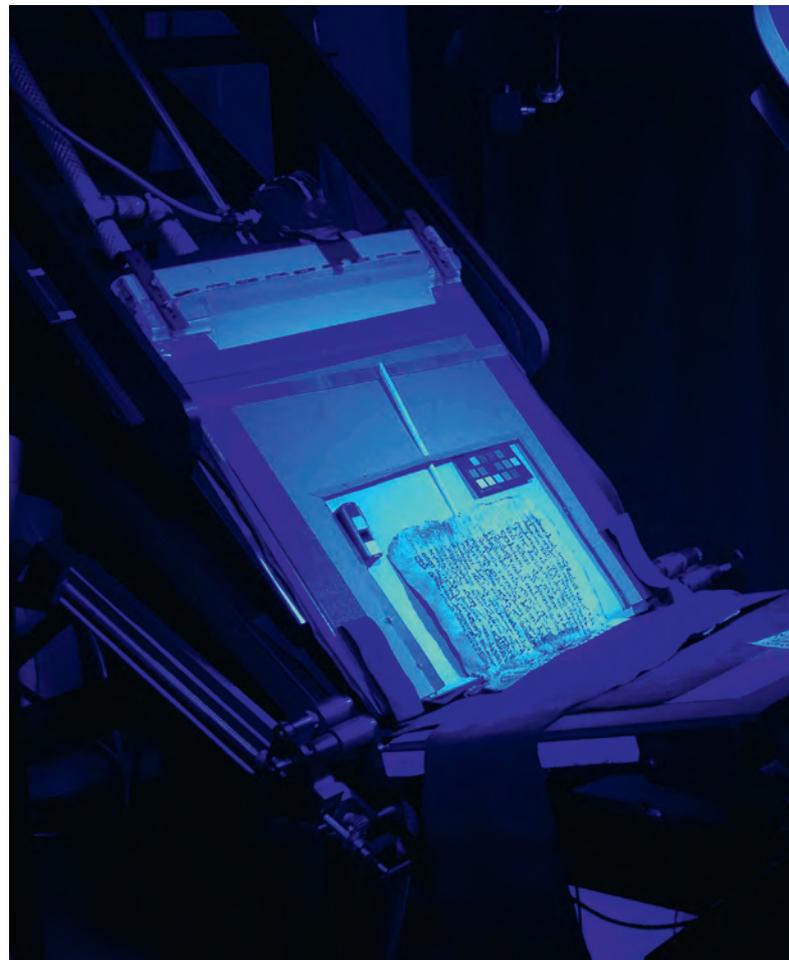
Die lange und wechselvolle Geschichte der mittelalterlichen Buchproduktion lässt sich insbesondere an den im Katharinenkloster in großer Zahl erhaltenen Palimpsesten erkunden. Dies sind Pergamente, von denen die ursprüngliche Schrift abgeschabt oder abgewaschen wurde, um die Tierhaut neu zu beschreiben. Seit wenigen Jahrzehnten können die ausradierten Texte wieder lesbar gemacht werden: mit Hilfe von Multispektralfotografie und computergestützter Bildanalyse.

Auf Einladung des Klosters hat die unabhängige Forschergruppe Early Manuscripts Electronic Library (EMEL) unter Leitung von Michael Phelps und gefördert durch den gemeinnützigen Arcadia Fund London von 2011 bis 2016

das Sinai Palimpsests Project durchgeführt. Wir waren Teil des Projekts – Claudia Rapp als wissenschaftliche Leiterin, Giulia Rossetto als wissenschaftliche Assistentin und Damianos Kasotakis als Leiter der Fotografie. Von den mehr als 170 Palimpsest-Handschriften der Bibliothek konnten wir 74 dokumentieren und bearbeiten, die für Interessierte auch im Internet zugänglich sind. Die Auswertung und Publikation der Texte dauern weiterhin an.

Ein internationales Team von 23 spezialisierten Forscherinnen und Forschern hat die ausradierten Texte, die häufig nur fragmentarisch erhalten sind, in mühseliger Kleinarbeit studiert, den Schriftstil analysiert sowie Werke und Autoren identifiziert. Mit teils erstaunlichen Ergebnissen: Manche der verwendeten Sprachen sind uns überhaupt oder fast nur aus den Palimpsesten vom Sinai bekannt, etwa das Kaukasische Albanisch oder das Christlich-palästinische Aramäisch. Bei den abgeschabten Texten handelt es sich größtenteils um liturgische oder theologische Schriften, daneben um wenig bekannte medizinische Traktate, die die Schreiber über Jahrhunderte immer wieder kopiert haben. Die Versionen auf den Palimpsesten reichen bis ins 5. Jahrhundert zurück. Daher enthalten sie auch seltene Beispiele für die früheste Form der griechischen Majuskelschrift, einer Schreibweise, die nur aus Großbuchstaben besteht.

Die Kopisten, die neue Texte auf das gereinigte Schreibmaterial übertrugen, wussten lediglich, dass sie Recyclingpergament verwendeten, aber nicht, welche Texte welchen Ursprungs zuvor darauf standen. Teils liegen Jahrhunderte zwischen der Erstellung der beiden Schreibschichten, teils nur wenige Jahrzehnte. Die Menschen haben damals Handschriften oder ausradiertes Pergament oft über große Entfernungen transportiert – als persönlichen Besitz oder



DAMIANOS KASOTAKIS: FOTOTECH (IMAGING GRADE) VON JOHN STOKES, KAMERA VON MEGAWISON, LICHTQUELLEN VON EQUIPOSE

als Handelsware. Daher lagen die Ursprungsregionen der ausradierten Schriften häufig weit entfernt von jenen Orten, an denen die neuen Schreiber tätig waren.

Zu Beginn unserer Projektarbeit ließ sich kaum absehen, was die Form der zerstörungsfreien, optischen »Ausgrabung« zu Tage fördern wird. Insgesamt haben wir zahlreiche Ergebnisse erzielt, etwa herausgefunden, dass die Mönche mit Menschen im gesamten Mittelmeerraum in Kontakt standen. Doch als Giulia Rossetto ein bisher unbekanntes Werk der klassischen Antike entdeckte, war ihr damit ein Sensationsfund gelungen.

Solche Texte konnten wir dank der Multispektralfotografie aufspüren. Dabei ist es gar keine neuartige Herangehensweise, die Palimpsest-Handschriften mit technologischen Methoden zu untersuchen. Schon seit dem späten 19. Jahrhundert haben Gelehrte mit Hilfe fotografischer Geräte Texte wieder sichtbar gemacht, die mit bloßem Auge nicht lesbar waren.

Ammoniak zersetzte die Tintenschrift

In dieser Hinsicht hat unter den Handschriften im Katharinenkloster »Sinai Syrisch 30« einen besonderen Stellenwert. Es war das erste Manuskript in der Bibliothek, das als Palimpsest erkannt wurde. Im Jahr 1892 bemerkten die schottischen Schwestern Agnes Lewis Smith (1843–1926) und Margaret Dunlop Gibson (1843–1920), dass sich unter dem Text des Manuskripts weitere ausradierte Zeilen abzeichnen. Nach langer und geduldiger Arbeit identifizierten sie diese als älteste erhaltene Fassung des Neuen Testaments in syrischer Sprache. Die Schwestern waren die Ersten, die diese Handschrift fotografierten, um nicht nur den Ober-, sondern auch den ausgelöschten Untertext zu

Statt »Amen« und »Heiliger Geist« standen da Namen wie Zeus und Dionysos

erforschen. Bei ihrer Untersuchung pinselten sie allerdings auf einige Seiten Ammoniak und setzten die Handschrift dem Sonnenlicht aus. Chemische Reaktionen mit der Tinte enthüllten zwar für kurze Zeit den ausgelöschten Text – so konnte das Gelehrtenpaar seine Ergebnisse dokumentieren. Doch die Handschrift war danach dauerhaft beschädigt. Auf den betreffenden Seiten lässt sich die ältere Schrift selbst mit modernster Technologie kaum wiederherstellen.

Die digitale Multispektralfotografie ist hingegen nicht-invasiv. Die Technik kombiniert die Ansätze der Satellitenfotografie, der medizinischen Diagnostik und der gewöhnlichen digitalen Fotografie. Wie bei der Satellitenbildgebung werden die Palimpseste in bestimmten Wellenlängenbereichen fotografiert. In der Diagnostik wiederum beobachtet man die Effekte des Auftreffens von ultravioletter und Infrarotstrahlung auf bestimmte Materialien. Auch bei den Palimpsesten geht es darum, die Wirkungen der Lichtstrahlen zu erkennen: Manche Tintenreste fluoreszieren unter ultravioletten Wellenlängen, und in einige Tinten dringt das Infrarotlicht ein und macht diese deutlicher lesbar.

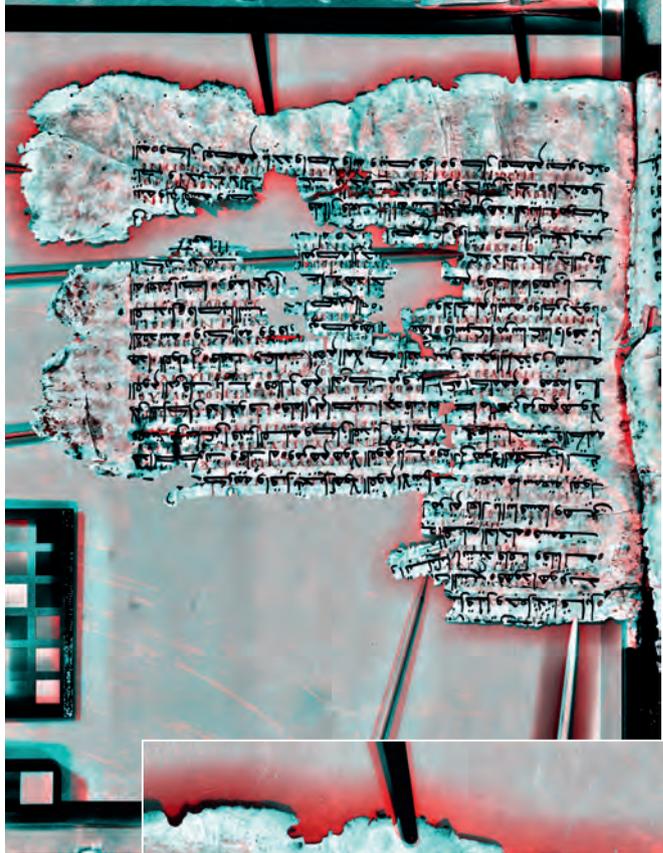
Die multispektrale und normale Fotografie unterscheidet sich eigentlich kaum. Man braucht ein Aufnahmegerät, ein Objektiv und eine Lichtquelle. Am Computer lassen sich die Bilder digital so bearbeiten, dass die ausradierten Textschichten klar herauskommen. Für das Sinai Palimpsests Project haben wir die bestehenden Methoden jedoch weiterentwickelt. In der Kamera steckt eine neuartige Linse aus Quarzkristall, mit der sich ultraviolettes und infrarotes Licht ohne Verzerrungen aufnehmen lässt. Ein spezieller digitaler Sensor arbeitet zudem feinste Details der Buchstaben heraus. Zusätzlich nutzen wir neuartige Lichtquellen: Besondere LED verringern die Wärmestrahlung, die auf die Pergamente trifft. Als weitere Innovation führten wir eine multispektrale transmissive Beleuchtung ein. Das heißt, wir beleuchten die Manuskriptseite auch von der Rückseite. Auf diese Weise können wir die ältere Tinte besser sichtbar machen. Dabei kommt uns ein typisches Phänomen alter Handschriften zugute: der Tintenfraß. Im Lauf der Jahrhunderte greift die Schreibflüssigkeit nämlich das Pergament an. Dadurch erodiert das Material an den beschrifteten Stellen und wird dünner. Deshalb zeichnen sich bei einer multispektralen transmissiven Beleuchtung die ursprünglichen Buchstaben klarer ab.

