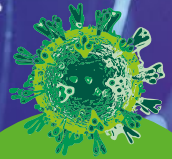


# Spektrum

der Wissenschaft

## Ein neues Teilchen?

Physiker machen eine umstrittene Entdeckung



**Covid-19-  
PANDEMIE**

Ein Porträt  
des Virus

**EVOLUTION** Entstehung der Tiere

**ATOMARE ENDLAGER** Sicher für eine Million Jahre?

**KOSMOLOGIE** Wurmlöcher im Labor

Spektrum  
der Wissenschaft

# KOMPAKT

Dieses Printkompakt und über 250 weitere digitale Ausgaben finden Sie unter [www.spektrum.de/kompakt](http://www.spektrum.de/kompakt)



Spektrum  
der Wissenschaft

04.20  
**KOMPAKT**

# WAS IST REAL?

Am Übergang von  
Wissenschaft und  
Philosophie

5,90 € (D/A/L) | 8,50 € F | 0753  
WWW.SPEKTRUM.DE



**NATURGESETZE** | Universelle Regeln?  
**NEO-GEOZENTRISMUS** | Was steht im Mittelpunkt?  
**KOGNITION** | Was ist Bewusstsein?



**KOGNITION** | Was ist Bewusstsein?  
**NEO-GEOZENTRISMUS** | Was steht im Mittelpunkt?  
**NATURGESETZE** | Universelle Regeln?

Download | € 4,99  
Print | € 5,90



# EDITORIAL REDAKTEURE VOR ORT

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

► Werde ich nach meinem Beruf gefragt und soll dann entsprechend erklären, was ein Redakteur den ganzen Tag so tut, vergleiche ich unseren Arbeitsalltag meist mit dem wenig glamourösen Dasein eines Ghostwriters: Wir arbeiten hinter den Kulissen emsig daran, aus den Originalmanuskripten maximal verständliche und informative Artikel zu gestalten – gleich, ob im Verlagsbüro oder wie seit einigen Monaten in der heimischen Arbeitsecke. Aus beruflichen Gründen gehen wir eher selten auf Reisen, vielleicht einmal für ein Interview mit einem Experten oder für einen Kongressbesuch, um am Puls der neusten Erkenntnisse in der Wissenschaft zu fühlen.

Doch ab und zu eröffnet sich für den einen oder anderen von uns eine Gelegenheit, einmal direkt vor Ort brandaktuelle Forschung zu erleben und darüber ausführlich zu berichten. In dieser Ausgabe finden Sie sogar gleich zwei solcher Reportagen meiner Kollegen, die ich Ihnen sehr ans Herz legen möchte. Für unser Titelthema reiste Physikredakteur Robert Gast nach Ungarn, um mit dem Physiker Attila Krasznahorkay und seinem Team zu sprechen. Sie glauben, ein bislang unbekanntes, wichtiges Elementarteilchen nachgewiesen zu haben, und sammeln seit Jahren Indizien dafür, dass das Partikel namens X17 tatsächlich existiert. Heute sind sie davon überzeugter denn je. Es könnte Bote einer bislang unbekanntes fünften Grundkraft des Universums sein und vielleicht sogar dabei helfen, die rätselhafte Dunkle Materie zu erklären. Aber noch sind die Daten nicht eindeutig und viele Kollegen sehr skeptisch.

Meine Kollegin Verena Tang verschlug es hingegen in die Schweiz, zum Mont Terri bei Saint-Ursanne, etwas südwestlich von Basel. Dort versuchen Experten aus aller Welt in einem unterirdischen Labor herauszufinden, wie das ideale Endlager für strahlenden Atommüll aussehen könnte. Denn die Frage, was mit den gefährlichen Hinterlassenschaften der Kernkraftwerke langfristig am besten geschehen soll, ist noch längst nicht entschieden. Schon gar nicht hier zu Lande, wo nach Jahrzehnten des Streits das Endlagerthema noch einmal ganz neu aufgerollt wurde und nun im Herbst diesen Jahres eine wichtige Weichenstellung für die Auswahl der geeignetsten Standorte erfolgen soll. Letztlich geht es dabei um eine Frage, die eigentlich niemand wirklich beantworten kann: Wie lagert man etwas sicher für eine Million Jahre? Aber wir schulden es unseren Nachfahren, es zumindest so gut es geht zu versuchen.

Nachdenklich grüßt  
Ihr



## NEU AM KIOSK!

Spektrum GESCHICHTE 3.20

Seit der Steinzeit besiedelten Menschen unwirtliche Gegenden und schreckten selbst vor eisigen Gefilden nicht zurück.

## IN DIESER AUSGABE



### RACHEL A. WOOD

Die Paläontologin erforscht die rätselhaften Vorgänge rund um die »kambrische Explosion« der Artenfülle, die mit dem Aufstieg der Tiere einherging (S. 32).



### DIRK BOSBACH

Kann die Technologie der Transmutation helfen, unseren Atommüll ungefährlicher zu machen? Der Nuklearsicherheitsexperte vertritt dazu einen klaren Standpunkt (Interview ab S. 64).



### NICOLE YUNGER HALPERN

Wie Konzepte aus der klassischen Thermodynamik neue Denkweisen für die moderne Quantenmechanik und Informationstheorie eröffnen, erklärt die Harvard-Physikerin ab S. 76.

# INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

## Die älteste Bildgeschichte der Welt

Indonesische Felszeichnungen liefern das früheste Zeugnis erzählender Kunst.

## Verrückte Familien

Eine 50 Jahre alte Vermutung ist bewiesen.

## Vulkanausbruch durch Starkregen

Die Eruption des Kilauea 2018 könnte einen nassen Auslöser gehabt haben.

30 SPRINGERS EINWÜRFE

## Künstliche Niederschläge

Unmengen Plastik erreichen entlegene Landschaften.

74 SCHLICHTING!

## Mücken im Regen

Warum fliegende Insekten den Aufprall schwerer Tropfen überleben.

88 ZEITREISE

89 FREISTETTERS FORMELWELT

## Kann ein Mond einen Mond haben?

Und wie sollen solche Trabanten heißen?

90 REZENSIONEN

93 IMPRESSUM

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 PHYSIK **DIE FÜNFTHE KRAFT**

Ungarische Forscher wollen ein neues Elementarteilchen aufgespürt haben. Aber viele Kollegen sind skeptisch. Die Geschichte einer umstrittenen Entdeckung.

Von Robert Gast

32 EVOLUTION **AUFSTIEG DER TIERE**

**Serie: Die Entfaltung des Lebens (Teil 2)** Die »kambrische Explosion« der Artenfülle vor rund 541 Millionen Jahren kam wohl weniger plötzlich, als Forscher bisher annahmen.

Von Rachel A. Wood

40 VIROLOGIE **PORTRÄT EINES KILLERS**



**Covid-19-PANDEMIE**

Weltweit erforschen Wissenschaftler, wie das neue Coronavirus funktioniert, wo es herkam und wie es sich weiterentwickeln könnte. Ein Überblick über den aktuellen Wissensstand zu Sars-CoV-2.

Von David Cyranoski

50 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **EISERNE NERVEN**

Unter bestimmten Bedingungen zeigt ein Eisenstab erstaunliche Ähnlichkeiten mit einer Nervenfasern.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

54 ATOMMÜLL **SICHER FÜR EINE MILLION JAHRE?**

Auf der Suche nach einem Endlager für radioaktiven Abfall sind viele Fragen offen. Einige Antworten wollen Forscherteams in einem unterirdischen Labor in der Nähe von Basel finden.

Von Verena Tang

64 INTERVIEW **»PLUTONIUM IST NICHT DAS HAUPTPROBLEM«**

Der Nuklearsicherheitsexperte Dirk Bosbach erläutert, warum die Technologie der »Transmutation« ein Atommüll-Endlager nicht ersetzen kann.

66 KOSMOLOGIE **WURMLÖCHER IM LABOR**

Zwei Schwarze Löcher, die durch ein Wurmloch miteinander verbunden sind, könnten eines der größten Rätsel der Kosmologie lösen. Nun wollen Forscher das in einem Experiment testen.

Von Philip Ball

76 PHYSIK **DIE QUANTEN-DAMPFMASCHINE**

Wenn man moderne Erkenntnisse über Quantenobjekte mit den Regeln der klassischen Thermodynamik verbindet, entstehen bemerkenswerte Konzepte für die technischen Herausforderungen des Mikrokosmos.

Von Nicole Yunger Halpern

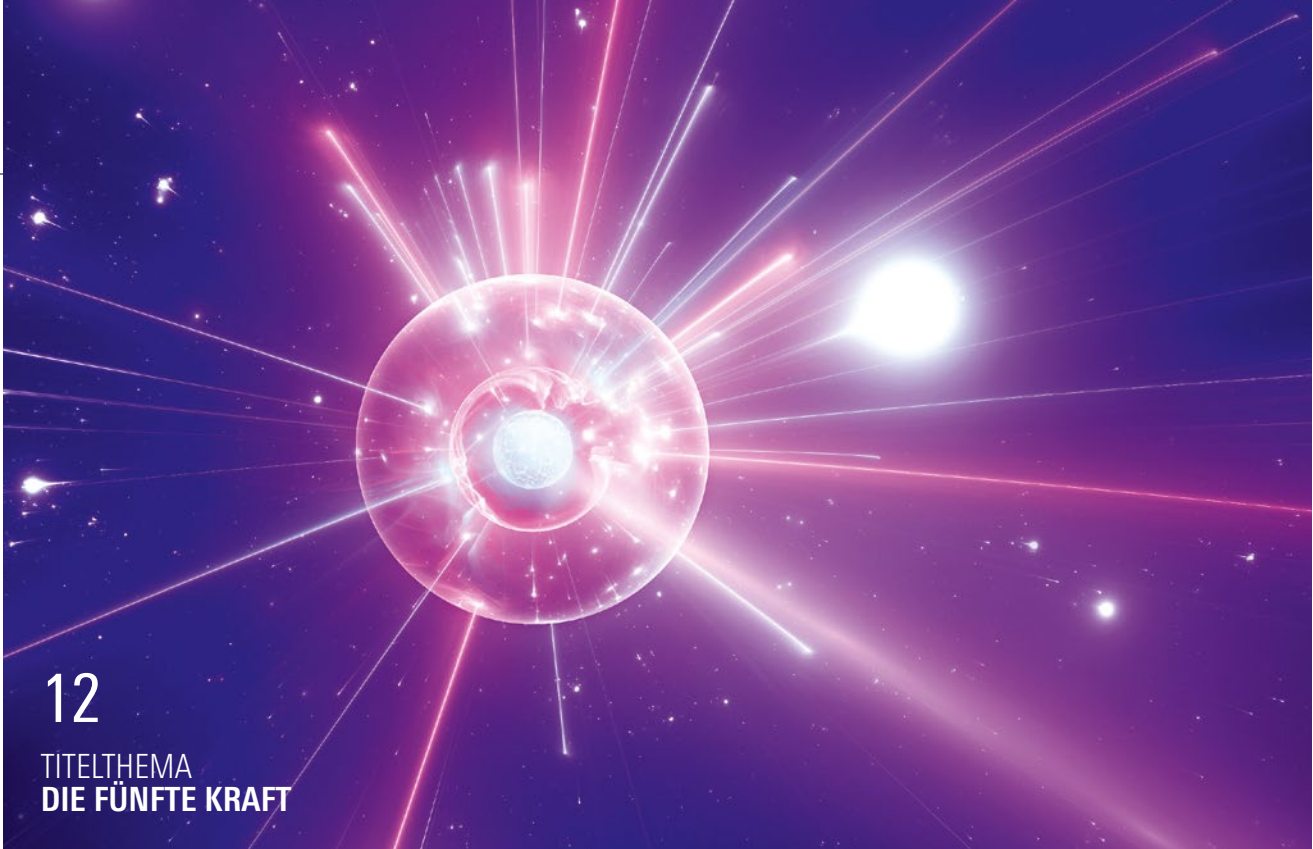
82 LANGLANDS-PROGRAMM

## BRÜCKENSCHLAG IN DER MATHEMATIK

Seit Jahrzehnten vermuten Mathematiker, dass zwei völlig verschiedene Gebiete miteinander verwoben sind. Nun konnten sie in einer ungewöhnlich großen Zusammenarbeit die mysteriöse Verbindung erweitern.

Von Erica Klarreich

TITELBILD:  
SAKKMESTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER  
WISSENSCHAFT; VIRUS: KOTO\_FEJA / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG:  
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA  
DIE FÜNFTE KRAFT

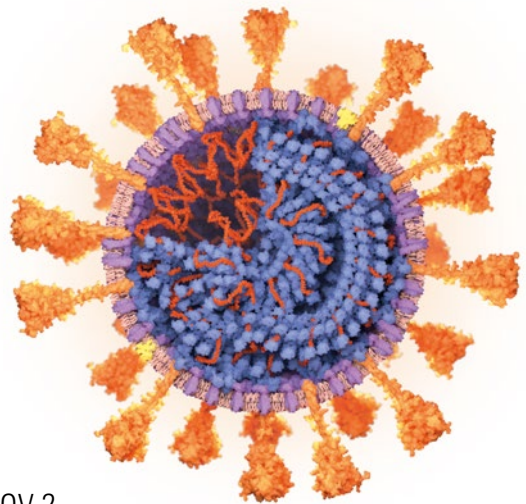
PETER JURIK / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



32

EVOLUTION  
AUFSTIEG DER  
TIERE

RYAN SOMMA / WWW.FLICLR.COM/PHOTOS/ID/102615/223740618917  
CC BY-SA 2.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/ BY-SA/2.0/LEGAL/0001/



40

SARS-COV-2  
PORTRÄT EINES KILLERS

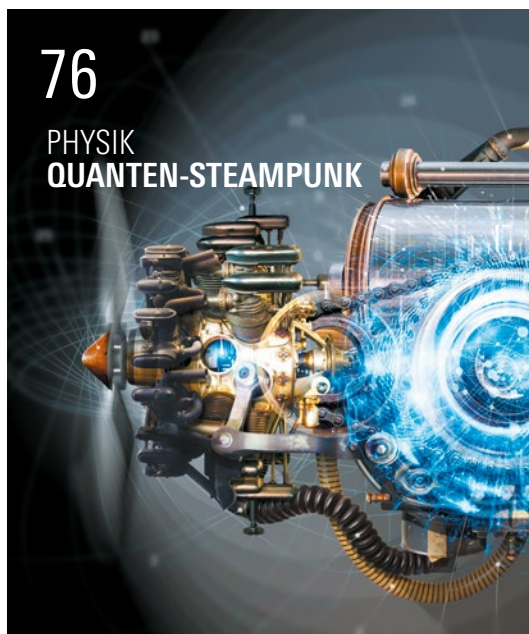
VERONICA FALCONER HAYS & IER CHRISTIANSEN, NACH LORENZO CASALINO,  
ZED GABE, ROMMIE AMARO, U. SAN DIEGO / SCIENTIFIC AMERICAN, JULI  
2020; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



54

ATOMMÜLL  
DIE ENDLAGER-  
FRAGE

VEREKA TANG



76

PHYSIK  
QUANTEN-STEAMPUNK

VITTO RIGONI & SCIENTIFIC AMERICAN | JULI 2020;  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



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

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

# SPEKTROGRAMM

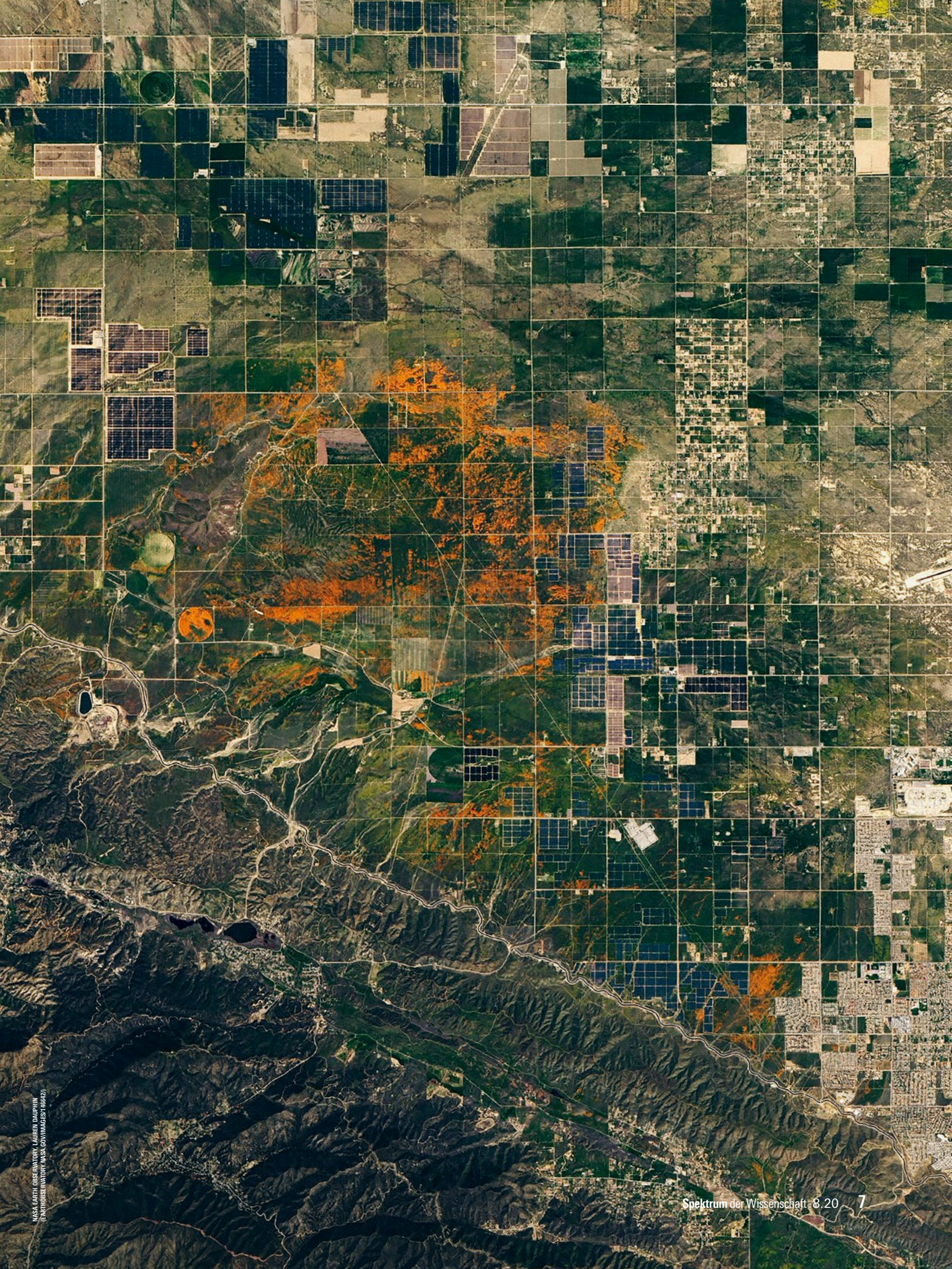


## MOHNBLÜTE IN KALIFORNIEN

▶ An der westlichen Spitze der Mojave-Wüste in Kalifornien tauchten Mohnfelder die Landschaft in diesem Frühjahr in ein leuchtendes Orange. Die Farbenpracht der »Superbloom«, wie die Amerikaner sagen, war dabei so intensiv, dass sie auch vom Weltraum aus sichtbar war: Am 14. April 2020 nahm der NASA-Satellit Landsat-8 das Bild von dem riesigen Blütenmeer im Mohnreservat Antelope Valley auf, ein paar Kilometer westlich der 150000-Einwohner-Stadt Lancaster.

Die Blumen verdanken die Blüte andauernden Regenfällen im März und April 2020. In den Jahren zuvor dagegen herrschte in Kalifornien eine lang anhaltende Dürre. Der kalifornische Mohn (*Eschscholzia californica*) verändert sein Aussehen je nach Wetter. Bei Sonnenschein breiten die Blumen ihre Blütenblätter aus, an kalten und windigen Tagen schließen sie sich.

Pressemitteilung des NASA Earth Observatory, April 2020



## PALÄONTOLOGIE DAS LETZTE MAHL EINES DINOSAURIERS

► Für viele Millionen Jahren bevölkerten riesige Pflanzenfresser die Erde. Was genau die verschiedenen Dinosaurierarten aßen, lässt sich jedoch meist nur auf Umwegen rekonstruieren, etwa über die damals vorherrschenden Gewächse. Zwar haben Wissenschaftler immer wieder auch Fossilien von vermutlichen Ausscheidungen oder Mageninhalten geborgen. Oft sind diese aber schlecht erhalten und lassen daher keine eindeutigen Schlüsse zu.

Weniger Zweifel dürfte es bei dem Mageninhalt eines Dinosauriers geben, der vor 110 Millionen Jahren lebte und den nun ein Team um Caleb M. Brown vom Paläontologischen Museum in Alberta ausgewertet hat. *Borealopelta markmitchelli* hatte einen mächtigen Rückenpanzer und brachte es wohl auf stolze 1300 Kilogramm. Ein besonders gut erhaltenes Fossil der Art ist bereits 2011 in einer Ölsandmine in Kanada aufgetaucht.



Der Dinosaurier *Borealopelta markmitchelli* ernährte sich offenbar bevorzugt von Echten Farnen.

In der Bauchgegend der erstarrten Echse sind die Forscher nun auf mehrere schlauchförmige Bereiche gestoßen. Nach Form, Fundort und Zusammensetzung zu urteilen, handelt es sich klar um einstiges Dinosaurieressen, argumentiert die Gruppe um Brown. Demnach hatte *Borealopelta markmitchelli* eine ausgeprägte Vorliebe für Echte Farne, wie man sie heute vor allem auf ozeanischen Inseln und im tropischen Hochland findet; 85 Prozent des Mageninhalts gehen auf das Gewächs zurück. Daneben stießen die Forscher auf beträchtliche Mengen verkohlter Materie: Wahrscheinlich habe der Dinosaurier in ei-

nem Nadelwald gefressen, der einige Zeit zuvor niedergebrannt war – und in dem in erster Linie die anpassungsfähigen Farne schon wieder Fuß fassen konnten.

Vermutlich nahm die gepanzerte Knotenechse ihr letztes Mahl zu sich, bevor sie tot ins Wasser stürzte. Dort sank sie dann auf den Grund, wobei sie große Mengen Sediment aufwirbelt haben muss. Dieses bedeckte den Dinosaurier und trug zusammen mit seinem Panzer dazu bei, dass der Kadaver so gut erhalten blieb.

*Royal Society Open Science*, 10.1098/rsos.200305, 2020

## PHYSIK NEUTRONENSTERNE AUS QUARKMATERIE

► An wenigen Orten im Universum wird Materie so stark beansprucht wie im Inneren von Neutronensternen. Bei gerade mal 20 Kilometer Durchmesser vereinen die Sternleichen derart viel Masse, dass Elektronen in die Atomkerne gepresst werden, wodurch Unmengen von Neutronen entstehen. Unklar ist, ob diese unter dem enormen Druck intakt bleiben oder sich in ihre Bestandteile auflösen. Insbesondere der innere Bereich von Neutronensternen würde in letzterem Fall aus einem Quark-Gluon-Plasma bestehen, wie es Wissenschaftler auf der Erde bisher nur für Sekundenbruchteile durch Atomkernkollisionen an Teilchenbeschleunigern herstellen konnten.

Ein Team um Alekski Vuorinen von der Universität Helsinki meint nun,

überzeugende Belege für Quarkmaterie im Neutronensterninneren gefunden zu haben. Wenn man alle verfügbaren Beobachtungsdaten und die denkbaren Modelle berücksichtige, müssten zumindest sehr schwere Exemplare einen Kern aus frei schwimmenden Quarks haben, berichten die Forscher.

Die Gruppe stützt sich in ihrer Studie auch auf zwei spezielle Beobachtungen der vergangenen zehn Jahre: 2017 haben Wissenschaftler die Gravitationswellen eines Zusammenstoßes zweier Neutronensterne aufgefangen. Dadurch ließen sich die Größe und Dehnbarkeit der extremen Objekte besser abschätzen. Und bereits 2010 hatten Astrophysiker ein besonders schweres Exemplar aufgespürt, das fast doppelt so viel Masse in sich

vereint wie unsere Sonne. Die finnischen Physiker haben überprüft, welche von 570 000 denkbaren »Zustandsgleichungen« für Neutronensternmaterie diese Rahmenbedingungen erfüllen und was für eine Vorhersage für den Kern sie jeweils treffen.

Demnach könnten sich viele der Objekte zwar ohne Quarkmaterie erklären lassen. Bei den schwersten Vertretern müsse man dazu aber extreme Annahmen treffen; unter anderem würde die Schallgeschwindigkeit in ihnen einen ungewöhnlich großen Wert annehmen. Ein Kern aus frei schwimmenden Quarks und Gluonen sei in diesen Fällen daher die deutlich plausiblere Variante, argumentiert das Team.

*Nature Physics*, 10.1038/s41567-020-0914-9, 2020



## ASTRONOMIE NACHSCHUB AN GRAVITATIONSLINSEN

► Für Astronomen sind sie ein Geschenk: Gravitationslinsen bündeln das Licht extrem weit entfernter Strahlungsquellen, was diese wie unter einer Lupe vergrößert. Meist handelt es sich um Galaxienhaufen, deren Schwerkraft eine gigantische Beule in die Raumzeit drückt. Licht eines genau dahinter liegenden Objekts kann sich dann auf dem Weg zur Erde nicht in einer geraden Linie ausbreiten, sondern macht einen Bogen. Am Nachthimmel erscheint das Objekt dadurch verzerrt oder sogar in mehrfacher Ausfertigung an den Rändern der Gravitationslinse.

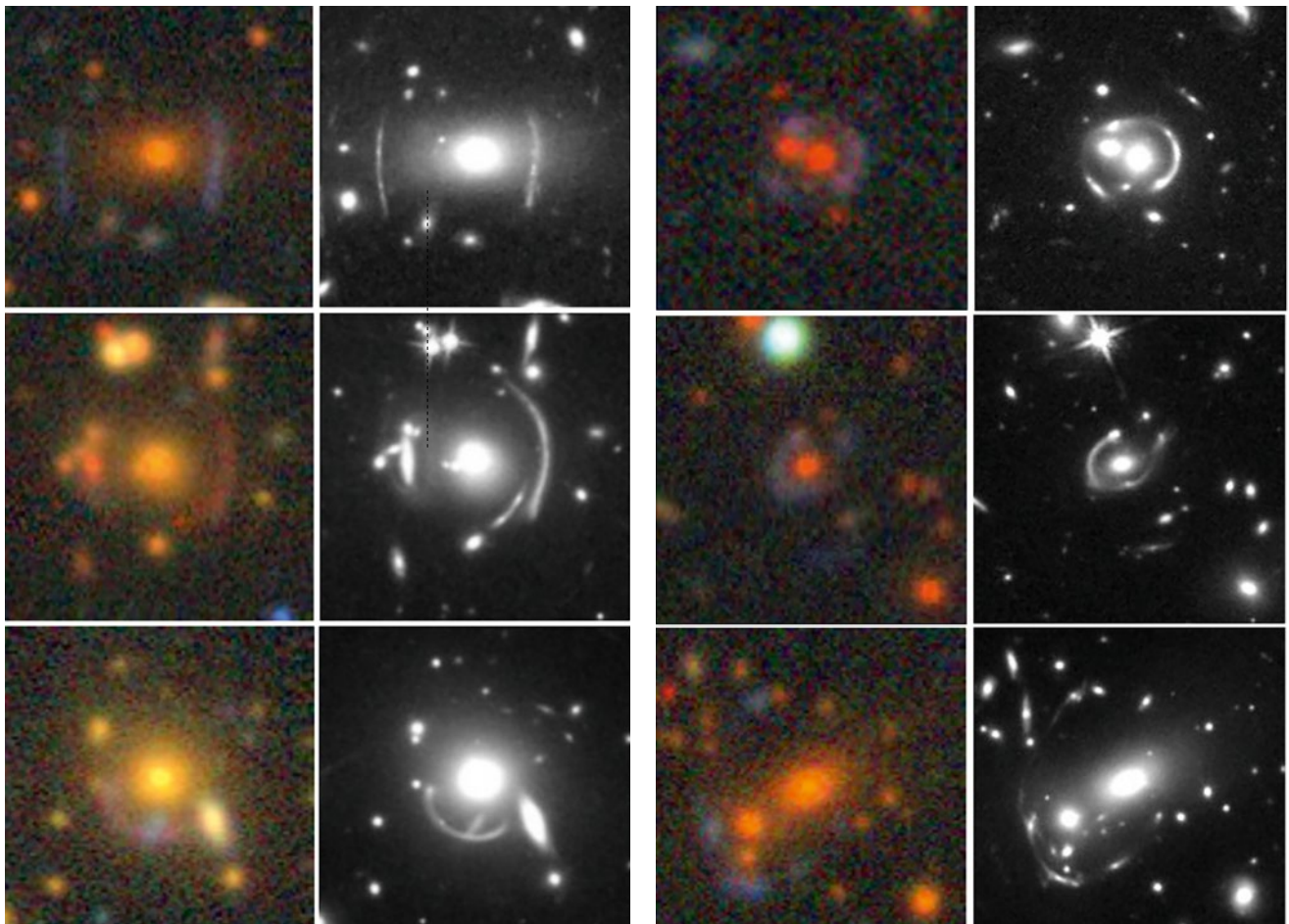
Bisher sind bloß einige hundert starke Gravitationslinsen bekannt. Dank neuronaler Netze könnten es künftig noch deutlich mehr werden, berichtet nun ein Team um Xiaosheng Huang von der University of San Francisco. Die Astrophysiker haben einem Algorithmus beigebracht, die charakteristischen Verzerrungen in einem bestehenden Datensatz aus Galaxienbildern zu suchen. Auf diese Weise haben die Forscher 335 neue Kandidaten für die kosmischen Brenngläser aufgespürt.

Basis hierfür bildeten Beobachtungen der Dark Energy Camera Legacy

Survey, die immer wieder Bilder eines großen Himmelsausschnitts mit unzähligen Galaxien geschossen hat. Ob es sich dabei um Gravitationslinsen handelt, entschied ein Algorithmus, den die Forscher mit 423 bekannten Gravitationslinsen und 9451 Nichtlinsen trainiert hatten. Das eigentliche Rechnen übernahm dann ein Supercomputer am Lawrence Berkeley National Laboratory. Bei einigen viel versprechenden Kandidaten führten die Wissenschaftler anschließend Nachbeobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop durch, das die Gravitationslinsen in größerem Detail ablichten konnte.

**Ein Computer identifizierte in einem großen Datensatz Galaxien, die von einer davor liegenden Masse stark verzerrt werden (farbige Bilder). Das Hubble-Weltraumteleskop lieferte dann genaue Aufnahmen (schwarz-weiß).**

*The Astrophysical Journal,*  
10.3847/1538-4357/ab7ffb, 2020



HUBBLE SPACE TELESCOPE, DARK ENERGY CAMERA LEGACY SURVEY

## ANTHROPOLOGIE

### NEANDERTALERGEN ERLEICHTERT SCHWANGERSCHAFT

► Vor rund 40 000 Jahren gelangte eine Genvariante des Neandertalers ins Erbgut der modernen Menschen, die bis auf den heutigen Tag erhalten ist und immer noch Wirkung zeigt: Offenbar hilft sie, eine Schwangerschaft mit weniger Komplikationen zu durchlaufen. Dadurch sind Familien, in denen das Neandertalergen häufig auftritt, im Schnitt kinderreicher.

Wie Wissenschaftler um Hugo Zebberg vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig berichten, ändert die Genvariante, wie die Zellen den Rezeptor für Progesteron

zusammenbauen. Das Schwangerschaftshormon hilft unter anderem, die Gebärmutter für das Einnisten des befruchteten Eis vorzubereiten. Das hat offenbar zur Folge, dass Trägerinnen dieser V660L-Variante des PGR-Gens seltener Fehlgeburten erleiden und auch weniger über Blutungen zu Beginn der Schwangerschaft klagen.

Da die Genvariante im Schnitt zu mehr Nachwuchs führt, erstaunt es wenig, dass sie vergleichsweise häufig im Erbgut heute lebender Menschen vorkommt: Knapp ein Drittel aller Frauen, die nicht afrikanischer Her-

kunft sind, besitzen es; 3 von 100 Frauen haben sogar zwei Kopien davon.

Andere Neandertalergene tauchen deutlich seltener auf; viele überdies so selten, dass der umgekehrte Prozess am Werk zu sein scheint: Sie wurden im Lauf der letzten Jahrtausende aus dem Erbgut der heute lebenden Menschen allmählich ausgesondert, vermutlich weil sie ihren Trägern Nachteile brachten.

*Molecular Biology and Evolution, 10.1093/molbev/msaa119, 2020*

## ARCHÄOLOGIE

### DSCHINGIS-KHAN-MAUER OHNE DSCHINGIS KHAN

► Die Dynastien des alten China waren große Baumeister: Immer wieder errichteten sie gewaltige Wälle, die meist Ackerland gegenüber der Steppe abschirmen sollten. Ein 737 Kilometer langes Segment im Norden Chinas passt jedoch nicht in dieses Schema: Seine Grundmauern führen mitten durch das öde Grasland im heutigen Dreiländereck zwischen China, Russland und der Mongolei.

In der Vergangenheit gingen Archäologen davon aus, dass das Bauwerk in erster Linie die Reiterhorden Dschingis Khans abhalten sollte, die im frühen 13. Jahrhundert in China einfielen. Dem widerspricht aber die Erbauungszeit, die viele Forscher mittlerweile in der Khitan-Liao-Dynastie verorten (907–1125). Ihre Herrscher ahnten noch nichts von der großen militärischen Bedrohung aus der Steppe. Erst die darauffolgende Jin-Dynastie (1115–1234) sah den Reitersturm aufziehen und errichtete hunderte Kilometer weiter südlich mehrere Schutzwälle, die recht eindeutig der Abwehr der Mongolen galten.