Bei unserem Projekt legen wir besonderen Wert darauf, die Palimpseste präzise und umfassend zu dokumentieren. Jede einzelne Manuskriptseite wird 33-mal aufgenommen. Dabei fotografieren wir die Schriftstücke unter verschiedenen Wellenlängen des Lichts, das wiederum aus unterschiedlichen Winkeln auf die Pergamente trifft. Im Streif-

DAMIANUS CASIRAGUS, FOTOTECHNIK/INAGRIC GRAFIEI VON JOHN STOKES, KAMERA VON MEGANSON, LICHTQUELLEN VON EUROPOSE



MULTISPEKTRALFOTOGRAFIE Auf einem speziellen Fototisch liegt das Manuskript »Sinai Syrisch 30«. Unter verschiedenen Lichtverhältnissen – hier im UV-Licht – fotografieren die Mitwirkenden des Sinai Palimpsests Project die biblische Handschrift.



PALIMPSEST Von einem der beiden Pergamentblätter mit der Göttergeschichte sind drei Fragmente erhalten, die am Computer wieder zusammengefügt wurden. Rot und blau sind zwei der Bruchstücke markiert (oben links). Der gut erkennbare arabische Text, der hier auf dem Kopf steht, stammt aus dem 10. Jahrhundert. Damals hatten Schreiber das Pergament wiederverwertet. In der Multispektralaufnahme zeichnet sich die ausradierte Schrift aus griechischen Großbuchstaben ab (oben rechts). Am oberen Bildrand des zweiten Pergamentblatts ist ein großes Psi (Ψ , Pfeil) zu erkennen (rechts). Der 23. Buchstabe im griechischen Alphabet markiert den Beginn des 23. Buchs in einem längeren Werk.



licht können wir die Oberflächenstruktur des Tintenauftrags oder der Radierungen deutlicher erkennen. Der gesamte Prozess dauert sechs Minuten pro Manuskriptseite.

In einem zweiten Schritt bearbeiten wir das digitale Bildmaterial in einer computergestützten Analyse weiter. Da wir bereits eine große Vielfalt an Pergamentqualität, Tinten und Schriftstilen im Katharinenkloster dokumentiert haben, konnten wir daraus spezielle Algorithmen entwickeln, die uns automatisiert Informationen zur ursprünglichen Schrift bereitstellen. Falls dieser dreiminütige Routinedurchlauf nur unzureichende Ergebnisse für die Aufnahmen einer Manuskriptseite liefert, bearbeiten wir in einem dreistündigen Verfahren die Bilder zusätzlich manuell nach.

Unsere Untersuchung von 74 Palimpsesten aus dem Katharinenkloster hat gezeigt, welche Inhalte die mittelalterlichen Schreiber ausradierten, um wiederverwertbares Schreibmaterial zu erhalten: In den meisten Fällen, bei über 80 Prozent der Pergamente, handelt es sich um christliche Schriften. Vorwiegend sind es liturgische und biblische Texte. Recht selten fanden sich Werke der klassischen Antike – bei weniger als vier Prozent. Doch genau solch

einen seltenen Text aus altgriechischer Zeit entdeckten wir während unseres Projekts.

Der Text ist auf zwei fragmentarischen Pergamentblättern mit der Bezeichnung »Sin. ar. NF 66« erhalten. Der Name steht kurz für »Sinai Arabic New Finds 66« (Sinai Arabisch Neufunde 66). Die Zeilen sind in einer griechischen Majuskelschrift verfasst; dem Schriftstil zufolge dürfte der Kopist im 5. oder 6. Jahrhundert in Alexandria oder woanders in Ägypten gearbeitet haben. Später radierte man die Texte auf den beiden Blättern aus. Im 10. Jahrhundert schrieb dann jemand die Lebensbeschreibungen von Heiligen in arabischer Sprache darauf ab. Als wir die Arbeit an diesen Seiten begannen, fiel uns sofort die Schönheit und Eleganz der ausradierten Majuskelschrift ab. Als wir die Arbeit an diesen Seiten begannen, fiel uns sofort die Schönheit und Eleganz der ausradierten Majuskelschrift ab. Als wir die Arbeit an diesen Seiten begannen, fiel uns sofort die Schönheit und Eleganz der ausradierten Majuskelschrift ab.

Es war sehr schwierig, den gelöschten Text zu entziffern; ohne die multispektrale Bildgebung und -verarbeitung wäre es unmöglich gewesen. Aus mehreren Gründen: Das Pergament ist nur fragmentarisch erhalten, an vielen Stellen

klaffen Löcher in den Blättern; der ursprüngliche Text wurde zudem sehr gründlich abgewaschen; und die alten Buchstaben waren besonders klein geschrieben worden. Geduld, Ruhe und in langjähriger Arbeit erworbene Schriftexpertise waren die Voraussetzungen, um die 89 erhaltenen Textzeilen zu transkribieren. Dabei wurde uns schnell klar, dass es sich um Verse handelt – genauer gesagt um Hexameter. In diesem Versmaß ist die epische Dichtung der Antike abgefasst, etwa die »Ilias« und »Odyssee« von Homer, die aus dem 8. und 7. Jahrhundert v. Chr. stammen.

Auf den beiden Seiten sind Episoden geschildert, die sich mit der Kindheit des Gottes Dionysos befassen: Auf dem einen Blatt führen die Göttinnen Persephone und Aphrodite einen Dialog über das Kind, auf dem anderen Blatt versuchen die Giganten, den kleinen Dionysos mit Spielzeug vom Thron seines Vaters Zeus wegzulocken, um ihn zu töten. In Übersetzung lautet die Episode so:

»Den Giganten gelang es nicht, Dionysos, den Sohn des Zeus und der Persephone, davon zu überzeugen, sich vom Königsthron zu erheben: weder mit irgendwelchen Gaben, die die weite Erde nährt, noch mit tückischen Täuschungen und drängenden Reden. Sogleich schmückten sie den Kopf des Sohnes des laut donnernden Zeus mit Kränzen aus lieblichen Blumen und schritten im Kreis einher, in der Absicht, ihn mit Ermahnungen und verführerischen Worten zu überzeugen, mit all den kindlichen Spielsachen und mit angenehmen Geschenken.«

Ein Buch, so lang wie die homerischen Epen

Uns ist kein anderer klassischer Text bekannt, der jene mythischen Ereignisse mit diesem Wortlaut und mit solchen Details darlegt. Nun war Detektivarbeit und Spezialwissen gefragt: Um welchen bisher unbekanntem Text handelt es sich?

Einen wichtigen Hinweis entzifferten wir am Rand des einen Blatts: Hier steht der 23. Buchstabe des griechischen Alphabets, ein Psi (ψ). Es dient in diesem Fall als Zahl, das den Beginn von »Buch 23« eines bestimmten Werks markiert. Auch die homerischen Epen sind nach den Buchstaben des Alphabets geordnet. Weitere Nachforschungen führten uns zu einem Werk, das, soweit uns die antiken Quellen informieren, eine ähnliche redaktionelle Geschichte durchlaufen hatte wie die homerischen Epen – es war in 24 Bücher gegliedert und enthielt eine Erzählung über die Kindheit des Dionysos: die »Hieroi Logoi in 24 Rhapsodien«.

Die »Heiligen Reden« gehörten zu den orphischen Werken, die heute fast alle verloren sind. Diese Bücher hatten die Orphiker geschrieben, Anhänger einer religiösen Bewegung der Antike. Die Gruppe hing unter anderem der Idee an, dass die Seelen der Menschen unsterblich seien und nach dem Tod in einen anderen Körper wandern würden. Wie das Leben im Jenseits aussehen würde, darauf hatte die klassische griechische Religion keine klare Antwort. Ungefähr seit dem 6. Jahrhundert v. Chr. füllten daher spezielle Geheimkulte und nicht staatliche Strömungen diese Lücke. Und so boten auch die Orphiker ein Erklärmodell über das Leben nach dem Tod, das sie in Gedichtform niederschrieben. Dabei geht die Bezeichnung »orphisch« auf den mythischen Sänger Orpheus zurück. Er soll die in

Hexametern verfassten Gedichte verfasst haben, lautete die antike Vorstellung.

In den »Hieroi Logoi« schilderten die Orphiker die mythische Entstehungsgeschichte des Kosmos. Wie antike Autoren schreiben, denen mehr Schriften bekannt waren, als heute erhalten sind, muss es sich um das längste orphische Gedicht gehandelt haben. Bislang war es lediglich indirekt überliefert – durch vereinzelte Zitate bei antiken Autoren. Insbesondere Neuplatoniker wie Porphyrios (um 233–301/305) oder Proklos (412–485) zitierten in der Spätantike aus dem Werk. Und einige solcher Erwähnungen der »Hieroi Logoi« erinnern stark an den Inhalt der Sinai-Verse.

Wann die orphischen »Hieroi Logoi« verfasst wurden, darüber ist sich die Gelehrtencommunity uneins. Offenbar ist das mythologische Material, aus dem sie bestehen, recht alt. Die Schriften wurden aber im Hellenismus und in der Kaiserzeit, also seit dem 3. Jahrhundert v. Chr., überarbeitet. Im 5. bis 6. Jahrhundert studierten dann in Alexandria die Neuplatoniker die »Heiligen Reden«. Da die Sinai-Fragmente in einem Schriftstil geschrieben sind, der im selben Zeitraum in Ägypten typisch war, liegt die Vermutung nahe, dass ein Schreiber die älteren Dionysos-Verse damals in dieser Region kopierte.

Mit den beiden Blättern vom Sinai liegt erstmals ein direktes Zeugnis jenes wichtigen mythologischen Werks aus der Antike vor. Es ist ein einzigartiger Fund, der erst durch die systematische Untersuchung der Palimpseste und dank der Multispektralfotografie möglich wurde. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / AOSHIN

QUELLEN

Rapp, C. et al. (Hg.): New light on old manuscripts. The Sinai palimpsests and other advances in palimpsest studies. Österreichische Akademie der Wissenschaften, 2023 (im Druck)

Rossetto, G.: Fragments from the Orphic rhapsodies? Hitherto unknown hexameters in the palimpsest Sin. ar. NF 66. Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik 219, 2021

Rossetto, G. et al.: A revised text of the poem with Orphic content in the palimpsest Sin. ar. NF 66. Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik 222, 2022

WEBLINK

www.sinaipalimpsests.org

Die Digitalaufnahmen der Palimpseste und ihre Forschungsergebnisse haben die Projektmitglieder in Kooperation mit der University of California in Los Angeles online zugänglich gemacht.

REZENSIONEN



WITTY STOCK.ADOBE.COM



Matthias Wemhoff
**SCHLIEMANN'S
WELTEN**

Sein Leben.
Seine Entdeckungen.
Sein Mythos.

E. A. Seemann
Henschel, Leipzig
2022

320 S., € 28,-



ARCHÄOLOGIE UMSTRITTENER ENTDECKER

Heinrich Schliemann spaltet noch heute die Gemüter: großer Archäologe oder Dilettant mit fragwürdigen Methoden?

► Troja! Wer diesen Namen hört, denkt an Homer und tragische Schicksale in einem epischen Ringen zwischen Göttern und Menschen. Aber auch an Heinrich Schliemann und seine zwei Karrieren: erst extrem wohlhabender Großkaufmann im Zarenreich, dann Pionier der prähistorischen Archäologie. Er holte den homerischen Mythos in die Gegenwart, naiv und genial zugleich.

Bis zum 6. November 2022 kann man die große Ausstellung zu Schliemann im Berliner Museum für Ur- und Frühgeschichte besuchen. Es geht um die Person, den Werdegang, den Mythos. Und natürlich um seine Wirkungsstätten, vor allem Troja und Mykene.

Es ist nie einfach, ein Leben in der Retrospektive in Kapitel einzuteilen, doch in diesem Katalog ist es gelungen. Meist kurze und durch ihre grafische Gestaltung optisch abgehobene

Artikel vermitteln Hintergrundwissen zu Personen wie »Die erste große Liebe? Minna Meincke« oder »Rudolf Virchow«, zu Orten und Geschehnissen wie »Amsterdam in den 1840er Jahren« oder »Ägypten und das Rätsel der Kleopatra«. Lediglich »Troja – was war das nochmal?« macht eine verständliche Ausnahme: Ein Historiker fasst den Mythos zusammen und gibt einen umfassenden Überblick über die vorhandenen Quellen.

Wer also war Schliemann, und wie kam er dazu, auf eigene Kosten in einem Hügel in der Türkei nach einer Stadt zu graben, die als reiner Mythos galt? Bis ins Kleinste lassen sich diese Fragen wohl nicht beantworten. Zwar hinterließ er zwei Autobiografien und mehr als 20000 Briefe, Telegramme und Postkarten, dazu 18 Reise- und Grabungstagebücher. Doch verstand er sich auch darauf, am eigenen Mythos zu arbeiten.

Der Pastorensohn entdeckte schon als Kind seine Faszination für Sagen und Legenden. Die Mutter starb, der Vater verlor seine Anstellung wegen seines unchristlichen Lebenswandels. Schliemann wuchs bei einem Onkel auf, lernte Latein, war aber aus finanziellen Gründen gezwungen, eine Lehre in einer Materialwarenhandlung zu beginnen.

Als Arbeiter investierte er sein spärliches Gehalt in Sprachunterricht. Und Schliemann war begabt: Schon nach einem Jahr beherrschte er Russisch gut genug für kaufmännische Briefwechsel. 1846 ließ er sich in Sankt Petersburg nieder, nahm die russische Staatsbürgerschaft an und erwarb das Patent eines Kaufmanns der zweiten Gilde von Sankt Petersburg. Damit waren Privilegien verbunden, darunter Reisefreiheit, wie sie sonst nur der Adel genoss.

Der Tod seines Bruders in Kalifornien veranlasste Schliemann Ende 1850 zu seiner ersten Amerikareise. Im aufstrebenden Sacramento gründete er ein Bankhaus, ließ sich auf das riskante Goldgeschäft ein und vermehrte in wenigen Monaten sein Vermögen. Nach schwerer Fieberkrankheit und einer verheerenden Überschwemmung der Stadt kehrte

er nach Sankt Petersburg zurück und heiratete Jekaterina Lyshina, die Tochter eines Juristen.

1858 sehnte sich Schliemann nach neuen Herausforderungen und zog sich aus dem aktiven Geschäftsleben zurück. Sein Vermögen belief sich auf umgerechnet mehr als 60 Millionen Euro. Er unternahm mehrmonatige Reisen, um die Altertümer der Welt zu besichtigen. Anfang des 19. Jahrhunderts bedeutete das: Strapazen und Risiken. So ritt Schliemann von Peking aus 14 Stunden auf einem Pferd, um die Chinesische Mauer zu erreichen. Davor hatte er Indien bereist, weiter ging es nach Japan und Amerika. Bis zu seinem Lebensende blieb er so mobil und besuchte etwa 50 Länder – sei es per Dampfer oder Boot, Eisenbahn oder Kutsche, zu Pferd oder einfach auf Schusters Rappen.

1868 war die nächste Reise den bei Homer beschriebenen Stätten gewid-

Schliemann hat die akademische Welt in zwei Lager gespalten

met, glaubte Schliemann doch fest daran, dessen Epen schilderten reale Ereignisse. So suchte er in Ithaka das Haus des Odysseus – und richtete mit der Spitzhacke einigen Schaden an. Zwei deutsche Archäologen hielten das Dorf Bunabaschi mit dem Hügel Bali Dagh für den Schauplatz der von Homer besungenen Geschehnisse, aber Schliemann fand nach gründlicher Begehung des gesamten Geländes, dass die in der »Ilias« und der »Odyssee« beschriebenen Gegebenheiten nicht dazu passten. Der in der Troas lebende Brite Frank Calvert legte Schliemann den Hügel Hisarlik nahe. Dort fand dieser die erhofften Parallelen.

1873 legten seine Arbeiter einen gepflasterten Weg frei, dazu die Überreste einer Toranlage. Sogleich verkündete Schliemann, das »Skäische Tor« gefunden zu haben – das einzige

von Homer erwähnte Stadttor Trojas. Auch andernorts bemühte er sich, die prähistorische Landschaft anhand antiker Schilderungen zu rekonstruieren, wobei er Autoren wie Pausanias und Strabon folgte. So ließ er in Tiryns wie zuvor auf dem Hisarlik einen Grabenschnitt bis auf den Felsen anlegen. Schliemanns Homergläubigkeit war deutschen Akademikern Anlass für Spott und scharfe Kritik. Und doch war sie die Voraussetzung für seinen Erfolg.

Allerdings ließ sie den unerfahrenen Ausgräber auch mit brachialer Gewalt vorgehen. Lange ignorierte er, was ihm nicht homerisch erschien. Im Lauf der Zeit erkannte er den Fehler seiner Herangehensweise: »Da es meine Absicht war, Troja auszugraben, und da ich dasselbe in einer der unteren Städte zu finden erwartete, musste ich manche interessante Ruine in den oberen Schichten zerstören.« Dennoch erforschte Schliemann als Erster einen prähistorischen Siedlungshügel. Erst 1882 begann er komplette Siedlungsschichten auszugraben, statt breite Gräben durch den Hügel zu treiben.

Schliemann kehrte immer wieder in die Troas zurück, oft mit Fragen, die sich aus seinen Grabungen in Griechenland ergaben. Wie in Troja ordnete er seine Funde lange zeitlich falsch ein. Dennoch war er es, der einen Blick in die Vorgeschichte eröffnete: Schliemann gilt als Entdecker der mykenischen Kultur.

Ob der Pionier wirklich das Troja Homers entdeckt hat, darüber stritt man schon zu seinen Lebzeiten – und auch heute ist man sich nicht einig. Die akademische Welt hat er in zwei Lager gespalten, und manch ein renommierter Archäologe ließ sich nicht beirren, den Quereinsteiger für einen Dilettanten mit fragwürdigen Methoden zu halten. Doch Schliemann bewies, dass »eine Epoche und Kulturwelt existiert hatte, von der vorher niemand etwas Genaues wissen, sondern lediglich anhand der homerischen Epen mutmaßen konnte«.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Archäologiejournalist im Raum Heidelberg. Er war Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft« und dort Koordinator für Archäologie und Geschichte.

INSEKTEN STARKES PLÄDOYER FÜR SECHSBEINER

Der britische Insektenforscher Dave Goulson erzählt von der Bedeutung der Tiere, liefert Beweise für das dramatische Ausmaß des Insektensterbens und zeigt Wege auf, wie wir es besser machen können.

► »Stumme Erde« ist Dave Goulsons sachlichstes Buch – und vielleicht sein wichtigstes. Dass er sehr unterhaltsam über das Leben der Insekten schreiben kann, hat er schon mit mehreren Bestsellern bewiesen. Im aktuellen Werk wirkt der Insektenforscher jedoch drängender und kämpferischer als in seinen bisherigen Veröffentlichungen.

Gleich zu Anfang erklärt der Autor, dass ein grundlegender Wandel nötig sei. Noch ist es nicht zu spät, schreibt er, denn die Insekten könnten sich in kurzer Zeit wieder erholen, »wenn wir ihnen nur ein klein wenig



Freiraum schenken«. Er fordert ein nachhaltiges Agrarsystem, grünere Städte und bessere Umweltbildung schon in der Grundschule. Um sein Anliegen zu untermauern, führt er zahlreiche Statistiken und Studien an, und er listet eine lange Reihe von konkreten Maßnahmen auf, wie wir unser Leben insektenfreundlicher gestalten könnten. Aber Goulson wäre nicht Goulson, erführe man nicht nebenbei auch viel über die faszinierenden Lebewesen selbst. So erzählt er von Termiten, die 50 Jahre alt werden, von Ohrwürmern mit

zwei Penissen, winzigen Mücken, die 1000-mal in der Sekunde mit den Flügeln schlagen, oder wie man einmal 23 Mistkäferarten nach Australien importierte, um die dortigen Weiden von Kuhfladen zu befreien.