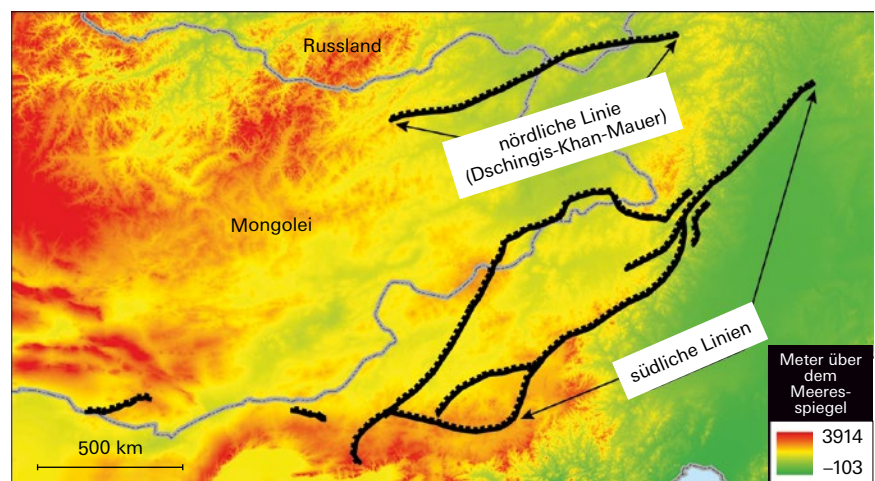
Die mutmaßliche »Dschingis-Khan-Mauer« könnte dagegen weniger einen kriegerischen Zweck gehabt als der Kontrolle von Bevölkerungsströmen gedient haben, argumentiert nun ein internationales Forscherteam um Gideon Shelach-Lavi von der Hebrew University in Jerusalem. Es hat die Mauerfundamente mit Drohnen untersucht und alle zehn Kilometer die Überreste von begleitenden Bauwerken gefunden. Diese befanden sich nicht vorrangig an erhöhten Punkten, wie man es für militärische Lager und

Wachtürme erwarten würde. Stattdessen scheint es sich eher um Grenzposten und Viehställe gehandelt zu haben.

Demnach könnte die Mauer der Bevölkerungskontrolle gedient haben: Durch die Steppe im Norden zogen schon zu Zeiten der Khitan-Liao-Dynastie hungrige Nomadenvölker, von denen man fürchtete, sie könnten nach harten Wintern in den Süden vordringen. Auch berichten Schriftstücke von einem Ausfuhrverbot auf Eisenwaren, das die herrschende Klasse mit der nördlichen Mauer möglicherweise durchsetzen wollten.

**Die Chinesische Mauer bestand aus verschiedenen Segmenten – die wohl unterschiedliche Funktionen hatten.**

*Antiquity, doi.org/10.15184/aqy.2020.51, 2020*



SHELACH-LAVI ET AL.: MEDIEVAL LONG-WALL CONSTRUCTION ON THE MONGOLIAN STEPPE  
DOI: 10.1093/aqy/2020.51.2020  
FIG. 1. (A) CHITAN 1990. (B) BEARBEITUNGS-SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## MEDIZIN MINILEBER AUS DEM LABOR

► Aus menschlichen Hautzellen haben Forscher der University of Pittsburgh eine funktionsfähige Minileber hergestellt. In dem Proof-of-Concept-Experiment waren die im Labor hergestellten Organe dann in Ratten in der Lage, Gallensäure und Harnstoff auszuscheiden, genau wie eine normale Leber.

Die Wissenschaftler erzeugten die Miniaturleber, indem sie menschliche Hautzellen zunächst zu so genannten induzierten pluripotenten Stammzellen umprogrammierten – eine mittlerweile gut etablierte biotechnische Methode. Diese Stammzellen ließen sich dann in Leberzellen umwandeln, welche die Forscher in eine Rattenleber verpflanzten, worauf sie alle tierischen Zellen nach und nach entfernten. Was in natürlicher Umgebung bis zu zwei Jahre dauert, benötigte im Bioreaktor weniger als einen Monat. Als letzten Schritt transplantierte das Team die im

**Forscher haben aus einer Rattenleber rattenspezifische Zellen entfernt und sie durch menschliche Leberzellen ersetzt.**

Labor gezüchteten Minilebern in fünf Ratten.

Trotz einiger Probleme bei der Blutzirkulation funktionierten die implantierten Organe noch vier Tage nach dem Eingriff. Langfristiges Ziel sei es, Organspenden zu ersetzen, so die Wis-

senschaftler. Bis dahin seien jedoch erhebliche Herausforderungen zu bewältigen, darunter das langfristige Überleben sowie Sicherheitsfragen.

*Cell Reports 10.1016/j.celrep.2020.107711, 2020*

UNIVERSITY OF PITTSBURGH MEDICAL CENTER (UPMC)



## GEOLOGIE ERSTARRTER SCHLAMM AUF DEM MARS

► Einst floss Wasser auf dem Mars. Davon zeugen unter anderem tiefe Flusstäler, die sich wie Furchen durch die Oberfläche des Roten Planeten ziehen. An vielen Stellen ist noch immer unklar, wie die Marsoberfläche ihre Gestalt bekam. Manche Strukturen ähneln beispielsweise erkalteter Lava, was Rückschlüsse auf die erloschenen Vulkane auf dem Mars erlauben würde.

Ein internationales Forscherteam um Petr Brož von der Tschechischen Akademie der Wissenschaften warnt nun jedoch vor großer Verwechslungsgefahr: Offenbar hinterlässt Schlamm auf dem Mars Spuren, wie

man sie von Lavaströmen auf der Erde kennt. Entsprechend könnten manche geologische Formation, die Forscher bislang für erstarrte Lava gehalten haben, in Wahrheit von Matsch stammen, der aus Marsgeysiren ausgetreten ist.

Dafür sprechen jedenfalls irdische Laborexperimente des Teams: Die Forscher haben wiederholt gefilmt, wie ein halber Liter Schlamm eine schräge Rampe hinunterrutscht. Bei gewöhnlichem Atmosphärendruck floss die Brühe rasch hinab. Senkte man Druck und Temperatur in der Versuchskammer allerdings auf jene niedrigen Werte, die auf dem Mars

üblich sind, verdampfte das meiste Wasser.

Übrig blieb eine zähflüssige, von einer dünnen Eiskruste bedeckte Masse, die langsam die Rampe hinabglitt – so ähnlich, wie es Lavamassen auf der Erde am Hang eines Vulkans tun. Zwar konnten die Wissenschaftler den Effekt der geringeren Schwerkraft auf dem Mars nicht berücksichtigen. Diese führt dem Team zufolge aber lediglich dazu, dass die Eiskruste über dem Schlamm etwas dicker ausfalle.

*Nature Geoscience, 10.5281/zenodo.3457148, 2020*

# PHYSIK DIE FÜNFTE KRAFT

**Ungarische Forscher wollen ein neues Elementarteilchen aufgespürt haben. Die Geschichte einer umstrittenen Entdeckung.**



**Robert Gast** ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» [spektrum.de/artikel/1744778](https://www.spektrum.de/artikel/1744778)

▶ Es ist unvorstellbar klein: ein Punkt im Mikrokosmos, wie alle Elementarteilchen. Doch das Gespenst, das sie X17 nennen, muss auch höchst wählerisch sein, extrem scheu und überraschend mächtig: Wenn es auftaucht, lässt es die Welt der Atomkerne erzittern, als Bote einer fünften, bislang unbekanntes Kraft.


Aber gibt es sie und X17 wirklich? Einer, der das herausfinden will, sitzt in der ungarischen Stadt Debrecen, in einem der führenden Physik Institute des Landes, und seufzt. Attila Krasznahorkay ist ein zurückhaltender Mann, schüchtern, bescheiden und höflich, 66 Jahre alt, vom Typ her eher Bibliothekar als Geisterjäger. »Wir müssen sehr vorsichtig sein«, sagt er leise.

Für den ungarischen Physiker begann die Suche bereits vor 20 Jahren, mit dem Anruf seines niederländischen Kollegen Fokke de Boer, der begeistert von dem neuen Teilchen erzählte. Erst war Krasznahorkay skeptisch, ließ sich Unterlagen zuschicken, wägte ab. Dann sagte er zu. »Ich dachte damals, die Sache hat sich nach einer Woche erledigt.«

Heute ist der Ungar noch immer dabei, und mittlerweile so etwas wie der Anführer der Jagd. In seinem Büro am Atomki-Forschungsinstitut hat er mehrere akkurat getackerte Fachaufsätze ausgebreitet, durch die Jalousien fällt die Nachmittagssonne. Mit dem Finger zeigt er auf eine kleine Beule in einer Messkurve, keine drei Zentimeter hoch. Die Fährte von X17, glauben Krasznahorkay und sein Team. »Es ist eine winzige Abweichung.«

In der Physik werden nur selten neue Elementarteilchen entdeckt. Passiert es doch einmal, ist es eine Sache für die Geschichtsbücher. So wie 2012, als Forscher am Genfer Forschungszentrum CERN das legendäre Higgs-Teilchen aufspürten. Nötig dafür waren eine 27 Kilometer lange Atomkern-Kanone (der berühmte Large Hadron Collider) und zwei kolossale Hightech-Detektoren, jeder unzählige Tonnen schwer. Planung, Aufbau und Datenauswertung beschäftigten tausende Wissenschaftler für Jahrzehnte.

In Debrecen ist alles ein paar Nummern kleiner. Attila Krasznahorkays Team besteht aus einem Dutzend Leute, darunter sein Sohn, der ebenfalls Physiker ist. Hin und wieder dürfen auch talentierte Gymnasialschüler helfen. Der Teilchenbeschleuniger für die X17-Suche passt dabei bequem in ein Gebäude von der Größe einer Schulturnhalle. Und der entscheidende Detektor erinnert auf den ersten Blick an ein Glücksrad, an das jemand zu viele Kabel angeschlossen hat.



Wenn Atomkerne überschüssige Energie loswerden wollen, geben sie diese in Form von Strahlung oder Partikeln ab. Hin und wieder könnte dabei auch ein bisher unbekanntes Elementarteilchen auftauchen, vermuten manche Physiker.

## AUF EINEN BLICK DIE JAGD NACH X17

- 1** Seit 35 Jahren suchen Physiker nach einer hypothetischen, schwer aufspürbaren Teilchenart, die eine bisher unbekannte Kraft übertragen würde. Sie könnte dabei helfen, die Dunkle Materie zu erklären.
- 2** Eine ungarische Forschergruppe ist auf die bislang stärksten Indizien für solch ein leichtes, neutrales Boson gestoßen – mit einer Strategie, die Physiker vor 25 Jahren in Deutschland entwickelt haben.
- 3** Doch viele Experten haben große Zweifel an dem Ergebnis, auch wegen der sonderbaren Vorgeschichte des Projekts.

Seit die ungarische Gruppe im Januar 2016 die Messdaten mit der Beule veröffentlicht hat, rätseln Experten in aller Welt: Ist Außenseitern hier ein historischer Durchbruch gelungen? Oder ist das Experiment der Ungarn fehlerhaft, X17 ein Hirngespinnst?

Wer Antworten auf diese Fragen sucht, stößt auf eine Geschichte, die Jahrzehnte in die Vergangenheit zurückreicht. Sie handelt von Elektronen und ihren vertrackten Anteilchen, den Positronen, von Darmstädter und Frankfurter Physikern, von Attila Krasznahorkay und seinem niederländischen Kollegen Fokke de Boer. Vor allem aber handelt sie vom Sog einer großen Entdeckung – und der Grenze zwischen Wunschdenken und wissenschaftlicher Realität sowie der Frage, wann man sie überschritten hat.

Die Geschichte beginnt dort, wo die menschliche Vorstellungskraft an ihre Grenzen stößt: im Reich der Atomkerne und bei den Kräften, die dort wirken. Es ist eine abstrakte Welt, auf den ersten Blick nur für Experten zugänglich, doch im Grunde ausschlaggebend dafür, wie wir Menschen aufs Universum blicken.

In dieser Welt sehen Physiker zwei große Elementarteilchen-Sippen am Werk. Zum einen sind da die Bausteine, aus denen die Materie um uns herum besteht. Zu ihr zählen die Quarks, die im Innersten von Atomkernen durcheinanderwabern, und – viel weiter draußen – die Elektronen.

**Der Versuchsaufbau zur X17-Suche passt bequem in ein mannshohes Regal. Unter anderem messen die Forscher Gammastrahlung aus Kernzerfällen, wozu sie sich ein neues Messgerät haben bauen lassen (hier rechts im Vordergrund).**

Gäbe es nur Quarks und Elektronen, wäre das Universum statisch. Eine Welt aus Myriaden winziger Legosteine, in der sich nichts bewegt. Denn wie soll ein Elektron merken, dass ein anderes Teilchen in der Nähe ist?

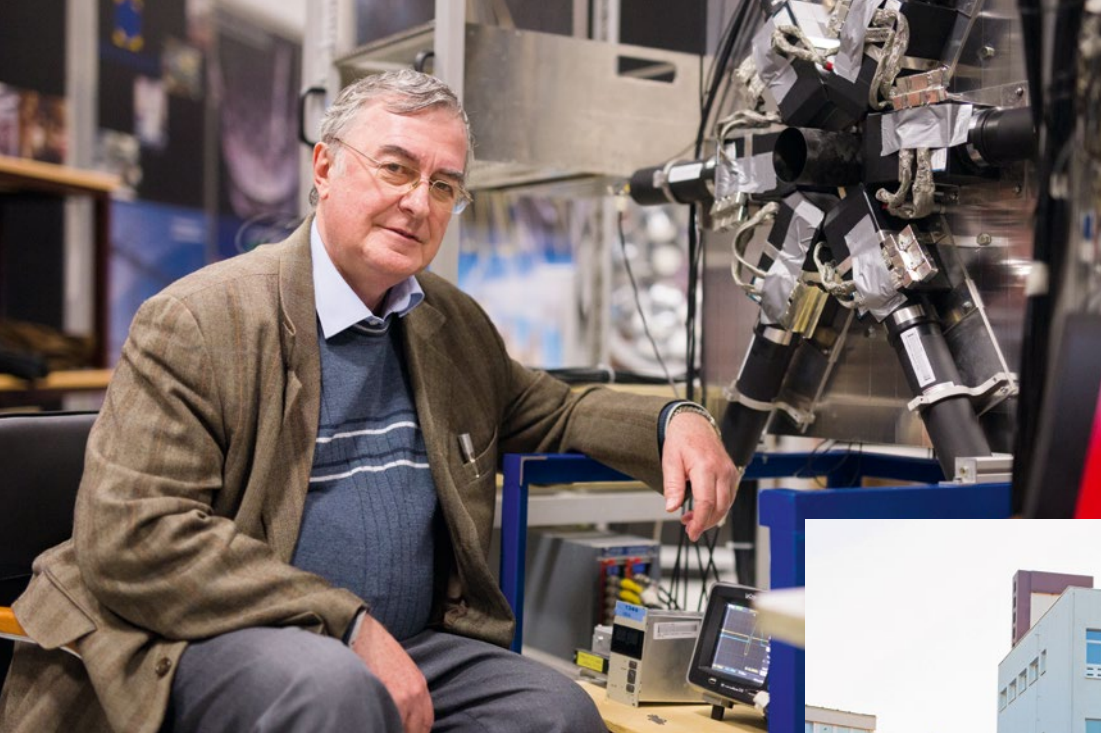
Hier tritt die andere Sippe aufs Parkett, die Botenteilchen oder »Bosonen«. Im Weltbild der Teilchenphysik übermitteln sie die Kräfte zwischen den Partikeln. Begegnen sich zwei Elektronen, tauschen sie blitzschnell ein Boson aus. Vier Grundkräfte kennen Forscher bislang, die jeweils von einem oder mehreren Botenteilchen vermittelt werden: Photonen übertragen den Elektromagnetismus, Gravitonen (wahrscheinlich) die Schwerkraft. Gluonen wiederum sind Paten der »starken« Kernkraft zwischen Quarks, sie hält Atomkerne zusammen. W- und Z-Bosonen schließlich verändern die Identität von Atomkernen – die »schwache« Kernkraft.

### **Ein Botenteilchen für die Dunkle Materie**

Mit diesem Baukasten aus Teilchen und Kräften können Physiker fast alle Phänomene auf der Erde erklären. Sie können damit berechnen, weshalb die Sonne scheint und warum Atomkerne zerfallen. Doch der Plan für den Mikrokosmos ist vermutlich nicht vollständig: Wenn Astronomen weit ins Weltall hinausblicken, in die Zwischenräume von Galaxien, sehen sie Spuren einer Welt, die aus anderen Teilchen zu bestehen scheint und in der womöglich andere Kräfte wirken. Die Forscher sprechen von Dunkler Materie – und wissen bisher nicht einmal ansatzweise, was sich dahinter verbirgt (siehe Spektrum März 2019, S. 12).

X17 könnte ein erster Vorgeschmack auf dieses unsichtbare Reich sein, glauben manche Wissenschaftler. Auf der Erde würde das neue Botenteilchen nur im Verborgenen agieren: im unmittelbaren Umfeld von Atomkernen und auf





Seit 20 Jahren sucht Attila Krasznahorkay mit einem speziellen Detektor nach einem neuen Teilchen. Das Atomki-Forschungsinstitut (unten) in Debrecen, Ungarn, wurde bereits 1954 gegründet. Etwa 100 Forscher arbeiten hier an Fragen aus Atomphysik und Materialwissenschaft.

eine Weise, die man noch nicht versteht. Aber in den Weiten des Kosmos könnte das Phantom eine größere Rolle spielen. Womöglich flitzt es dort ständig zwischen Teilchen der Dunklen Materie hin und her – wenn es denn wirklich existiert.

Es gehört wohl zu den Besonderheiten der Physik, dass sie die spektakulärsten Fragen an den unscheinbarsten Orten erforscht. Wer am Pförtnerhäuschen des Atomki-Instituts in Debrecen vorbeigeht, wähnt sich zunächst auf dem Gelände einer Firma für Heizungsrohre oder Lackierpistolen. Ein paar weiß gestrichene Quader liegen in der Landschaft, verteilt um einen Parkplatz und flankiert von ein paar kräftigen Fichten.

Attila Krasznahorkay kommt zur Begrüßung nach draußen. Er ist ein großer Mann mit schwerem Gang, in Kordjacket und blauem Wollpulli, rot im Gesicht vom Herbeieilen. Zielstrebig führt er auf eines der Gebäude zu. Es geht durch eine staubige Werkstatt, in der es nach verschmortem Gummi riecht – in die Halle, in der sie nach X17 suchen.

Dort glänzen Röhren, Flansche und Vakuumpumpen im Kunstlicht von Halogenlampen. 2015 hat das Atomki-Institut hier einen neuen Teilchenbeschleuniger in Betrieb genommen, möglich machten es Gelder der EU, der ungarischen Akademie der Wissenschaften und des örtlichen Atomkraftwerks. Krasznahorkay läuft die rund 20 Meter lange Vakuumröhre der Maschine ab, vorbei an Magneten, die die beschleunigten Atomkerne auf der Bahn halten, in die ferne Ecke der Halle. Dort steht das Messgerät der X17-Jäger: sechs armlange Speichen aus schwarzem Plastik, zigfach verkabelt und bedeckt von grauem Klebeband. »Weil es so viel Kritik an unserer Messung gab, haben wir kürzlich alle Teile durch neue ersetzt«, erzählt Krasznahorkay.

Das Nachbargebäude konserviert dagegen die Vergangenheit. Der Weg in Krasznahorkays Büro, 2. Stock, Zimmer 201, führt durch einen schaukeligen Aufzug und über orange-vergilbtes Linoleum. An einer der Flurwände hängt eine Pinnwand mit alten Fotos. Mal ist ein Besuch des einstigen Präsidenten der Darmstädter Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) zu sehen, mal Szenen von



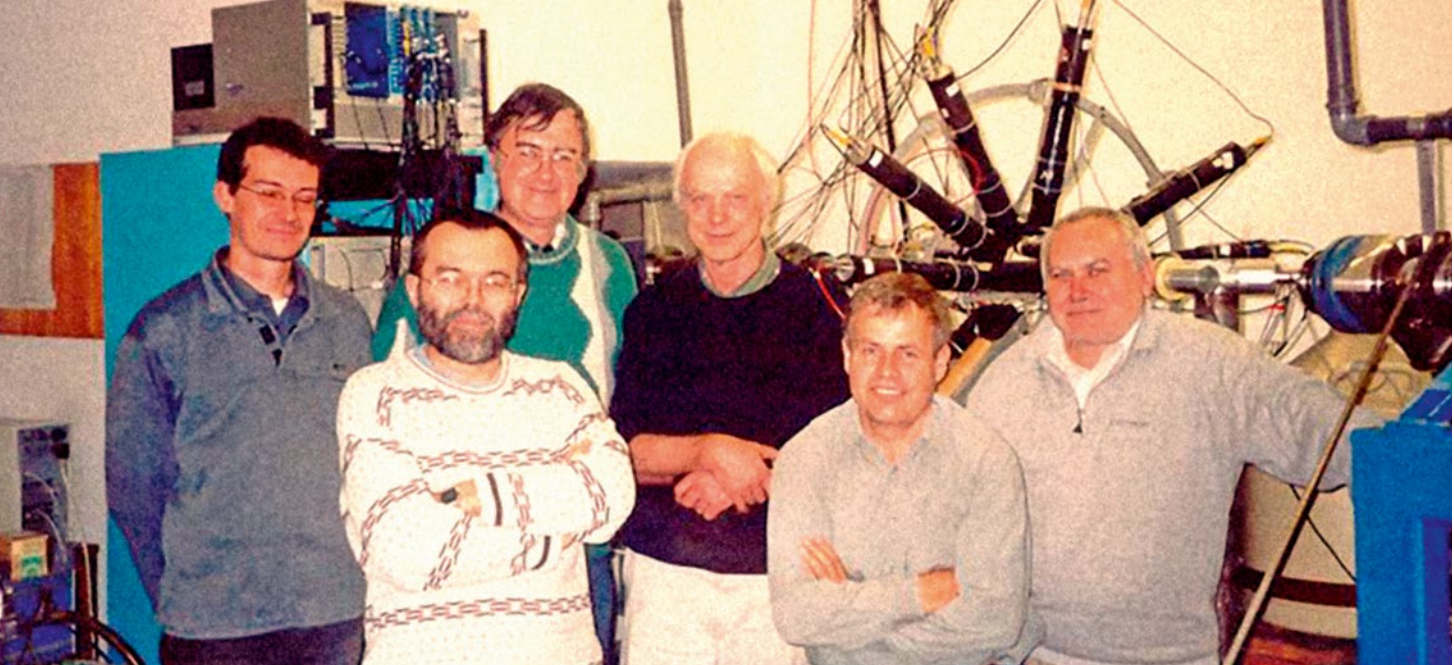
einer lange zurückliegenden Fachkonferenz: Physiker, die sich über eine weiße Tischdecke zuprosten oder sich auf einer Pferderanch im Sattel halten.

Und dann ist da der Mann mit Halbglatze, weißblondem Haar und weißer Hose, der freundlich in die Kamera blickt. Auf mehreren Fotos steht er in der Mitte der Gruppe. Krasznahorkay bleibt neben einem dieser Bilder stehen und deutet auf einen daneben angepinnten Nachruf. »Fokke de Boer ist 2010 gestorben. Wir machen in Erinnerung an ihn weiter.«

Der Niederländer, der Krasznahorkay im Jahr 2000 zur Suche nach dem Phantomteilchen überredete, ist so etwas wie die Schlüsselfigur des Projekts. Denn wegen de Boer schwebt über den Messungen in Debrecen nicht nur die Frage, ob die Ungarn ihr Equipment im Griff haben. Es geht auch darum, ob sich Krasznahorkay und sein Team von der eigenwilligen Arbeitsweise ihres Amsterdamer Kollegen emanzipiert haben.

Fokke de Boer zählte zu den Ersten, die sich für ein neues Teilchen in der Art von X17 interessierten. Wie kein Zweiter warb er für die nötigen Laborversuche, trieb Kollegen an und verteidigte Messdaten, über Jahrzehnte hinweg. Doch mit der Zeit steigerte er sich so sehr in die Suche hinein, dass er überall neue Elementarteilchen sah – und ihm irgendwann niemand mehr glaubte, nicht einmal Attila Krasznahorkay.

Für de Boer begann der Traum von einem neuen Teilchen bereits Mitte der 1980er Jahre, mit Messdaten aus Darm-



ATTILA KRASZNAHORKAY

stadt. An einem 120 Meter langen Teilchenbeschleuniger feuerten Forscher damals Atomkerne aufeinander. Bei den Minikarambolagen verwandelte sich Bewegungsenergie in Masse, getreu Einsteins berühmter Formel  $E = mc^2$ . Konkret bedeutete das: Die Atomkerne zerplatzten und ließen einen ganzen Schwall anderer Partikel entstehen. Unter anderem mit zwei Detektoren namens EPOS und ORANGE sichteten die Darmstädter diese Trümmer. Dabei stießen sie auf eine rätselhafte Anomalie: In den Atomkernkollisionen tauchten bei manchen Energien des Beschleunigers überraschend viele Positronen auf.

Im Mikrokosmos sind die positiv geladenen Antiteilchen der Elektronen eigentlich nichts Ungewöhnliches. Wenn die Natur überschüssige Energie loswerden will, ruft sie manchmal ein Elektron-Positron-Paar ins Leben. Doch auch ein bisher unbekanntes Elementarteilchen, das nach kurzer Flugstrecke in ein Elektron und ein Positron zerfällt, könne die Messdaten erklären, meinten manche Physiker.

Ob solch ein neues Teilchen tatsächlich hinter der Darmstädter Anomalie steckte, blieb fürs Erste unklar. Aber über Jahre hinweg waren die »EPOS peaks« ein Thema, das Experten weltweit beschäftigte. Mancher Forscher wähte sich ihretwegen auf dem Weg zum Nobelpreis. Nur wenige ahnten, dass die Sache zu einer großen Enttäuschung werden würde. Zu einer Art Prolog bei der langwierigen Suche nach einem neuen Boson – ein Prolog, aus dem man bereits viel lernen konnte.

### Viele Anomalien, keine Erklärung

Fokke de Boer, damals Mitte 40, war zu dieser Zeit auf der Suche nach einem Achtungserfolg. Einst in seiner Heimat Amsterdam als großes Talent gehandelt, zog er Ende der 1980er Jahre schon seit mehr als zehn Jahren von Institut zu Institut, von Zeitvertrag zu Zeitvertrag. In der Positronen-Anomalie sah er eine Chance, sich einen Namen zu machen. Fasziniert malte er sich aus, was für ein Teilchen sich dahinter verbergen könnte. Selbstbewusst trug er seine Gedanken auf Konferenzen vor.

»Fokke hatte immer viele Ideen«, erinnert sich sein Kollege Johan van Klinken, wenn man ihn heute in den Niederlanden anruft. 35 Jahre lang hat van Klinken mit

**Der Niederländer Fokke de Boer (Dritter von rechts) brachte Attila Krasznahorkay und dessen Team auf die Idee, mit einem in Deutschland gebauten Spektrometer (im Hintergrund) nach einem X-Boson zu suchen. Bis zum Jahr 2006 war er an den Messungen in Ungarn beteiligt.**

de Boer zusammengearbeitet, ihn auf allen Etappen seines Wegs begleitet, ihm bis zum Ende unterstützt. Seinen Freund habe ein besonderer Sinn für Ästhetik angetrieben, sagt van Klinken. Wo andere bloß ein Schema denkbarer Zerfälle eines Atomkerns sahen, ein Wirrwarr aus Linien, Zahlen und Pfeilen, erblickte de Boer die Schönheit der Schöpfung. »In dieser Hinsicht war er wie ein Künstler.«

Angetan hatten es de Boer nicht nur die Darmstädter Daten, sondern auch Ergebnisse aus Kairo, von denen er um das Jahr 1986 erfuhr. Auch dort wichen Positronen aus Atomkernkarambolagen von den Erwartungen ab. Und de Boer hatte eine Idee, wie man diese Spur weiter verfolgen konnte. Sie hatte mit dem Innersten eines jeden Atoms zu tun, dem Kern. Er kann verschiedene Energieniveaus einnehmen, ähnlich der Hülle, in der Elektronen unterschiedliche Bahnen offenstehen. Der Kern hingegen geht anders mit überschüssiger Energie um: Er schwingt wild hin und her, mit einer von mehreren klar voneinander abgegrenzten Frequenzen.

Welche das sind, lässt sich nur mit technischer Finesse klären. Eine Möglichkeit ist eine sanfte Variante der Karambolagen, die an großen Teilchenbeschleunigern stattfinden. Physiker beschießen dabei ruhende Materie mit einem Strahl aus Protonen, die sie mit Hilfe elektrischer Felder in Schwung gebracht haben. Haben die Partikel genau das richtige Maß an Bewegungsenergie, zerplatzen gerammte Kerne nicht etwa. Sie nehmen stattdessen eines der Protonen auf, wachsen dadurch etwas und beginnen zu zappeln.

Wenn sie sich anschließend wieder beruhigen, spucken die betroffenen Kerne ein Strahlungspaket aus. Oder, in selteneren Fällen, ein Elektron-Positron-Paar. Indem Physiker diese Absonderungen auffangen und analysieren, können sie die Energieniveaus von Atomkernen rekonstru-

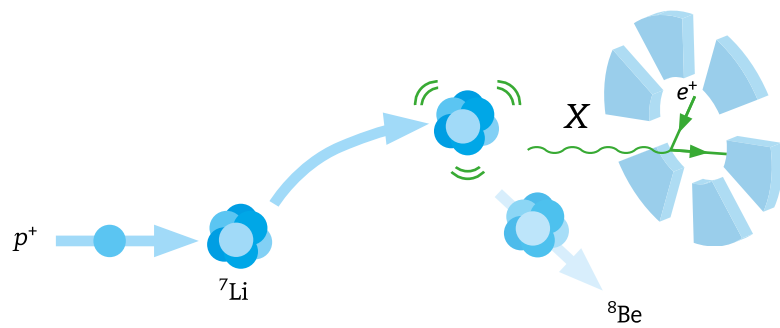


## Das Experiment von Debrecen

Die ungarischen Forscher um Attila Krasznahorkay haben Lithiumatomkerne mit einem Strahl aus Protonen beschossen. Letztere stammen aus einem Tandetron-Teilchenbeschleuniger und haben eine Energie von einem Megaelektronvolt – gerade einmal 0,007 Prozent der Maximalenergie der weltbesten Partikelkanone am Genfer Forschungszentrum CERN.

Anders als dort bleiben die beschossenen Atomkerne in Ungarn intakt: Beim Aufeinandertreffen fangen sie die Protonen ein, wodurch sie sich in die Kerne des Berylliums umwandeln. Wegen der überschüssigen Energie zappeln sie anschließend wild hin und her, nehmen also einen »angeregten« Zustand ein. Fallen die Kerne nach kurzer Zeit in den Grundzustand zurück, geben sie meist ein Päckchen Gammastrahlung ab.

Doch so läuft es nicht immer: In seltenen Fällen entweicht statt des Gammaquants ein »virtuelles« Photon, das sich im elektromagnetischen Feld des Kerns rasch in ein Elektron und ein Positron umwandelt; Kernphysiker sprechen von innerer Paarbildung.



Das Team um Krasznahorkay hat untersucht, in welche Richtung diese Paare bevorzugt davonfliegen. Die Forscher nutzten dazu ein Messgerät aus sechs armlangen Röhren. Sie sind wie die Speichen eines Rads angeordnet, in einer senkrechten Ebene zum Strahl des Teilchenbeschleunigers.

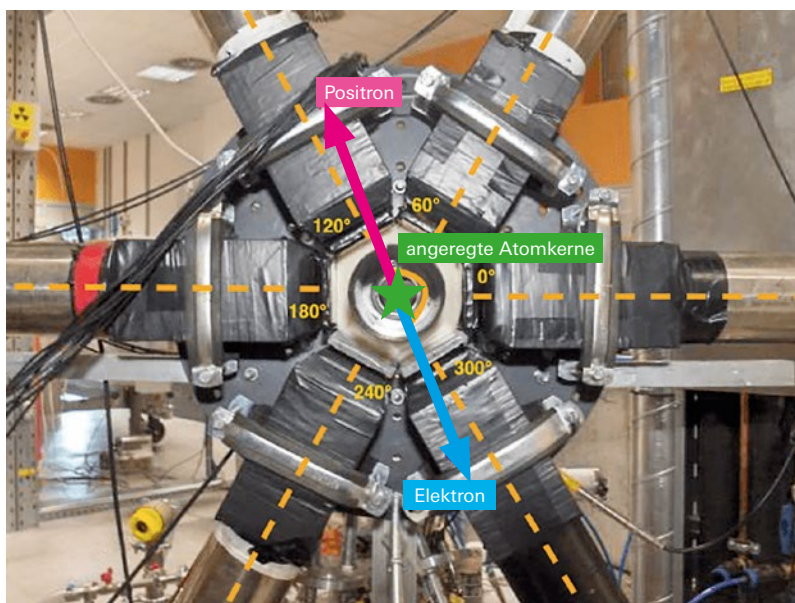
Im Mittelpunkt des Rads treffen die Protonen auf ein Plättchen aus Lithium und regen die Atomkerne darin an. Geben diese kurz darauf Elektronen und Positronen ab, lässt sich ihre Bahn mit den Speichendetektoren verfolgen: Dort entstehen schwache Lichtblitze, wenn sich die geladenen Teilchen durch das Detektormaterial bewegen.

Bei der Auswertung der Daten sind die Ungarn auf überraschend

viele Elektron-Positron-Paare gestoßen, die unter einem Winkel von 140 Grad auseinanderfliegen, also fast in entgegengesetzte Richtung. Bei Teilchen aus innerer Paarbildung würde man das Gegenteil erwarten: Wegen der Impulserhaltung bewegen sich Elektronen und Positronen hier meistens grob in die Richtung, in der das Proton den Atomkern gerammt hat.

Erklären ließe sich die Häufung großer Winkel durch ein neues Teilchen, das der Kern mit einer Wahrscheinlichkeit von 6 zu 1000000 statt eines Gammaquants ausspuckt, meinen Krasznahorkay und seine Kollegen. Dieses X-Boson wäre instabil und würde nach kurzer Flugstrecke in ein Elektron und ein Positron zerfallen. Da es jedoch deutlich langsamer unterwegs wäre als ein masseloses Strahlungsquant, würden sich seine gegensätzlich gepolten Zerfallsprodukte bevorzugt unter großen Winkeln voneinander entfernen.

Die Abweichung tritt in den Daten deutlich hervor, eine statistische Schwankung ist also sehr unwahrscheinlich. Die Auswertung des Experiments ist jedoch schwierig. Nicht nur bei der inneren Paarbildung entstehen Elektronen und Positronen. Auch die von den Kernen abgegebenen Gammaquanten können die Duos ins Leben rufen, wenn sie sich in der Nähe anderer Atomkerne bewegen. Und diese Paare lassen sich nicht immer sauber von denen aus anderen Quellen unterscheiden.



ATTILA KRASZNAHORKAY: DT. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

SPECTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH FENG, J.-L. ET AL.: PARTICLE PHYSICS MODELS FOR THE 17 MEV ANOMALY IN BERYLLIUM NUCLEAR DECAYS, ARXIV:1808.05312V2, 2017, FIG. 2

ieren. Eigentlich war das nichts anderes als das Tagesgeschäft der Kernphysik, tausendfach umgesetzt und bis in die letzte Ecke erforscht. Doch de Boer und andere erkannten: In einer leichten Abwandlung müsste sich die Technik auch für die Suche nach einem neuen Elementarteilchen eignen. Denn das neue Boson wäre eine weitere Möglichkeit für Atomkerne, Energie abzugeben. Der Neuling wäre dabei nicht stabil, sondern würde nach kurzer Flugzeit in ein Elektron und ein Positron zerfallen.