Ein Manko: Gerade weil der Forscher so viele Belege und Fakten zum Insektensterben zusammengetragen hat, ist es schade, dass direkt zugeordnete Quellenangaben fehlen. Das Buch enthält lediglich ein nach Kapiteln aufgeteiltes, allgemeines Literaturverzeichnis.

Das Buch ist in fünf Abschnitte gegliedert. Es beginnt mit der grundlegenden Bedeutung der Insekten für das Funktionieren der Ökosysteme, skizziert das erschreckende Ausmaß des Insektensterbens und erörtert die diversen Ursachen. Im vierten Teil entwirft Goulson eine düstere Zukunftsvision für das Jahr 2080: Er beschreibt darin – detailliert und beängstigend realitätsnah – den Alltag seiner Kinder und Enkel in einer Welt, in der Klimawandel und Biodiversitätskrise zu massiven Wohlstandsverlusten geführt haben. Das fünfte Kapitel führt zahlreiche konkrete Maßnahmen auf, mit denen sich das Blatt noch in eine positivere Richtung wenden ließe.

Am Ende jedes Kapitels stellt Goulson eine besondere Insektenart oder -gruppe vor – dort kommt das Talent des Autors, die Leserinnen und Leser in die spannende und oft skurrile Welt der Lebewesen zu entführen, stark zur Geltung. Wer ein unbeschwertes Sachbuch über das faszinierende Leben der Insekten lesen möchte, sollte aber zuerst zu Goulsons anderen Werken greifen.

»Stumme Erde« ist ein starkes Plädoyer für Sechsbäuer. Es macht klar, dass unser Überleben eng mit dem der Insekten verknüpft ist. Eine Erkenntnis, die immer noch nicht in der Breite der Gesellschaft angekommen sei, wie Goulson schreibt. Das vorliegende Buch soll dazu beitragen, das zu ändern. Wer sich für die Zukunft des Planeten interessiert, sollte es daher lesen.

Gunther Willinger ist Biologe und Wissenschaftsjournalist in Tübingen.



BOTANIK EIN JAHRHUNDERT- SCHINKEN

Die umfangreiche Pflanzensammlung bündelt das aktuelle Wissen um die vergangene und gegenwärtige Pflanzenwelt.

► Für viele einheimische Pflanzen kommt die »Flora Germanica« schon zu spät, für andere, im Lauf der Globalisierung zugewanderte »Neophyten« (verwilderte Kultur- und Zierpflanzen) sowie nur unbeständig auftretende »Adventivarten« gerade recht. Mit Entsetzen stellt man beim Blättern fest, wie viel der Flora in den letzten 70 Jahren in verschiedenen Regionen verschwunden ist. Man lernt auch manches kennen, was man noch nie zu Gesicht bekommen hat.

Die ungeheure Arbeit der beiden Hauptautoren Michael Hassler und Thomas Muer (neben rund 150 weiteren) kann nur ermesen, wer selbst wenigstens bei bestimmten Arten, etwa Gräsern oder Orchideen, eine gewisse Vollständigkeit »sammeln« will. Einige sind recht verbreitet, so dass man sie danach praktisch »persönlich« kennt. Andere kommen nur an wenigen Fundorten vor und sind manchmal bloß einer Hand voll Eingeweihten bekannt. Hat sich die Seltenheit herumgesprochen, braucht man dort nicht mehr zu suchen: Breite Trampelpfade der Fotografen führen hin – und zeugen von rücksichtslosem Umgang mit der Natur, für deren Erhalt und Schutz man angeblich mit seinen Bildern werben möchte.

Die erste Zeile des Buchs lautet: »Eine neue Übersicht über die deut-

sche Flora.« Das ist treffend formuliert, denn der Vorgänger von 1999, an dem der Zweitautor bereits beteiligt war, ist mehr als 20 Jahre alt. Die fortschreitende Intensivierung der Landwirtschaft, der gigantisch gewachsene Welthandel und die Veränderungen beim Klima haben in dieser Zeit für viel Wandel gesorgt.

Wichtigste Neuerung ist die verbesserte Bebilderung mit je zwei Bildern pro Art. Die Systematik wurde mit molekulargenetischen Ergebnissen auf den neuesten Stand gebracht. Die gewohnte Reihenfolge der Ordnungen und Familien aus den klassischen Bestimmungsbüchern (Schmeil-Fitschen, Rothmaler, Oberdorfer) ist somit überholt. In der neuen phylogenetischen Anordnung erscheinen nun völlig andere Namen vor allem für Gattungen, aber auch in höheren Kategorien.

Beispielsweise steht jetzt vor den Einkeimblättrigen: (die) »Basale Ordnungen der Bedecktsamer (Angiospermae)«, das ist Stand Dezember 2021. Einige weitere inzwischen erfolgte Neuerscheinungen zu solchen Revisionen konnten bis zum Druck nicht mehr berücksichtigt werden. Tatsächlich sind derartige Bücher nie fertig. Bestimmend für Pflanzennamen ist ein ungeheuer kompliziertes Regelwerk, mittels dessen die Namen festgelegt

Man lernt deutsche Flora kennen, die man nie zu Gesicht bekommen hat

und verbindlich zur Verfügung gestellt werden. Die Datenbank befindet sich in den Royal Botanic Gardens in Kew, London. Am häufigsten muss der Prioritätsregel gefolgt werden: Der Name des Erstbeschreibers gilt, wenn eine Art mindestens zweimal beschrieben wurde, und bei einer weit verbreiteten Orchidee des Mittelmeerraums ist das gerade wieder geschehen. Der jahrhundertealte Name wird nun zum so genannten Synonym.

Das Ziel der »Flora«, alle Sippen zu behandeln, auch Unterarten, apomiktische (nicht durch geschlechtliche Fortpflanzung entstandene) Pflanzen und Varietäten, erscheint völlig unrealistisch. Aus den bisherigen rund 3500 Sippen werden nämlich nun zirka 5900. Abhilfe ist geplant durch einen dritten Band, der »kritische Sippen« wie Brombeere (*Rubus*), Löwenzahn (*Taraxacum*) oder Habichtskraut (*Hieracium*) enthalten soll. Probleme werden wohl die Abbildungen machen, denn viele Merkmale zur Abgrenzung einzelner Sippen von der sehr nahen Verwandtschaft sind fotografisch nicht darstellbar. Der dritte Band ist in Arbeit und wird voraussichtlich 2024 erscheinen.

Vor dem eigentlichen Atlas sind zur Orientierung noch vier Deutschlandkarten zu Klima, potenzieller natürlicher Vegetation (kurz: PNV, die Vegetation, die ohne menschlichen Einfluss bestünde) und Landschaftsgliederung eingefügt. Es folgt ein 54-seitiger Abschnitt »Die Lebensräume Deutschlands und ihre typischen Pflanzenarten«, eine ausgezeichnete Zusammenfassung, die trotz der Kürze mit einem Standardwerk, etwa von Richard Pott (Biotoptypen), mithalten kann – vor allem, weil man die erwähnten Arten danach anschauen kann.

Es folgen 9000 Aufnahmen mit Kurzbeschreibung wichtiger Merkmale (es handelt sich nicht um ein Bestimmungsbuch) und viele weitere Informationen durch Symbole. An einer Stelle erwähnen die Autoren, dass die meisten Bilder digitaler Herkunft sind – und so überhaupt erst möglich wurden. Das stimmt nur teilweise, denn leider ist die Pflanzenfotografie mit den modernen Maschinen keineswegs immer besser geworden: Da nicht alle Fotografen mit professionellen Geräten mit Sensoren im früheren Vollformat 24 x 36 Millimeter arbeiten, sondern mit kleineren, verwenden sie Objektive mit viel kürzeren Brennweiten mit einer größeren Tiefenschärfe. Als Ergebnis ist auf den Bildern nicht nur die Pflanze zu sehen, man erkennt auch die Umgebung, was manchmal stört.

Auch wäre für manche Arten bloß ein Bild völlig ausreichend gewesen,

was bei anderen ein drittes ermöglicht hätte. Aber: Insgesamt ist die überzeugende Auswahl und Zusammenstellung ästhetisch und drucktechnisch schwer zu übertreffen.

Am Ende des zweiten Bands findet sich ein ausführliches Glossar aller Fachausdrücke, ein Register bis herunter zu den Synonymen und das Literaturverzeichnis. Das macht die »Flora Germanica« zum Handbuch: 3000 Einträge der letzten 30 Jahre bis April 2022, sorgfältig gelistet nach verschiedenen Kategorien. Mein Großvater bezeichnete solche umfangreichen und teuren Bücher als »Jahrhundertschinken«, um die Anschaffung vor seiner sparsamen Frau zu rechtfertigen. Diese beiden Bände hätte er sicher sofort gekauft.

Jürgen Alberti ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.

DIGITALISIERUNG WAS PASSIERT, WENN DAS INTERNET KOLLABIERT?

Die Wissenschaftsjournalistin Esther Paniagua erläutert die Verwundbarkeiten der digitalen Infrastruktur. Leider liest sich das Buch an vielen Stellen wie ein fader Abklatsch der Internetkritik.

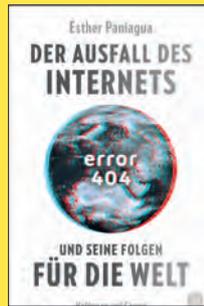
► Im März 2021 kam es in einem Rechenzentrum in Straßburg zu einem Großbrand. Meterhohe Flammen loderten aus dem mehrstöckigen Gebäude, die Feuerwehr musste mit einer Hundertschaft anrücken, um den Brand unter Kontrolle zu bringen. In der Folge gingen 3,6 Millionen Webseiten offline, unter anderem Regierungsseiten, Shopping-Portale und Nachrichtenseiten.

Der Vorfall macht deutlich, wie abhängig die Welt vom Internet und seiner technischen Infrastruktur ist. Online-Banking, Online-Shopping, E-Government – immer mehr Prozesse laufen digital. Doch was würde im Fall eines Crashes passieren? Mit dieser Frage beschäftigt sich die spanische Wissenschaftsjournalistin Esther

Paniagua in ihrem Buch »Error 404: Der Ausfall des Internets und seine Folgen für die Welt«.