In einem Punkt sollten sich diese Duos aber von jenen unterscheiden, die auf Strahlungsteilchen zurückgehen oder direkt vom Kern ausgestoßen werden: Sie müssten unter einem deutlich größeren Winkel auseinanderfliegen. Verfolgt man also akribisch, in welcher Richtung angeregte Atomkerne Elektronen und Positronen davonschleudern, könnte das Hinweisen auf das Teilchen liefern.

Eine kreative Idee, und auf den ersten Blick nicht allzu schwer in der Umsetzung. Ein Detektor für die Winkelmessung ließ sich für wenig Geld in jeder Institutswerkstatt zusammenbauen. De Boer machte sich an die Arbeit. Was ihm fehlte, war ein geeigneter Protonenbeschleuniger, der das neue Teilchen aus Atomkernen herauskitzeln konnte. Anfang der 1990er Jahre rief er deshalb in Frankfurt am Main an, am dortigen Institut für Kernphysik. Der Beginn des ersten Akts der Teilchensuche.

In Frankfurt erreichte de Boer Kurt Stiebing, einen ernsthaften und gewissenhaften Experimentalphysiker. Einige Jahre zuvor war Stiebing an den Darmstädter Messungen beteiligt gewesen. Nun war es an der Zeit für ein eigenes Positronen-Projekt. Doch als de Boer mit dem von ihm entworfenen Apparat in Frankfurt ankam, schüttelte Stiebing nur den Kopf. Unter anderem hatte der Niederländer falsch berechnet, wie der Detektor auf Signale reagierte.

Auch war der schwenkbare Aufbau, der de Boer vorschwebte, viel zu fehleranfällig. Also machten sich Stiebing und sein Doktorand Oliver Fröhlich daran, ein besseres Gerät zu bauen. Es bestand aus acht fest installierten Teilchendetektoren, die wie die Speichen eines Rads in alle Richtungen zeigten – ein Konzept, mit dem Attila Krasznahorkay in leicht abgewandelter Form 25 Jahre später noch arbeiten wird (siehe »Das Experiment von Debrecen«, S. 17).

### **Skeptische Frankfurter und ein euphorischer Niederländer**

1995 gab es in Frankfurt erste Ergebnisse: Elektron-Positron-Paare schienen tatsächlich etwas häufiger als gedacht unter großen Winkeln auseinanderzufliegen, was man als Indiz für ein neues Boson deuten konnte. So sah es jedenfalls Fokke de Boer. Seine deutschen Kollegen blickten skeptisch auf die schwer interpretierbaren Daten. »Meiner eher bescheidenen Auffassung über die erreichte experimentelle Genauigkeit hat Herr Dr. de Boer sich nicht anschließen wollen«, heißt es in Oliver Fröhlichs Doktorarbeit, die zu einer Art Standardwerk für X17-Jäger werden sollte.

Wenn man Kurt Stiebing heute anruft, wird er noch deutlicher. »Ich bin erstaunt, dass jemand noch immer mit meinem Detektorentwurf arbeitet«, sagt er mit Blick auf die Messungen in Debrecen. Denn schon damals, in Frankfurt, sei klar gewesen, wie heikel Experimente mit Positronen waren. »Man musste wahnsinnig viele Fehlerquellen beachten.« Selbst wenn man jahrelang weiter Daten genommen hätte, wäre die Sache unklar geblieben.

Da war nicht nur die Schwierigkeit, das seltene Zerfallssignal des neuen Teilchens von Elektron-Positron-Paaren aus anderen Quellen zu unterscheiden. Diese fliegen manchmal ebenfalls unter einem großen Winkel auseinander. So

## **Was für ein Teilchen könnte X17 sein?**

Ein leichtes, bisher unentdecktes Boson aus Kernphysik-Experimenten lässt sich nur mit Mühe in das bisherige Regelwerk für den Mikrokosmos eingliedern. Am ehesten könnte es sich bei X17 um einen exotischen Verwandten des Photons handeln, das in der uns bekannten Welt den Elektromagnetismus überträgt. Ein »dunkles« Photon wäre im Gegensatz zu seinem bekannten Vetter allerdings nicht masselos.

Es würde dennoch bloß sehr schwach mit bekannten Elementarteilchen interagieren sowie möglicherweise auch mit den mutmaßlichen Bestandteilen der Dunklen Materie. Doch damit X17

als dunkles Photon in Frage kommt, muss dieses viel wählerischer sein, als Forscher bislang annahmen: Unter anderem dürfte es lediglich mit Neutronen wechselwirken, nicht aber mit Protonen. Nur so lässt sich erklären, dass es bisher nicht in anderen Experimenten aufgetaucht ist.

Eine Möglichkeit wäre auch ein bisher unbekanntes Austauschteilchen, das eine Kraft zwischen Quarks und Elektronen vermittelt. Es steht bei manchen Theoretikern hoch im Kurs, da sich mit ihm eine neue Brücke zwischen schwacher und starker Kernkraft schlagen ließe. Noch ist unklar, ob sich diese beiden Kräfte als Facetten eines

grundlegenderen Phänomens begreifen lassen, was ein weiterer Schritt zu einer »großen Vereinheitlichung« der Kräfte wäre. Gelungen ist diese Synthese bereits bei schwacher Kernkraft und Elektromagnetismus, die nach Ansicht von Forschern bloß zwei Gesichter derselben »elektroschwachen« Grundkraft darstellen.

Nicht in Frage als Ursache der aktuellen Kernphysik-Anomalie kommen Axionen. Die hypothetischen Teilchen gelten ebenfalls als Kandidaten für die Dunkle Materie. Wären sie so schwer wie X17, hätten Forscher sie jedoch schon vor Jahrzehnten an Teilchenbeschleunigern entdeckt.

will es die Quantenphysik, in der selbst unwahrscheinliche Ereignisse gelegentlich stattfinden. Hinzu kam das allgegenwärtige Störfeuer des Mikrokosmos: Teilchen aus anderen Zerfällen, Querschläger aus benachbarten Kollisionen, Partikel der kosmischen Strahlung – ein Albtraum für jeden Experimentalphysiker.

Letztlich einigte sich das niederländisch-deutsche Team auf eine Interpretation zwischen dem Optimismus de Boers und der Skepsis der Deutschen. Fröhlich nahm einen Job in der Industrie an, Stiebing schlug eine andere Forschungsrichtung ein. »Ich wollte nicht etwas nachjagen, was man mit verfügbaren Instrumenten nicht entdecken konnte«, sagt er rückblickend. »Mich hat die Sache irgendwann gelangweilt.«

Auch in anderer Hinsicht brachten die 1990er Jahre schlechte Nachrichten für Teilchenjäger: Die Darmstädter Positronen-Anomalie verschwand. Forscher in den USA ließen wie ihre deutschen Kollegen Atomkerne zerplatzen, beobachteten aber keinen Überschuss an Positronen. Offenbar hatte man in früheren Versuchen unterschätzt, wie oft die Teilchen auf normalem Weg entstehen.

Was folgte, war eine Zeitenwende: Viele Experten wechselten zu größeren Beschleunigern, die Kerne mit so viel Wucht zertrümmern, dass selbst ihre kleinsten Bestandteile sichtbar werden. Aus Kernphysikern wurden Teilchenphysiker. Messungen, bei denen es vorrangig um ganze Atomkerne und Positronen ging, kamen aus der Mode – und stießen bei vielen Forschern fortan auf Vorbehalte.

Doch Fokke de Boer ließ sich nicht unterkriegen. Immer wieder veröffentlichte er Fachaufsätze mit kreativen Deutungen der Frankfurter Daten. »Da ist was, da ist was«, sagte er zu Kollegen. Als feststand, dass die Versuche am Main nicht weitergingen, rief er im Frühjahr 2000 Attila Krasznahorkay an, der zu dieser Zeit in Japan forschte. In Debrecen, der Heimatstadt des Ungarn, gab es ebenfalls einen geeigneten Teilchenbeschleuniger.

Krasznahorkay hatte sich damals bereits einen Ruf als fähiger Experimentator erarbeitet. Sein Fachgebiet: »Riesenresonanzen« bei Atomkernkollisionen. Ein seit Langem beackertes Forschungsfeld, auf dem Anfang des neuen Jahrtausends bloß noch Details offen zu sein schienen. De Boers Anruf stellte hingegen ein exotisches Thema in Aussicht, ein kleines Forschungsabenteuer. Und so sagte Krasznahorkay nach kurzer Bedenkzeit zu. Bald darauf brachte Kurt Stiebing sein Winkelmessgerät nach Ungarn. Der Start des zweiten Akts der Jagd – in dem die Fährte erst klarer hervortrat, nur um dann zu versanden.

In Debrecen arbeiteten Krasznahorkay und de Boer zunächst mit Atomkernen des Sauerstoffs. Richtig angeregt, schienen diese ein Boson abzugeben. Den Messungen zufolge sollte es eine Masse von 9 Megaelektronvolt (MeV) haben, ungefähr 18-mal so viel wie ein Elektron. Auch bei 12 MeV schien sich etwas zu regen, wie Tests mit Beryllium zeigten. Damit war der Neuling schwerer als jene 1,6 MeV, von denen de Boer Anfang der 1990er Jahre ausgegangen war, und etwas leichter als X17, das heutigen Daten zufolge knapp 17 MeV haben müsste.

Für de Boer war die Arbeit in Debrecen ein Kraftakt. Wochenweise reiste er aus den Niederlanden an, wo seine



MILIOS VARGHA / IMAGOSARIEHL.COM

**Mit Protonen aus einem Teilchenbeschleuniger beschießt das ungarische Team ein dünnes Plättchen. Getroffene Atomkerne gelangen so in einen angeregten Zustand.**

Lebensgefährtin mit der gemeinsamen Tochter lebte. Manchmal legten er und sein Freund Johan van Klinken die 1600 Kilometer im Auto zurück. Einen festen Job hatte de Boer zu dieser Zeit nicht: Eine Einstellungsklage an seinem Amsterdamer Heimatinstitut war zuvor gescheitert.

### **Eine ganze Schar neuer Bosonen**

Dennoch sah sich der Niederländer auf einem guten Weg. Nachdem er eine Weile über den Ergebnissen aus Frankfurt und Debrecen gebrütet hatte, meinte er diese mit sage und schreibe acht neuen Bosonen erklären zu können. Es kam zum Streit: Wie schon Kurt Stiebing blickte Attila Krasznahorkay kritisch auf de Boers Auslegung der Daten. Aus seiner Sicht taugten diese nicht mal als Indiz für ein einziges neues Teilchen – woraufhin das Verhältnis zwischen beiden deutlich abkühlte.

Schließlich diagnostizierten Ärzte bei Fokke de Boer Lungenkrebs. »Johan, sie glauben mir nicht«, klagte er seinem Freund van Klinken ein Jahr vor seinem Tod. Im Juli 2010 starb de Boer. Auf die Trauerkarte ließ seine damals 17-jährige Tochter eine Zeichnung drucken: ein Diagramm mit all den Bosonen, an die der Niederländer glaubte.

Attila Krasznahorkay reiste nicht zur Beerdigung nach Amsterdam. Aber er hängt ein großes Poster im Flur des Atomki-Instituts in Debrecen auf, in Erinnerung an »unseren unvergesslichen Freund und Kollegen«. Auch in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2015 werden er und sein Team de Boer überschwänglich danken: »Wir stehen zu tiefst in seiner Schuld.«

Es fällt nicht leicht, dies mit den heutigen Schilderungen des Ungarn in Einklang zu bringen. Sie lassen insgesamt wenig Gutes an de Boer. »Er war ein Träumer und hat sich sehr eigenartig verhalten«, sagt Krasznahorkay etwa. Doch



**Der Tandetron-Beschleuniger am Atomki-Institut nimmt Atomkerne aus einer radioaktiven Quelle – und feuert sie dann in eine Vakuumröhre.**

weshalb haben er und sein Team dann all die Jahre mit dem Holländer zusammengearbeitet und ihn nach seinem Tod immer wieder gewürdigt? Und warum hat Krasznahorkay 2006 und 2008 gemeinsam mit de Boer Konferenzberichte veröffentlicht, in denen sie Messdaten aus Debrecen mit einem neuen Boson erklären?

Krasznahorkay sinkt etwas in sich zusammen, wenn man ihn das in seinem Büro in Debrecen fragt. Dann antwortet er, leise und leicht betreten: »Fokke war ein armer Mann, alle anderen waren gegen ihn.« Daher habe er seinen Kollegen unterstützen wollen – schließlich fühle er sich selbst oft wie ein Außenseiter.

Wer den gutmütigen Ungarn einmal erlebt hat, ist geneigt, ihm diese Version der Geschichte abzunehmen. Andererseits wirft seine Erzählung Fragen auf. De Boers Vertrauter Johan van Klinken erinnert sich etwa an eine Phase, in der Krasznahorkay ebenfalls hinter der Teilchen-Deutung gestanden habe, nicht nur aus Mitleid, sondern aus Überzeugung. Versucht sich Krasznahorkay also nachträglich von seinem umstrittenen Kollegen zu distanzieren, um die Glaubwürdigkeit seiner Gruppe zu retten? Der Ungar bestreitet das: »Es gab diese Distanz schon immer.«

Unklar bleibt derweil, wieso das Team nach de Boers Tod nirgendwo öffentlich aufgearbeitet hat, was bei den Experimenten damals schiefgelaufen ist. In der Wissenschaft gehört solch eine Korrektur vergangener Fehler zum guten Ton. Dass dieser Schritt bei den Messungen aus den Nullerjahren ausgeblieben ist, hat der Gruppe viel Kritik eingebracht. Krasznahorkay rechtfertigt das rückblickend mit Zeitmangel: Die Bosonen-Suche sei nur ein Nebenprojekt gewesen, und für sein Vorankommen in der Wissenschaft habe er dringend andere Publikationen schreiben müssen.

All das würde wohl keine große Rolle spielen, wenn die Jagd nach dem neuen Boson mit dem Tod de Boers geen-

det hätte. Aber sie ging weiter, in einer Art drittem Akt: 2010 nahmen Krasznahorkay und sein Team mit verbesserter Apparatur die Messungen wieder auf, um die Sache ein für alle Mal abzuschließen. Tatsächlich sahen die Forscher nichts mehr von einem Teilchen bei 9 oder 12 MeV. Dafür entdeckten sie eine neue Anomalie, bei 13,5 MeV.

Als Krasznahorkay diese Daten 2012 bei einer Konferenz in Italien vorstellte, überraschte ihn das Interesse der internationalen Forschergemeinschaft. Sie diskutierte zu dieser Zeit über »dunkle Photonen« als möglichen Bestandteil der Dunklen Materie. Das neue Boson, auf das die Messungen der Ungarn hindeuteten, schien zu diesem Steckbrief zu passen.

In den folgenden Jahren trat das Signal in Debrecen dann deutlicher hervor. Waren überschüssige Elektron-Positron-Paare zu de Boers Zeiten noch bei allen möglichen Winkeln aufgetaucht, häuften sie sich nun bei 140 Grad, als auffällige Beule in dem Diagramm mit Messwerten. Damit änderte sich jedoch erneut die Masse des mutmaßlichen Teilchens. Statt 13,5 MeV schienen es eher 17 MeV zu sein – X17 war geboren. »Die Daten haben damals schon gestimmt, aber unsere Interpretation war anfangs nicht ganz korrekt«, sagt Krasznahorkay.

2016 akzeptierten die »Physical Review Letters« den Aufsatz zur Veröffentlichung, das prestigeträchtigste aller Physiker-Journals. Und bald darauf lieferte ein Team um Forscher der University of California in Irvine eine Interpretation, die bei Teilchenphysikern weltweit große Beachtung fand: X17 könnte ein höchst wählerisches Boson sein, das nur auf die Neutronen in Atomkernen reagiert. Protonen hingegen würden das neue Teilchen komplett kaltlassen.

Im Mikrokosmos gibt es für solchen Snobismus bereits einen Präzedenzfall: Das Z-Boson der schwachen Wechselwirkung verhält sich ganz ähnlich. »Ein Teilchen wie X17 wird zwar von bisherigen Theorien nicht vorhergesagt«, räumt Tim Tait aus der Irvine-Gruppe ein. »Doch vielleicht ist die Natur einfach ein bisschen sonderbarer, als wir es uns bisher vorgestellt haben.«

Dass X17 so wählerisch sein müsste, hat dabei einen einfachen Grund. Nur auf diese Weise lässt sich seine Exis-

tenz mit anderen Messungen in Einklang bringen. Forscher haben im Lauf der Jahre immer wieder mit großen Teilchenbeschleunigern nach neuen Partikeln gesucht. Eigentlich müsste X17 auch dort entstanden sein, durch die in den Kollisionen freigesetzte Energie – zumindest, wenn es wirklich einen Platz im Baukasten der Natur hat. Aber wenn dem so ist, hat es keine Spuren hinterlassen, weder in dem für solch eine Suche geeigneten CERN-Detektor NA64 noch im BESIII-Spektrometer in China.

Was nicht heißen muss, dass es das Teilchen nicht gibt. Im Trümmerfeld zerplatzender Atomkerne ließe sich X17 womöglich bloß dann entdecken, wenn man genauer hinschauen würde als bisher, sagen manche Physiker. Vielleicht hat das neue Teilchen noch unbekannte Eigenschaften, die erklären, wieso es in Attila Krasznahorkays Experiment auftaucht, aber nirgendwo sonst.

### **Die Forscher können nur simulieren, wie ihr Detektor auf Signale aus dem Mikrokosmos reagiert**

Ein Detektor liefert auffällige Daten, andere nicht: Es ist eine Situation, wie es sie immer wieder gibt in der Physik. Bislang steckte in solchen Fällen fast immer ein Fehler dahinter. Davon gehen die meisten Experten auch bei X17 aus – und sind entsprechend zurückhaltend, wenn es darum geht, das Ergebnis zu überprüfen. »Sicherlich zehn Labore weltweit könnten das Atomki-Experiment nachvollziehen«, sagt etwa Andreas Zilges von der Universität zu Köln. »Wir selbst könnten es hier im Keller unseres Instituts wohl binnen eines halben Jahrs machen.« Doch er und viele seiner Kollegen glaubten schlicht nicht daran, dass die Ungarn einem echten Phänomen auf der Spur sind – entsprechend habe sich lange Zeit niemand die Mühe gemacht.

Dabei ist es nicht so, dass Forscher wie Zilges der Gruppe aus Osteuropa grundsätzlich misstrauen. Er halte Krasznahorkay und sein Team für integer und kompetent. Eine Einschätzung, die auch andere Experten teilen, mit denen »Spektrum« für diesen Artikel gesprochen hat. »Das heißt aber nicht, dass man automatisch vor Fehlern gefeit ist«, sagt Zilges. Zumal das Experiment, das man sich da vorgenommen habe, einfach enorm knifflig sei.

Bis heute kämpfen Krasznahorkay und sein Team mit denselben Problemen, die schon Kurt Stiebing vor 25 Jahren in Frankfurt hatte: Es ist sehr schwer, die Spuren des mutmaßlichen Teilchens sauber aus der Kakophonie des Mikrokosmos herauszufiltern. Man kann immer nur schätzen, wie viele Elektronen und Positronen dort umherflitzen und wie ein Detektor auf sie reagiert. Forscher verlassen sich hierzu auf eine CERN-Software namens GEANT, in der es auf jede einzelne Schraube ankommt. Weichen die darin getroffenen Annahmen nur leicht von der Realität ab, verfälscht das die Datenauswertung.

Krasznahorkay sagt, er und sein Team hätten in den vergangenen Jahren viel Zeit investiert, um diese und andere mögliche Fehlerquellen auszuschließen. An den Daten habe sich dadurch nichts geändert. Im Gegenteil, die Fährte tritt nun deutlicher denn je hervor: Auch bei angeregten Heliumatomkernen fliegen Elektronen und Positronen etwas häufiger unter großen Winkeln auseinander als

erwartet, berichteten sie im Herbst 2019. Diesmal haben die »Physical Review Letters« jedoch ausführliche Nachbesprechungen erbeten und den Fachaufsatz letztlich abgelehnt.

Dennoch haben die neuen Ergebnisse Bewegung in die X17-Suche gebracht. Mindestens eine Laborgruppe will die Experimente aus Debrecen wiederholen, das »New JEDI«-Projekt im französischen Orsay. Und mit dem PADME-Versuchsaufbau in Frascati, Italien, sowie dem US-amerikanischen »Dark Light Experiment« wollen Forscher in den nächsten Jahren gezielt nach dunklen Photonen Ausschau halten. Dabei könnten ebenfalls Spuren des Teilchens auftauchen, hoffen die Teams.

Attila Krasznahorkay hat die Bosonenjagd derweil zu einer kleinen Berühmtheit gemacht. Unlängst durfte er im ungarischen Fernsehen auftreten, daneben hat ihn seine Heimatstadt Debrecen Ende 2019 zur Person des Jahres gekürt. Sein Highlight war indes ein Vortrag in Budapest vor hunderten Schülern. »Es ist sehr schwer für uns, Nachwuchs zu finden«, seufzt er. »Die jungen Leute wollen hier zu Lande lieber in der freien Wirtschaft arbeiten.«

Zum Abschluss des Besuchs führt der ungarische Physiker noch einmal durch die Versuchshalle des Atomki-Instituts. Es ist mittlerweile früher Abend, das Surren der Vakuumpumpen ist verstummt, ein Techniker macht bereits die Lichter aus. Krasznahorkay bleibt vor dem Messgerät seiner Gruppe stehen und legt sanft seine Hand darauf. Haben er und sein Team wirklich schon alles probiert? Der groß gewachsene Physiker denkt kurz nach. »Es gibt schon noch ein paar Sachen, die wir testen wollen«, sagt er schließlich. »Im Grunde sind wir erst am Anfang.«

Und so gibt es also selbst heute, nach jahrzehntelanger Suche, zwei mögliche Enden für die X17-Geschichte. Vielleicht versteckt sich ausgerechnet dort, wo bislang niemand ganz genau nachgesehen hat, ein neues Teilchen. In diesem Fall wird Fokke de Boer als tragischer Held in die Geschichte eingehen, Attila Krasznahorkay vermutlich den Nobelpreis erhalten. Und viele Beobachter werden sich fragen, ob sie mit zu großen Vorurteilen nach Ungarn geblickt haben.

Wahrscheinlicher ist wohl ein anderer Ausgang: Wenn kein anderes Labor X17 aufspüren kann, wird es zu einer Randnotiz in der Geschichte der Teilchenphysik werden. Eine weitere falsche Fährte, bei der optimistische Forscher zu viel in Messergebnisse hineininterpretiert haben. Attila Krasznahorkay wird in diesem Szenario sicherlich einsehen, dass er einen Fehler gemacht hat, und sich einer anderen Frage aus der Kernphysik zuwenden. »Ich will mich nicht auf eine Sache versteifen und am Ende dafür leiden, so wie Fokke«, sagt er. ◀

### QUELLEN

**De Boer, F.W.N. et al.:** A deviation in internal pair conversion. *Physics Letters B* 388, 1996

**Feng, J. et al.:** Particle physics models for the 17 MeV anomaly in beryllium nuclear decays. *Physical Review D* 95, 2017

**Krasznahorkay, A.J. et al.:** Observation of anomalous internal pair creation in  $^8\text{Be}$ : A possible indication of a light, neutral boson. *Physical Review Letters* 116, 2016



## ARCHÄOLOGIE DIE ÄLTESTE BILDGESCHICHTE DER WELT

**Felsmalereien in Indonesien liefern möglicherweise das bislang früheste Zeugnis für erzählende Kunst. Die rund 44.000 Jahre alten Bilder stellen angeblich Mischwesen auf der Jagd dar.**

Wollnashörner, Mammuts, Bisons – die frühesten Kunstwerke der Menschheit zeigen das, was *Homo sapiens* vor 30.000 oder 40.000 Jahren während der letzten Eiszeit sah. Keines dieser Bilder erzählt jedoch eine konkrete Geschichte oder berichtet über ein bestimmtes Ereignis, wie wir es aus späteren Epochen kennen – etwa, wenn der ägyptische König Narmer auf der gleichnamigen 5000 Jahre alten Schieferpalette Städte erobert und die Feinde niederschlägt oder wenn auf griechischen Vasen des frühen 1. Jahrtausends v. Chr. von Schiffbruch und Totenprozessionen erzählt wird. Mit visuellen Mitteln Geschichten zu erzählen – diese kreative Fähigkeit ist ein Alleinstellungsmerkmal unserer Spezies. Nur der *Homo sapiens* hat es gemeistert, fiktive Erzählungen zu ersinnen und sie auch bildlich zu formulieren. Woher stammt diese menschliche Verhaltens-

weise? Lange Zeit kamen alle Belege für die früheste figürliche Kunst ausschließlich aus Europa – nichts davon älter als 40.000 Jahre. Aus gutem Grund galt Europa als Wiege der Eiszeitkunst. Doch vor einigen Jahren haben Forscher am anderen Ende der Welt, in Südostasien, ebenfalls Höhlenbilder aus den Händen eiszeitlicher Jäger und Sammler gefunden. Und eine dieser Malereien ist nicht nur älter als ihre Pendanten in Europa, sondern erzählt wohl auch eine Geschichte.

Die Archäologen Maxime Aubert, Adhi Agus Oktaviana und Adam Brumm von der Griffith University in Australien haben ihren Fund im Fachmagazin »Nature« beschrieben: eine Höhlenmalerei auf der indonesischen Insel Sulawesi. Dargestellt seien mehrere Wesen, halb Mensch, halb Tier, die Jagd auf Wildtiere machen. Wenn die Forscher mit dieser Deutung richtigliegen, dann wäre es das frü-

heste Zeugnis eines narrativen Bilds, das überdies von fiktiven Wesen handelt.

Das Team entdeckte die Malerei 2017 in der Höhle Leang Bulu' Sipong 4, die sich in der Karstregion Maros-Pangkep im Süden Sulawesi befindet. Die bewaldete Landschaft ist gespickt mit Felstürmen und steil abfallenden Erhebungen, in die natürliche Gänge hineinführen. Auf einer schroffen Wand der Höhle sind sechs winzige Jäger zu erkennen, die offenbar mit Speeren und Seilen einem deutlich größeren Büffel nachstellen. Daneben sind zwei weitere Jäger gezeigt sowie im Vergleich gigantische Büffel und Schweine. Nicht nur der Größenunterschied fällt ins Auge, sondern auch einige besondere Details: So hat eine Figur einen Tiereschwanz, eine andere eine Schnauze,

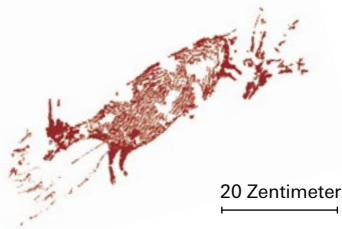


FOTO UND ZEICHNUNG ADHI AGUS OKTAVIANA, RAYNO SARDI UND ADAM BRUMM

MAPPING SPECIALISTS / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2020



FOTO UND ZEICHNUNG: ADRI AGÜS / OKTAVIANA, RATNO SARDI UND ADAM BRUMM



### **Kleine Mischwespen lauern Wildschweinen und Büffeln auf. So deuten Forscher das Felsbild in einer indonesischen Höhle.**

die nächste einen Schnabel. Solche Mensch-Tier-Hybriden bezeichnen Forscher als Therianthropen. Der Begriff ist eine Kombination aus den griechischen Wörtern für »Tier« (θηρίον) und »Mensch« (άνθρωπος). Derartige Mischwespen werden gemeinhin als bildlicher Reflex spiritueller oder mythischer Vorstellungen gedeutet. Bekannte Beispiele für dieses Phänomen sind der stierköpfige Minotaurus der alten Griechen und der schalkköpfige ägyptische Gott Anubis.

### **Prähistorische Treibjagd?**

Dass die Figuren tatsächlich eine einzige Bildszene ergeben, schließen die Forscher aus dem Stil, der einheitlichen Malfarbe und dem Erhaltungszustand. Alle Figuren seien mit derselben rostbraunen Farbe gemalt worden, glichen sich in der Machart und seien ähnlich stark verwittert. Aubert und seine Kollegen vermuten, dass eine gemeinschaftliche Treibjagd wiedergegeben ist, bei der die anvisierte Beute bereits aus der Deckung in Richtung der Jäger getrieben wurde.

Um die Bilder zu datieren, bedienten sich die Forscher der Uran-Thorium-Methode. Sie bestimmten das Mengenverhältnis von Uran und dessen Zerfallsprodukten in Kalkschichten, die sich im Lauf der Zeit über den Darstellungen abgelagert hatten. Aus der Datierung der Minerale leiteten sie dann das Mindestalter der Malereien ab. Aubert und sein Team nahmen an verschiedenen Stellen Proben. Die Ergebnisse reichen von 43900 bis 35100 Jahre vor heute. Wenn die Malerei tatsächlich 43900 Jahre alt ist, wie die Forscher mutmaßen, dann wäre es weltweit das älteste bekannte Werk figürlicher Kunst. Es würde den bisherigen Spitzenreiter um einige tausend Jahre hinter sich lassen: das rund 40000 Jahre alte Bild eines rinderähnlichen Wildtiers auf der Nachbarinsel Borneo. Ebenso wäre es deutlich früher entstanden als die bislang älteste Figur eines Therianthropen, des Löwenmenschen aus der Höhle Hohlenstein-Stadel auf der Schwäbischen Alb. Archäologen datieren die Statuette aus Mammuthelfenbein auf ein Alter von 39000 bis 40000 Jahre.

Von großer Bedeutung ist der Fundort der Höhlenmalerei. Obwohl sich Experten seit Langem einig sind, dass der anatomisch moderne Mensch aus Afrika stammt, »sah man Europa als den Ort an, an dem die Menschheit ihren letzten Schliff erhalten habe«, sagt die Archäologin April Nowell von der kanadischen University of Victoria. Denn die ältesten bekannten Kunstwerke, etwa auch Musikinstrumente, kamen in Europa ans Licht. Jetzt zeigt sich aber: Diese Meinung beruht offenbar nicht auf der tatsächlichen Fundsituation, sondern auf einem ungleichen Forschungsstand. In Europa und vor allem in Frankreich haben Steinzeitarchäologen deutlich mehr über Höhlenkunst gearbeitet als anderswo. »Aus Indonesien und Australien sind inzwischen mehrere frühe Felsbilder bekannt. Das zeigt, wie wichtig es ist, dieses Feld außerhalb Europas zu erforschen«, meint Nowell. So hatten Maxime Aubert und seine Arbeitsgruppe erstmals 2014 Höhlenmale-

rien von der indonesischen Insel Sulawesi vorgestellt: das ungefähr 35000 Jahre alte Bild eines rot gefassten Hirschebers und mehrere Konturbilder von Händen, von denen das älteste vor 40000 Jahren entstanden war. Dann, 2018, berichtete Aubert von Malereien auf der Nachbarinsel Borneo. In einer Karsthöhle entdeckte sein Team das bereits erwähnte Bild eines Wildrinds. Und nun die Jagdszene auf Sulawesi.

### **Unzugänglich und hell beleuchtet**

Das Bild prangt an einer schwer zugänglichen Stelle. Der Eingang zur Höhle liegt mehr als sieben Meter über dem Erdboden. Ohne Leiter oder Kletterausrüstung ist der Ort kaum zu erklimmen. In Europa befinden sich frühe Höhlenmalereien oft in tief gelegenen, dunklen Gängen, die ebenfalls schwer zu erreichen sind. Das deutet darauf hin, dass die Steinzeitkünstler solchen Stellen eine besondere Bedeutung beimaßen. Doch auf Sulawesi stießen die Archäologen meist an den Eingängen der Höhlen auf Darstellungen. Wie Auberts Kollege Adam Brumm betont, waren die Maler also nicht in den dunklen Winkeln tätig, sondern in den beleuchteten, hellen Bereichen – die allerdings wie im Fall der Jagdszene von Leang Bulu' Sipong 4 eben nur mit Mühe erreichbar waren. »Abgesehen von der Kunst gibt es an diesen Orten keine weiteren Zeugnisse, die von Menschen stammen – niemand lebte längere Zeit in diesen Höhlen. Wir gehen deshalb davon aus, dass die Menschen dort einst nur Bilder malten«, sagt Brumm. »Warum, das wissen wir nicht. Aber womöglich war es von großer, symbolischer Bedeutung, die Darstellungen an solch unzugänglichen grenznahen Orten weit über dem Boden anzubringen.« Der Archäologe vermutet, die Künstler seien an Ranken oder Bambusstangen hochgeklettert. Ebenfalls denkbar sei, dass sie sich von einer anderen Seite her durch das Gewirr von Höhlengängen zwängten, welche die Felsentürme von Sulawesi durchziehen.



**In roten Farbtönen sind links sechs kleine Figuren dargestellt – halb Mensch, halb Tier. Wie die Entdecker der Malerei vermuten, erlegen die mit Speeren und Seilen bewaffneten Wesen ein überdimensioniertes Wildtier.**

Sicher ist: Es gibt Ähnlichkeiten zwischen den Arbeiten der Steinzeitkünstler auf Sulawesi und denen in Europa. Etwa, dass sie ihre Malereien an für sie bedeutungsvollen Orten geschaffen haben und ähnlichen stilistischen Konventionen folgten. »Eine direkte kulturelle Verbindung zwischen der Eiszeitkunst in Indonesien und Europa ist aber unwahrscheinlich«, betont Brumm.

Zwar dürfe die Jagdszene als die bislang früheste bekannte narrative Darstellung und die früheste Wiedergabe von Mischwesen gelten, doch das verrät nicht, warum Menschen überhaupt dieses Verhalten entwickelt haben. Seit Jahrzehnten stehen Wissenschaftler vor einem Rätsel. Weshalb war so viel Zeit verstrichen zwischen der Entstehung des anatomisch modernen Menschen und kulturell modernen Verhaltensweisen wie der

Kunst? Während sich *Homo sapiens* anatomisch vor fast 300 000 Jahren herausgebildet hatte, lassen sich die Merkmale kultureller Modernität erst vergleichsweise spät anhand archäologischer Hinterlassenschaften fassen. Einige Forscher vertreten dazu folgende These: Erst ein relativ später kognitiver »Urknall« verhalf unseren Vorfahren dazu, sich in Bildern und Symbolen auszudrücken und auszutauschen. Andere Anthropologen nehmen an, dass bestimmte kulturelle, soziale oder klimatische Bedingungen – oder eine Kombination von allen dreien – das Feuer der Kreativität im Menschen entfachten. »Die neue Höhlenmalerei liefert uns auf diese interessante Frage leider keine direkte Antwort«, sagt Brumm. Angesichts der neuen Faktenlage geht er davon aus, dass sich die Menschen schon lange fiktive Geschichten erzählten, bevor Jagdbilder wie auf Sulawesi entstanden – »vielleicht schon bevor unsere Spezies Afrika verlassen hatte«.