Im ersten Kapitel skizziert die Autorin mehrere Wege, wie es zu einem solchen Zusammenbruch kommen könnte. Durch eine Sicherheitslücke im BGP-Protokoll – einer Art Verteiler der digitalen Infrastruktur – könnten dem System fehlerhafte Informationen zugeführt werden; so würde womöglich eine Kettenreaktion ausgelöst, bei der das Internet binnen 30 Minuten lahmgelegt würde. »Das Problem besteht darin, dass durch die Öffnung des Internets für die massenhafte Nutzung eine ungeheure Vielzahl von Risiken für die Nutzer und für wichtige Systeme und Infrastrukturen in der realen Welt entstand, einschließlich der Kraftwerke, die schnell an das World Wide Web angeschlossen wurden«, konstatiert die Autorin. Das Internet sei mittlerweile mehr als 40 Jahre alt, und obwohl die Technologie noch funktioniere, fehle es ihr an nötigen Sicherheitsvorkehrungen.

Esther Paniagua
ERROR 404
Der Ausfall des
Internets und seine
Folgen für die Welt
Hoffmann und
Campe, Hamburg
2022
400 S., € 26,-



Eine weitere Schwachstelle ist die physische Infrastruktur des Internets. Durch die Weltmeere verlaufen 487 Unterseekabel mit einer Gesamtlänge von 1,3 Millionen Kilometern. Durch Unfälle oder Naturkatastrophen kommt es jährlich zu 200 Störungen. Zu Beginn des Jahres 2022 etwa war die kleine Inselgruppe Tonga im Pazifik durch den Ausbruch eines Unterwasserseevulkans mehrere Wochen vom Internet abgeschnitten. Das Problem besteht nach Einschätzung von Paniagua darin, dass es nicht genügend

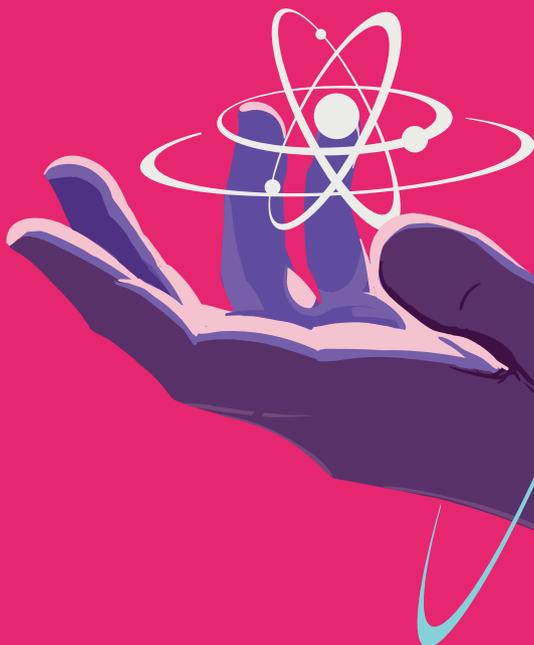
Redundanz, also Ersatzsysteme gibt, die verhindern könnten, dass ein räumlich begrenzter Schaden verschiedene Internetleitungen betrifft und ein ganzes Land vom World Wide Web trennt.

Vor diesem Hintergrund entwirft die Autorin eine Reihe weiterer Bedrohungsszenarien: Sonnenstürme oder elektromagnetische Impulse könnten die Stromnetze und damit auch das Internet lahmlegen, Hacker Leitungen sabotieren, Regierungen aus präventiven Gründen das Netz abschalten. Die Journalistin hält es sogar für möglich, dass die von Überwachung und Manipulation genervte Zivilgesellschaft »in einer Art modernem Sturm auf die Bastille gegen das World Wide Web rebellieren würde« oder eine Superintelligenz beschließt, das Internet zu beseitigen, weil es dem Menschen nicht guttut.

An Kassandrarufen fehlt es in der Internetdebatte nicht. Schon 1995, als man sich noch mit dem schrillen Ton des Modems ins World Wide Web

Spektrum PLUS⁺

IHRE VORTEILE EINES GEHIRN&GEIST-ABONNEMENTS



Im Oktober können alle Abonentinnen und Abonnenten an unserer kostenfreien **Leserexkursion zur Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II)** am Freitag, den 14. Oktober teilnehmen.

Weitere Termine und Anmeldung:
[Spektrum.de/plus](https://www.spektrum.de/plus)

einwählte, warnte der Internetpionier Robert Metcalfe, das Internet werde sich zu einer »spektakulären Supernova« entwickeln und bald kollabieren. Esther Paniagua will ihr Buch nicht als Dystopie verstanden wissen. Vielmehr sei es als »didaktischer und bewusstseinsbildender« Beitrag gedacht, um solche dystopischen Verhältnisse zu vermeiden. Denn so wie die Welt nicht auf eine globale Pandemie vorbereitet war, sei sie auch für die Abschaltung des Internets nicht gewappnet. Die Frage sei nicht, ob der Absturz kommt, sondern wann.

Angesichts der Verwundbarkeiten der technischen Infrastruktur ist das eine plausible Einschätzung, und der Kritik, dass Regierungen zu wenig in Cybersicherheit investieren, ist zuzustimmen. Doch wer erwartet, dass Paniagua auf den folgenden 350 Seiten die konkreten Folgen eines Internetausfalls ausbuchstabiert oder eine Lösungsstrategie für mehr Resilienz entwickelt, wird enttäuscht.

Dabei wäre genau das das Spannende gewesen: Wie sähe eine Welt ohne Internet aus? Welche Notfallsysteme werden im Ernstfall aktiviert? Wie lassen sich Rechenzentren gegen Sabotageakte schützen? Stattdessen liefert die Autorin ein wildes Potpourri an Themen, von algorithmischer Diskriminierung über Deep Fakes bis hin zum QAnon-Verschwörungskult, deren Zusammenhang mit dem Untersuchungsgegenstand sich nicht erschließt. Was haben Desinformationen mit Webprotokollen zu tun? Es fehlt der rote Faden.

Der gegen Ende des Buchs vorgebrachte Maßnahmenkatalog wie die Forderung einer »demokratischen Allianz für digitale Governance« klingt interessant, bleibt aber holzschnittartig. So wirkt das Ganze wie ein fader Abklatsch der Internetkritik. Zu diesen inhaltlichen Schwächen gesellen sich stilistische Mängel durch schwerfällige Substantivierungen, die wohl der Übersetzung aus dem Spanischen geschuldet sind. Letztlich bleibt das Buch hinter den Erwartungen zurück, die der viel versprechende Titel weckt.

Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg.

TECHNIK VON IKARUS ZUR GOTTESMASCHINE

Neue Technologien rufen sowohl Hoffnungen als auch Ängste hervor. Ein Blick in die Geschichte zeigt, dass das kein Novum ist.

Die Sage des Ikarus erzählt von dem alten Wunsch des Menschen, göttliche Kräfte zu mobilisieren, um sich in die Lüfte zu erheben. Maschinen haben uns seit Jahrhunderten begeistert und fasziniert, sie haben aber auch Ängste ausgelöst. Das gilt bis heute, wie die Diskussionen über die Fortschritte und Probleme der künstlichen Intelligenz belegen. Der schweizerische Psychiater, Psychoanalytiker und Philosoph Daniel Strassberg spannt in seinem faktenreichen Buch »Spektakuläre Maschinen« einen weiten Bogen und beschreibt techni-



sche Neuerungen seit den Theatermaschinen der Antike bis zur Entwicklung leistungsfähiger Computer. Wie der Autor jedoch einleitend anmerkt, handelt »das Buch (...) in erster Linie von Affekten, nicht von Maschinen«.

Zu Beginn des technischen Fortschritts tauchten fast lebensechte Automaten auf, die durch ihre Magie die Menschen beeindruckten und verzauberten. Solche Wunderautomaten, wie der bekannte mechanische Flötenspieler oder die Ente von Jacques de Vaucanson sowie die Wunderkammern des Mittelalters mit einem Sammelsurium an verschiedensten Exponaten, dienten in erster Linie der Verwunderung des Publi-

kums. Die Ansichten über und die Erwartungen an Maschinen haben sich fortwährend verändert. Anfangs waren die Geräte magisch, spektakulär und unterhaltend. Später, ab dem 18. Jahrhundert, rückten ihre Nützlichkeit und ökonomische Gesichtspunkte der Industrialisierung in den Vordergrund.

Parallel zu den Fortschritten der Naturwissenschaften und der Handwerkskunst wie etwa der Uhrmacher wurden der Nutzen und die praktische Anwendung immer wichtiger. Uhren erlaubten eine zeitliche Strukturierung des Alltags. Außerdem entwickelten Maschinen Eigenschaften, welche die menschliche Arbeit erleichterten – aber auch ersetzen konnten, etwa mechanische Webstühle. Bei den Weltausstellungen in London im Jahr 1851 und 1889 in Paris wurden einem breiten Publikum Dampfmaschinen, Lokomotiven, Verbrennungsmotoren oder Phonographen präsentiert, die bald das Arbeits- und Alltagsleben veränderten. Die Entdeckungen der Elektrizität und der Kybernetik waren ausschlaggebend für moderne Entwicklungen von elektronischen Geräten und Computern.

All das wurde auch kritisch beobachtet und rief Ängste hervor. Der Autor schildert die Rolle der Kirche und die Einwände der Gesellschaftswissenschaften, wie die Auffassung Max Webers, der technische Fortschritt trage zur Entfremdung der Menschen von sich selbst bei. Der ökonomische Druck durch die maschinelle Industrialisierung war schließlich ein Kernthema der Schriften von Karl Marx. Auch die Skepsis, auf welche die künstliche Intelligenz stößt, illustriert die grundlegenden Probleme: Menschen fürchten sich nicht erst seit heute vor Maschinen. Bereits Goethes Ballade »Der Zauberlehrling« erzählt davon.

Das angenehm zu lesende Buch verdeutlicht die technischen Entwicklungen und ihre Auswirkungen aus einer historischen Perspektive. Darüber hinaus betont Strassberg, wie die Fortschritte die Gesellschaft berühren. Auf der einen Seite stehen

Erstaunen und Begeisterung, auf der anderen teilweise begründete Ängste. Aber es scheint, als sei die Furcht, von Maschinen beherrscht zu werden, unauflöslich mit der Faszination für die Technik verwoben. Die Leserinnen und Leser finden in diesem umfangreichen Werk viele aufschlussreiche Ideen und Fakten aus den vergangenen Jahrhunderten.

Wolfgang Skrandies ist Professor für Physiologie i. R. an der Justus-Liebig-Universität Gießen sowie an der Dokkyo Medical University in Japan.

GESCHICHTE TERRORISMUS ALS BEGLEITERSCHENUNG

Leben wir heute im Zeitalter des Terrorismus? Dafür stehen Schlagworte wie der 11. September, Islamischer Staat, Rechtsterrorismus. Dass dieser Eindruck täuscht, führt der Historiker Tobias Hof vor.