War es aber tatsächlich *Homo sapiens*, der die Figuren an die Höhlenwand von Leang Bulu' Sipong 4 malte? Denn: Es fanden sich weder in der Höhle noch an irgendeinem anderen Ort auf Sulawesi menschliche Skelett-

reste aus derselben Zeit. Sicher ist hingegen, dass neben *Homo sapiens* auch andere Menschenformen einschließlich der Neandertaler künstlerisch tätig waren – selbst wenn Letztere wohl ausschließlich abstrakte Symbole an Höhlenwände malten. Doch in Südostasien weilten damals noch weitere Spezies: *Homo floresiensis* lebte bis vor 60 000 Jahren auf der indonesischen Insel Flores. *Homo luzonensis* hauste noch vor 50 000 Jahren auf den Philippinen. Und eine genetische Studie kam zu dem Schluss, dass sich eine spät überlebende Gruppe von Denisovanern vor nur 15 000 Jahren in Indonesien oder Neuguinea mit *Homo sapiens* gekreuzt haben könnte. Konservative Schätzungen gehen allerdings davon aus, dass die Denisova-Menschen vor rund 40 000 oder 30 000 Jahren ausstarben. Auf die Frage, ob eine der anderen Spezies die Jagdszene gemalt haben könnte, meint Brumm: »Angesichts der fortgeschrittenen Malweise der Bilder lautet unsere Annahme, dass moderne Menschen, die uns heutzutage im Wesentlichen kognitiv gleich waren, diese Höhlenkunst geschaffen haben. Vermutlich gelangten diese Menschen auf Sulawesi, als die erste Migrationswelle des *Homo sapiens* nach Indonesien kam, die vor mindestens 70 000 bis 50 000 Jahren die Region erreicht haben dürfte.«

### **Sind die Malereien aus einer Hand?**

Ob die Jagdszene tatsächlich ein Gesamtkunstwerk darstellt, ist allerdings umstritten. Zweifel hegt der Experte für frühe Kunst Paul Pettitt von der Durham University in England. Der Archäologe bemängelt, dass nur ein Tier in der Szene einigermaßen sicher auf ein Alter von 43 900 Jahren datiert sei. Für die meisten anderen Figuren liegt jedoch keine Datierung vor. »Szenische Motive sind in der eiszeitlichen Kunst sehr selten«, sagt Pettitt. »Befände sich dieses Bild in Europa, Afrika oder Nordamerika, es wäre wohl nicht älter als 10 000 Jahre.« Laut Pettitt sei überdies der Größenunterschied zwischen den Mischwesen und den Tieren, die sie angeblich



jagen, eher ungewöhnlich. »Könnte es nicht auch sein, dass beide gar nicht zusammengehören?« Oder wäre es denkbar, dass die vermeintlichen Jäger zu einem anderen, viel späteren Zeitpunkt gemalt wurden? »Von den Höhlenmalereien in Europa wissen wir, dass die Bilder in mehreren Phasen entstanden waren, die Tausende von Jahren auseinanderliegen können«, erklärt Pettitt. Er schlägt vor, die Pigmente im Bild von Leang Bulu Sipong 4 geochemisch zu untersuchen. Weisen alle Farbflächen dieselbe Signatur auf, stammen sie sehr wahrscheinlich aus derselben Zeit.

Pettitt ist zudem nicht überzeugt, dass die Jäger tatsächlich Therianthropen darstellen – oder gar menschen-

ähnliche Figuren. »Einige sind nur vage zu erkennen und damit strittig. Selbst die deutlichsten Malereien könnten auch Vierfüßler zeigen, keine Menschen« – denn immerhin würden die Figuren nicht aufrecht stehen, sondern sind horizontal oder liegend wiedergegeben. Und die Speere? »Sind womöglich nur lange Linien, die zufällig so nah an den »Menschen« vorbeiführen.« Der englische Forscher hält es daher für unwahrscheinlich, dass die Figuren Waffen in Händen tragen sollen. »Es muss offenbleiben, ob hier Menschen dargestellt sind, und falls es eine einzige Bildszene ist, ob sie wirklich eine Jagd wiedergibt.«

Es gibt also noch einiges zu erforschen. Die australischen Archäologen

um Aubert haben in der Region bereits weitere Stätten mit figürlichen Bildern entdeckt; die Datierungen stehen noch aus. Womöglich liefern diese Funde neue Hinweise auf die Ursprünge der Kunst und des Geschichtenerzählens. ◀

**Kate Wong** ist leitende Redakteurin für Evolution und Ökologie bei »Scientific American«.

#### QUELLEN

**Aubert, M. et al.:** Earliest hunting scene in prehistoric art. *Nature* 576, 2019

**Aubert, M. et al.:** Palaeolithic cave art in Borneo. *Nature* 564, 2018

**Aubert, M. et al.:** Pleistocene cave art from Sulawesi, Indonesia. *Nature* 514, 2014

## MATHEMATIK VERRÜCKTE FAMILIEN

**Warum lassen sich manche unendlich große Objekte so viel schwerer fassen als andere? Mathematiker haben nun eine tief greifende Antwort auf dieses sehr alte Problem gefunden – und damit das Verständnis für Unendlichkeiten erweitert.**

Den Begriff »verrückte Familien« verbinden die meisten Menschen wohl kaum mit Mathematik. Doch auf diesem Fachgebiet sind die so genannten »mad families« der englische Fachausdruck für bestimmte abstrakte Sammlungen unendlicher Zahlenfolgen, wobei »mad« ein Akronym für deren ungewöhnliche Eigenschaften darstellt. Man kann zwar beweisen, dass »mad families« existieren, aber sie sind so kompliziert, dass völlig unklar ist, wie sie konkret aussehen – geschweige denn, wie sie sich genau konstruieren lassen. Wie ich nun mit meinem Kollegen Asger Törnquist von der Universität Kopenhagen feststellen konnte, hat das einen handfesten Grund, der damit zu tun hat, wie in unendlichen Mengen spontan Ordnung entsteht.

Kurz nach seiner Doktorarbeit veröffentlichte der britische Mathematiker Adrian Mathias 1969 seinen ersten Fachaufsatz mit dem Titel »Happy and mad families«. Schon

damals hatte er versucht zu verstehen, was die rätselhaften Familien von anderen unendlichen Mengen unterscheidet. Zu manchen der in seiner Arbeit aufgeworfenen Fragen gab es lange Zeit wenige Fortschritte. Einige Eigenschaften der abstrakten Gebilde entzogen sich über Jahrzehnte dem Verständnis der Wissenschaftler.

#### Komplizierte Mengen

Dabei verwenden Mathematiker »mad families« schon lange in den verschiedensten Bereichen. Unter anderem spielen sie in der Topologie und der Mengenlehre eine große Rolle. In letzterer Disziplin geht es um beliebige Ansammlungen von Objekten. Das Konzept ist so allgemein, dass sich fast alles als Menge auffassen lässt: von geometrischen Figuren über Zahlen bis hin zu Rechenoperationen. Die Mengenlehre stellt eine Art Standardkatalog an Regeln und Axiomen bereit, der sämtliche Zutaten enthält, die man für einen Beweis braucht. Auf

diesem »Zermelo-Fraenkel-Axiomensystem plus Auswahlaxiom« (kurz: ZFC, wobei C für den englischen Ausdruck »axiom of choice« steht) fußt inzwischen die gesamte moderne Mathematik.

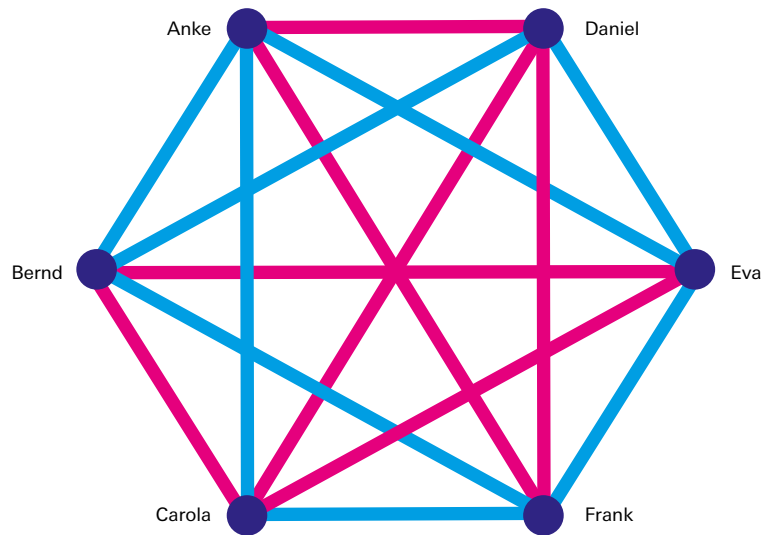
Georg Cantor (1845–1918) begründete die Mengenlehre im 19. Jahrhundert, um mit Sammlungen unendlich vieler Objekte umgehen zu können. Solchen begegnet man in der Mathematik häufig, zum Beispiel wenn man irrationale Zahlen wie Pi untersucht, die unendlich viele Nachkommastellen besitzen. Wie Cantor erstmals herausarbeitete, gibt es überabzählbar unendlich viele irrationale Zahlen – das heißt, sie lassen sich niemals aufzählen, nicht einmal in einer unendlich langen Liste. Damit hatte er gleichzeitig bewiesen, dass es nicht nur eine Art von Unendlichkeit gibt, sondern eine unendliche Folge verschiedener, immer größer werdender Unendlichkeiten (siehe Spektrum März 2009, S. 54).

»Mad families« hängen damit zusammen. Sie bestehen aus unendlich vielen, unendlich langen ansteigenden Folgen positiver ganzer Zahlen, etwa die ungeraden Zahlen: 1, 3, 5, 7 und so weiter. Eine Sammlung solcher Folgen bildet eine »mad family«, wenn sie ganz bestimmte Bedingungen erfüllt: Je zwei Folgen sind »fast disjunkt« – das heißt, es gibt eine letzte Zahl, die beide gemeinsam haben, danach enthalten die Folgen nur noch unterschiedliche Zahlen. Gleichzeitig muss die Sammlung maximal sein, was bedeutet, dass man keine weitere Zahlenfolge hinzufügen kann, ohne die Fast-Disjunktheit zu zerstören. Darin liegt auch die eigentliche Ursache für die Bezeichnung »mad«: Es ist ein Akronym für »maximal almost disjoint« (deutsch: maximal fast disjunkt).

Diese Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen, ist alles andere als einfach. Dass »mad families« tatsächlich existieren, konnten Mathematiker nur mit Hilfe des so genannten Auswahlaxioms beweisen, eine der Grundannahmen der Mengenlehre. Es besagt, dass man aus jeder nichtleeren Menge, die zu einer Sammlung von Mengen zählt, ein Element auswählen kann. Das ist durchaus plausibel: Stellen Sie sich zum Beispiel die Sammlung aller Fahrradhersteller vor, die wiederum alle dazugehörigen Radmodelle enthalten. Dann ist es ein Leichtes, für jeden Hersteller ein bestimmtes Modell auszuwählen. Bei unendlichen Mengen gestaltet sich das allerdings schwieriger. Das Auswahlaxiom lässt zudem meist keine Rückschlüsse über die Eigenschaften oder den Aufbau der abstrakten mathematischen Objekte zu, die mit seiner Hilfe entstehen.

So verhält es sich auch mit den »mad families«. Man weiß zwar, dass sie existieren, doch es lässt sich kaum etwas über ihre konkrete Beschaffenheit sagen. Das hat einen handfesten Grund: Wie sich herausstellte, sind »mad families« zwangsweise extrem kompliziert. Denn die speziellen Beziehungen, welche die Folgen untereinander erfüllen müssen, schließen eine einfache Beschreibung aus.

Das trifft bei Weitem nicht auf alles zu, was unendlich ist. Pi ist zum Bei-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

**Unter sechs Personen gibt es immer drei Menschen, die sich alle kennen (pink) oder einander unbekannt sind (blau).**

spiel unendlich lang, aber es gibt eine Formel, mit der man jede beliebige Nachkommastelle berechnen kann. Mathias konnte 1969 hingegen beweisen, dass »mad families« nicht analytisch sind – es also keine konkrete Formel gibt, um ihre Zahlenfolgen zu bestimmen. Mehr noch, ohne das Auswahlaxiom sind »mad families«, wie er zeigte, nicht einmal konstruierbar.

### Spontane Ordnung in riesigen Mengen

Dafür verwendete Mathias Methoden aus einem bestimmten Bereich der Kombinatorik, der so genannten Ramseytheorie (siehe Spektrum Februar 2018, S. 76). In diesem Gebiet sucht man nach Regelmäßigkeiten in sehr großen Sammlungen von Objekten. Zum Beispiel gibt es auf jeder Party mit mindestens sechs Gästen eine Gruppe von drei Personen, die sich entweder alle gegenseitig kennen oder die alle einander unbekannt sind – prüfen Sie es gerne nach. Je umfangreicher die Feier, desto kompliziertere Beziehungen ergeben sich. Trotzdem kann man immer eine große Gruppe finden, in der alle im gleichen Verhältnis zueinander stehen.

Mengentheoretiker haben versucht, Ideen der Ramseytheorie auf unendliche Mengen zu übertragen. Möchte man das obige Beispiel der Party derart verallgemeinern, kann man sich die Gäste als unendliche ansteigende Zahlenfolgen vorstellen, die man in mehrere Mengen aufteilt: Die Folgen innerhalb einer Menge seien beispielsweise vom Typ 1 (man kennt sich), die anderen vom Typ 2 (man ist sich gänzlich unbekannt). Mathematiker fragten sich daraufhin, ob es Folgen gibt, die immer nur einem Typ angehören, unabhängig davon, welche und wie viele seiner Folgenglieder man entfernt.

Wie sich herausstellt, können solche Folgen existieren – aber nur, wenn die vorgegebene Menge nicht allzu kompliziert ist; sie muss auf einfache Weise konstruierbar sein. Dass die Einteilung in Typ 1 und Typ 2 nicht beliebig sein darf, konnten Forscher mit Hilfe des Auswahlaxioms zeigen.

Einige Mengentheoretiker wollten daraufhin herausfinden, ab welchem Punkt das zuvor genannte Problem keine Lösung hat: Wie komplex müssen die Eigenschaften einer Familie von Zahlenfolgen mindestens sein, damit die Ramseytheorie versagt? Mathias konnte beweisen, dass man innerhalb des ZFC-Axiomensystems keine Antwort darauf finden kann. Damit teilt die Frage das Schicksal vieler anderer unbeweisbarer Aussagen, zu der die berühmte Kontinuumshypothese zählt.

Daher schlugen Logiker neue Axiome vor, die den Standardkatalog ZFC erweitern. Mit solchen zusätzlichen Werkzeugen lassen sich einige der unentscheidbaren Aussagen beweisen oder widerlegen. Manche dieser Axiome handeln von so genannten großen Kardinalzahlen. Sie postulieren »hyperunendliche« Mengen, deren Größe alles Bekannte übertrifft.

In den 1980er Jahren erkannten Mathematiker, dass sich die Ramseytheorie auch auf kompliziertere unendliche Mengen anwenden lässt, wenn man ZFC durch geeignete Axiome über große Kardinalzahlen ergänzt. Die Ramseytheorie schafft dann Ordnung in einer Klasse von Mengen, die »in einem sehr weiten Sinn konstruierbar« sind. Wie sich allerdings herausstellte, schließen die neuen Axiome aus, dass sich darunter »mad families« befinden. Demnach sind Letztere nicht einmal in einem weiten Sinn konstruierbar.

Mathias hatte schon 1969 vermutet, dass sich beide Phänomene ausschlie-

ßen: Wenn alle im weiten Sinn konstruierbaren Mengen eine Art von spontaner Ordnung besitzen, also »schöne« ramseytheoretische Eigenschaften besitzen, müsse direkt daraus folgen, dass »mad families« nicht zu ihnen gehören.

#### Ein mathematisches Paralleluniversum

Er kam zu dieser Annahme, indem er mit Hilfe der so genannten Forcing-Methode so etwas wie ein mathematisches Paralleluniversum konstruierte, in dem alle üblichen Axiome gelten bis auf das Auswahlaxiom. In diesem Universum fehlen etliche komplizierte Mengen, da man ihre Existenz ohne das Auswahlaxiom nicht beweisen kann. Alle Familien haben daher schöne ramseytheoretische Eigenschaften.

Wie Mathias beweisen konnte, befinden sich darunter keine »mad families«. Fortan war der britische Mathematiker überzeugt, dass es eine

Verbindung zwischen den ramseytheoretischen Eigenschaften und den »mad families« gibt, konnte es aber nicht beweisen.

Genau das gelang Törnquist und mir nun 50 Jahre später: Wenn sich die Ramseytheorie für eine Klasse von Mengen erweitern lässt, dann ist es ausgeschlossen, dass sich darunter »mad families« befinden. Das Ergebnis erklärt, warum die Axiome über große Kardinalzahlen bedingen, dass »mad families« nicht einmal im weitesten Sinne konstruierbar sind.

Dafür musste Törnquist die Arbeit von Mathias zunächst in ein neues Licht rücken: Mein Kollege fand einen anderen Beweis dafür, dass es keine analytischen »mad families« gibt, was bedeutet, dass es keinen einfachen Weg gibt, um sie zu konstruieren.

Anschließend setzten wir dieses Ergebnis mit mehreren modernen Ideen und Techniken in Beziehung, die vor 50 Jahren noch nicht so weit entwickelt waren. Unter anderem

Spektrum PLUS<sup>+</sup>

## Ihre Vorteile als Abonnent

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

- ▶ Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**
- ▶ Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis
- ▶ **Digitales Produkt** zum kostenlosen Download und weitere Vorteile:

Download des Monats im August: Spektrum Kompakt »Tiere on Tour«

Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Reduzierte Digitalpakete »Exoplaneten«, »Frauen« sowie »Drogen«

Weitere Informationen und Anmeldung:

**Spektrum.de/plus**

verwendeten wir aktuelle Fortschritte aus der Theorie der großen Kardinalzahlen und des Forcings. Darüber hinaus nutzten wir aus, dass bestimmte Konstruktionen gleich bleiben, wenn man ihre Inhalte nur endlich verändert. Schließlich gelang es uns nach mehreren Jahren, Mathias' Frage zu lösen. Dabei griffen wir fast ausschließlich auf gängige mathematische Methoden zurück – trotzdem waren die Einblicke, die wir auf unserem langen Umweg erhalten haben, entscheidend, um sie zu finden.

Unser Ergebnis erklärt, warum eine »mad family« so kompliziert aufgebaut ist. Tatsächlich muss sie sich aus dem Blickwinkel der Ramseytheorie anders verhalten, als man es von endlichen (und manchen einfachen unendlichen) Objekten gewohnt ist. Oder umgekehrt: Die Struktur einer »mad family« ist aus ramseytheoretischer Sicht ungewöhnlich. Die Anforderungen an die Familien sind so verzwickelt, dass sie keine einfache Ordnung zulassen, welche die Ramseytheorie herstellen würde.

**David Schrittesser** ist Mathematiker am Kurt Gödel Research Center der Universität Wien.

## QUELLEN

**Mathias, A. R. D.:** Happy families. *Annals of Mathematical Logic* 12, 1977

**Schrittesser, D., Törnquist, A.:** The Ramsey property implies no mad families. *PNAS* 116, 2019

**Törnquist, A.:** Definability and almost disjoint families. *Advances in Mathematics* 330, 2018

## GEOLOGIE VULKANAUSBRUCH DURCH STARKREGEN?

**Anfang 2018 regnete es auf Hawaii ungewöhnlich stark, einige Monate später brach auf der Insel der Vulkan Kīlauea aus. Ein Modell lässt vermuten, dass die heftigen Niederschläge den Grundwasserdruck ansteigen ließen und dies zur Eruption führte.**

Der letzte Ausbruch des Vulkans Kīlauea auf Hawaii begann 1983. Von da an drang 35 Jahre lang Magma aus seinem Innern durch Risse nach außen. Das zerklüftete Gebiet, in dem das heiße Gestein an die Oberfläche gelangte, ist als Upper East Rift Zone (obere östliche Riftzone) bekannt. Am 3. Mai 2018 öffnete sich jedoch die untere östliche Riftzone des Vulkans und gab den Weg frei für einen riesigen Lavastrom, der den Südosten der Insel verwüstete (siehe Foto rechts). Warum aber geschah das ausgerechnet im Mai 2018 und nicht davor oder danach im Verlauf des jahrzehntelangen Ausbruchs? James Ian Farquharson und Falk Amelung von der University of Miami haben jetzt eine mögliche Antwort gefunden: Rekordregenfälle Anfang 2018 haben demnach den Druck des Grundwassers erhöht. Dadurch wurde das Gestein brüchiger, so dass Magma leichter an neuen Stellen an die Oberfläche steigen konnte.

Ein Weg für die brodelnde Masse bildet sich dann, wenn Gestein mechanisch nachgibt. Das kann auf zwei Arten stattfinden: Entweder öffnen sich neue Risse, oder bestehende

verschieben sich. Ändert sich der Druck des Grundwassers, kann das beide Prozesse beschleunigen. Im ersten Fall ist durch den steigenden Wasserdruck weniger Kraft nötig, damit sich neue Spalten öffnen. Im zweiten Fall können sich Risse verlagern, wenn die Kräfte parallel zu ihnen (Scherkräfte) größer werden als jene, die senkrecht auf den Riss wirken (Normalkräfte). Letztere bewirken für gewöhnlich, dass die Öffnungen sich wieder schließen. Steigt der Flüssigkeitsdruck im Gestein, verringern sich die Normalkräfte, während die Scherkräfte unverändert bleiben – was das Aufbrechen begünstigt.

Starke Regenfälle lassen den Spiegel des Grundwassers und damit dessen Druck ansteigen. Weil das vulkanische Gestein auf Hawaii sehr durchlässig ist, kann das Wasser leicht eindringen, und der Druck verändert sich bis in mehrere Kilometer Tiefe – bis in die Nähe der Region, in der sich Magma befindet. Es dauert natürlich seine Zeit, bis sich die Druckunterschiede von der Oberfläche bis weit hinunter fortpflanzen. Die wichtigsten Indizien dafür, dass die Regenfälle den Bruch des Gesteins am Kīlauea aus-

lösten, sind zwei Beobachtungen: Zum einen rissen die Spalten langsam von oben nach unten auf, zum anderen lag zwischen der Wasseransammlung an der Oberfläche und dem Nachgeben des Gesteins in der Tiefe eine gewisse Zeitspanne.

### Laut Computermodell änderte sich der Druck tief unter der Erde

Farquharson und Amelung stellten die Druckänderungen, die die Regenfälle in den Monaten vor der Eruption am 3. Mai 2018 an dem hawaiianischen Vulkan hervorriefen, in einem Computermodell nach. Laut ihrer Simulation stieg der Druck in mehreren Kilometern Tiefe um einige zehn bis mehrere hundert Pascal an. Darüber hinaus gehen Ausbrüche am Kīlauea oft mit erheblichen Regenfällen einher, wie vier Reihen von Beobachtungen nahelegen. Auf Grund dieser beiden Indizien postulieren die Autoren, dass der starke Regen das Gestein nachgeben ließ, wodurch letztlich heißes Magma in die untere östliche Riftzone fließen konnte.

Ist ihre Hypothese plausibel? Die Druckänderungen, die ihre Modellrechnungen ergeben haben, sind

gering – kleiner als die Belastungen, die die Gezeiten verursachen. Wenn Gestein kurz davorsteht, zu zerbrechen, könnten solche minimalen Veränderungen jedoch den letzten Anstoß zum Bruch geben. Die Eruption von 2018 wurde von einem Erdbeben der Stärke 6,9 begleitet, und es gibt zahlreiche Beispiele dafür, wie Druckänderungen in derselben Größenordnung Erdbeben hervorrufen. So lässt sich etwa die weiträumige Zunahme der Erdbebenhäufigkeit im Zentrum und im Osten der USA in der Vergangenheit darauf zurückführen, dass Abwasser in wasserdurchlässiges Gestein gepresst wurde, was den Flüssigkeitsdruck erhöhte und die Belastungen des Gesteins veränderte.

Darüber hinaus können Druckschwankungen auf der Erdoberfläche vulkanische Aktivität beeinflussen, wie geologische Daten bestätigen. An Land verstärkt sie sich beispielsweise durch den Rückzug der Gletscher. Die Veränderungen des Meeresspiegels zwischen Eiszeiten und interglazialen Perioden wiederum können Eruptionsraten an mittelozeanischen Rücken steuern. Kräfte, die bei großen Erdbeben freigesetzt werden, machen Vulkanausbrüche wahrscheinlicher und können auch die Aktivität bereits aktiver Feuerberge verändern.

Obwohl bekannt ist, dass Änderungen des Wasserdrucks Erdbeben fördern, führen diese wiederum nicht notwendigerweise direkt zum Austreten von Magma. Denn sie können lokal

Druck abbauen und es der heißen Gesteinsschmelze dadurch erschweren, aus dem Reservoir nach oben zu schießen.

### Oft spuckt der Vulkan gerade zur nassesten Jahreszeit Feuer

Letztlich ist unsicher, ob Gestein in der Nähe eines Magmareservoirs überhaupt durch Druckänderungen im Grundwasser auseinanderbrechen kann, wie Amelung und Farquharson postulieren. Das Magma, das 2018 als erstes aus der unteren östlichen Riftzone ausbrach, war alt, vielleicht noch ein Relikt einer früheren Eruption aus dem Jahr 1955. Demnach wäre die Riftzone also noch heiß gewesen. In der Folge hätte das Grundwasser dort in geringer Tiefe möglicherweise gasförmig vorgelegen, weiter unten könnte es in Form einer superkritischen Flüssigkeit bestanden haben (das heißt, es war weder gasförmig noch flüssig, sondern besaß Eigenschaften beider Zustände). Weil sowohl Gase als auch superkritische Flüssigkeiten unter Druck gut komprimierbar sind, wären die Druckunterschiede im Modell der Autoren um Größenordnungen kleiner und ein dadurch bedingter Bruch des Gesteins weniger wahrscheinlich.

Wie lässt sich nun die Hypothese der Wissenschaftler überprüfen? Leider sind Druckmessungen unterhalb der Oberfläche, ebenso wie hydrogeologische Daten generell, nur selten Teil der Überwachung von

Vulkanen. Stattdessen müssen wir einen Blick auf Eruptionen in der Vergangenheit werfen. Dazu haben die Wissenschaftler alle überlieferten Ausbrüche am Kīlauea seit 1790 untersucht und herausgefunden, dass der Vulkan dazu neigt, gerade zur nassesten Jahreszeit Feuer zu spucken. Das spricht für ihre Annahme.

Sollten wir also Warnstufen erhöhen, wenn in der Nähe von Vulkanen starker Regen gefallen ist? Dasselbe könnte man sich bezüglich anderer Druckänderungen fragen, etwa solcher, die sich nach Erdbeben ergeben. Die Antwort steht noch aus. Die Kräfte verändern sich dadurch nur geringfügig, und wenn sie überhaupt etwas beeinflussen, dann den genauen Zeitpunkt der Eruption an der Oberfläche. Am Kīlauea wirkten zusätzlich Kräfte aus anderen Quellen: Messungen zufolge verformte sich der Boden, was auf Magmabewegungen hindeutete. Aus diesem Grund hatte man bereits erwartet, dass sich das Ausbruchverhalten ändern würde. Am 17. April 2018 warnte daher das hawaiianische Vulkanobservatorium vor einem neuen Schlot, der sich öffnen könnte.

Möglicherweise rufen also äußere Einflüsse Vulkanausbrüche hervor. Das erinnert uns wieder daran, dass die Feuer speienden Berge Teil eines dynamischen Systems sind. Vulkanausbrüche beeinflussen die Erdoberfläche sowie Wetter und Klima. Verändern sich solche Faktoren ihrerseits, etwa bei starkem Regen, könnte sich das im Gegenzug auf die Eruptionen auswirken. Wir beginnen gerade erst zu verstehen, wie diese Gewalten zusammenspielen. ◀

**Michael Manga** forscht am Department of Earth and Planetary Science der University of California in Berkeley.

#### QUELLE

**Farquharson, J. I., Amelung, F.:** Extreme rainfall triggered the 2018 rift eruption at Kīlauea Volcano. *Nature* 580, 2020

#### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
 Nature 580, S. 457–458, 2020

Lava tritt aus der Bruchzone des Kīlauea aus. Wissenschaftler vermuten, dass ungewöhnlich starke Regenfälle zum Ausbruch des hawaiianischen Vulkans im Mai 2018 geführt haben.





# SPRINGERS EINWÜRFE KÜNSTLICHE NIEDERSCHLÄGE

**Einklang mit der Natur – ein schönes Ziel. Doch was, wenn es unberührte Landschaften gar nicht mehr gibt?**

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

► [spektrum.de/artikel/1744786](https://spektrum.de/artikel/1744786)

**T**räumen Sie nicht auch manchmal davon, der Hektik der Stadt zu entfliehen – weit, weit hinaus in die Wildnis? Statt Abgasen und Feinstaub wird dort jeder tiefe Atemzug würzige Berg- oder Seeluft in die Lungenbläschen pumpen, und lächelnd werden Sie das Gesicht in den von Schadstoffen unbelasteten Regen halten.

Wenn Sie unbedingt an diesem schönen Gedanken festhalten möchten, rate ich Ihnen von der Lektüre der Arbeit ab, die ein Team um die Umweltforscherin Janice Brahney von der Utah State University im Juni 2020 veröffentlicht hat. Die Gruppe sammelte in den geschützten Nationalparks im Westen der USA Niederschlagsproben und analysierte sie auf Mikroplastik (*Science* 368, S. 1257–1260, 2020).

Gemeint sind Kunststoffteilchen, die kleiner sind als fünf Millimeter. Mikroplastik entsteht, wenn der übliche Kunststoffmüll, wie wir ihn in gelben Säcken sammeln, bewegt wird und sich mit der Zeit von selbst zerkleinert – aber auch, wenn von vornherein winzige Plastikteilchen beim Färben mit der Spritzpistole versprüht, mit Fabrikabgasen in die Luft geblasen oder beim Abwaschen kosmetischer Produkte in den Wasserkreislauf gespült werden. Der Gutteil all dieser Partikel ist nur Millimeterbruchteile groß, also so winzig wie vom Erdboden emporgewirbelter Staub – aber leichter. Mikroplastik lässt sich deshalb besonders bereitwillig vom Winde verwehen.

Das wiederum erklärt, warum Brahneys Mitarbeiter in den weit entfernt von allen US-Ballungszentren gesammelten Staubproben bis zu fünf Prozent synthe-

tische Polymere fanden. Die mikroskopisch kleinen Fädchen und Klümpchen genießen somit eine Freiheit, die nicht bloß über den Wolken grenzenlos sein muss. Wer weiß, fragt Brahneys Gruppe, ob sie überhaupt alle vom amerikanischen Kontinent stammen?

Jedenfalls rieseln Jahr für Jahr schätzungsweise 1000 Tonnen Kunststoff auf die Naturschutzgebiete der USA herab – ein künstlicher Regen, der in der Summe bis zu 300 Millionen Plastikflaschen gleichkommt. Dabei ist selbst diese gewaltige Menge bloß der lokale Aspekt eines globalen Kreislaufs, bei dem keineswegs nur die Atmosphäre im Spiel ist. Zunächst fielen die riesigen Kunststoffmengen auf, die auf den Ozeanen treiben, später kamen die Tiefsee und Eisberge als Transportwege und Lager ins Bild – und nun macht sich Plastik obendrein in Stäuben und Niederschlägen bemerkbar. 2017 produzierte die Welt 348 Millionen Tonnen Plastik, und die ungeheure Masse steigt jährlich um fünf Prozent. Während Experten streiten, ob eine Kreislaufwirtschaft an Stelle der gängigen Wachstumsökonomie mehr sein kann als eine Öko-Utopie, ist die ungebremste Synthetikschwemme in ihren ökologischen Auswirkungen gewiss auf Dauer unannehmbar.

**D**ie globale Anreicherung von Wasser, Luft und Erde mit künstlichen Stoffen hat Anlass gegeben, unsere Epoche als Anthropozän zu bezeichnen – als ein eigenes, diesmal wesentlich vom Menschen geprägtes Erdzeitalter. Die Kunst wird darin bestehen, alle großtechnisch hergestellten Stoffe möglichst nachhaltig in natürlich-künstliche Kreisläufe zu integrieren – so wie ja umgekehrt eine einst »freie« Ressource wie das Wasser schon längst zum mittels Pumpen, Bewässerungs- und Kläranlagen bewirtschafteten Kunstprodukt wurde. So oder so, als Triumph oder Warnung, erfüllt sich der Spruch des greisen Faust: »Es kann die Spur von meinen Erdetagen / Nicht in Aeonen untergehn.«

**Mikroplastik lässt sich  
besonders bereitwillig vom  
Winde verwehen**

# Bewegende Geschichte, spannende Zukunft.



Geschichte, echt spannend.



Neugierig auf morgen.

**P.M.** Jetzt im Handel.

Neu! Unsere besten  
Artikel, Videos und Podcasts im Netz:  
[pm-wissen.com](http://pm-wissen.com)

# EVOLUTION AUFSTIEG DER TIERE

Die »kambrische Explosion« der Artenfülle vor rund 541 Millionen Jahren kam wohl weniger plötzlich, als Forscher das bisher annahmen. Neue Daten zeigen: Das damalige massenhafte Auftreten komplexer Tiere hatte sich lange zuvor angekündigt.



Rachel A. Wood ist Paläontologin und Geologin an der University of Edinburgh, Schottland. Sie erforscht die Evolution der Riffe sowie erdgeschichtliche Veränderungen in den chemischen Verhältnissen der Ozeane.

» [spektrum.de/artikel/1744788](https://www.spektrum.de/artikel/1744788)



Die Lebensgemeinschaften des Ediacariums (vor 635 bis vor 541 Millionen Jahren) muten aus heutiger Sicht seltsam an. Federähnliche Wesen wurzelten mit Stielen im Meeresboden; andere bedeckten den Grund. Auch mobile Formen gab es.

SERIE

## Die Entfaltung des Lebens

Teil 1: Juli 2020

### In der Tiefe geboren

Ulrich C. Schreiber und Christian Mayer

Teil 2: August 2020

### Aufstieg der Tiere

Rachel A. Wood

Teil 3: September 2020

### Morgenröte der Säuger

John Pickrell

Steile weiße Felsen säumen die gewaltigen Flüsse Sibiriens. Wer auf ihnen steht, dessen Füße berühren buchstäblich einen Wendepunkt in der Geschichte des Lebens. Es ist die 541 Millionen Jahre alte Trennlinie, die das Zeitalter des Kambriums (541 bis 485 Millionen Jahre vor heute) von der vorhergehenden Phase des Präkambriums scheidet. Unterhalb dieser Grenze enthält das Gestein nur spärliche fossile Überreste: geisterhafte Abdrücke von Lebewesen, deren Körper offensichtlich weich waren, und ein paar vereinzelte Relikte von Organismen mit Gehäusen. Oberhalb der Linie hingegen wimmelt es von Schalen und Gehäusen. Noch ein wenig höher tauchen Fossilien von Tieren wie den Trilobiten auf. Allem Anschein nach haben sich die damaligen Ökosysteme binnen kurzer Zeit sehr stark verändert – ein Ereignis, das wir heute als »kambrische Explosion« bezeichnen. Es ist eine der bedeutendsten und zugleich rätselhaftesten Episoden der Evolution.