► Terrorismus ist keineswegs ein neues Phänomen: In der Römischen Republik verehrte man zwei Attentäter, die im Jahr 514 v. Chr. versuchten, den herrschenden Tyrannen zu töten; im Mittelalter und in der islamischen Welt war er präsent; und auch im 19. Jahrhundert war Terror global verbreitet. Bis zur Französischen Revolution hatte das Wort nicht einmal eine negative Bedeutung. Es schien bis dahin ein adäquates Mittel, um die richtige politische Ordnung durchzusetzen.

Aber kann man die Ereignisse überhaupt miteinander vergleichen?



Ja, beschreibt der Historiker Tobias Hof in seinem sehr empfehlenswerten Buch, denn seit den Anfängen sei der terroristische Akt das Mittel der Unterlegenen gegenüber den herrschenden Mächten. Meist beginne es mit dem Attentat auf den Herrscher, erweitere sich dann auf führende Personen und darüber hinaus auf deren Vertreter – bis zur eigenen Bevölkerung. Am Ende leiden auch vollkommen Unbeteiligte darunter.

In Rom stellte die Tyrannei die Gefahr dar, bei den Assassinen im 12. Jahrhundert die christlichen Kreuzzüge, für die Sozialrevolutionäre im 19. Jahrhundert die Machtherrscher, für den Ku-Klux-Klan alles Fremde oder für separatistische Terroristen wie im Baskenland die Unterdrückung der regionalen Tradition. Alle eint ein Verständnis, durch starke Mächte existenziell bedroht zu werden, so dass praktisch jede Gewalttat als legitim gilt.

Damit wolle man auch die jeweils Mächtigen zu Gegenschlägen herausfordern, um Sympathien für die terroristischen Gruppen provozieren. Der Autor beschränkt seine Geschichte keineswegs auf den Terrorismus. Vielmehr erklärt er anhand vieler Beispiele, wie staatliche Mächte mit Staatsterrorismus umgehen, etwa die US-Regierung mit dem 2001 ausgerufenen »Krieg gegen den Terror«.

Wie Hof anführt, ändern sich die jeweiligen Formen von Anschlägen mit dem Stand der technischen Entwicklung: von Dolchen in Antike und Mittelalter über Dynamit als Waffe des kleinen Mannes im 19. Jahrhundert bis zu entführten Flugzeugen und Cyberterrorismus.

Informativ schildert das Buch verschiedene terroristische Bewegungen. Nach der gescheiterten Revolution von 1848 griffen die Aufrührer auf Gewalttaten zurück. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts waren es vor allem Anarchisten, die in Russland unzählige Bombenattentate begingen. Ähnlich operierten ethnisch-nationalistische Terroristen in Irland oder in Südosteuropa, was mit den berühmten Schüssen von Sarajevo in den Ersten Weltkrieg führte. Rassistischer und

rechter Terror herrschte in den USA seit dem Bürgerkrieg, in Deutschland während der Weimarer Republik und in Rumänien. Mit Terror wurden die vielen Kriege zur Befreiung vom Kolonialismus geführt. Später kam der Terror der PLO, in Lateinamerika vor allem der Staatsterror der Militärdiktaturen.

Natürlich geht das Buch auch auf die Entwicklungen des 21. Jahrhunderts ein. Wenn man diese Ereignisse vor dem geschichtlichen Hintergrund betrachtet, relativieren sich die aktuellen Bedrohungen. Unser heutiges Zeitalter zeichnet sich nicht durch Terrorismus aus. Vielmehr scheint es eine Begleiterscheinung von staatlicher Macht.

Hans-Martin Schönherr-Mann lehrt politische Philosophie an der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie Theorie der Bildung an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.



GENETIK KARYOGRAMME FÜR KINDER

»Der Code des Lebens« will neugierige Kinder für die Genetik begeistern. Stattdessen lässt es die Nachwuchsforscherinnen und -forscher überfordert zurück.

► »Mama, warum habe ich braune Augen?« Wenn Kinder erfahren möchten, wieso sie ihren Geschwistern ähnlich sehen und was eigentlich Gene sind, stoßen manche Erwachsene an die Grenzen ihres Wissens. »Der Code des Lebens« will hier Abhilfe schaffen. Das Kindersachbuch enthält

nicht nur ein paar interessante Fakten. Es bietet laut Untertitel gleich »alles, was Kinder über Genetik, DNA und Vererbung wissen wollen«. Manche der Fragen, die das Buch beantwortet, hat sich jedoch wohl kaum ein Zehnjähriger je gestellt.

Die Autorin Carla Häfner, selbst Medizinerin, führt die Leserinnen und Leser in klarer Sprache durch die Genetik: Sie startet in Mendels Garten und erklärt, wie die DNA entdeckt und entschlüsselt wurde. Dann widmet sie sich aktuellen Forschungsthemen: Wie funktioniert die Genschere CRISPR? Was ist ein mRNA-Impfstoff? Wie werden Straftäter anhand ihrer Gene geschnappt?

Mieke Scheiers schöne Illustrationen ergänzen den Text hervorragend. Besonders gelungen ist eine Doppelseite zur genetischen Verwandtschaft von Familienmitgliedern. Nicht nur Eltern, Geschwister, Cousins und Cousinen, sondern auch Halbgeschwister und Adoptivkinder haben dort einen Platz gefunden. Im Buch tauchen Figuren mit verschiedenen Hautfarben und Körperformen auf. Die Autorin schreibt, dass das biologische Geschlecht eines Menschen nicht immer mit seinem sozialem Geschlecht übereinstimmt. Ganz selbstverständlich gelingt es Häfner und Scheier, Personen darzustellen, die bisher zu selten in Büchern vertreten sind.

So inkludierend das Werk optisch und sprachlich ist, inhaltlich ist es auf den Nachwuchs wissenschaftlich gebildeter Menschen zugeschnitten. Dauernd tauchen komplizierte Begriffe und Zusammenhänge auf, mit denen wahrscheinlich viele Erwachsene Schwierigkeiten haben – ganz zu schweigen von Zehn- bis Zwölfjährigen. Im Schnelldurchlauf lernen wir, was Chromosomen und Ribosomen sind, wie man ein Karyogramm auswertet und die Gensonne liest. Damit wären wir für den Biologieunterricht der 10. Klasse gewappnet. Die Informationsdichte ist enorm.

Außergewöhnlich interessierte Kinder, die etwas Vorwissen mitbringen, könnten dennoch Freude an dem Buch haben – nicht zuletzt, weil es so schön gestaltet ist. Aber diejenigen

ohne Vorkenntnisse sind womöglich überfordert und legen es nach wenigen Seiten frustriert zur Seite. Das ist schade, denn so kann das liebevoll aufgemachte Werk nur manche Kinder für die spannenden Zusammenhänge der Genetik begeistern.

Esther Megbel ist studierte Medizinerin und war bis August 2022 Volontärin in der Redaktion von »Spektrum.de«.

UMWELT KEIN AUSREICHENDER SCHUTZ VOR EXTREM- EREIGNISSEN

Die Journalistinnen Susanne Götze und Annika Joeres decken auf, wie wenig vorbereitet Deutschland auf die Folgen des Klimawandels ist.

► Mehr als 100 Menschenleben hat die Flut im Ahrtal im Jahr 2021 gefordert. Tausende haben ihr Hab und Gut verloren. Wie kann es sein, dass die Wassermassen viele Bürger so unvorbereitet trafen? Dass Menschen überdies durch Hitzewellen oder Erdbeben zu Tode kamen – Extremereignisse, die Fachleute auf die Erderwärmung zurückführen?

Diesen Fragen spüren die Journalistinnen Susanne Götze und Annika Joeres in ihrem neuen Buch »Klima außer Kontrolle« nach und kommen zu einem ernüchternden Ergebnis: Seit Jahren versäume es Deutschland, sich angemessen auf den Klimawandel vorzubereiten. Fehlender politischer Wille, bürokratische Hürden und gegensätzliche Interessen stünden der

Anpassung entgegen, so das Fazit der Autorinnen.

Erkennbar werde das unter anderem am Hochwasserschutz: So genannte Überschwemmungsgebiete sollen eigentlich vor Flutkatastrophen schützen und dürfen deshalb nicht bebaut werden. Dennoch ermöglichen Ausnahmen des entsprechenden Gesetzes es den Gemeinden oft, sie in lukratives Bauland umzuwandeln. Für präventive Klimaschutzmaßnahmen gebe es hingegen wenig Geld.

Götze und Joeres analysieren Deutschlands Defizite beim Klimaschutz prägnant und mit großem Fachwissen. Sie belassen es aber nicht dabei, sondern zeigen auch Lösungswege auf. Zunächst klingen manche davon vielleicht überambitioniert – etwa, wenn die Autorinnen in Anlehnung an den Philosophen Byung-Chul Han schreiben, dass wir »unser Denken und Wahrnehmen auf eine ganz neue Stufe heben müssen«.

Allerdings nimmt die Erderwärmung laut dem Weltklimabericht von 2021 inzwischen massiv Tempo auf. Doch Götze und Joeres machen auch Mut, indem sie Vorteile eines umfassenden ökologischen Wandels benennen: So könnten zum Beispiel weniger Autos in Städten dazu führen, dass Parkplätze zu Grünflächen werden, die bei Hitze kühlen und bei Starkregen Wasser auffangen.

Generell sprechen sich die Autorinnen in vielen Bereichen für »naturbasierte Lösungen« zur Anpassung an die Klimakrise aus und warnen vor blindem Vertrauen in technikbasierte Ansätze. Letztere hätten Götze und Joeres an manchen Stellen differenzierter behandeln können – etwa beim Thema Gentechnik in der Landwirtschaft, in der einige Forschende ein Mittel zur Reduzierung von CO₂-Emissionen sehen.

In der Summe ist »Klima außer Kontrolle« aber ein sehr gut recherchiertes Buch, das nicht nur vor der Erderwärmung warnt, sondern auch Lust auf die dringend benötigten Schutzmaßnahmen macht.

Christina Mikalo hat Kultur- und Nachhaltigkeitsnaturwissenschaften in Lüneburg studiert und ist Journalistin.





DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2023

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen zeigen 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.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die besonderen Himmelsereignisse 2023 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.

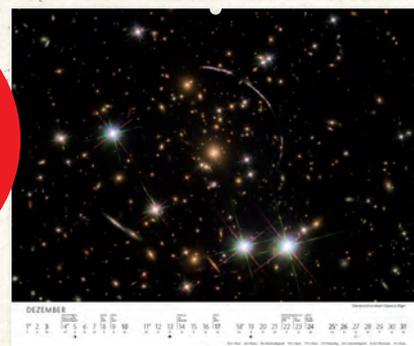
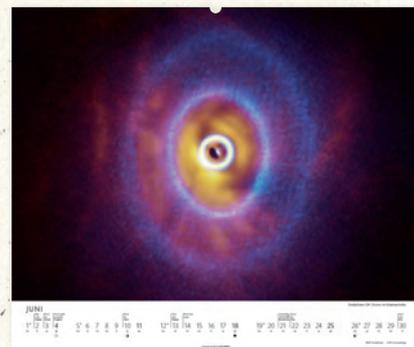
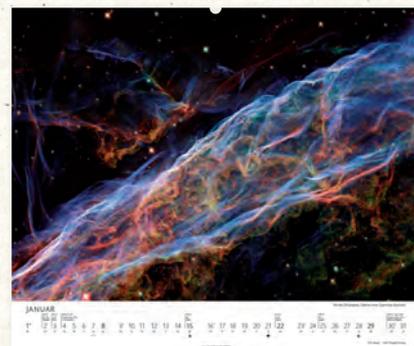
14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;

MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!



HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/aktion/hue
 E-Mail: service@spektrum.de



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)

SALZWASSERFESTES ALUMINIUM

Ein dünner Oxidfilm macht Aluminium beständig gegen äußere Einflüsse. In ihrer Kolumne demonstrierten die Chemiker Matthias Ducci und Marco Oetken, wie Chloridionen die Schicht zerstören. (»Kleine Schicht, große Wirkung«, »Spektrum« August 2022, S. 54)

Bernd Weber, Köln: Bei Verpackungen von Lebensmitteln wird Aluminium verbreitet verwendet. Da die meisten Speisen salzig und sauer sind, habe ich mir folgendes Experiment ausgedacht. Die notwendigen Zutaten sind einfacher zu beschaffen als bei den »Chemischen Unterhaltungen« üblich: Kochsalz, Zitronensäure, Alufolie, ein Glasbehältnis und eventuell ein Filter.

Man stelle eine bei Raumtemperatur konzentrierte Lösung aus Kochsalz und Zitronensäure her und dekantiere oder filtriere vom Bodenkörper ab. Dann bringe man ein Stück Alufolie ein und warte ein Weilchen. Im Versuch hatte es sich unter starker Gasentwicklung aufgelöst. Freunde, denen ich das vorführte, zeigten sich beeindruckt und wollen den Gebrauch von Alufolie einschränken. Aluminium steht in Verdacht, im Zusammenhang mit diversen degenerativen Erkrankungen zu stehen. Außerdem ist es zu kostbar, um es einfach zu verschwenden.

Ulrich Thome, Markkleeberg: Das Phänomen, dass Salz die Oxidschicht von Aluminium angreifen kann, konnte ich an meinem Fahrrad nach winterlichen Fahrten über mit Streusalz behandelte Straßen schon beobachten. Nun gibt es ja auch seewasserfeste Aluminiumlegierungen, aus denen sogar Schiffe gebaut werden (»6000er-Legierungen«, sie enthalten außer Aluminium auch Magnesium und Silizium). Es würde mich sehr interessieren, mit welchen Mechanismen sie vor dem Angriff der Chloridionen im Meer geschützt sind. Und: Ist das von der Salzkonzentration abhängig? Das scheint mir der Fall zu sein. Mein Fahrrad soll aus so einer Legierung bestehen und kriegt trotzdem Korrosionsschäden. Ich vermute, der Schneematsch enthält deutlich höhere Salzkonzentrationen als das Meerwasser.

Antwort der Redaktion:

Magnesium trägt als unedleres Metall zum Schutz des Aluminiums bei. Insbesondere beim leicht erhöhten pH-Wert im Meerwasser ist seine Oxidschicht stabiler. Korrosionsschäden bei solchen Legierungen (mit etwa einem Prozent Magnesium und einem halben Prozent Silizium) entstammen letztlich der mikroskopischen Struktur: Magnesium und Silizium lösen sich zunächst gut in der Schmelze, aber mit dem Erkalten bilden sich an den kleinen Korngrenzen des Metalls Phasen aus Magnesiumsilicid. Das ist prinzipiell erwünscht, weil es die Festigkeit des Werkstücks erhöht, doch gerade im Bereich der

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.

Grenzen kann es an der Oberfläche zur Lochkorrosion kommen und davon ausgehend zur »interkristallinen Korrosion«, die sich weiter durch das Material frisst. Mit dem Chloridgehalt in der Umgebung steigt die Gefahr.

NICHT ALLE IRRATIONALEN ZAHLEN

Florian Freistetter stellte Formeln vor, die überraschende Eigenschaften von reellen Zahlen beschreiben. (»Chintschins kuriose Kettenbruchkonstante«, »Spektrum« September 2022, S. 55)

Kai-Uwe Ekrutt, Herdecke: Die Formulierung im Artikel suggeriert leider, dass die Formel für K_0 für irrationale Zahlen zuträfe. Die bessere Wortwahl wäre gewesen: »für fast alle irrationalen Zahlen«. Denn schon für den »goldenen Schnitt« ($j = 1,618...$) stimmt die Formel nicht, da der Wurzelausdruck eins ergeben würde. Beispielsweise ist das auch für alle j mit ungeradem Exponenten der Fall (j hoch 3, j hoch 5, j hoch 7, ...), da diese durch eine unendliche Reihe von konstanten Kettenbruchzahlen ausgedrückt werden können (nämlich durch jedes zweite Folgeglied der Lucas-Zahlen: 1, 4, 11, 29, 76, 199, ...). Insofern gibt es unendlich viele Vertreter der irrationalen Zahlen, für welche die Formel nicht gelten würde.

ERRATA

»Das Einmaleins im Kreis«, »Spektrum« Juli 2022, S. 74

Wie unserem Leser Robert Standtke auffiel, sind im Infokasten »Epizykloiden« auf S. 76 die beiden Abbildungen vertauscht, und auf S. 79 müsste die letzte Abbildung die Nummer 8 tragen.

»Dunkle Materie für die Westentasche«, »Spektrum« Juli 2022, Rezension, S. 92

Der Schweizer Astrophysiker hieß Fritz (nicht Franz) Zwicky. Zudem war er nicht wie angegeben US-Schweizer, da er das ihm in den USA angebotene Bürgerrecht abgelehnt hat. Wir danken Alfred Stöckli, Präsident der Fritz Zwicky Stiftung, für die Hinweise.

Pantheon des Weltuntergangs

Ein apokalyptisches Stelldichein.

Eine Kurzgeschichte von Christian Endres

Sonnensturm ist ein richtiger Arsch.

Nicht, dass es mich überraschen würde: Lläuft er doch mit seinem lodernnden Körper und seinem strahlenden Grinsen durch die Gegend, als würde ihm das alles hier gehören.

Jeder Saal. Jede Kammer. Jeder Gang. Jede Halle. Jedes Terminal. Jede Säule. Jeder Screen.

Arroganter Sonnenfury!

Aber jetzt hat er sich an Eiszeit rangemacht hat, was ich keinesfalls hinnehmen kann.

Schließlich bin ich der Einzige, dem Eiszeit ihre wunderbar kalte Schulter zeigt; der Einzige, der sie zum Schmelzen bringt; der Einzige, der morgens unter den zarten Eiskristallen erwacht, die über Nacht aus dem Tauwasser unserer Leidenschaft entstanden sind.

Sonnensturm wird das einsehen müssen, sobald ich ihn mir vorgenommen und sein egozentrisches Lodern mit der Durchschlagskraft von Tornados zurechtgestutzt habe.

Auf meiner Suche nach ihm kommt mir seine Zwillingsschwester Supernova in einem der breiten Gänge des Komplexes entgegen. Ihre Erscheinung gleicht mal einem leuchtenden Riss in der Wirklichkeit, mal einer gleißenden Schönheit, deren Anblick man kaum erträgt.

Noch so eine Lichtgestalt, die denkt, über jedem zu stehen.

Wie üblich schwebt sie hochnäsigt an mir vorbei.

Ich blicke ihr finster hinterher.

»Ärger im Paradies?«, fragt da auf einmal Atomkrieg hinter mir, und ich fahre herum.

Seine drohende Haltung und sein scheinbar wütender Gesichtsausdruck lassen vermuten, dass er jeden Moment in die Luft gehen könnte.

»Ich suche Sonnensturm«, sage ich. »Er hat sich an Eiszeit rangemacht.«

Genau genommen hat der hinterhältige Solarpisser mit seinen schmeichlerischen Worten sogar ein paar Zacken ihrer Krone angetaut, was ich Atomkrieg natürlich nicht auf die Nase binde.

Der stößt so oder so einen leisen, warnenden Pfiff aus. »Und jetzt? Willst du ihn dir packen? Das ginge für keinen von euch gut aus, glaub mir. Denn das würde *ihnen* nicht gefallen.«

Wahrscheinlich nicht. Wir alle hier sind grenzenlose Wesen und manifestierte kosmische Konzepte von gewaltiger Macht; doch die Endgültigkeit unserer Interaktion miteinander unterliegt Grenzen, die von höheren Instanzen des Universums gesetzt wurden.

Statt einer Antwort frage ich: »Hast du ihn gesehen?«

Atomkrieg überlegt kurz, als kreise sein Finger über einem roten Knopf. »Nicht in letzter Zeit. Aber was heißt das schon an einem Ort wie diesem?«

Klar: Eine Taschendimension voller Entitäten ist nicht dafür geeignet, verbindliche Aussagen zu wann und wo zu machen.

»Dann suche ich halt weiter«, erkläre ich grimmig. »Irgendwann werde ich ihn schon erwischen.«

»Hm, hm, wenn du meinst. Ich treff mich jetzt mit Zeitparadoxon zu einem Drink. Ich wünsche dir einen Volltreffer«, sagt Atomkrieg zum Abschied salbungsvoll, und ich frage mich, ob er damit meint, dass ich einen Volltreffer landen oder einen kassieren soll.

Ich lasse den nuklearen Bastard stehen und setze meine Suche wie angekündigt fort.

Weder Zombieplage noch Vampirrevolution oder Maschinenaufstand, die in einer schattigen Ecke des Großen Speisesaals miteinander abhängen, haben Sonnensturm gesehen, erklärt Maschinenaufstand für das Trio.

Schade, dass Überbevölkerung durch Abwesenheit glänzt, die mir angesichts unserer Freundschaft sicher beim Suchen helfen würde. Sie ist leider oft weg.

Nach einer Weile trete ich in den Garten, der größer ist als die eine oder andere Welt, deren Untergang hier ihren Anfang genommen hat. Eiszeit und ich haben hier schon viele Spaziergänge gemacht, bei denen sie das Gras unter uns gefrieren ließ, doch ich glaube nicht, dass wir uns je einem Ende des Gartens genähert hätten. Vielleicht hat er gar keins, wie die Gänge drinnen, die überall und nirgendwohin zugleich führen.