Jahrzehntelang nahmen Wissenschaftler an, komplexe Tiere – das heißt vielzellige mit unterschiedlichen Gewebetypen – seien im Wesentlichen während der kambrischen Explosion entstanden. Und tatsächlich kamen zu jener Zeit zahlreiche neue Formen auf, darunter die Vorfahren vieler Hauptgruppen des heutigen Tierreichs. Neue Entdeckungen in Sibirien, Namibia und anderswo belegen jedoch, dass die Entwicklung komplexer Tiere schon Jahrmillionen vor dem Kambrium einsetzte, nämlich während des so genannten Ediacariums, des letzten Abschnitts des Präkambriums. Unter den Fossilien von damals finden sich Überreste der ältesten bekannten Wesen, die über ein Innen- oder Außenskelett aus mineralisiertem Körpergewebe verfügten – eine ganz entscheidende evolutionäre Neuerung, die sich in der Natur bis heute bewährt.

Demnach gibt es gepanzerte Tiere schon seit mindestens 550 Millionen Jahren. Die Selektionsdrücke, die vor 541 Millionen Jahren die kambrische Explosion vorantrieben, waren somit wohl schon lange vorher wirksam gewesen. Wenn wir herausfinden, wie sie im Ediacarium die frühe Evolution der Tiere prägten, sollte es uns leichter fallen, den erstaunlichen Entwicklungsschub zu verstehen, der im Kambrium folgte.

Seit mehr als 150 Jahren befassen sich Forscher eingehend mit Fossilien aus dem Kambrium. Deshalb ist das globale Muster ihres Auftretens recht gut aufgeklärt: Auf vielen Kontinenten traten ähnliche Organismen ungefähr zeitgleich in Erscheinung und machten anschließend eine vergleichbare evolutionäre Entwicklung durch. Doch erst jetzt, mit der Entdeckung älterer Ediacara-Fossilien, beginnen wir zu verstehen, wie es zu diesem Prozess kam. Dabei wird immer klarer, warum sich die kambrische Explosion gerade zu jener Zeit abspielte und nicht zu einer anderen. Neue geochemische Methoden verraten uns, wie sich die chemischen Verhältnisse in den Ozeanen des Ediacariums und des Kambriums veränderten. Erkenntnisse aus Fossilienuntersuchungen und geochemische Analysen lassen erahnen, wie die damalige Bio-, Geo-, Hydro- und Atmosphäre zusammenwirkten. Es zeichnet sich ein verblüffendes Bild davon ab, wie die Meeresböden bereits dutzende Millionen Jahre vor der kambrischen Explosion von immer komplexeren Lebewesen besiedelt wurden, was die Bühne für den Aufstieg der Fauna schuf.

### Spuren von Schwämmen – oder doch eher von Amöben?

Die ältesten Hinweise auf urzeitliche Tiere kommen nicht etwa von Fossilien, sondern von Biomarkern, also Überbleibseln organischer Substanzen, die im Sediment enthalten sind und Rückschlüsse auf ihre Herkunft erlauben. Zu diesen Biomarkern gehören organische Kohlenwasserstoffmoleküle namens Sterane. Solche Verbindungen haben Forscher in gut erhaltenem Sedimentgestein der »Huqf Supergroup« im Oman gefunden, einer Schichtenfolge, die mindestens 650 Millionen Jahre alt ist. Manche Fachleute meinen, die speziellen Sterane kämen ausschließlich bei bestimmten Schwämmen vor, und deshalb belege ihre Anwesenheit im Sedimentgestein, dass es vielzellige Tiere schon in dieser Phase gab. Allerdings stimmen dem nicht alle Experten zu: Im April 2019 erschien eine Studie, der zufolge die Sterane eher auf einzellige Amöben hindeuten.

Ebenso umstritten sind die mutmaßlich ältesten Tierfossilien aus der Lantian-Formation, einem 150 Meter mächtigen geologischen Schichtenverbund im Südosten Chinas. Sie haben ein Alter von möglicherweise bis zu 635 Millionen Jahre. Einige Forscher sehen in ihnen die Überreste winziger Lebensformen mit weichen Körpern, die mit Korallen oder Quallen verwandt waren, denn manches an ihnen erinnert an Tentakel. Die Fossilien sind aber nicht gut erhalten, weshalb sie keine eindeutige Zuordnung erlauben. Viele Wissenschaftler bezweifeln sogar, dass sie überhaupt von Tieren stammen.

Bei den ältesten Überbleibseln, deren tierische Herkunft weitgehend unumstritten ist, handelt es sich um Fossilien aus Neufundland, die auf rund 571 Millionen Jahre datieren. Sie stammen somit aus der Zeit nach der letzten weltweiten Vereisung (»Schneeball-Erde«). Es handelt sich um die ersten bekannten Vertreter der Ediacara-Lebensgemeinschaften, in denen Organismen mit weichen Körpern dominierten, die bis zu einen Meter hoch beziehungsweise breit waren. Manche von ihnen sahen wie große, federähnliche Wedel aus, die mit senkrechten Stielen im Meeresboden

## AUF EINEN BLICK FRÜHES STELLDICHEIN

- 1 Forscher nahmen lange Zeit an, komplexe Tiere seien relativ plötzlich während der »kambrischen Explosion« entstanden.
- 2 Immer mehr Fossilienfunde deuten aber darauf hin, dass sie schon Jahrmillionen früher während des Ediacariums erschienen.
- 3 Neue Methoden, um die chemischen Verhältnisse in den damaligen Ozeanen zu rekonstruieren, liefern Erkenntnisse darüber, was diese Entwicklung vorantrieb.



BACHEL A. WOOD



BACHEL A. WOOD

**Zu den wichtigsten Stätten, an denen Fossilien von komplexen Ediacara-Tieren aufgetaucht sind, zählen Sedimente an den Ufern des Flusses Judoma im Nordosten Sibiriens (oben) sowie Gebiete am Rand der Nama-Wüste in Namibia (unten).**

wurzelten. Andere bedeckten den Grund, wobei ihre flachen Körper eine fraktale Architektur aufwiesen – mit verzweigten Strukturen, die auf verschiedenen Größenskalen das immer gleiche Muster zeigten. Das gemeinsame Merkmal solcher Körperbaupläne war, für eine möglichst große Oberfläche zu sorgen. Es gibt somit gute Gründe zu vermuten, dass die Tiere sich ernährten, indem sie Substanzen über ihre Außenhülle absorbierten – direkt aus dem umgebenden Wasser.

Diese Tierwelt, deren Formenreichtum noch recht bescheiden anmutet, bestand mehr als zehn Millionen Jahre lang. Dann nahm die Evolution Fahrt auf. Laut Fossilienfunden begannen sich die Ediacara-Gemeinschaften vor etwa 560 Millionen Jahren stärker zu differenzieren und entwickelten nun auch bewegliche Formen, die flaches Wasser besiedelten. An manchen Fossilien haben sich Kratzspuren erhalten, was darauf schließen lässt, dass die Tiere Algen abschürften, um sie zu fressen. Andere wiederum dürften über Algenmatten gekrochen sein und dabei Nährstoffe mit der Unterseite ihrer Körper aufgenommen haben. Ungefähr zur gleichen Zeit tauchten die ersten gegrabenen Kühlen oder Löcher auf, ein Hinweis darauf, dass die Tiere sich bewegten und dabei das Sediment aufwirbelten.

Vor 550 Millionen Jahren erschienen – offenbar ziemlich plötzlich – die ersten Tiere mit Außen- beziehungsweise Innenskelett, erkennbar an entsprechenden Fossilien in Kalkstein, der vorwiegend aus Kalziumkarbonat besteht. Diese Überreste weisen in Größe und Form bereits eine durchaus beachtliche Vielfalt auf, und man findet sie in weit voneinander entfernten Regionen wie Sibirien, Brasilien und Namibia. Dass damals derart viele Tiergruppen parallel Skelette entwickelten, und zwar weltweit, ist ein Beleg dafür, dass rund um den Globus ähnliche evolutionäre Triebkräfte gewirkt haben müssen. Um was es sich dabei handelte, wissen wir nicht genau, aber wir haben eine Vermutung. Ein Skelett auszuprägen, verschlingt wertvolle Ressourcen; Tiere, die das tun, müssen einen großen Nutzen davon haben, der die Kosten überwiegt. Der mit Abstand wichtigste Vorteil eines Skeletts ist der Schutz vor natürlichen Feinden. Zwar gibt es aus dem fraglichen Zeitraum keine Fossilienfunde, die auf Räuber hindeuten, doch das rasche Erscheinen von Skeletten war sehr wahrscheinlich eine Reaktion darauf, dass sich erstmals Tiere verbreiteten, die andere fraßen.

Neuere Untersuchungen fossiler Skelette aus diesem erdgeschichtlichen Abschnitt liefern faszinierende Hinweise darauf, wie die Tiere aussahen – und wie sie lebten. Als besonders wichtig für den Versuch, die Ökosysteme des Ediacariums zu rekonstruieren, hat sich *Cloudina* erwiesen. Von diesem Wesen kennen wir das filigrane Röhrenskelett, das bis zu sieben Zentimeter lang wurde und einem Stapel aus Speiseeis-Waffeltüten ähnelte. Überreste von *Cloudina* wurden erstmals 1972 in Namibia entdeckt, und man nahm lange Zeit an, das Tier habe während seines Wachstums am Meeresboden festgesessen. In den zurückliegenden Jahren haben Forscher jedoch viele neue *Cloudina*-Exemplare von Fundstellen auf der ganzen Welt analysiert und dabei unser Wissen über diese Organismen stark erweitert. Mein Team beispielsweise hat an Funden aus Namibia belegt, dass *Cloudina* auf ganz verschiedene Weise gedeihen konnte. Mitunter heftete es sich an Mikrobennmatten fest, die auf weichem Sediment des Meeresbodens wucherten, manchmal verankerte es sich auch an aufgeschichteten Kolonien von Zyanobakterien. Noch wichtiger aber ist: *Cloudina*-Individuen konnten sich untereinander verkitten, um Riffe zu bilden. Damit war diese Überlebensstrategie nachweislich bereits 20 Millionen Jahre früher verbreitet, als Forscher bisher annahmen.

### **In Nachbarschaft zu anderen Tieren**

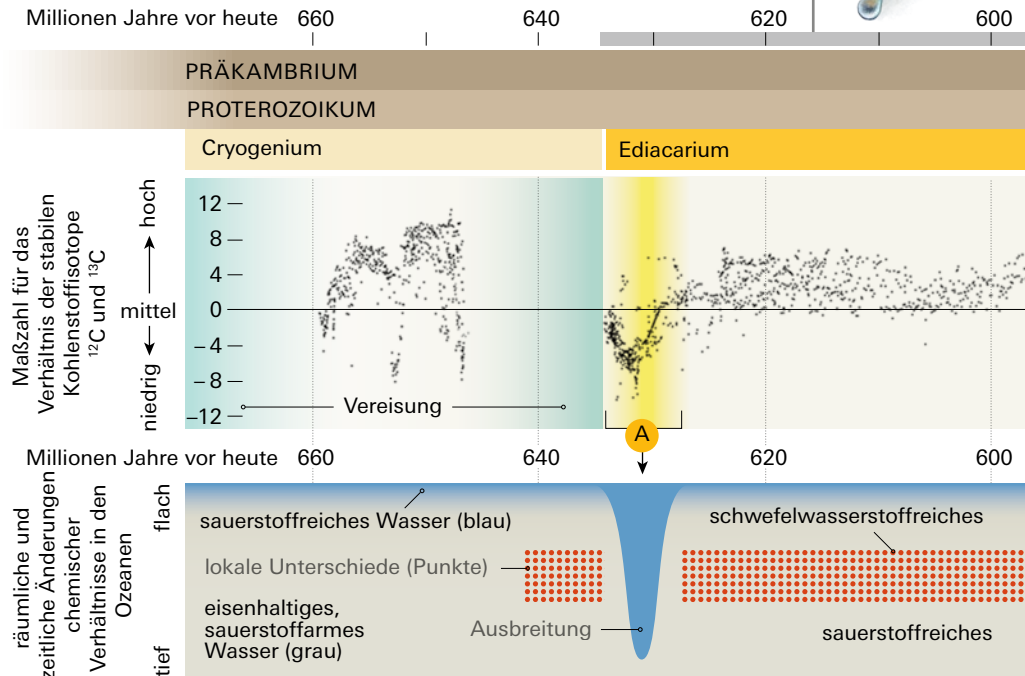
Ob *Cloudina* mit den Vorfahren der Korallen und anderer heutiger Riffbildner verwandt war, wissen wir nicht. Bekannt ist jedoch, dass die Lebewesen – so wie heutige Korallen – in enger Nachbarschaft zu zahlreichen anderen Tieren lebten. Das belegen Skelettfossilien, die man in Gesteinen des gleichen Alters fand. Einer von *Cloudinas* Zeitgenossen war *Namacalathus*, dessen Überbleibsel an zahlreichen Fundstellen rund um den Globus aufgetaucht sind. Sein bis zu fünf Zentimeter langes Skelett bestand aus einem zarten, dünnwandigen Stiel sowie einer Art Becher mit einer zentralen Öffnung auf der Oberseite sowie mehreren seitlichen Öffnungen. Das weiche Gewebe befand sich

## Vor der kambrischen Explosion

Viele wichtige Neuerungen in tierischen Bauplänen, von denen Forscher angenommen hatten, sie seien erst während des Kambriums aufgetreten, lassen sich in Wirklichkeit weiter zurückverfolgen – nämlich bis ins Ediacarium. So traten die ersten Tiere mit Skeletten bereits während dieser früheren Phase auf. Ihre Fähigkeit, mineralisierte Körpergewebe auszubilden, entstand ursprünglich wahrscheinlich als Schutzmechanismus gegenüber Raubtieren. Fossilien und geochemische Daten aus der Zeit von vor 670 bis vor 480 Millionen Jahren liefern Hinweise darauf, welche Umweltfaktoren damals die Evolution antrieben.

### Geochemische Befunde

Tiere brauchen Sauerstoff zum Leben. Die Entstehung neuer Arten im Ediacarium spielte sich unter stark schwankenden Sauerstoffgehalten in den damaligen Ozeanen ab. Kohlenstoffisotope in den Sedimenten dieser Zeit zeigen: Der Kohlenstoffzyklus war instabil und unterlag ständigen Änderungen. Die Analyse von Eisenverbindungen wiederum lässt erkennen, dass die Menge des im Meerwasser gelösten Sauerstoffs vermutlich nach und nach bestimmte Schwellenwerte überschritt, so dass die Tiere aktiver werden und sich stärker ausdifferenzieren konnten. Nach heutiger Kenntnis stieg der Sauerstoffgehalt nicht langsam und gleichmäßig, sondern in Schüben (A, B, C, D), die mit Schwankungen von Kohlenstoffisotop-Gehalten zusammenzufallen scheinen und während des gesamten Ediacariums, aber auch noch danach auftraten.



wahrscheinlich vor allem im Becher, hat sich aber leider bei keinem Exemplar erhalten.

Fossilien von *Namacalathus* deuten darauf hin, dass sich das Tier ebenfalls auf Mikrobenmatten festsetzte, und zwar anscheinend häufig in der Nähe von *Cloudina*.

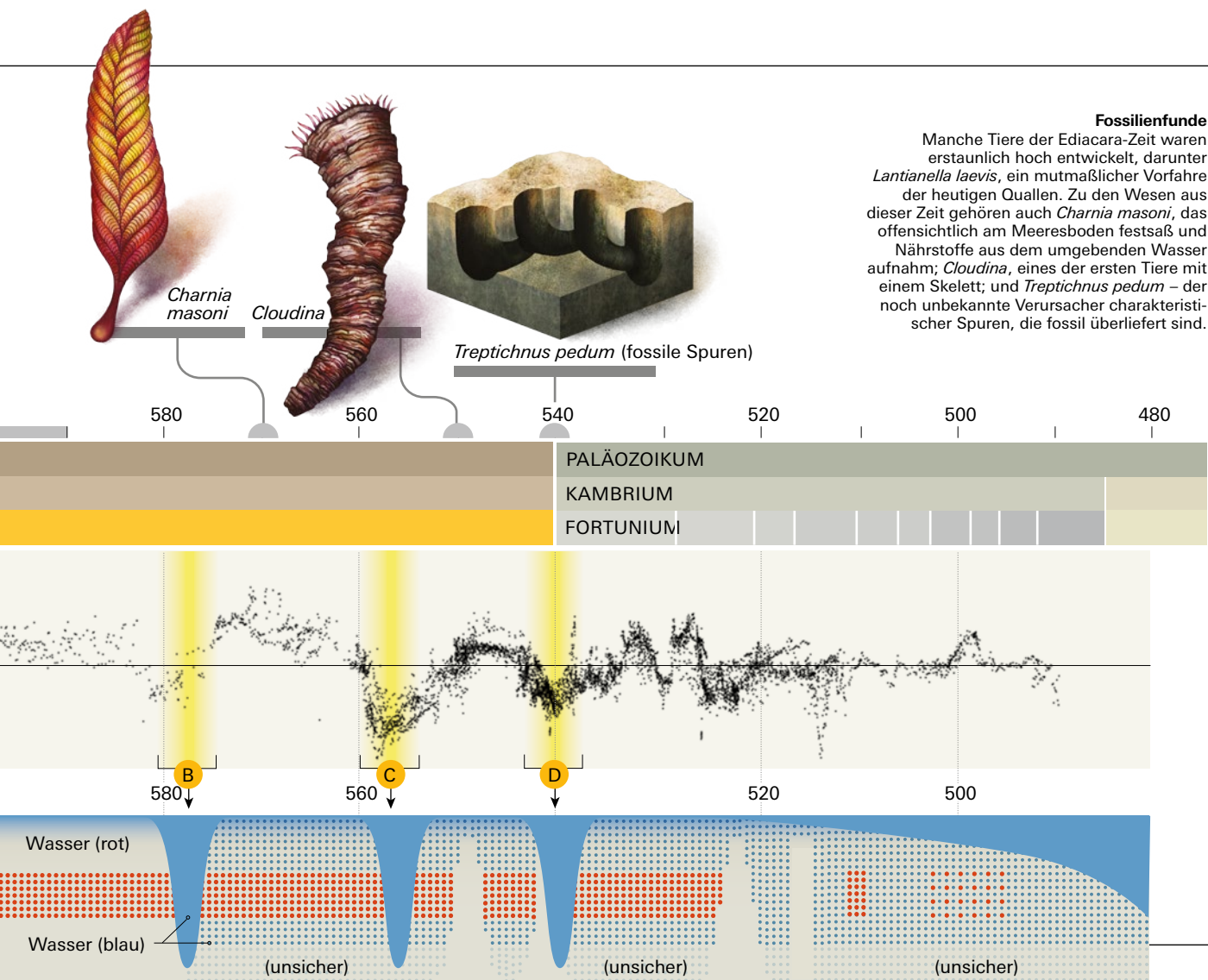
Auch *Namapoikia*, ein Tier, das man nur von Fossilienfundstätten in Namibia kennt, tat sich gern mit *Cloudina* zusammen. Bemerkenswert ist dieses Wesen vor allem wegen seiner Größe – es hatte einen Durchmesser von bis zu einem Meter – und seines robusten Skeletts. Angesichts seiner Körperform erscheint es möglich, dass *Namapoikia* ein Schwamm war; als solcher hätte er ein Innenskelett besessen, während *Cloudina* und *Namacalathus* vermutlich ein Außenskelett hatten. Interessanterweise wuchs *Namapoikia* an geschützten Stellen der Riffe, überzog beispielsweise die steilen Wände von Spalten und Rissen. Heutige Riffe weisen diesbezüglich unterschiedliche Lebensgemeinschaften auf: Auf offenen Flächen siedeln andere Tiere und Pflanzen als in versteckten Regionen wie Höhlen, Klüften oder unter Überhängen. Die Ediacara-Fossilien lassen erahnen, dass derartige Unterschiede schon damals bestanden.

Von Bedeutung ist das alles, weil der Riffbau eine wichtige ökologische Neuerung darstellte. Wenn Individuen dicht

beieinander wachsen und sich sogar untereinander verkitten, wird ihre Gemeinschaft mechanisch robuster, kann sich über den Meeresboden und über den Lebensraum von Konkurrenten erheben, kann Nährstoffe effektiver aufnehmen und sich besser vor natürlichen Feinden schützen. So wie das Aufkommen von Skeletten zeigt deshalb auch das Erscheinen von Riffen im Ediacarium an, dass sich die Umwelt in jener Zeit massiv wandelte und dies mit stark veränderten Selektionsdrücken einherging. Jahrmillionen vor der kambrischen Explosion hatte der Rüstungswettlauf zwischen Räuber und Beute bereits begonnen.

### Unscharfer Übergang

Der Übergang vom Ediacarium zum Kambrium war offenbar keine plötzliche, dramatische Wende. Nicht nur setzten die Evolution von Skeletten und der Riffbau deutlich früher ein als lange angenommen – wie aus Modellen der damaligen Ökosysteme hervorgeht, besaßen die Lebensgemeinschaften beider Zeitabschnitte zudem viele ähnliche ökologische Merkmale. Neuere Entdeckungen in Sibirien und China lassen die Grenze noch weiter verschwimmen. So haben Forscher aus China und Deutschland festgestellt,



FOSSILIEN OBEN: FRANZ ANTHONY / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2019; GRAFIK UNTEN: SCIENTIFIC AMERICAN NACH WOOD, R. ET AL.: INTEGRATED RECORDS OF ENVIRONMENTAL CHANGE AND EVOLUTION CHALLENGE THE CAMBRIAN EXPLOSION, NATURE ECOLOGY & EVOLUTION 3, 2019, FIG. 1

dass *Cloudina* bis ins Kambrium hinein existierte. Meine eigene Arbeitsgruppe ist zusammen mit Kollegen aus Russland und China in Ediacara-Sedimenten auf Fossilien gestoßen, die zuvor ausschließlich aus dem Kambrium bekannt gewesen waren. Solche Befunde bestärken uns in unserer Überzeugung: Wenn wir das Rätsel der kambri-schen Explosion lösen wollen, müssen wir das Geschehen im Ediacarium besser rekonstruieren, da in ihm die Tiere ihren Ursprung hatten.

Von besonders großem Interesse in diesem Zusammen-hang ist der Sauerstoffgehalt in den Meeren jener Zeit. Tiere benötigen Sauerstoff (O<sub>2</sub>) zum Leben, und deshalb dreht sich eine zentrale Debatte unter Wissenschaftlern darum, ob seine Konzentration irgendwann während des Ediacariums oder Kambriums über einen bestimmten Schwellenwert stieg, der die Entfaltung der Fauna ermög-lichte. Das ist eine schwierige Frage, denn nicht alle Tiere haben den gleichen Sauerstoffbedarf. Schwämme und andere einfache, unbewegliche Organismen brauchen häufig weniger davon als mobile Arten. Und mit Sicherheit benötigen sie viel weniger Sauerstoff als aktive, schnell schwimmende Räuber.

Zum Glück haben Forscher in den zurückliegenden Jahren viele geochemische Methoden entwickelt, mit denen sich der Sauerstoffgehalt in den Meeren des Ediacariums abschätzen lässt. Ein besonders leistungsfähiges Verfahren nutzt die Tatsache, dass sich verschiedene Eisenverbindungen unterschiedlich verhalten, je nachdem, ob O<sub>2</sub> vorhanden ist oder nicht. Mit seiner Hilfe können wir eine Vorstellung davon bekommen, wo und wann genü-gend Sauerstoff zur Verfügung stand, um die Existenz komplexer tierischer Lebensformen zu ermöglichen. Studien, die dieses Verfahren angewendet haben, kamen weit-gehend übereinstimmend zu dem Schluss: Die Menge des

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/evolution](http://spektrum.de/t/evolution)



FOTOLIA / HLPHOTO

in den Ozeanen gelöstes  $O_2$  kletterte während des Ediacariums wahrscheinlich auf Werte, die es den Tieren erlaubten, aktiver und beweglicher zu werden.

Mittlerweile liegen so viele geochemische Daten vor, dass wir den Gehalt und die Verteilung des Sauerstoffs nicht nur für einzelne Ediacara-Fundstätten rekonstruieren können, sondern auch im globalen Maßstab und im erdgeschichtlichen Verlauf. Für die Abschnitte des Ediacariums und des Kambriums erkennen wir dabei Muster, die sich beträchtlich von den heutigen unterscheiden. In vielen Regionen lag offenbar eine recht dünne Schicht sauerstoffhaltigen Wassers auf einem mächtigen Wasserkörper, der praktisch überhaupt kein gelöstes  $O_2$  enthielt – ein Zustand, den Fachleute als Anoxie bezeichnen.

Die Messdaten zeigen außerdem, dass die Grenze zwischen sauerstoffarmem und sauerstoffhaltigem Wasser während dieses Zeitraums sehr dynamisch war: Sie stieg und fiel mit den wechselnden Ständen des Meeresspiegels.

Flachwasserregionen, die sich als Lebensräume erster Tiere eigneten, waren daher vermutlich eher selten und klein – sie stellten regelrechte Oasen sauerstoffreichen Wassers in einer anoxischen »Wüste« dar. Wenn sich die Evolution während des Ediacariums und Kambriums bei relativ niedrigen Sauerstoffkonzentrationen, aber unter ökologisch stark schwankenden Bedingungen abspielte, wie hat sich das auf die Bildung neuer Arten ausgewirkt?

Phasen eines ausgeprägten Sauerstoffmangels in den Meeren fallen mit einigen Massenaussterben zusammen, etwa mit dem an der Perm-Trias-Grenze vor 252 Millionen Jahren, dem mehr als 90 Prozent aller marinen Arten zum Opfer fielen. Doch auch große Entstehungsschübe neuer Arten – etwa am Beginn des Kambriums, 100 Millionen Jahre später im Ordovizium oder vor rund 247 Millionen Jahren während der Trias – begannen während ausgedehnter anoxischer Perioden. Daher vermuten mein Kollege Doug Erwin von der Smithsonian Institution und ich, die

## Versteinerte Organismen

*Cloudina* gehört zu den ältesten Lebewesen mit einem Außenskelett. Man kennt es von Fossilien, bei denen sich das zarte, röhrenförmige Gehäuse erhalten hat (oben links). Die Individuen von *Cloudina* konnten sich untereinander verkitten und Riffe bilden. Eine andere frühe Lebensform mit Skelett ist *Namacalathus*, dessen becherförmige Hartteile in großer Zahl erhalten geblieben sind (oben rechts). Häufig findet man *Cloudina* und *Namacalathus* dicht beieinander (unten links). *Namapoikia*, ein früher Schwamm, scheint ebenfalls ein häufiger Nachbar von *Cloudina* gewesen zu sein; er siedelte in geschützten Spalten der Riffe (unten rechts).



RACHEL A. WOOD

schwankende Verfügbarkeit von Sauerstoff während des Ediacariums könnte entscheidend daran mitgewirkt haben, dass die damaligen Tiere mit ihren weichen Körpern evolutionäre Neuerungen entwickelten.

Wenn der Sauerstoffgehalt im Meerwasser oberhalb von zehn Mikromol pro Liter liegt, fällt es Tieren viel leichter, ein Skelett aus Kalziumkarbonat zu bilden – jenem Material, aus dem auch die Gehäuse vieler heutiger Meeresorganismen bestehen. Vielleicht konnte dieses Körpermerkmal deshalb erst massenhaft auftreten, als die Sauerstoffwerte weltweit über die jene Schwelle gestiegen waren, weshalb entsprechende Formen im Rückblick vermeintlich plötzlich und unvermittelt auftraten. Es ist aber noch weitgehend unklar, wie Lebewesen in evolutionären Zeiträumen auf schwankende Sauerstoffmengen reagieren. Vermutlich war das im Detail sehr kompliziert, denn die Tiere mussten mit zusätzlichen Faktoren wie einem wachsenden Verfolgungsdruck durch Räuber zurechtkommen. Auch die (überwiegend unbekannt) Rückkopplungen zwischen Individuen, Ökosystemen und dem Erdsystem als Ganzem fließen hier mit ein.

### Lückenhafter Befund

Während des Ediacariums und Kambriums hat es in den Prozessen, die die Erdkruste formten, vielerorts einschneidende Umwälzungen gegeben. Infolgedessen weisen die geologischen und die Fossilienbefunde aus dieser Zeit große Lücken auf. Wir können den Aufstieg der komplexen Tiere deshalb nur rekonstruieren, indem wir Daten zusammenpuzzeln, die von zahlreichen Fundorten rund um den Globus stammen. Erschwerend kommt hinzu, dass viele wichtige Ediacara-Fundstätten bis heute schlecht datiert sind. In der Regel bestimmen wir das Alter entsprechender Gesteine, indem wir das Mengenverhältnis von Blei- und Uranisotopen in benachbarten Ascheschichten früherer Vulkanausbrüche bestimmen. Dies ist eine der wenigen Methoden, die absolute radiometrische Alterswerte für Gesteine liefern. Leider fehlen an vielen bedeutenden Fundstätten aber entsprechende Ascheschichten. Deshalb können wir evolutionäre Veränderungen, die sich damals in verschiedenen Teilen der Welt abgespielt haben, nicht exakt zueinander in Beziehung setzen – womit uns ein verlässlicher Zeitrahmen der Ereignisse fehlt. Ein Musterbeispiel hierfür ist die bereits erwähnte und heftig umstrittene Lantian-Formation in China: Sie enthält die möglicherweise ältesten Tierfossilien der Welt, doch ihr Alter lässt sich nicht genauer ermitteln als irgendwo zwischen 635 und 590 Millionen Jahren.

Dennoch gibt es Grund für Optimismus. Neue Ascheschichten werden entdeckt und die Datierungsmethoden weiter verfeinert. So haben Forscher bestimmte Sedimente, die zur Altersbestimmung von Ediacara-Fossilien in Namibia dienen, kürzlich neu untersucht. Wie sich dabei herausstellte, sind die jüngsten unter ihnen – die der Grenze zwischen Präkambrium und Kambrium am nächsten liegen – mehr als zwei Millionen Jahre jünger als zuvor angenommen. Das wirft Fragen dazu auf, wie sich diese Fossilien zu denen von anderen Fundorten verhalten. Zudem entwickeln Geochemiker neue Isotopentechniken und

## Keine Tiere, sondern Flechten oder Einzeller?

Die meisten Forscher sehen in den Ediacara-Fossilien die Überreste früher vielzelliger Tiere. Einige Wissenschaftler schlagen allerdings andere Deutungen vor. Zu ihnen gehört der Geologe und Paläontologe Gregory J. Retallack von der University of Oregon. Er vertritt die Ansicht, bei den Ediacara-Wesen könnte es sich um Flechten oder Pilze gehandelt haben, die im Uferbereich oder sogar auf trockenen Böden an Land wuchsen – und nicht auf dem Meeresgrund. Der Paläontologe, der die urzeitlichen Lebensgemeinschaften mit Flechten der heutigen Tundra verglichen hat, präsentiert damit jedoch eine Außenseiter-These.

Der deutsche Paläontologe Adolf Seilacher (1925–2014) wiederum interpretierte die Ediacara-Fossilien als Überbleibsel gigantischer Einzeller – ähnlich den heutigen Xenophyophoren, die in der Tiefsee leben und einen Durchmesser bis zu 25 Zentimeter erreichen, was für einzellige Lebewesen kolossal ist. Die Entwicklungslinie der Ediacara-Organismen, postulierte Seilacher, sei eine völlig andere gewesen als diejenige der vielzelligen Tiere und mit Beginn des Kambriums erloschen. Der Paläontologe prägte den Begriff »Vendobionten« für die hypothetischen Riesen-Einzeller des Ediacariums; einige Wissenschaftler vertreten seine Auffassung bis heute.

**Frank Schubert** ist Redakteur bei »Spektrum«.

**Retallack, G. J.:** Ediacaran life on land. *Nature* 493, 2013

**Seilacher, A. et al.:** Ediacaran biota: The dawn of animal life in the shadow of giant protists. *Palaentological Research* 7, 2003

andere Methoden, mit denen sich die Sauerstoffgehalte in vorzeitlichen Meeren hoffentlich besser rekonstruieren lassen. Schließlich stoßen Wissenschaftler immer wieder auf neue Fossilien an abgelegenen Orten, die bisher weitgehend unerforscht waren, etwa im Süden Sibiriens. All dies wird zu einem nach und nach immer genaueren Bild davon führen, was sich an der Schwelle zum Kambrium zugetragen hat. ◀

### QUELLEN

**Tostevin, R. et al.:** Low-oxygen waters limited habitable space for early animals. *Nature Communications* 7, 2016

**Wood, R. A. et al.:** Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian explosion. *Nature Ecology and Evolution* 3, 2019

**Zhu, M. et al.:** A deep root for the Cambrian explosion: Implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian Platform. *Geology* 45, 2017

# VIROLOGIE PORTRÄT EINES KILLERS

**Weltweit erforschen Wissenschaftler, wie das neue Coronavirus Sars-CoV-2 funktioniert, wo es herkam und wie es sich weiterentwickeln könnte.**



**David Cyranoski** ist Wissenschaftsjournalist und berichtet als Korrespondent der Zeitschrift »Nature« aus Schanghai über Entwicklungen im asiatisch-pazifischen Raum.

► [spektrum.de/artikel/1744790](https://spektrum.de/artikel/1744790)

Im Jahr 1912 rätselten deutsche Tierärzte über den Fall einer fiebrigen Katze mit stark geschwollenem Bauch. Vermutlich handelt es sich dabei um den ersten überlieferten Bericht einer durch Coronaviren ausgelösten Krankheit. Was die Tierärzte damals noch nicht wussten: Coronaviren verursachen auch bei Hühnern Bronchitis und bei Schweinen eine Erkrankung des Verdauungstrakts, an der fast alle betroffenen Ferkel sterben, die weniger als zwei Wochen alt sind.

Die Gemeinsamkeit zwischen den jeweiligen Erregern kam erst in den 1960er Jahren ans Licht, als Forscher in Großbritannien und den Vereinigten Staaten zwei Viren mit kronenähnlichen Strukturen isolierten, die beim Menschen Erkältungen auslösten. Wie die Wissenschaftler bald feststellten, weisen die Viren der infizierten Tiere die gleiche borstige Struktur auf, sie sind gespickt mit stacheligen Eiweißzacken (siehe Grafik rechts). Unter dem Elektronenmikroskop ähnelten sie der Sonnenkorona, weshalb die Forscher 1968 die Bezeichnung Coronaviren für die gesamte Gruppe einführten. Die Familienmitglieder erwiesen sich als vielseitige Killer: Hunde-Coronaviren können Katzen befallen, das Katzen-Coronavirus schädigt Schweine. Beim

**»Wir müssen erhöht wachsam sein und permanent beobachten, ob neue Virenstämme durch zoonotische Übertragung auftauchen«**

Rasmus Nielsen, University of California, Berkeley

Menschen jedoch, so glaubten die Forscher, würden die Viren nur milde Symptome verursachen. Aber 2003 offenbarte der Ausbruch des schweren akuten Atemwegssyndroms Sars (severe acute respiratory syndrome), dass dies ein Irrtum war.

Angesichts der rasant zunehmenden Todesfälle der aktuellen Covid-19-Pandemie (coronavirus disease 2019) bemühen sich die Forscher nun, so viel wie möglich über die Biologie des neuen Coronavirus Sars-CoV-2 herauszufinden. Nach und nach zeichnet sich ein klareres Bild des Erregers ab: Genetische Hinweise deuten darauf hin, dass es sich bereits seit Jahrzehnten in der Natur versteckt hielt. Offenbar entwickelte das Virus dabei eine Reihe von Anpassungen, die es bedrohlicher machen als die Mehrheit der Coronaviren, mit der die Menschheit bisher konfrontiert war. So attackiert Sars-CoV-2 im Gegensatz zu seinen nahen Verwandten rasch menschliche Zellen an mehreren Stellen, wobei Lunge und Rachen die beiden Hauptziele sind. Einmal im Körper, greift das Virus auf ein vielfältiges Arsenal gefährlicher Moleküle zurück.

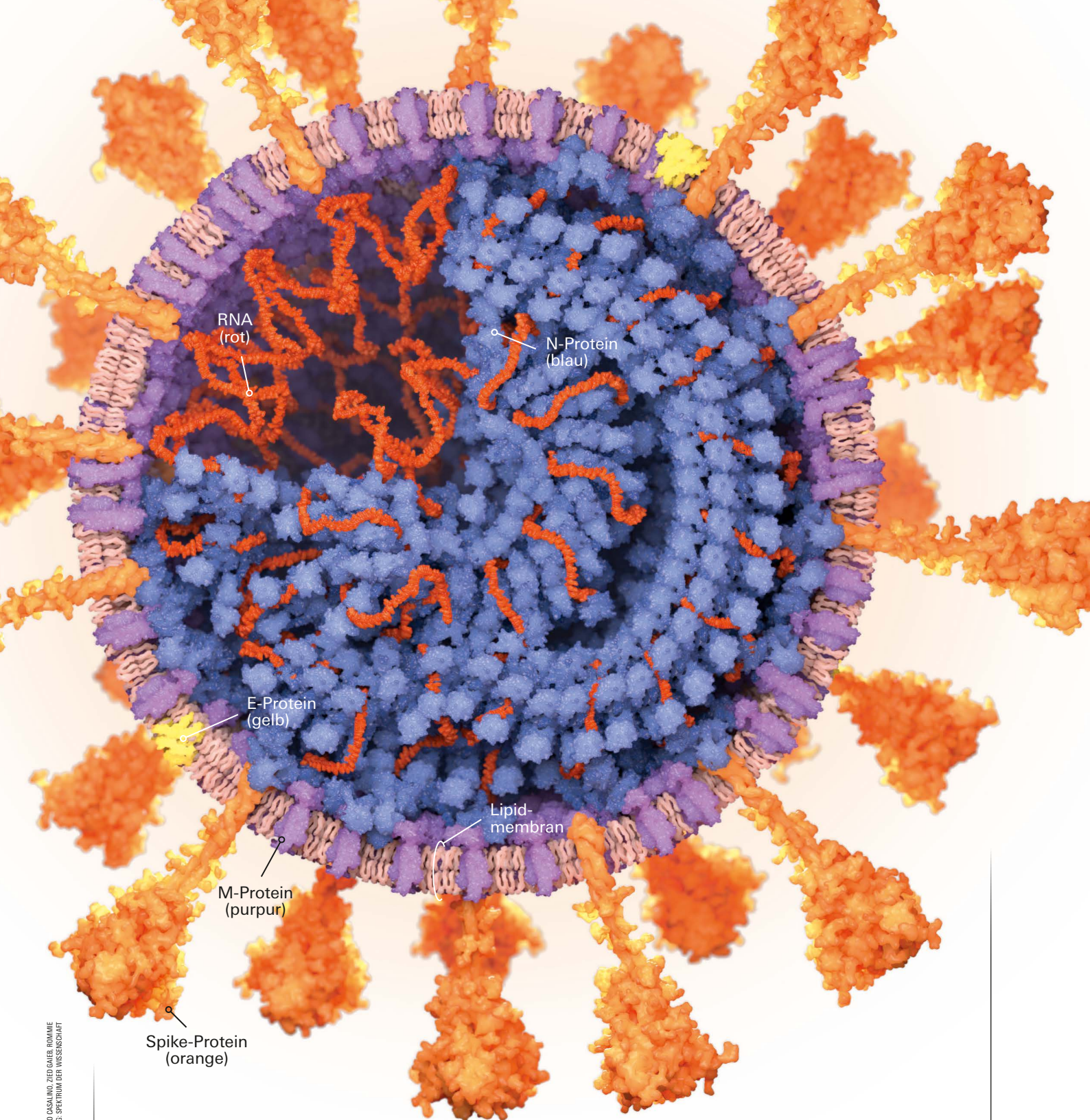
Viele Fragen bleiben allerdings offen, darunter: Wie genau tötet das Virus? Wird es sich zu etwas Bedrohlicherem entwickeln – oder harmloser werden? Was kann es über die nächste Attacke aus der Familie der Coronaviren verraten? »Es wird noch mehr passieren, entweder tut es das schon da draußen, oder es entsteht gerade«, meint Andrew Rambaut, der an der britischen University of Edinburgh die Evolution des Virus erforscht.

Unter den Viren, die den Menschen befallen, gehören Coronaviren zu den größeren Exemplaren. Mit einem Durchmesser von 125 Nanometern erscheinen sie auch vergleichsweise groß innerhalb jener Gruppe von Viren, die RNA zur Vermehrung nutzen und die für die meisten neu aufgetretenen Krankheiten verantwortlich sind. Corona-



VERONICA FALCONER/SHUTTERSTOCK, JEN CHRISTENSEN, NACH LORENZO CASALINO, ZIER GALEB, ROMANE AMARO, IUC SAN DIEGO / SCIENTIFIC AMERICAN, JULI 2020; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT





## Winzig, aber gefährlich

Ein Sars-CoV-2-Viruspartikel hat einen Durchmesser von etwa 100 Nanometern und ist nur in einem Elektronenmikroskop sichtbar. Es besteht aus einer annähernd kugelförmigen Zusammenballung von Proteinen und RNA innerhalb einer Lipidmembran, aus der so genannte Spike-Proteine als lange Fortsätze herausragen. Mit Hilfe dieser Moleküle heftet sich das Virus an menschliche Zellen, die oft hunderte Male größer sind als es selbst, und tritt ins Zellinnere ein. Durch die Fortsätze sieht das Virus ähnlich aus wie eine Krone (»Corona«), was ihm seinen Namen gegeben hat. Bei einem Infektionsvorgang bewegen sich die Strukturproteine N, M und E ins Innere der befallenen Zelle, wo sie dabei helfen, neue Viruspartikel zu bilden.

viren zeichnen sich dabei vor allem durch ihr Erbgut aus: Mit 30000 Nukleotiden besitzen sie das größte Genom aller RNA-Viren (siehe »Bemerkenswertes Virusgenom«, S. 47). Es übersteigt den Erbgutumfang der Erreger von Aids und Hepatitis C um das Dreifache und den von Influenza um mehr als das Doppelte.

Darüber hinaus gehören Coronaviren zu den wenigen RNA-Viren, die einen genetischen Korrekturlesemechanismus besitzen. Das ist wahrscheinlich der Grund dafür, dass bei Covid-19 gängige antivirale Mittel wie Ribavirin versagen, die etwa das Hepatitis-C-Virus stoppen, indem sie Mutationen auslösen. Bei den Coronaviren merzt dieses Korrekturlesen solche Veränderungen wohl wieder aus.

Mutationen können für Viren jedoch auch nützlich sein. Influenzaviren beispielsweise mutieren dreimal häufiger als Coronaviren und schaffen es damit, Impfstoffe zu umgehen. Coronaviren hingegen nutzen einen ganz besonderen Trick: Sie ordnen ihr genetisches Material öfter neu an und tauschen dabei Stücke ihrer RNA mit anderen Coronaviren aus. Meist handelt es sich dabei um einen wenig produktiven Handel mit ähnlichen Teilen zwischen ähnlichen Viren. Doch wenn zwei entfernt verwandte Coronaviren in derselben Zelle landen, bringt eine derartige Rekombination nach Ansicht von Rambaut mitunter beeindruckende Versionen hervor, die sowohl neue Zelltypen infizieren als auch auf andere Spezies überspringen können.

### Dunkle Herkunft

Bei Fledermäusen tauchen solche Rekombinationen recht häufig auf. Von insgesamt 61 Fledermausviren, die bekanntermaßen auch Menschen befallen, beherbergen manche Fledermausarten bis zu einem Dutzend gleichzeitig. Dabei schaden die Viren den Tieren meist gar nicht. Es gibt mehrere Theorien darüber, warum das so ist. So geht eine im Februar 2020 veröffentlichte Studie davon aus, dass infizierte Fledermauszellen Immunantworten einleiten, welche

## »Ist Sars-CoV-2 erst einmal in der Lunge, wirkt es wahrscheinlich genauso tödlich wie der Sars-Erreger«

Stanley Perlman, University of Iowa

die Viren veranlassen, schnell von einer Zelle zu anderen überzugehen. Das verhindert das Absterben der jeweiligen infizierten Zellen.

Wann tauchte das erste Coronavirus auf? Vor 300 Millionen oder erst vor 10000 Jahren? Die Schätzungen darüber schwanken stark. Heutzutage kennen Wissenschaftler Dutzende Stämme, von denen sieben ebenfalls den Menschen infizieren. Von den insgesamt vier Stämmen, die gewöhnliche Erkältungen auslösen, kommen zwei (OC43 und HKU1) in Nagetieren und die beiden anderen (229E und NL63) in Fledermäusen vor. Die drei, die teils schwere bis tödliche Krankheiten verursachen – das Sars-Virus Sars-CoV, der Erreger Mers-CoV (Middle East respiratory syndrome) sowie das neue Sars-CoV-2 –, stammen alle von Fledermäusen. Wissenschaftler gehen jedoch davon aus, dass die Übertragung auf den Menschen in der Regel über einen Vermittler, ein von Fledermäusen infiziertes Tier, verläuft. So gelten auf chinesischen Tiermärkten angebotene Zibetkatten bei Sars als Zwischenwirt.

Die Herkunft von Sars-CoV-2 ist immer noch unbekannt. Das Virus teilt 96 Prozent seines Erbguts mit einem Virus, das bei einer Fledermaus in einer Höhle in der chinesischen Provinz Yunnan gefunden wurde (siehe »Spektrum« Mai 2020, S. 32). Gleichwohl gibt es einen entscheidenden Unterschied: Die Spike-Proteine von Coronaviren besitzen eine so genannte Rezeptorbindungsdomäne, mit der das Virus in menschliche Zellen eindringen kann. Die sehr effizient wirkende Sars-CoV-2-Bindungsdomäne unterscheidet sich in wichtigen Punkten von der des Yunnan-Fledermausvirus, das offenbar Menschen nicht befallen kann.

Weiter verkompliziert wird die Sache durch ein als Pangolin bezeichnetes Schuppentier, bei dem man ein Coronavirus mit einer zur menschlichen Version fast identischen Rezeptorbindungsdomäne fand. Da jedoch der Rest des Virusgenoms nur zu 90 Prozent übereinstimmt, schließen manche Forscher das Schuppentier als Zwischenwirt aus.

Die Tatsache, dass sowohl Mutationen als auch Rekombinationen das Virus verändern, macht es besonders schwierig, einen Stammbaum zu erstellen. In den vergangenen Monaten erschienen dazu verschiedene Studien, die allerdings noch nicht von Fachkollegen beim so genannten Peer-Review überprüft wurden. Sie deuten darauf hin, dass sich Sars-CoV-2 – oder ein sehr ähnlicher Vorläufer – seit Jahrzehnten in verschiedenen Tieren versteckt hält. So spaltete sich laut einem im März 2020 vorab veröffentlichten Artikel die Coronavirus-Linie, die schließlich zu Sars-

## AUF EINEN BLICK DAS NEUE CORONAVIRUS UNTER DER LUPE

- 1 Sars-CoV-2 gehört zu den Coronaviren, zu denen harmlose Erkältungsviren, aber auch die Auslöser der oft tödlichen Erkrankungen Sars und Mers zählen. Die Viren gelangten über Tiere auf den Menschen.
- 2 Im Gegensatz zum Sars-Erreger infiziert Sars-CoV-2 meist den Rachen. Von da aus oder direkt erreicht es mitunter die Lunge – was sich fatal auswirkt. Andere Organe können ebenfalls betroffen sein.
- 3 Einige Wissenschaftler hoffen, dass das Virus sich mit der Zeit an den Menschen anpasst und somit ungefährlicher wird. Beweise für diese These gibt es allerdings noch nicht.

CoV-2 führte, vor mehr als 140 Jahren von den eng verwandten Formen ab, die man heute bei Schuppentieren findet. Irgendwann in den vergangenen 40 bis 70 Jahren trennten sich demnach dann die Vorläufer von Sars-CoV-2 von der Fledermausversion, die daraufhin die effektive Rezeptorbindungsdomäne verlor – in Sars-CoV-2 allerdings verblieb (siehe »Stammbaum der Coronaviren«, S. 48). Die Arbeitsgruppe des Evolutionsbiologen Rasmus Nielsen von der University of California in Berkeley zog mit einer anderen Datierungsmethode ähnliche Schlüsse.

Damit zeichnet sich eine lange Familiengeschichte ab, wobei etliche Zweige der Coronaviren in Fledermäusen und Schuppentieren dieselbe gefährliche Rezeptorbindungsdomäne wie Sars-CoV-2 tragen. Darunter befänden sich auch einige mit Pandemiepotenzial, meint Nielsen und betont: »Wir müssen erhöht wachsam sein und permanent beobachten, ob neue Virusstämme durch zoonotische Übertragung auftauchen.«

### Ein leichter Husten kann sich zur schweren Lungenentzündung entwickeln

Obwohl die bekannten menschlichen Coronaviren viele Zelltypen infizieren können, verursachen sie alle in erster Linie Atemwegsinfektionen. Der Unterschied besteht darin, dass die vier, die gewöhnliche Erkältungen auslösen, leicht die oberen Atemwege befallen, während Mers-CoV und Sars-CoV dort schlechter angreifen können. Stattdessen infizieren letztere erfolgreicher die Zellen der Lunge.

Sars-CoV-2 vermag leider beides sehr effizient. Damit verfüge es über zwei Möglichkeiten, sich im Körper einzunisten, erklärt der Pathologe Shu-Yuan Xiao von der University of Chicago: Erreichen uns zehn Viruspartikel vom Husten eines weiter entfernten Gegenübers, lösen diese vielleicht eine Infektion im Hals aus. Die dort befindlichen Flimmerhärchen werden aber wahrscheinlich die Eindringlinge zügig beseitigen. Kommt unser Gegenüber uns hingegen näher und hustet 100 oder mehr Viruspartikel in unsere Richtung aus, könnten es manche bis in die Lunge schaffen.

Diese zwei verschiedenen Infektionswege könnten erklären, warum Covid-19-Patienten so unterschiedliche Erfahrungen machen. Die Infektion beginnt eventuell im Rachen oder in der Nase, löst Husten aus, beeinträchtigt Geschmack und Geruch – und endet dort auch schon. Oder aber sie breitet sich bis in die Lunge aus und schädigt diese. Auf welchem Weg das Virus dort hinuntergelangt – etwa indem es sich von Zelle zu Zelle hangelt oder irgendwie nach unten gespült wird –, sei unbekannt, sagt der Immunologe und Coronaviren-Experte Stanley Perlman von der University of Iowa.

Nach Ansicht von Clemens Wendtner, Chefarzt an der Münchner Klinik Schwabing, könnte es auch am Immunsystem liegen, warum das Virus manchmal die Lungen erreicht. Die meisten Infizierten bilden neutralisierende Antikörper, die an das Virus binden und es so daran hindern, in eine Zelle einzudringen. Doch einige Menschen seien wohl nicht in der Lage, diese Antikörper zu produzieren, erklärt Wendtner. Das könnte der Grund dafür sein, warum sich manche Patienten nach einer Woche mit leichten Symptomen erholen, während andere von einer

später einsetzenden Lungenentzündung heimgesucht werden.

Wie erwähnt kann das Virus aber offenbar auch die Rachenzellen umgehen und direkt in die Lunge gelangen. Solche Patienten könnten eine Lungenentzündung bekommen ohne die üblichen milden Anfangssymptome wie Husten oder leichtes Fieber, so Wendtner. Durch diese zwei Infektionswege verbinde Sars-CoV-2 die Übertragbarkeit der gewöhnlichen Erkältungsviren mit der Letalität von Mers und Sars – eine »unglückliche und gefährliche Kombination«.

Die Fähigkeit des Virus, die oberen Atemwege zu infizieren, überraschte die Forscher, weil sein genetischer Verwandter Sars-CoV das nicht vermag. Wendtners Team konnte das Virus aus dem Rachen von neun Covid-19-Patienten kultivieren, was zeigt, dass der Erreger sich hier vermehrt und infektiös ist. Das erklärt einen entscheidenden Unterschied zwischen den nahen Verwandten: Noch bevor Symptome auftreten, kann Sars-CoV-2 Viruspartikel aus dem Rachen in den Speichel absondern, die dann wiederum leicht von Mensch zu Mensch wandern. Sars-CoV hingegen agierte weit weniger effizient, da es nur dann übertragen wurde, wenn bereits ausgeprägte Symptome auftraten. Aus diesem Grund ließ es viel leichter eindämmen.

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ROBERT WEI / GETTY IMAGES / IStock

Aus den unterschiedlichen Infektionswegen von Sars-CoV-2 resultierte vielleicht eine gewisse Verwirrung über dessen Letalität. Experten und Medienberichte beschreiben das Virus üblicherweise als weniger gefährlich, weil es maximal ein Prozent der Infizierten tötet, während es bei Sars-CoV etwa zehnmal so viele waren. Perlman sieht das jedoch anders: Viele Infektionen von Sars-CoV-2 gelangen zwar nicht in die unteren Atemwege – »ist es aber erst einmal in der Lunge, wirkt es wahrscheinlich genauso tödlich«.

Trotz einiger Unklarheiten scheint sich der Covid-19-Erreger in der Lunge ähnlich zu verhalten wie andere Atemwegsviren: Wie Sars-CoV und Influenza infiziert und zerstört es die Alveolen, die den Sauerstoff in den Blutkreislauf abgeben. Sobald die zelluläre Barriere, die diese Lungenbläschen von den Blutgefäßen trennt, zusammenbricht, tritt Flüssigkeit aus den Gefäßen aus und verhindert die Sauerstoffübertragung ins Blut.

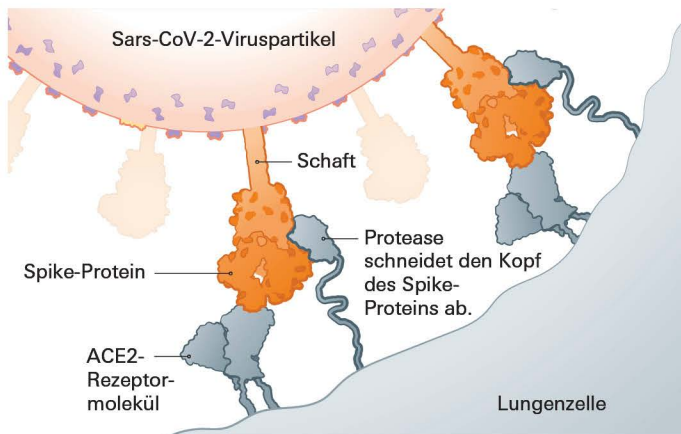
Andere Zellen, darunter weiße Blutkörperchen, verstopfen zusätzlich die Atemwege. Eine angemessene Immunantwort sollte all dies beseitigen, eine Überreaktion des Immunsystems kann den Schaden jedoch weiter verschlimmern. Bei sehr schwer wiegenden Entzündungen und

# Virusinvasion und Immunantwort

Sars-CoV-2-Partikel dringen durch Nase oder Mund ein, gelangen in die Atemwege und erreichen schließlich Lungenzellen, auf denen Rezeptormoleküle namens ACE2 sitzen. Die Erreger binden sich daran, schlüpfen ins Zellinnere und nutzen die Zellmaschinerie, um sich selbst zu vervielfältigen. Die neu gebildeten Viruspartikel brechen aus ihren Wirtszellen aus und befallen weitere Ziele. Infizierte Zellen senden Alarmsignale ans körpereigene Immunsystem, um Abwehrreaktionen einzuleiten, doch die Erreger können diese Signale unterdrücken und so Zeit gewinnen, um sich zu vermehren.

## 1 Bindung an eine Lungenzelle

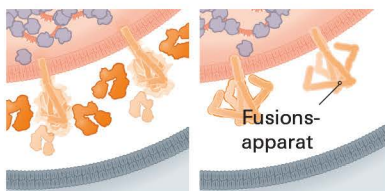
Wenn sich ein virales Spike-Protein an ein ACE2-Rezeptormolekül auf der Zielzelle heftet, schneidet ein zelluläres Protease-Enzym (vermutlich Furin) den Kopf des Spikes ab. Dies setzt eine Maschinerie in Gang, die im Schaft des Spike-Proteins wie eine zusammengedrückte Feder verharrt und nach ihrer Aktivierung dafür sorgt, dass das Virus mit seiner Zielzelle fusioniert. ACE2 ist normalerweise an der Regulierung des Blutdrucks beteiligt.



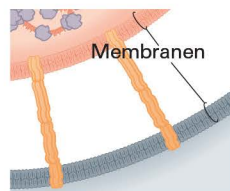
## 2 Eindringen

Die Membranen des Viruspartikels und der Lungenzelle verschmelzen, was es der viralen RNA – dem Erbmolekül des Erregers – erlaubt, ins Innere der Zelle zu gelangen.

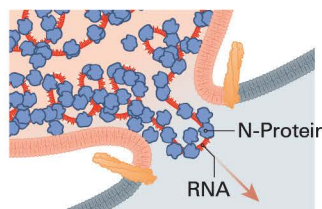
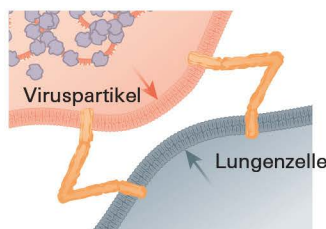
Die »Enthaftung« des Spike-Proteins aktiviert den Fusionsmechanismus.



Der Apparat verankert sich in der Zellmembran ...



... und drückt die Lipidmembranen des Viruspartikels und der Zelle zusammen.

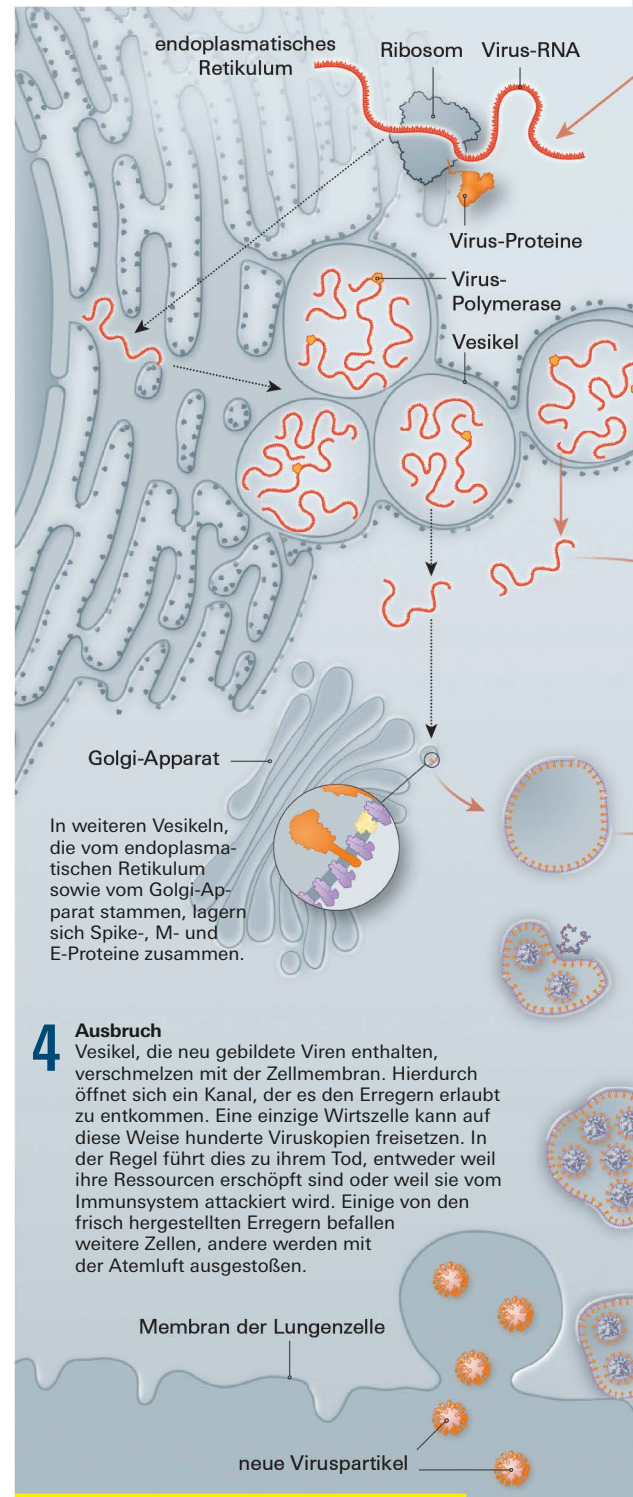


Ein Kanal entsteht, durch den die N-Proteine und die RNA des Virus in die Zielzelle eintreten.

**VERGANGENE ZEIT: RUND 10 MINUTEN**

## 3 Vermehrung

Sobald sich die Virus-RNA im Zellinnern befindet, versorgt sie die zellulären Ribosomen mit etwa zwei Dutzend Genen, die diese in Proteine übersetzen. Einige davon veranlassen das endoplasmatische Retikulum, ein verzweigtes Kanalsystem in der Zelle, dazu, Vesikel auszubilden. Innerhalb dieser Bläschen erzeugt eine viruseigene Kopiermaschine (eine Polymerase) zahlreiche Abschriften der Virus-RNA. Manche davon dienen zur Herstellung weiterer Virusbestandteile, etwa der Spike-Proteine. Andere werden in neuen Viruspartikeln verpackt, die aus der Lungenzelle ausbrechen.



In weiteren Vesikeln, die vom endoplasmatischen Retikulum sowie vom Golgi-Apparat stammen, lagern sich Spike-, M- und E-Proteine zusammen.

## 4 Ausbruch

Vesikel, die neu gebildete Viren enthalten, verschmelzen mit der Zellmembran. Hierdurch öffnet sich ein Kanal, der es den Erregern erlaubt zu entkommen. Eine einzige Wirtszelle kann auf diese Weise hunderte Viruskopien freisetzen. In der Regel führt dies zu ihrem Tod, entweder weil ihre Ressourcen erschöpft sind oder weil sie vom Immunsystem attackiert wird. Einige von den frisch hergestellten Erregern befallen weitere Zellen, andere werden mit der Atemluft ausgestoßen.

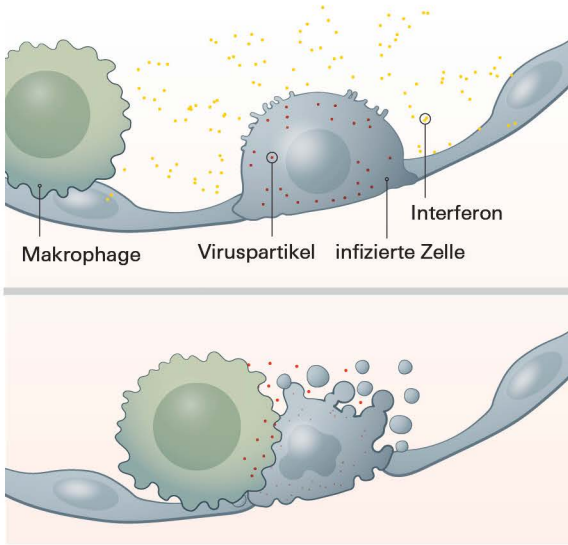
**VERGANGENE ZEIT: RUND 10 STUNDEN**

## 5 Immunabwehr

Während die Infektion fortschreitet, versucht das angeborene Immunsystem, die Lungenzellen vor Virenbefall zu schützen. Das adaptive Immunsystem entwickelt zielgerichtete Abwehrmaßnahmen gegen Sars-CoV-2.

### Angeborene Immunabwehr:

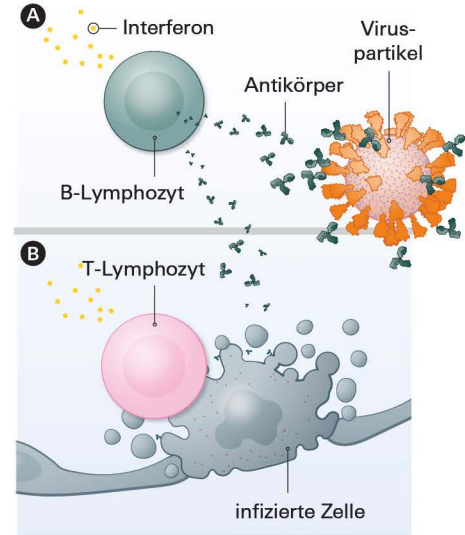
Infizierte Zellen setzen Interferone frei – Proteine, die benachbarte Zellen alarmieren. Die Nachbarzellen erzeugen daraufhin Moleküle, die Viruspartikel am Eindringen ins Zellinnere oder an der Vermehrung hindern. Interferone veranlassen zudem Makrophagen im Blut, Viruspartikel zu beseitigen.



VERGANGENE ZEIT: 0–3 TAGE

### Adaptive Immunabwehr:

Interferone alarmieren weiterhin so genannte B-Lymphozyten. Diese Immunzellen produzieren neutralisierende Antikörper, die sich spezifisch an das virale Spike-Protein binden (A) und so verhindern, dass es an eine Lungenzelle andockt. Schließlich rufen die Interferone zudem T-Lymphozyten auf den Plan – Immunzellen, die sowohl Viren zerstören als auch infizierte Zellen abtöten, bevor aus diesen die neu gebildeten Viruspartikel ausbrechen (B). Einige B- und T-Lymphozyten entwickeln sich zu Gedächtniszellen, die es der Körperabwehr ermöglichen, künftige Invasionen des Virus rasch zu erkennen und zu bekämpfen.

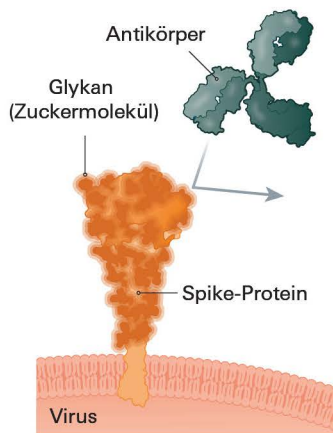


VERGANGENE ZEIT: 6–11 TAGE

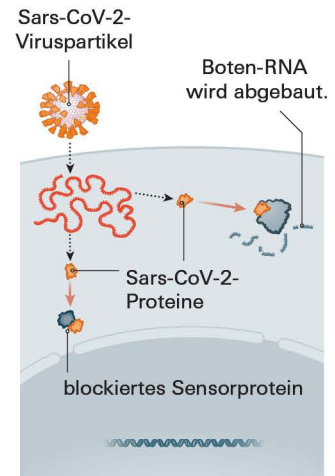
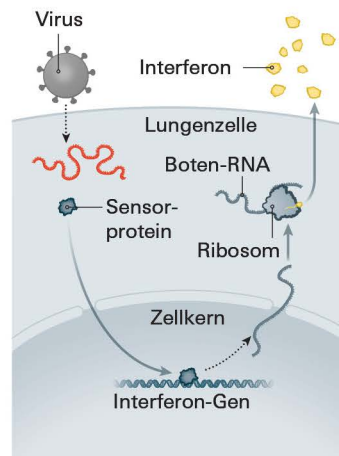
## 6 Virale Gegenmaßnahmen

Sars-CoV-2 nutzt verschiedene Mechanismen, um der Körperabwehr zu entgehen.

Das Spike-Protein des Virus kann sich mit Zuckermolekülen tarnen. Dies hindert Antikörper der Immunabwehr mitunter daran, sich an den Erreger zu koppeln, um ihn zu neutralisieren.



Bestimmte Sensorproteine der Zelle erkennen eindringende Viren normalerweise als fremd und weisen den Zellkern daraufhin an, Boten-RNA-Moleküle zu produzieren, die den zelleigenen Ribosomen als Bauanleitung für Interferon-Proteine dienen. Die frisch hergestellten Interferone verlassen die Zelle anschließend, um benachbarte Zellen sowie das Immunsystem zu alarmieren ...



... Forscher nehmen allerdings an, dass mehrere Sars-CoV-2-Proteine die zelleigenen Sensorproteine blockieren oder die Boten-RNA der Interferone ausschalten.

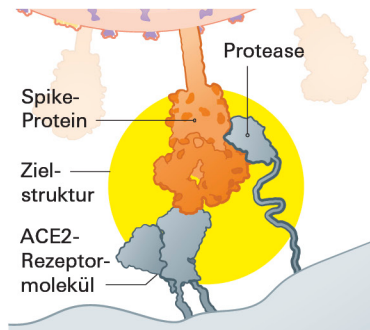
# Behandlung mit Arzneistoffen und Impfung

Kommerzielle Unternehmen und universitäre Arbeitsgruppen rund um den Globus untersuchen weit über 100 Arzneistoffe, um damit Covid-19 zu behandeln – die Krankheit, die das Sars-CoV-2-Virus verursacht. Impfstoffe hingegen helfen weniger, eine aktuell vorliegende Erkrankung zu therapieren, sondern bereiten das Immunsystem darauf vor, künftig eintretende Infektionen schnell und wirksam zu bekämpfen.

## Zielstrukturen von Arzneistoffen

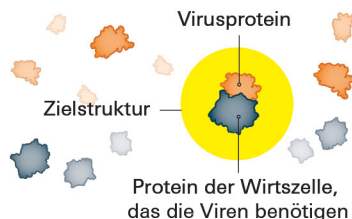
### Viren davon abhalten, in Zellen einzudringen

Die medikamentösen Wirkstoffe oder therapeutischen Antikörper binden sich an das Spike-Protein und vereiteln so, dass es an den ACE2-Rezeptor etwa auf einer Lungenzelle koppelt. Andere Substanzen lagern sich an das zelluläre Enzym Protease an und hindern es daran, das Spike-Protein zu zerschneiden, so dass das Virus nicht mit der Zelle fusionieren kann.