Im Moment halten sich der massige Asteroideneinschlag, die elendig krank wirkende Pandemie und die große, dürre Hungersnot im Garten auf und sitzen plaudernd beisammen.

»Willst du dich zu uns gesellen?«, fragt Pandemie, die es schätzt, von möglichst vielen umgeben zu sein und sich rege auszutauschen.

Ich ignoriere ihre Einladung. »Ich bin auf der Suche nach Sonnensturm.«

»Oh je«, dröhnt Asteroideneinschlag. Jedes seiner Worte fühlt sich an, als hinterließe es einen Krater. »Was hat die Leuchte denn jetzt wieder angestellt?«

»Das kannst du dir doch denken«, erwidert die nur aus Haut und Knochen bestehende Hungersnot, die immer kraftlos klingt. Sie sitzt in einem Kranz ausgefallener Haarsträhnen.

Es scheint, als seien Eiszeit und ich nicht die Einzigen, die derzeit Beziehungsprobleme haben

»Eiszeit«, folgert Asteroideneinschlag und haut mit der Faust auf den Boden, was nun tatsächlich einen Krater nach sich zieht.

Ich sage gar nichts und bemühe mich, die Gewitter in Zaum zu halten, die in meinem Inneren ebenso tosen wie an meiner Oberfläche.

Die anderen drei schauen mich mitleidig an.

»So schlimm, ja?«, fragt Pandemie und erleidet einen Hustenanfall, der sie vorerst ablenkt.

»Vorhin war er im Krafraum«, meint Hungersnot, die nicht so aussieht, als würde sie den von ihr erwähnten Ort je aufsuchen. Aber er hilft jedem von uns auf individuelle Weise dabei, in Form zu bleiben und bereit zu sein.

»Danke«, sage ich, verlasse eilig den Garten und rausche einer Sturzflut gleich in Richtung Krafraum.

Unterwegs komme ich an Supervulkan vorbei, der lautstark mit Singularität streitet. Sie ist endlos schön und tiefschwarz, ihre Wut wie ein Loch, das alles verschlingt – er dagegen glüht und raucht vor mühsam unterdrücktem Zorn, der auszubrechen droht.

Es scheint, als seien Eiszeit und ich nicht die Einzigen, die derzeit Beziehungsprobleme haben.

Aus dem Gang, der zum Krafraum führt, eilt leider nicht der ätzende Sonnensturm auf mich zu, sondern Alieninvasion.

Er ist eindeutig aufgeregt: Seine Insektenflügel surren hektisch, seine Mandibeln öffnen und schließen sich ständig.

»Da steckst du!«, ruft er schon aus einiger Entfernung, als seine Facettenaugen mich erspähen. Seine einander überlagernden Stimmen scheinen einer ganzen summen-den Horde zu gehören, nicht bloß einem Individuum. »Hast du es nicht gehört?«

»Gehört?«, frage ich irritiert. »Ich war im Garten. Außerdem suche ich Sonnensturm. Hast du ihn ...?«

Er schneidet mir mit einer ruckartigen Bewegung dreier seiner sechs Gliedmaßen das Wort ab. »Hör zu! Du bist dran. Jetzt. Verstehst du? Du kennst das Protokoll. Du musst sofort los.«

»Aber ...« Ich verstumme. Meine Gedanken überschlagen sich mit der Wucht von Monsterwellen.

Ich soll dran sein?

Die Erkenntnis, die sich auf meinem Gesicht ausbreitet, lässt Alieninvasion amüsiert den Kopf schütteln.

»Ich muss mich von Eiszeit verabschieden!«, sage ich impulsiv. »Und ich muss mit Sonnensturm reden. Gerade jetzt, wenn ich länger nicht hier sein werde. Ich ...«

Alieninvasion legt mir beruhigend eine Gliedmaße an die Seite – und zuckt sofort vor dem Aufruhr zurück, der aus meinem Inneren hervorbricht. Wasser, Feuer, Luft, Erde – alles bäumt sich auf; meine Körpertemperatur erhöht sich beständig.

»Du bist dran«, wiederholt Alieninvasion dennoch sanft. »Alles andere ist jetzt unwichtig. Geh in die Entmanifestationskammer, leg deine gegenwärtige Personifizierung ab und schick deine Essenz auf den Planeten.« Alieninvasion dreht mich mit vier seiner Extremitäten gen Entmanifestationskammer. »Dafür wurden wir geschaffen. Dafür sind wir hier.«

Ich nicke selbstbewusster, als ich mich fühle, und gehe los, meinem vorherbestimmten Schicksal und meiner einzigen wirklichen Aufgabe in diesem Universum entgegen.

Meine letzten zweifelnden Gedanken, die sich natürlich um Eiszeit und Sonnensturm drehen, lösen sich mit der Geschwindigkeit von Sauerstoff in einem kochenden Ozean auf; meine Sorgen schmelzen wie Gletscher und Polkappen; die Klarheit, genau zu wissen, was ich zu tun habe, steigt wie der Meeresspiegel.

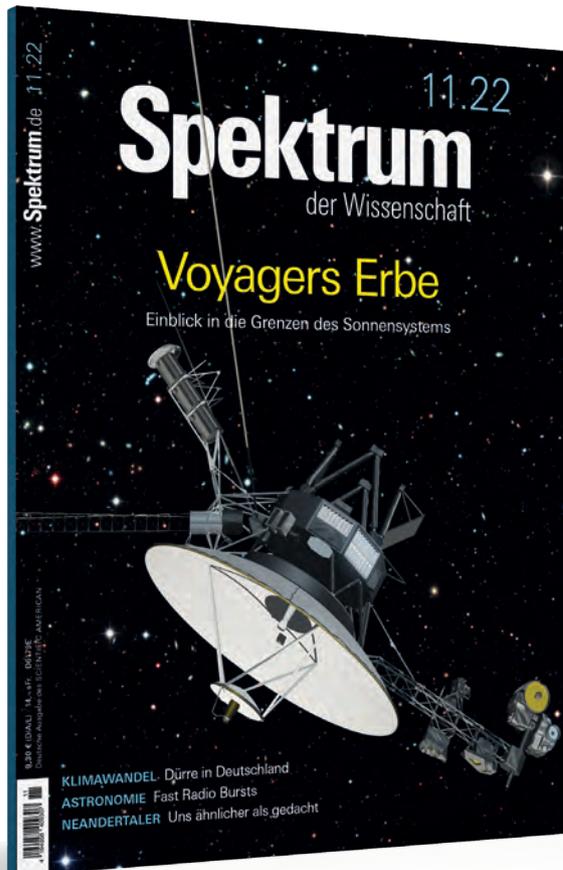
Ich beschleunige meine Schritte.

»Beeil dich, Klimawandel!«, ruft Alieninvasion mir noch hinterher. »Lass dich nicht aufhalten ...« ◀

DER AUTOR

Christian Endres schreibt für den »Tagesspiegel«, »tip-Berlin«, »diezukunft« und Panini Comics. Seine Kurzgeschichten erscheinen unter anderem in »c't – Magazin für Computertechnik« und »phantastisch!«. Für seine Arbeit wurde der Würzburger mit dem Deutschen Phantastik Preis sowie dem Kurd-Laßwitz-Preis ausgezeichnet.

VORSCHAU



www.Spektrum.de 11.22

11.22
Spektrum
der Wissenschaft

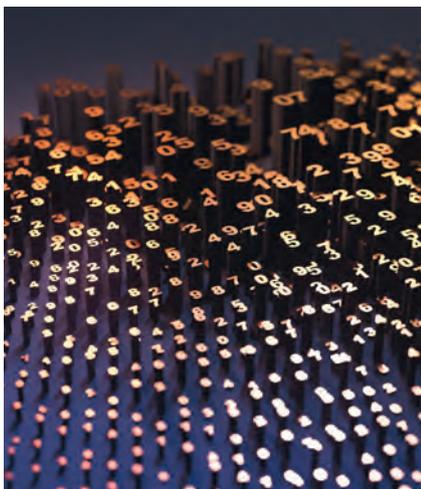
Voyagers Erbe
Einblick in die Grenzen des Sonnensystems

KLIMAWANDEL: Dürre in Deutschland
ASTRONOMIE: Fast Radio Bursts
NEANDERTALER: Uns ähnlicher als gedacht

NASA/JPL/CALTECH; HINTERGRUND: ESO (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/POTV1038M1/CC-BY-ND 4.0)
©HEINRICHHEIMANN; BRUNNEN/LEGACODE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

GRENZGÄNGER DES SONNENSYSTEMS

Die 1977 gestarteten Raumsonden Voyager 1 und 2 befinden sich inzwischen als erste von Menschen geschaffene Objekte im interstellaren Raum. Noch immer senden einige Instrumente wertvolle Daten, doch die Energieversorgung schwindet. Damit steht das Ende der Mission bevor, die alle Erwartungen übertroffen hat.



KERLIS / BETTY IMAGES / ISTOCK

AUF DEN KOPF GESTELLT

Die Mathematik neu aufrollen: Nichts Geringeres haben sich Peter Scholze und Dustin Clausen vorgenommen. Mit ihrem revolutionären Ansatz verdrängen sie ein allgegenwärtiges Konzept durch »verdichtete Mengen« – und begeistern damit die Fachwelt.



NEANDERTHAL MUSEUM, HILGER NEUMANN

ÄHNLICHER ALS GEDACHT

Primitiv und grobschlächtig seien die Neandertaler gewesen. So lautete lange die Lehrmeinung. Inzwischen ist diese These nicht mehr haltbar. Funde aus Kroatien zeigen, dass die Frühmenschen mehr mit *Homo sapiens* gemeinsam hatten als angenommen.



JOHANN JACK / PICTURE ALLIANCE

EIN LAND TROCKNET AUS

Deutschland verliert seit Jahren so viel Wasser wie nur wenige andere Regionen der Welt. Dies ist nicht nur eine Folge klimatischer Einflüsse, sondern auch schlechten Wassermanagements.

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

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **33** 18.08.2022

- > Warum T. rex so kleine Augen hatte
- > Wie aus Abfall eine hochwertige Chemikalie wird
- > Warum es sich lohnt, mal wieder Hallo zu sagen

TITELTHEMA: REKORDSOMMER 2022

Im Jahr der Jahrhundertdürre

Viel Wärme, kaum Regen: Der Sommer 2022 könnte der heißeste, trockenste und sonnigste seit Beginn der Aufzeichnungen werden. Ein anhaltender Wetterwechsel ist nicht in Sicht.

KLIMAAANLAGEN
Drinne kühl, draußen heiß

UMWELTKATASTROPHE IN DER ODER
»Die Dimensionen des Fischsterbens sind gewaltig«

VERHALTENSÖKOLOGIE
Können Spinnen träumen?

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)