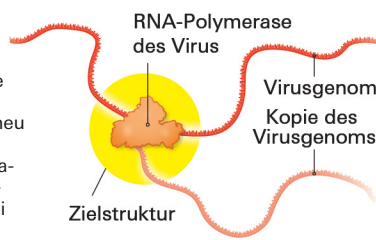
### Die Virusvermehrung abschalten

Medikamentöse Substanzen können auch Proteine in Körperzellen (etwa in Lungenzellen) blockieren, die das Virus zu seiner Replikation benötigt – beispielsweise solche, die an der Herstellung von Virusproteinen mitwirken oder die daran beteiligt sind, die Vesikel hervorzubringen, in denen das Virus sein Erbgut vervielfältigt.



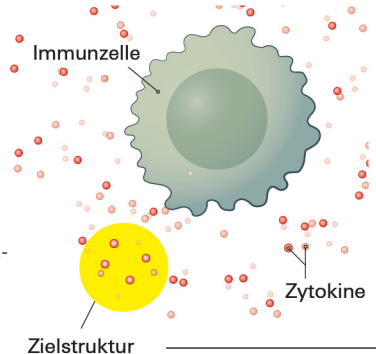
### Das Entstehen schadhafter Viruspartikel fördern

Manche Arzneistoffe beeinflussen die Virus-Polymerase. Diese arbeitet mit einem weiteren Enzym namens ExoN (nicht gezeigt) zusammen, um Fehler zu beheben, die beim Kopieren des viralen Erbguts entstehen; solche Fehler machen die neu gebildeten Viruspartikel manchmal funktionsunfähig. Indem einige medikamentöse Wirkstoffe jene Fehlerkorrektur unterbinden, bewirken sie, dass bei der Vermehrung des Virus mehr funktionslose Exemplare entstehen.



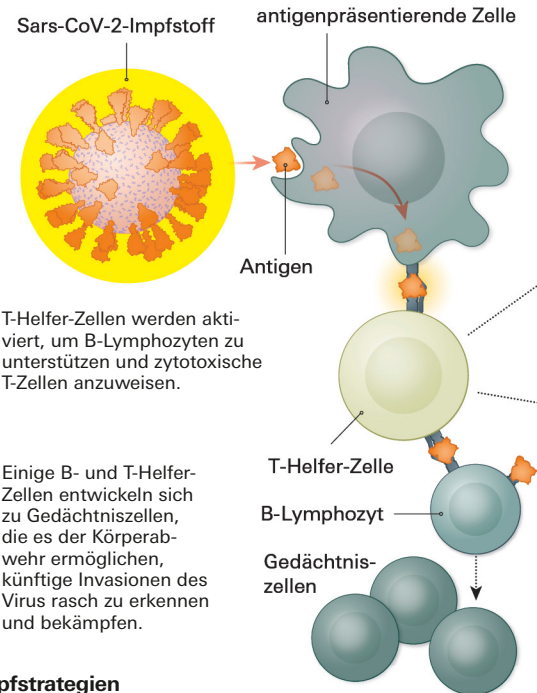
### Überbordende Immunreaktionen dämpfen

Die Körperabwehr schießt mitunter übers Ziel hinaus, indem sie so viele Lungenzellen zerstört, dass deren schleimige Abbauprodukte die Funktion der Lunge blockieren. Die Patienten drohen zu ersticken und müssen beatmet werden. Eine massive Produktion von körpereigenen Signalstoffen wie Zytokinen kann das Immunsystem zu entsprechenden Überreaktionen provozieren. Einige Arzneistoffkandidaten wirken dem entgegen, indem sie solche Signalstoffe hemmen.



## Wie die Antikörper-Reaktion einsetzt

Jene Bestandteile des Virus, an die sich die körpereigenen Antikörper zielgerichtet binden, nennt man Antigene. Gelangen sie in den Körper, werden sie von antigenpräsentierenden Zellen aufgenommen, die sie dann anderen Immunzellen namens T-Helfer-Zellen und B-Lymphozyten vorzeigen. Die B-Lymphozyten produzieren daraufhin Antikörper, die sich gegen das Virus richten; die T-Helfer-Zellen unterstützen sie dabei und weisen außerdem zytotoxische T-Zellen dazu an, infizierte Lungenzellen zu zerstören.



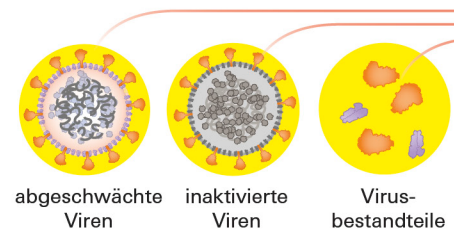
T-Helfer-Zellen werden aktiviert, um B-Lymphozyten zu unterstützen und zytotoxische T-Zellen anzuweisen.

Einige B- und T-Helfer-Zellen entwickeln sich zu Gedächtniszellen, die es der Körperabwehr ermöglichen, künftige Invasionen des Virus rasch zu erkennen und bekämpfen.

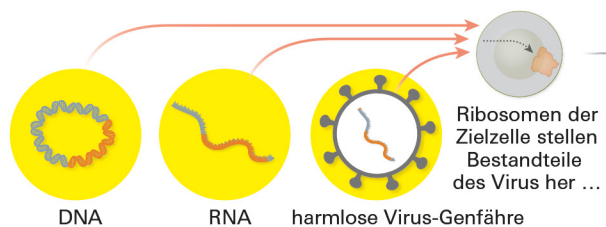
## Impfstrategien

Experten entwickeln mindestens sechs verschiedene Ansätze, um Virus-Vakzinen herzustellen.

### veränderte Versionen des Virus verabreichen

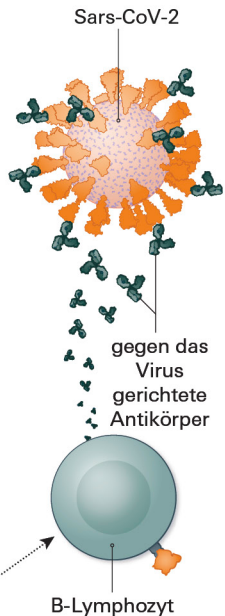


Virus-Gene entschlüsseln (etwa die mit den Bauplänen der Spike-Proteine) und Kopien dieser Gene in den Organismus einführen – entweder in Form von DNA, RNA oder mit Hilfe harmloser viraler Genfähren.



## Möglichkeiten der Impfung

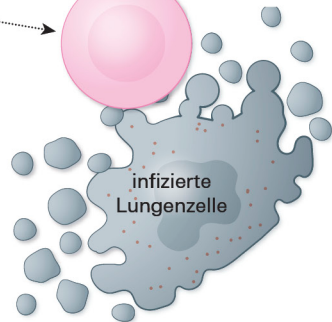
Eine Impfung setzt das Immunsystem entweder veränderten Viren oder Virusbestandteilen aus, so dass es »üben« kann, den Erreger zu bekämpfen. Die dabei entwickelten zielgerichteten Abwehrmaßnahmen merkt sich der Organismus mit Hilfe von Gedächtniszellen, so dass er Invasionen des echten Virus in der Zukunft viel rascher bekämpfen kann. Impfstoffhersteller verfolgen verschiedene Strategien, um Vakzinen zu entwickeln und massenhaft zu produzieren.



gegen das Virus gerichtete Antikörper

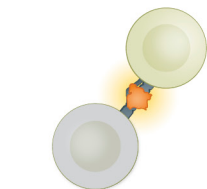
B-Lymphozyt

zytotoxische T-Zelle



infizierte Lungenzelle

antigenpräsentierende Zelle leitet die Immunreaktion ein.



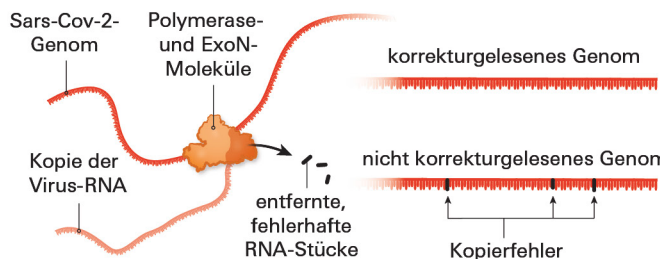
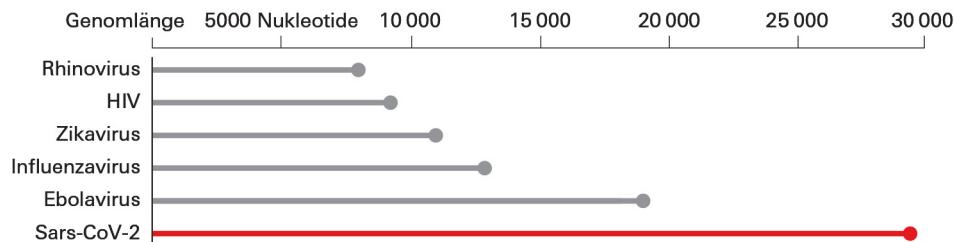
... die die Zelle dann den Immunzellen vorzeigt, was eine Immunreaktion einleitet.

## Bemerkenswertes Virusgenom

Das Genom von Sars-CoV-2 ist ein RNA-Strang mit etwa 29900 Nukleotiden, was verglichen mit anderen RNA-Viren gewaltig anmutet. Bei Influenza-Erregern sind es etwa 13500 Nukleotide und bei Rhinoviren, die gewöhnliche Erkältungen verursachen, rund 8000. Wegen der enormen Größe des Sars-CoV-2-Erbguts können bei dessen Vervielfältigung diverse Kopierfehler auftreten, die die Virusfunktion beeinträchtigen. Der Replikationsapparat des Erregers erkennt solche Fehler aber und korrigiert sie – zumindest bis zu einem gewissen Grad. Diese Qualitätskontrolle ist bei menschlichen Zellen oder auch bei DNA-Viren gang und gäbe, bei RNA-Viren hingegen höchst ungewöhnlich. Das umfangreiche Sars-CoV-2-Genom enthält mehrere Erbanlagen, deren Funktion noch nicht vollständig verstanden ist; einige davon helfen dem Erreger möglicherweise, dem Immunsystem des Wirts zu entgehen.

### Korrekturlesen

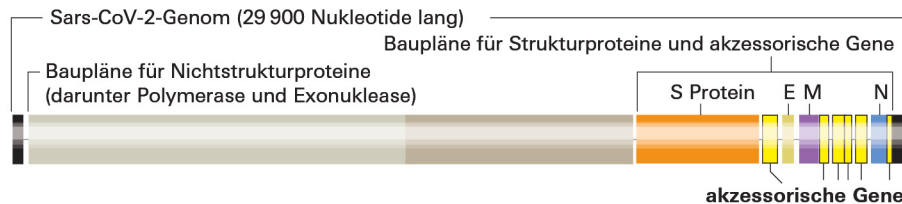
Weil das Sars-CoV-2-Genom so groß ist, kann es eine riesige Menge an Informationen codieren, so dass das Virus mehr Proteine und somit vielleicht auch komplexere Replikationsstrategien nutzen kann als andere RNA-Viren. Zu den Virusproteinen zählt ein Enzym namens Exonuklease (ExoN), das es dem Erreger erlaubt, Kopien seines Erbguts zu kontrollieren und Fehler darin zu beheben. Nur Viren, deren Genom mehr als etwa 20000 Nukleotide umfasst, verfügen über dieses Enzym.



Sobald Sars-CoV-2 eine Lungenzelle infiziert hat, beginnt ein virales Enzym, eine Polymerase, damit, Kopien der Virus-RNA herzustellen, während ein weiteres Enzym, ExoN, zufällig aufgetretene Mutationen in den neu gebildeten Strängen erkennt und korrigiert.

### Rätselhafte Erbanlagen

Ungewöhnlich kurze Teilstücke des Virusgenoms, die als akessorische Gene bezeichnet werden, liegen in räumlicher Nähe zu Erbanlagen, die für virale Strukturproteine codieren. Welche Funktion sie haben, ist nicht vollständig geklärt. Manche Forscher vermuten, die von akessorischen Genen codierten Proteine könnten dem Virus helfen, dem Immunsystem des Wirts zu entgehen.



VERONICA FALCONERI HAYS & JEN CHRISTENSEN, WACH KIM, D. ET AL.: THE ARCHITECTURE OF SARS-CoV-2 TRANSCRIPTOME, CELL 181, 2020 / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2020, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Gewebeschiedigungen erholten sich die Lungen nie wieder, und die Person sterbe oder bleibe mit vernarbten Lungen zurück, erläutert Xiao – »aus pathologischer Sicht nichts Besonderes«. Und wie bei Sars-CoV, Mers-CoV oder tierischen Coronaviren bleibt der Schaden nicht auf die Lungen begrenzt. Eine übermäßige Immunreaktion, die als Zytokinsturm bezeichnet wird, kann sogar zu multiplem Organversagen und zum Tod führen.

Darüber hinaus vermag Sars-CoV-2 offenbar Darm, Herz, Blut, Sperma, Augen und vielleicht das Gehirn zu befallen. Schäden an Niere, Leber und Milz bei Covid-19-Patienten deuten nach Ansicht des chinesischen Pneumologen Guan Wei-jie von der Medizinischen Universität Guangzhou darauf hin, dass das Virus über das Blut die verschiedensten Organe erreicht. Das Virus könnte demnach in der Lage sein, unterschiedliche Gewebe überall dort zu infizieren, wo die Blutversorgung es hinbringt. Doch auch wenn genetisches Material des Virus in diesen Geweben nachgewiesen wurde, sei nicht klar, ob die Schäden dort tatsächlich durch das Virus oder durch einen Zytokinsturm verursacht wurden, ergänzt Wendtner.

### Einbruch in die Zelle

Ob im Rachen oder in der Lunge, Sars-CoV-2 durchbricht mit seinem Spike-Protein die schützende Membran der Wirtszellen (siehe »Virusinvasion und Immunantwort«, S. 44). Zunächst heftet sich die rezeptorbindende Domäne des Proteins an einen auf der Zelloberfläche liegenden Rezeptor namens ACE2 (Angiotensin-konvertierendes Enzym 2). Dieses Protein kommt in Arterien und Venen vor, die sämtliche Organe des Körpers durchziehen. Besonders dicht sitzt es auf den Zellen, die Lungenbläschen und Dünndarm auskleiden.

Obgleich die genauen Mechanismen noch ungeklärt sind, gibt es Hinweise darauf, dass die Wirtszelle nach der Anheftung des Virus das Spike-Protein an einer speziellen Spaltstelle aufschneidet und dabei Fusionspeptide frei

legt – kleine Aminosäureketten, die dabei helfen, die Zellmembran aufzubrechen, so dass die Virusmembran mit ihr verschmilzt. Sobald das genetische Material des Eindringlings in die Zelle gelangt, beginnt es die molekulare Maschinerie des Wirts zu steuern, um neue Viruspartikel zu produzieren. Diese Nachkommen verlassen dann die Zelle und infizieren andere.

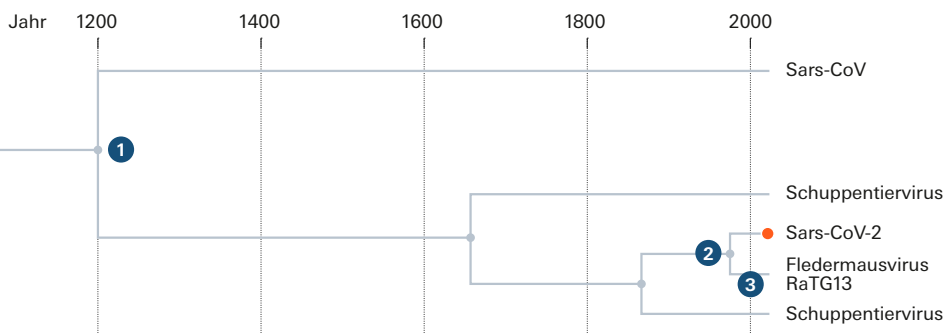
ACE2 wirkt sowohl bei Sars-CoV als auch Sars-CoV-2 als Türöffner: Bei Letzterem ist die rezeptorbindende Domäne jedoch besonders gut geeignet, sich Zugang zu den Zellen zu verschaffen, weil sie sich hier mit einer 10- bis 20-mal höheren Wahrscheinlichkeit anheftet als beim Sars-Erreger. Da Sars-CoV-2 derart leicht die oberen Atemwege infizieren, könne es womöglich sogar einen zweiten Rezeptor geben, mit dem das Virus seinen Angriff starte, spekuliert Wendtner.

Noch beunruhigender ist die Tatsache, dass bei Sars-CoV-2 offenbar die entscheidende Spaltung des viralen Spike-Proteins durch das wirtseigene Enzym Furin erfolgt. Fatalerweise kommt dieses im ganzen Körper vor und ist in den Atemwegen reichlich vorhanden. Auch andere gefährliche Viren wie HIV, Grippe, Dengue oder Ebola nutzen Furin, um in Zellen einzudringen. Im Gegensatz dazu sind die von Sars-CoV verwendeten Spaltungsmoleküle weit weniger wirksam.

Die Beteiligung von Furin dürfte nach Ansicht von Wissenschaftlern erklären, warum Sars-CoV-2 so leicht von Zelle zu Zelle, von Mensch zu Mensch und möglicherweise von Tier zu Mensch springen kann. Der Virologe Robert Garry von der Tulane University in New Orleans schätzt, dass Sars-CoV-2 dadurch eine 100- bis 1000-mal größere Chance als Sars-CoV hat, tief in die Lunge zu gelangen. »Als ich sah, dass Sars-CoV-2 diese Spaltungsstelle besitzt, habe ich in Nacht darauf sehr schlecht geschlafen«, erzählt er.

Mysteriös bleibt, woher die genetischen Anweisungen für die spezielle Angriffsstelle für Furin stammen. Auch wenn das Virus sie wohl durch Rekombination erhalten hat,

## Stammbaum der Coronaviren



Wissenschaftler versuchen, die evolutionäre Herkunft des neuen Coronavirus Sars-CoV-2 zu ergründen. Ein mögliches Szenario zeigt dieser Stammbaum.

1 In der Familie der Coronaviren spalteten sich eventuell vor mehreren Jahrhunderten die Vorläufer von Sars-CoV-2 von dem Sars-Erreger Sars-CoV ab.

2 Das in Fledermäusen vorkommende Coronavirus RaTG13 gilt als nächster Verwandter zu Sars-CoV-2; ihre Wege trennten sich vor vielleicht 70 bis 40 Jahren.

3 Irgendwann verlor die zu RaTG13 führende Linie die Rezeptorbindungsdomäne, mit denen Sars-CoV-2 in menschliche Zellen eindringen kann.

WIKITRUE: NACH DORN, M.F. ET AL. EVOLUTIONARY ORIGINS OF THE SARS-CoV-2 SARS-CORONAVIRUS LINEAGE RESPONSIBLE FOR THE COVID-19 PANDEMIC. BIORxiv, 10.1101/2020.03.09.015506; ZELIG, CHANGSUN, D. PROFILE OF A VIRELLE NATURE. 07. 2020. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



# »Das Virus wird in relativ kurzer Zeit den größten Teil der Weltbevölkerung infizieren und dann in der menschlichen Bevölkerung zirkulieren – wahrscheinlich für immer«

Klaus Stöhr, WHO

wurde sie bisher bei keinem anderen Coronavirus nachgewiesen. Hier liegt eventuell das letzte Puzzleteil für die Auflösung des Rätsels, über welches Tier der Erreger zum Menschen gelangte.

Manche Forscher hoffen, Mutationen könnten das Virus abschwächen, so dass es besser an seinen menschlichen Wirt angepasst ist. Dann sollte es weniger Menschen töten und hätte somit höhere Chancen, sich auszubreiten. Bislang gibt es jedoch keinerlei Anzeichen für eine solche Schwächung – vermutlich auf Grund des effizienten genetischen Reparaturmechanismus. »Das Genom des Covid-19-Virus ist sehr stabil, und ich sehe keine Veränderung seiner Pathogenität, die durch eine Mutation ausgelöst wurde«, erklärt Guo Deyin, der an der Sun-Yat-sen-Universität in Guangzhou an Coronaviren forscht. Auch Rambaut bezweifelt, dass der Erreger mit der Zeit milder wird und seinen Wirt verschont. Solange er erfolgreich neue Zellen infizieren und sich vermehren kann, spielt es Rambauts Ansicht nach keine Rolle, ob das Virus den Wirt schädigt oder nicht.

## Zukünftige Abschwächung?

Andere Wissenschaftler äußern sich optimistischer. So hofft Klaus Stöhr, der bei der Weltgesundheitsorganisation WHO die Sars-Forschung koordiniert hat, dass vom Menschen gebildete Antikörper zumindest zum Teil vor dem Virus schützen. Die Immunität werde natürlich nicht perfekt sein, und neu Infizierte entwickelten weiterhin leichte Symptome wie bei einer Erkältung. Aber schwere Verläufe sollten seltener auftreten. Gleichzeitig verhindere der Korrekturlesemechanismus eine schnelle Mutation des Virus, so dass Infizierte längerfristig geschützt wären. »Das bei Weitem wahrscheinlichste Szenario ist«, erläutert Stöhr, »dass sich das Virus in relativ kurzer Zeit weiter ausbreitet und den größten Teil der Weltbevölkerung infiziert.« Das könne ein bis zwei Jahre dauern. »Danach wird das Virus in der menschlichen Bevölkerung zirkulieren – wahrscheinlich für immer.« Wie die vier ständig präsenten, im Allgemeinen harmlosen menschlichen Coronaviren sollte Sars-CoV-2 dann meist nur leichte Infektionen der oberen Atemwege verursachen. Aus diesem Grund, so Stöhr weiter, seien Impfstoffe gar nicht unbedingt notwendig.

Frühere Studien untermauern dieses Argument. So zeigten Probanden, die mit dem gewöhnlichen Erkältungs-Coronavirus 229E geimpft wurden, zwei Wochen später einen erhöhten Antikörperspiegel, der sich bis zu einem

Jahr hielt. Das verhinderte zwar spätere Infektionen nicht, linderte allerdings deren Symptome und verkürzte den Zeitraum, in dem der Patient ansteckend war.

Ein Modell für die jetzige Pandemie bietet das OC43-Coronavirus. Dieser Erreger verursacht harmlose Erkältungen – das war aber wohl nicht immer so. Laut Genanalysen der belgischen Universität Löwen agierte OC43 in der Vergangenheit als Killer. Es sprang vielleicht um 1890 von Kühen, die sich wiederum durch Mäuse infiziert hatten, auf den Menschen über. Wie die Wissenschaftler vermuten, löste OC43 eine Pandemie aus, an der 1889 bis 1890 weltweit mehr als eine Million Menschen starben – ein Ausbruch, der zuvor der Influenza angelastet worden war. Heute zirkuliert OC43 nach wie vor weit verbreitet, und vermutlich hat diese ständige Exposition die große Mehrheit der Menschen gegen das Virus immunisiert.

Noch ist nicht klar, ob bei Sars-CoV-2 etwas Ähnliches passieren wird. Zumindest Katzen, Kühe, Hunde und Hühner werden offenbar nicht dauerhaft gegen die manchmal tödlichen Coronaviren immun, weshalb Tierärzte in den vergangenen Jahren für die Suche nach geeigneten Impfstoffen warben. Eine 2020 vorab veröffentlichte Studie an infizierten Affen zeigte, dass diese über einen Beobachtungszeitraum von 28 Tagen Antikörper gegen Sars-CoV-2 aufwiesen. Doch wie lange hält die Immunität an? Bei Sars-Patienten sank die Antikörperkonzentration nach zwei bis drei Jahren deutlich. Ob diese reduzierten Werte ausreichen, um eine Infektion zu verhindern oder den Schweregrad zu verringern, bleibt fraglich. Dennoch werben einige Länder für die Idee, »Immunitätspässe« für Personen auszustellen, die bereits eine Covid-19-Infektion überstanden haben. Sie könnten sich dann wieder unter Menschen wagen, ohne sich oder andere in Gefahr zu bringen.

Letztlich vermag die Mehrheit der Wissenschaftler momentan nicht zu beurteilen, ob die zahmeren Coronaviren einst so gefährlich waren wie Sars-CoV-2. Manche Leute denken, »die anderen Coronaviren waren einst schrecklich und wurden immer harmloser«, sagt Perlman. »Das klingt sehr optimistisch – aber uns fehlen die Beweise.« ◀

## QUELLEN

**Boni, M. F. et al.:** Evolutionary origins of the Sars-CoV-2 sarbecovirus lineage responsible for the Covid-19 pandemic. *bioRxiv* 10.1101/2020.03.30.015008, 2020

**Brook, C. E. et al.:** Accelerated viral dynamics in bat cell lines, with implications for zoonotic emergence. *eLife* 9 e48401, 2020

**Wölfel, R. et al.:** Virological assessment of hospitalized patients with Covid-2019. *Nature* 581, 2020

**Wrapp, D. et al.:** Cryo-EM structure of the 2019-nCoV spike in the prefusion conformation. *Science* 367, 2020

**Zhou, P. et al.:** A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. *Nature* 579, 2020

## nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
*Nature* 581, S. 22–26, 2020

# CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

## EISERNE NERVEN

**Kann es Gemeinsamkeiten zwischen einer Nervenfaser und einem Eisenstab geben? Und ob! Unter bestimmten Bedingungen zeigen die beiden erstaunliche Ähnlichkeiten.**

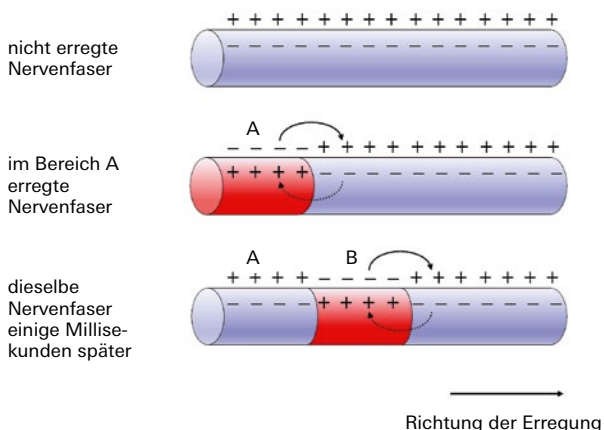


**Matthias Ducci** (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» [spektrum.de/artikel/1744792](http://spektrum.de/artikel/1744792)

► Eine Nervenzelle empfängt und verarbeitet Reize aus der Umwelt oder aus dem Körper. Sie leitet ihrerseits elektrische Signale über einen langen Fortsatz, das Axon, weiter an andere Zellen, etwa Muskelfasern oder Drüsenzellen. Die Erregungsleitung basiert darauf, dass an der Innenseite der Zellmembran ein Überschuss an negativ geladenen Ionen vorliegt und an ihrer Außenseite ein Überschuss an positiv geladenen. Die Potentialdifferenz liegt zwischen  $-30$  und  $-150$  Millivolt (mV). Bei einem Reiz ändert sich die Durchlässigkeit der Zellmembran für die Ionen. Positiv geladene Ionen (Kationen) strömen darauf-

**Wird ein Nerv erregt, pflanzt sich ein Aktionspotential entlang der Nervenfaser fort (vereinfachte Darstellung).**



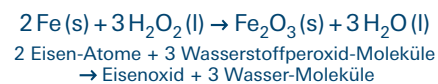
hin ins Innere, wodurch das Membranpotenzial betragsmäßig absinkt (etwa von  $-70$  auf  $-50$  mV). Einen solchen Vorgang bezeichnet man als Depolarisation. Überschreitet der Betrag einen Schwellenwert, strömen plötzlich noch viel mehr Kationen hinein, und die Ladung an der Membran kehrt sich kurzzeitig um – ein so genanntes Aktionspotential ist ausgelöst worden. Zwischen dem erregten und dem benachbarten, nicht erregten Bereich der Membran fließen daraufhin sowohl im Außenmedium als auch im Zellinnern Ionenströme, um die Ladungen auszugleichen. Folglich verändert sich dort das Membranpotenzial ebenfalls. Wird dadurch der Schwellenwert erreicht, entsteht wieder ein Aktionspotential. Auf diese Weise wandert die Erregung weiter. Im Bild unten links ist der Mechanismus stark vereinfacht dargestellt.

Überraschend ähnlich reagiert ein Eisenstab, der in ein Gemisch aus Schwefelsäure-Lösung und Wasserstoffperoxid eintaucht. Eisen ist eigentlich ein unedles Metall, doch in dem Elektrolyten liegt es in einer bestimmten Form vor und verhält sich dadurch wie ein Edelmetall. So ist trotz des sauren Charakters der Lösung keine Wasserstoffentwicklung durch Korrosion zu beobachten. Das ist damit zu erklären, dass Eisen zu den so genannten passivierbaren Metallen zählt. Eigentlich sollte es unter den gegebenen Bedingungen rasch korrodieren. Die Reaktion:



Metall-Atom  $\rightarrow$   $n$ -fach geladenes Metall-Ion +  $n$  Elektronen ( $n = 1, 2$  oder  $3$ )

sollte also leicht ablaufen. Tatsächlich löst sich das Metall aber sehr langsam auf, was durch eine Schutzschicht aus Oxiden oder anderen salzartigen Korrosionsprodukten bedingt wird. Im Fall des Eisenstabs in der genannten Lösung bildet sich durch die oxidierende Wirkung des Wasserstoffperoxids ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) eine Schicht aus Eisen(III)-oxid auf der Metalloberfläche. Mit chemischen Symbolen geschrieben, lautet der Vorgang (die Abkürzungen »s« und »l« stehen für »fest« sowie »flüssig«):



Mit einem anschaulichen Versuch lässt sich die oben beschriebene Erregungsleitung an einem passivierten Eisen-

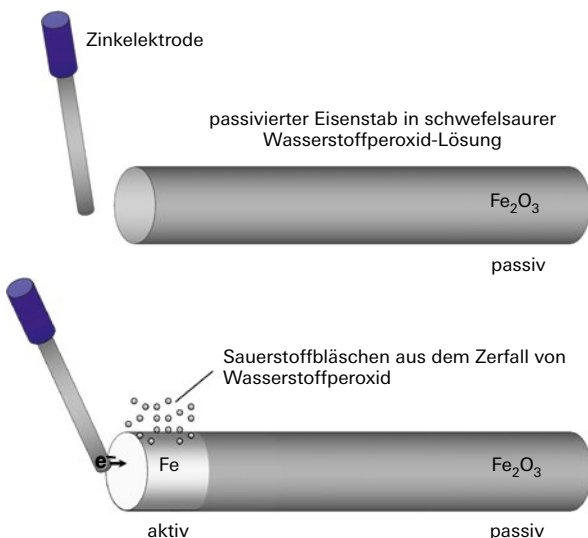


MATTHIAS DIICCI

Ein Eisenstab liegt in schwefelsaurer Wasserstoffperoxid-Lösung passiviert vor. Durch Kontakt mit einer stabförmigen Zinkelektrode (oberes Foto links) lässt sich eine Gasentwicklung auslösen, die wie eine Welle über die Oberfläche wandert.

stab modellhaft nachvollziehen. Zunächst mischt man dafür 97,5 Milliliter Wasser mit 27,5 Milliliter Schwefelsäure-Lösung (Konzentration 1 mol/l) und 40 Milliliter Wasserstoffperoxid-Lösung (30 Gewichtsprozent  $\text{H}_2\text{O}_2$  in Wasser). Hierbei ist zu beachten, dass die Ausgangslösungen exakt angesetzt sind. Als Modellnervenfaser dient ein etwa 30 Zentimeter langer, entfetteter und intensiv geschmirgelter Eisenstab (Durchmesser 3,2 Millimeter, Bezugsquelle: [www.goodfellow.com](http://www.goodfellow.com), Artikelnummer FE007920). Man legt ihn in ein geeignetes Gefäß und gibt so viel von der Lösung hinzu, bis er rund zwei bis drei Zentimeter tief eintaucht. Beim Zufügen der Lösung ist für einige Sekunden noch eine Gasentwicklung am Eisenstab zu erkennen.

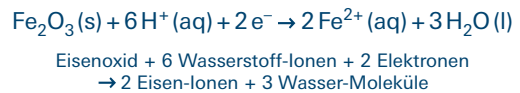
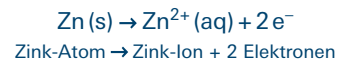
Die Berührung mit der Zinkelektrode aktiviert das Eisen im Bereich der Kontaktstelle.



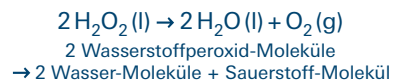
MATTHIAS DIICCI

Sie kommt jedoch schnell zum Erliegen, woraufhin der Stab passiviert vorliegt. Dieser Zustand entspricht dem einer nicht erregten Nervenfaser. Um einen Reiz zu simulieren, berührt man den Eisenstab an einem Ende eine halbe bis eine Sekunde lang mit einer stabförmigen Zinkelektrode oder einem kleinen Zinkblech. Der Kontakt löst eine Gasentwicklung am Eisenstab aus, die sich wie eine Welle über die gesamte Oberfläche bis zum Ende des Stabs fortpflanzt und dort zum Erliegen kommt (Fotos links) – analog einem Aktionspotenzial an einer Nervenfaser. Auch die chemischen Prozesse, die zu dem Phänomen führen, weisen überraschende Übereinstimmungen mit den neurophysiologischen Vorgängen auf.

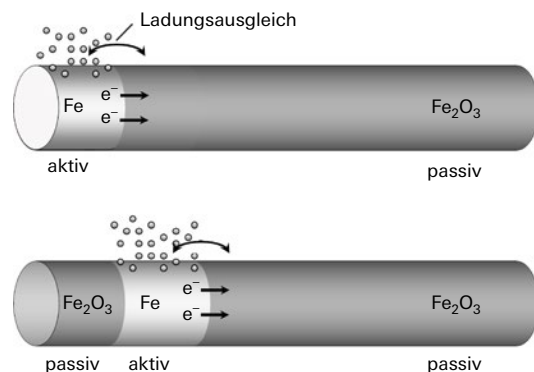
Zink ist ein recht unedles Metall, das eingetaucht in die Lösung mit  $-0,62$  Volt ein entsprechend niedriges Potenzial aufweist. Kommt es in Kontakt mit dem passivierten Eisenstab, der mit  $+0,6$  Volt ein höheres Potenzial besitzt, gelangen Elektronen vom Zink auf den Stab. Dadurch wird die Eisenoxidschicht im Bereich der Kontaktstelle abgebaut. Mit chemischen Symbolen formuliert laufen folgende Prozesse ab (»aq« steht für »in Wasser gelöst«):



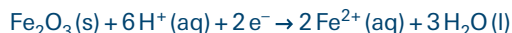
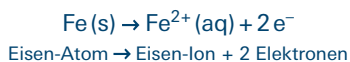
Somit ist der Eisenstab im Bereich der Kontaktstelle von dem passiven in den aktiven Zustand übergegangen, so dass das zuvor von der Oxidschicht geschützte elementare Eisen nun in direktem Kontakt mit der Lösung steht. Auf der restlichen Oberfläche befindet sich nach wie vor noch die Oxidschicht (Grafik unten, links). Die Gasentwicklung, die man nun sieht, ist auf den Zerfall des Wasserstoffperoxids zurückzuführen, den das aktive Eisen katalysiert: Bei dem sprudelnden Gas handelt es sich um Sauerstoff.



Die Aktivitätszone »wandert« entlang des Eisenstabs.



Mit der Aktivierung ändert sich das Potenzial des Eisens: Es sinkt ab. Das entspricht bei einer Nervenfaser dem Auslösen eines Aktionspotenzials. Nun grenzt der aktive Bereich mit niedrigem Potenzial direkt an einen passiven, der ein hohes Potenzial aufweist. Dadurch bilden sich Lokalströme von Elektronen, die den benachbarten Bereich ebenfalls aktivieren. Gleichzeitig kommt es zum Ladungsausgleich durch Ionenströme im Elektrolyten. Mit chemischen Symbolen lauten die Prozesse:

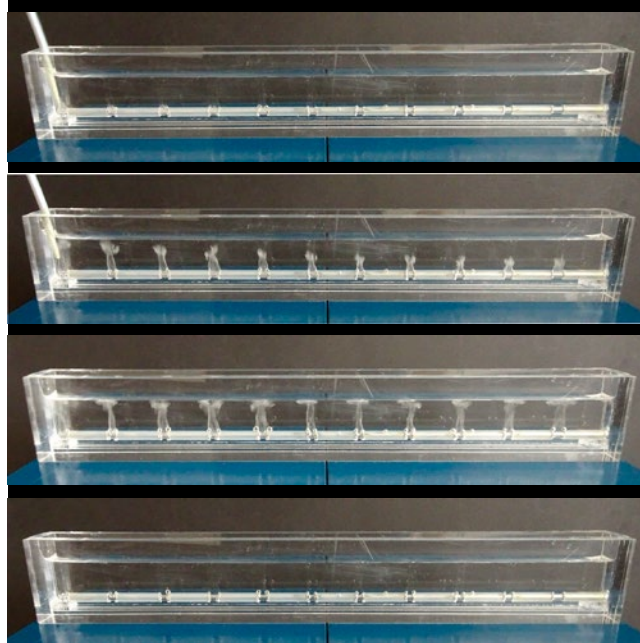
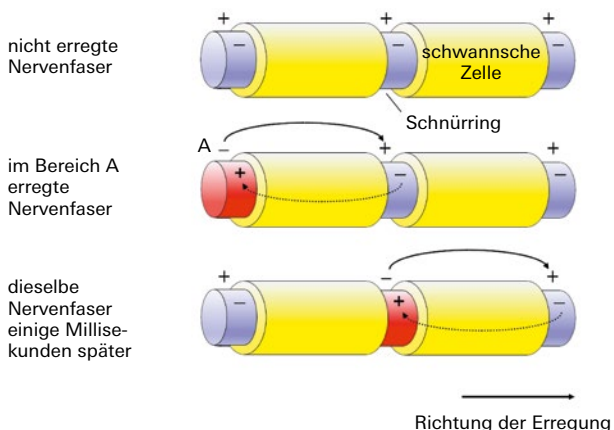


Eisenoxid + 6 Wasserstoff-Ionen + 2 Elektronen  
→ 2 Eisen-Ionen + 3 Wasser-Moleküle

Das setzt sich bis zum Ende des Eisenstabs fort, wobei genau genommen weder die Aktivitätszone am Metallstab noch das Aktionspotenzial an der Nervenfaser wandern: Vielmehr werden sie in beiden Fällen durch lokale Stromkreise entlang des Stabs sowie der Nervenfaser fortlaufend neu gebildet (wie in der Grafik auf S. 50 sowie auf S. 51 unten rechts dargestellt).

Darüber hinaus ist die Zustandsänderung des Eisenstabs, genau wie im Fall der Nervenfaser, umkehrbar: Kurz nachdem ein Bereich aktiviert wurde, wird er durch die oxidierende Wirkung des Wasserstoffperoxids wieder passiviert. Weitere Untersuchungen mit Hilfe definierter kathodischer Stromstöße haben gezeigt, dass beim Eisenstab ebenso ein bestimmter Schwellenwert überschritten werden muss, um eine Aktivierung auszulösen. Das kann man qualitativ ganz einfach zeigen: So passiert beispielsweise bei Kontakt mit einer Kupfer- an Stelle einer Zink- elektrode nichts. Kupfer besitzt im betrachteten Elektroly-

**Die Nervenfasern von Wirbeltieren sind von isolierenden Myelinscheiden umhüllt, die regelmäßig unterbrochen sind. Ein Aktionspotenzial wandert nun nicht mehr durch die gesamte Nervenfaser, sondern »springt« von einem frei liegenden Bereich zum anderen. Durch diese saltatorische Erregungsleitung pflanzen sich Signale deutlich rascher fort.**



MATTHIAS DÜCCI

**Ein in schwefelsaurer Wasserstoffperoxid-Lösung passivierter Eisenstab ist mit Hilfe von zirka ein Zentimeter langen Schlauchstücken stückweise isoliert. Analog zur saltatorischen Erregungsleitung in Nervenzellen wandert die Aktivitätszone sehr schnell über den Eisenstab.**

ten ein höheres Potenzial als Zink. Infolgedessen fließt ein geringerer Kontaktstrom, der nicht ausreicht, um die Eisenoxidschicht in diesem Bereich abzubauen und eine Aktivitätsstelle auszulösen. Das aus der Neurophysiologie bekannte »Alles-oder-nichts-Gesetz« gilt hier also genauso.

Ferner lässt sich wie bei der extrazellulären Ableitung an realen Nervenfasern die Wanderung der Aktivitätszone mit Hilfe von Ableitelektroden erfassen und deren Geschwindigkeit bestimmen. Sie beträgt rund 5 bis 8 Zentimeter pro Sekunde. An den Nervenfasern wirbelloser Tiere wie der Qualle erfolgt die Erregungsleitung mit etwa 0,5 Metern pro Sekunde (m/s). Bei Schaben, die ebenfalls ein recht einfaches Nervensystem besitzen, wurden Geschwindigkeiten von 1,5 m/s gemessen. Das würde bei Weitem nicht ausreichen, um den komplexen Organismus von Wirbeltieren zu steuern. In Nervenfasern der menschlichen Skelettmuskulatur werden Geschwindigkeiten von 120 m/s und in Hautnervenfasern 70 m/s erreicht. Doch wie ist das möglich?

Hier hat sich die Natur einen Trick einfallen lassen: Im Wirbeltierreich sind Nervenfasern oft von schwannschen Zellen umgeben. Sie bilden eine isolierende Hülle, die Myelin- oder Markscheide, indem sie sich um die Nervenfaser wickeln. Zwischen zwei schwannschen Zellen liegt jeweils ein kleines Stückchen der Axonmembran frei. Das ist etwa alle ein bis drei Millimeter der Fall, die Einschnürungen selbst sind nur etwa zwei Mikrometer lang. Hier wird die Erregung schneller weitergeleitet, denn das zeitintensive Entladen der Axonmembran für ein Aktionspotenzial muss nun lediglich an den kleinen Einschnürungen passieren. Das Aktionspotenzial »springt« quasi von Schnürring zu Schnürring (Grafik links). Nach dem lateinischen Wort »saltare« für »springen« bezeichnet man den Vorgang als saltatorische Erregungsleitung.

Um den Aufbau der markhaltigen Nervenfasern zu simulieren, wird der Eisenstab abschnittsweise isoliert –

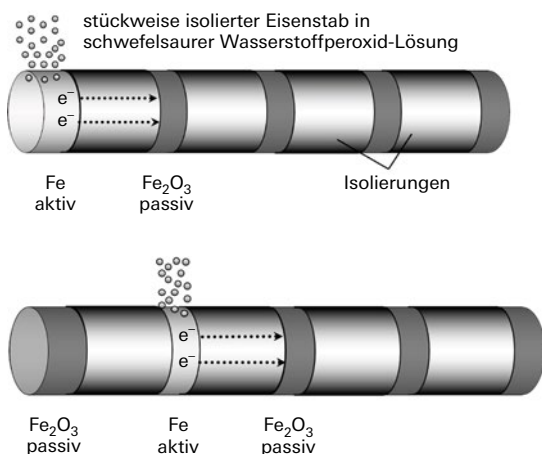
etwa mit Hilfe von Gewebeband (ein Zentimeter breit) oder kurzen Schlauchstücken (ein Zentimeter lang), die über den Eisenstab gestülpt werden. Zwischen den Isolierungen lässt man je rund drei bis vier Millimeter frei. Jetzt stellen sich zwei spannende Fragen: Lläuft die Aktivitätszone trotz der Isolierungen bis zum Ende des Stabs durch? Und falls ja, geschieht das analog zur saltatorischen Erregungsleitung schneller als am nicht isolierten Eisenstab?

Um das herauszufinden, muss man die Zusammensetzung der Lösung ein wenig verändern: An Stelle von 40 Millilitern gibt man nur 38,5 Milliliter der Wasserstoffperoxid-Lösung zu den oben angegebenen Mengen an Wasser und Schwefelsäure-Lösung. Und tatsächlich: Der Kontakt mit der Zinkelektrode löst eine Gasentwicklung aus, die entlang der frei liegenden Bereiche des Eisenstabs wandert, während in den isolierten Abschnitten keine Reaktion beobachtbar ist (Fotos links oben). Außerdem erreicht die Welle das Stabende deutlich schneller als beim nicht isolierten Eisenstab. Sie bewegt sich sogar zirka fünfmal schneller fort als im vorherigen Versuch, wie entsprechende Messungen zeigen.

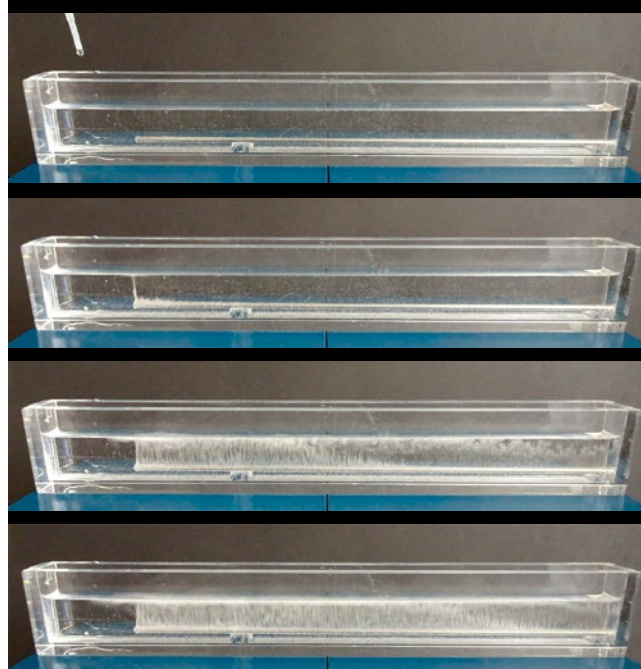
Der Grund dafür liegt im Mechanismus der Weiterleitung. Durch den Kontakt mit der Zinkelektrode baut sich wie beschrieben die Eisenoxidschicht an derjenigen Stelle ab, wodurch Lokalströme entstehen. Erreicht die Aktivitätswelle den ersten isolierten Abschnitt, wird die Weiterleitung des elektrischen Signals zum nächsten frei liegenden Sektor nicht durch die zeitaufwändige Reduktion einer Eisenoxidschicht gebremst. Im ummantelten Bereich wird nämlich gar keine Oxidschicht gebildet, da kein Kontakt zum Elektrolyten besteht. Somit wird der elektrische Impuls viel rascher direkt durch den Stab zur nächsten Einschnürung weitergeleitet. Hier setzen der Abbau der Deckschicht und die sich daraus ergebenden Lokalströme wieder ein, bis zum nächsten isolierten Sektor. Die Aktivierung springt demnach wie die saltatorische Erregungsleitung von einer Einschnürung zur nächsten (Grafik unten).

Erreicht ein Signal das Ende einer Nervenfasern, gelangt es über eine Synapse zu anderen Zellen wie etwa Muskel-

### Mechanismus der diskontinuierlichen Aktivierungsausbreitung auf einem stückweise isolierten Eisenstab.



MATTHIAS DUCCI



MATTHIAS DUCCI

### Wenige Tropfen Kochsalz-Lösung erzeugen Aktivitätswellen auf dem passivierten Eisenstab.

fasern. Die beiden Membranen trennt hier ein dünner Spalt, weshalb das ankommende elektrische Signal nicht direkt weitergeleitet werden kann. Stattdessen wird es in ein chemisches Signal umgewandelt. Sobald ein Aktionspotenzial das Ende des Axons erreicht hat, setzt die präsynaptische Membran Neurotransmittermoleküle frei, beispielsweise Acetylcholin. Sie diffundieren durch den Spalt und sorgen dafür, dass an der postsynaptischen Membran ein Aktionspotenzial ausgelöst wird.

Auch der passivierte Eisenstab lässt sich durch einen chemischen Botenstoff aktivieren. So ist es möglich, durch Kochsalz-Lösung (1 mol/l) Aktivitätswellen auf dem Eisenstab zu erzeugen (Fotos oben). Hierzu fügt man an einem Ende des Gefäßes einige Tropfen davon zur enthaltenen Lösung hinzu. Nach zirka einer Minute sind die ersten ein bis zwei Zentimeter des Eisenstabs aktiviert, denn die Chlorid-Ionen wirken korrosiv und bauen die Eisenoxidschicht chemisch ab. Allerdings verbleibt dieser Bereich wegen der Chlorid-Ionen permanent im aktiven Zustand, wodurch eine Welle nach der anderen über den Eisenstab wandert. In Synapsen hingegen ist das nicht der Fall, weil spezielle Enzyme die Botenstoffmoleküle spalten, damit keine permanente Erregung stattfindet. Eine solche »Dauererregung« hätte fatale Auswirkungen auf den Besitzer des eisernen Nervs: Genau solch ein permanentes Feuern der Neurone bewirken nämlich Nervengifte wie Sarin, indem sie die den Botenstoff spaltenden Enzyme blockieren, was zur Atemlähmung und zum Tod führen kann. ◀

### QUELLEN

**Ducci, M.:** Periodische und chaotische Oszillationserscheinungen an Metallelektroden und elektrochemische Modellexperimente zur Erregungsleitung am Nerven. Dissertation, Universität Oldenburg, 2000

**Ducci, M., Oetken, M.:** Nerven wie Drahtseile. Praxis Schriftenreihe Chemie 59, Aulis, 2007

# ATOMMÜLL SICHER FÜR EINE MILLION JAHRE?

In einem unterirdischen Labor in der Schweiz untersuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, ob sich eine besondere Gesteinsart für ein Atommüll-Endlager eignet: Opalinuston. Auch in Deutschland könnte eine solche Formation die letzte Ruhestätte für den hoch radioaktiven Abfall werden.



Verena Tang ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» [spektrum.de/artikel/1744794](https://www.spektrum.de/artikel/1744794)

## AUF EINEN BLICK FORSCHUNG FÜR DIE EWIGKEIT

- 1** Drei Gesteinsarten kommen in Frage, um eines Tages Deutschlands radioaktiven Abfall zu beherbergen: Steinsalz, Kristallingestein und Tonstein.
- 2** In einem unterirdischen Labor in der Schweiz untersuchen internationale Expertenteams eine dicke Schicht aus Opalinuston, um Erkenntnisse für die Endlagerung zu gewinnen.
- 3** Die Experimente sollen gleichzeitig als Referenz für die Erkundung möglicher Standorte dienen.





IMAG: COMMONS WIKIMEDIA. ORG/WIKIFILE/VADUC. ST-URSANNE. 080716.JPG / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS ORG) LICENSE BY SA 4.0 (LEGALCODE)

Der Mont Terri ist der Hausberg des mittelalterlichen Städtchens Saint-Ursanne in der Schweiz. Zahlreiche Experimente in seinem Innern sollen helfen zu verstehen, wie ein Endlager im Tonstein zu gestalten wäre.

► In der Schweiz, rund 40 Kilometer südwestlich von Basel, befindet sich das malerische Örtchen Saint-Ursanne. Wer aus Richtung Basel mit dem Zug hier ankommt, sieht das mittelalterliche Dorf von einem langen Viadukt aus im Tal liegen. Unmittelbar danach hält der Zug am Bahnhof, und die meisten Besucher begeben sich nach links auf den langen Marsch hinunter in den Ortskern. Wer jedoch ein paar Schritte nach rechts geht, findet sich direkt vor dem Mont Terrible wieder, dem Hausberg von Saint-Ursanne. In einem unterirdischen Labor forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt dort an der Frage, wie ein Endlager für Atommüll aussehen könnte.

Der Mont Terri, wie die Schweizer den Berg kurz nennen, liegt mitten im Faltenjura. Der entstand, als sich die Alpen erhoben und dadurch die Gesteinsschichten zusammendrückten. Im Norden schließt sich der Oberrheingraben an, eine tektonisch unruhige Zone. Durch diese Gegebenheiten ist praktisch garantiert, dass sich irgendwann innerhalb von tausenden Jahren die Lage der Gesteinsschichten verändern wird – der Berg kommt daher für ein Atommülllager nicht in Frage. Aber mitten durch die Erhebung zieht sich eine gut 150 Meter dicke Schicht aus Opalinuston.

Das Gestein ist für Wasser nur sehr wenig durchlässig, hält strahlende Teilchen effektiv zurück und schließt Risse quasi von selbst (siehe »Kandidaten für die Endlagersuche«, unten). Dadurch gilt es als aussichtsreicher Kandidat, wenn es um die Frage geht, welches Wirtsgestein künftig unsere radioaktiven Abfälle beherbergen soll. Steinsalz ist für diesen Zweck zwar bereits viel besser erforscht; unter anderem hat Deutschland jahrzehntelange Erfahrung durch die ausgiebige Erkundung des Bergwerks Gorleben (siehe »Atommülllager in Deutschland«, S. 58/59). Doch seit 2013 schreibt das so genannte Standortauswahlgesetz vor, dass geeignete Lagerstätten unabhängig von den bisherigen

logischen Gegebenheiten. Orte, an denen sich der Boden kontinuierlich hebt, wie etwa die Alpenregion, sind beispielsweise ungeeignet, weil der Abfall dann früher oder später an die Oberfläche kommt. Das Gleiche gilt für erdbebengefährdete Regionen wie den Oberrheingraben oder Gebiete, die in der jüngeren Vergangenheit vulkanisch aktiv waren, wie die Eifel.

Jedes Gestein hat unterschiedliche Stärken und Schwächen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Während Steinsalz beispielsweise Wärme gut abtransportieren kann, was es interessant für die Lagerung hoch radioaktiver,

Wärme entwickelnder Abfälle macht, ist es wasserlöslich. Opalinuston hingegen hält Wasser extrem gut zurück, ist aber nicht so stabil wie Steinsalz und führt Wärme nur schlecht ab. Aus diesem Grund arbeiten Fachleute in ihren Szenarien mit einer zusätzlichen »geotechnischen Barriere« aus Bentonit (Bild rechts).

Steinsalz ist als Wirtsgestein am besten erforscht. Zum einen durch den jahrzehntelangen Abbau von Kali- und Steinsalz, zum anderen, weil die BGR dazu ausgedehnte Untersuchungen angestellt hat, unter anderem am ehemaligen Salzstock Gorleben.



NATIONALE GENÜSSIGKEIT FÜR DIE LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (MAGRACH)

**Eine speziell konstruierte Schneckenverfüllmaschine brachte in Millimeterarbeit 255 Tonnen Granulat in einen Stollen ein, der drei Heizelemente und hunderte Sensoren beherbergt. Das Experiment soll klären, wie stark hoch radioaktiver Müll das Gestein erhitzt.**

## Kandidaten für die Endlagersuche

### Welche Wirtsgesteine kommen in Deutschland in Frage?

In Deutschland kommen drei Alternativen als Wirtsgesteine für ein Endlager in Betracht: Tongestein wie der Opalinuston, Steinsalz in Salzstöcken oder in flacher Lagerung sowie kristalline Formationen wie Granit. Welche der Gesteine sich eignen, hängt zum einen von der Lage ab, zum anderen von der Dicke (Stärke) der betreffenden Gesteinsschicht und den umgebenden Gesteinen.

### Welches Gestein ist das beste?

Das lässt sich pauschal nicht sagen. Wichtig sind in erster Linie die geo-



Untersuchungen auf einer »weißen Landkarte« gesucht werden müssen. Gleichzeitig regelt das Gesetz, dass als Alternativen Steinsalz, Tonstein sowie Kristallgestein wie etwa Granit als Wirtsgesteine in Frage kommen.

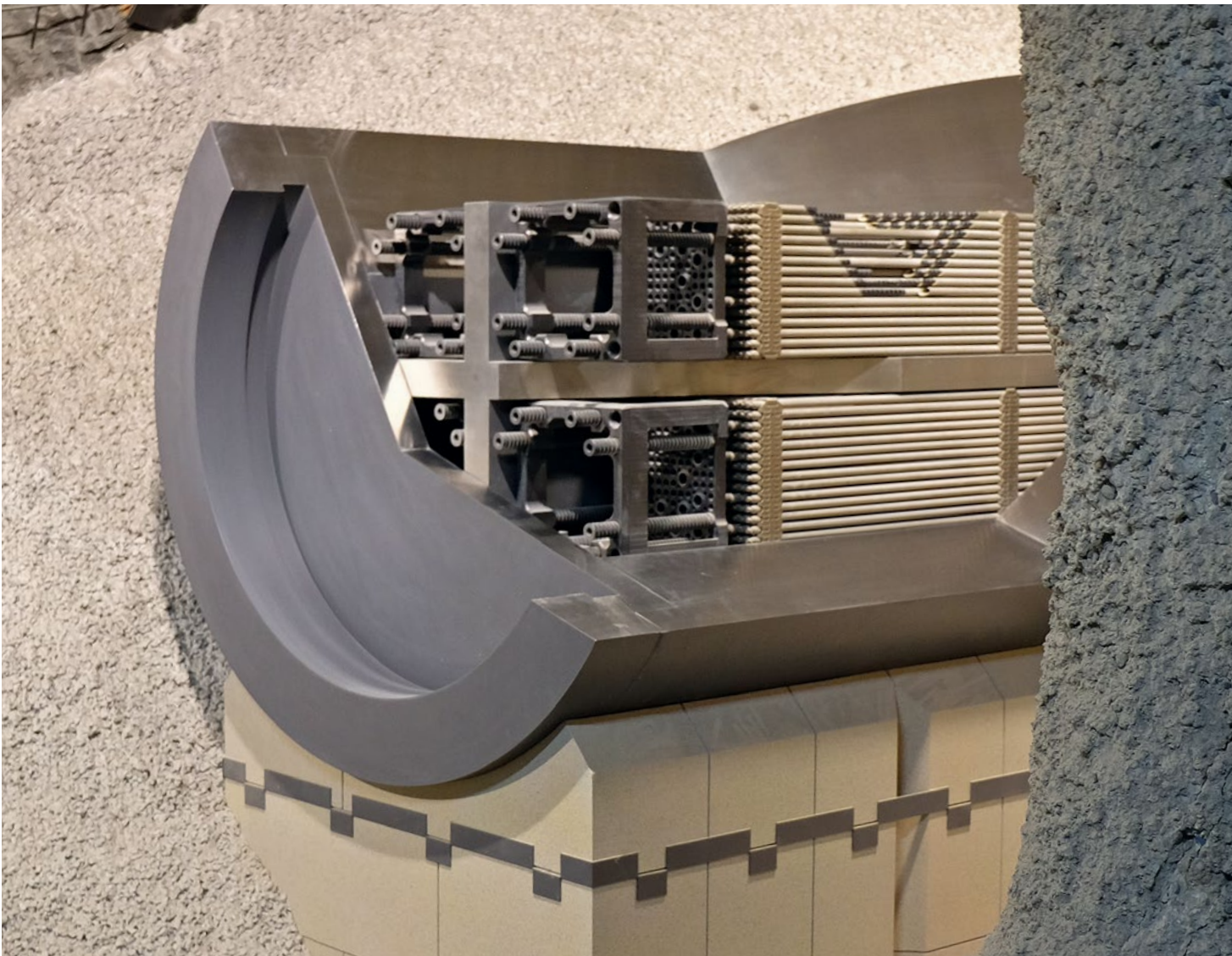
Jedes der Materialien hat seine Vor- und Nachteile: Tonstein ist viel komplexer zusammengesetzt und besitzt je nach Raumrichtung unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften, ganz anders als etwa Salz, betont Gerhard Enste. Er leitet an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover die Abteilung Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum und verantwortet damit dort unter anderem die Forschung zur Endlagerung von radioaktivem Abfall. Bereits seit 1996 untersucht die BGR die Gesteinsformation am Mont Terri. Gemeinsam mit 21 Forschungsgruppen aus neun Län-

**Das Modell verdeutlicht, wie ausgediente Brennstäbe unterirdisch eingelagert werden könnten: In einem runden Stollen befindet sich auf einem Sockel aus Bentonit ein Stahlzylinder mit den Brennelementen (metallene Röhren). Rings um den Abfallbehälter wird der Stollen mit Granulat aus Bentonit aufgefüllt, das im Lauf der Jahre Wasser aufnimmt. Bricht der Behälter nach mehreren zehntausend Jahren, hält das aufgequollene Granulat die austretenden Radionuklide zurück.**

dern – aus Deutschland sind außer ihnen noch fünf Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft, das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) sowie die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) beteiligt – studieren Enste und seine Kollegen das Material, prüfen dessen Stabilität, bauen Heizelemente in den Berg und simulieren, wie man große Abfallbehälter zigtausende Jahre sicher dort lagern kann. Die Wissenschaftler haben die schwierige Aufgabe, herauszufinden, unter welchen Umständen der Ton radioaktive Abfälle für eine Million Jahre sicher einschließt. Aber wie erbringt man einen Sicherheitsnachweis für eine Zeitspanne, die für einen Menschen unabsehbar erscheint?

### **Uralte Risse geben Aufschluss, wie sich das Gestein in Zukunft verhalten könnte**

Der Geologe Ben Laurich untersucht dazu kleine Risse, die sich vor langer Zeit im Berg gebildet haben. Der Tonstein im Mont Terri ist durchzogen von zahllosen Brüchen, die vor rund zwölf Millionen Jahren entstanden sind. Damals, im mittleren Miozän, begann sich der Schweizerische Jura zu heben. Dabei hat sich die Region rund um den Berg so aufgefault, dass die ehemals horizontal übereinander liegenden Gesteinsschichten schräg nach oben gedrückt wurden und sich nun hübsch nebeneinander aufreihen. Die »Störungszone« mit ihren vielen Brüchen, die dabei



entstanden ist, gibt Laurich Hinweise darauf, wie sich das Gestein bei künftigen tektonischen Kräfteeinwirkungen verhalten könnte.

Für die Forscher ist die Hebung und Auffaltung der Gebirgsschichten ein Glücksfall, denn die verschiedenen Lagen, die sonst nur über einen tiefen Schacht erreichbar wären, werden ihnen dadurch quasi auf dem Silbertablett serviert. Um die aufschlussreichen Tonschichten untersuchen zu können, genügt es nun, einen horizontalen Tunnel durch den Berg anzulegen. Und so begannen 1996, als an dieser Stelle der gut vier Kilometer lange Mont-Terri-Autobahntunnel gebaut wurde, Wissenschaftler der Schweizer Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) ausgehend von einem angeschlossenen Sicherheitstunnel Gänge für ein Labor in den Berg zu gra-

ben. Heute durchziehen anderthalb Kilometer Strecken und Nischen den Stein westlich der Autobahnöhre und beherbergen zahlreiche Großexperimente, Sensoren, Bohrlöcher, Messinstrumente und Maschinen. Der neueste Abschnitt kam Ende 2019 dazu.

Am Eingang des Labors steht Laurich nun neben einem frei gelegten Stück Wand. Eigentlich ist der Tunnel überall mit Spritzbeton verkleidet, da er sonst nicht stabil genug wäre. Doch an dieser Stelle sollen die Besucher sehen, wie der Berg tatsächlich aussieht. Laurich zeigt auf eine der vielen Bruchflächen in der schiefergrauen Wand. »Die Zonen, in der Verschiebungen stattgefunden haben, sind nur zehn Mikrometer dick«, erklärt der BGR-Wissenschaftler. Sie erstrecken sich aber mehrere Meter weit ins Gestein. »Die Oberfläche spiegelt ganz leicht – das heißt, die

## Atommülllager in Deutschland

### Ehemaliges Salzbergwerk Asse II

»Die Asse« ist ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie Endlagerung nicht funktioniert. In dem ehemaligen Kali- und Salzbergwerk im Niedersächsischen Landkreis Wolfenbüttel wurden von 1967 bis 1978 insgesamt 125 787 Behälter – etwa 47 000 Kubikmeter – mit schwach und mittel radioaktivem Abfall eingelagert. Was genau dort eingebracht wurde, ist nach Angaben der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) teilweise unklar, da die damalige Dokumentation lückenhaft und nicht zuverlässig sei. Ähnlich wirt ist die Lagerung selbst: Anfangs wurden die Fässer aufrecht gestapelt, später liegend. Weil die Strahlenbelastung für die Mitarbeiter beim ordentlichen Aufstellen der Fässer zu groß war, kippte man diese ab 1971 mit einem Radlader in die Stollen, ohne Rücksicht darauf, ob die Behälter Schaden nahmen.

Zu allem Überfluss ist das Lager ziemlich marode: Rund 12 000 Liter salzhaltige Lösungen dringen täglich in das Bergwerk und die Stollen mit den Müllfässern ein. Die ganze Schachtanlage ist einsturzgefährdet, weshalb bereits Salz und Beton hineingefüllt wurden, um es zu stabilisieren. Aus diesen Gründen beschloss der Bundestag 2013, alle in

der Asse eingelagerten radioaktiven Abfälle zurückzuholen und an geeigneter Stelle unterirdisch einzulagern.

Weil dazu ein neuer Schacht angelegt werden muss, untersucht die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) noch bis 2020, wo dieser am besten entstehen und wie er gebaut werden soll. Erst nach dessen Fertigstellung kann die Rückholung beginnen. Bis ein endgültiger Lagerort für die Fässer aus der Asse gefunden ist, müssen sie über Tage verstaubt werden.

### Endlager Konrad

Der Schacht Konrad ist ein ehemaliges Erzbergwerk im Stadtgebiet Salzgitter und seit 2002 das erste nach Atomrecht genehmigte Endlager Deutschlands. Es soll künftig 303 000 Kubikmeter schwach und mittel radioaktiven Atommüll beherbergen. Dabei handelt es sich zu zwei Dritteln um Abfall aus Kernkraftwerken oder Betrieben der kerntechnischen Industrie und zu etwa einem Drittel um Atommüll aus öffentlichen Einrichtungen, wie beispielsweise Forschungsinstitutionen oder aus dem Rückbau von DDR-Kernkraftwerken. Momentan wird das Bergwerk zum Endlager umgebaut und soll ab 2027 in Betrieb genommen werden.

### Endlager Morsleben

Die DDR nutzte das ehemalige Salzbergwerk Morsleben zwischen Braunschweig und Magdeburg, um schwach und mittel radioaktive Abfälle zu beseitigen. Nach der Wiedervereinigung betrieb das Bundesamt für Strahlenschutz das Lager weiter. Insgesamt 367 54 Kubikmeter Atommüll wurden dort zwischen 1971 und 1998 eingelagert. Daneben beherbergt der Salzstock zwischengelagerte hoch radioaktive Abfälle. Sie machen zwar nur 0,01 Prozent des Abfallvolumens aus, sind jedoch für 60 Prozent der Radioaktivität verantwortlich.

Die BGE will das Endlager stilllegen: Das heißt sichern, verfüllen und verschließen. Die Rückholung und anderweitige Beseitigung der Abfälle bietet nach Einschätzung der BGE keinen Gewinn an Sicherheit. Bis klar ist, ob das Endlager so genehmigt wird, muss die BGE es offen und »stilllegungsfähig« halten.

### Gorleben – Symbol des Protests

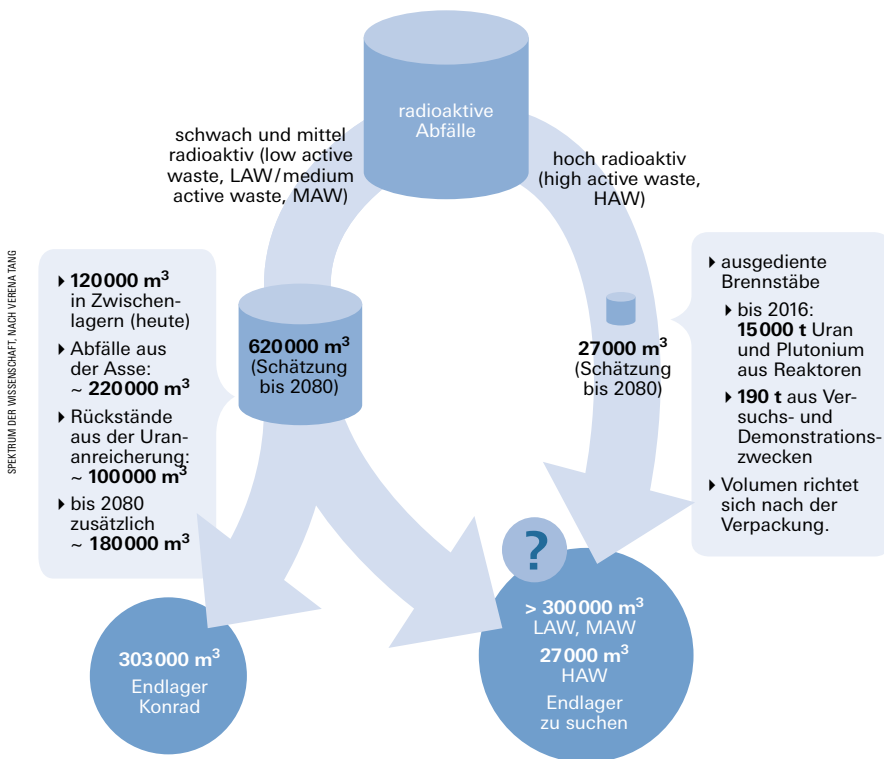
1977 beschloss die Regierung der Bundesrepublik Deutschland, in einem Salzstock unter der niedersächsischen Stadt Gorleben ein Endlager für Atommüll zu errichten. Nach starken Protesten wurde das Unterfangen zwei Jahre später umgewidmet: Der Salzstock sollte von da an als »Erkundungsberg-

Unebenheiten sind kleiner als die Wellenlängen des sichtbaren Lichts«, die zwischen 400 und 750 Nanometer liegen. Will man die Unregelmäßigkeiten zu Gesicht bekommen, benötigt man ein Transmissionselektronenmikroskop, das die winzigen Details auflösen kann. Doch die Risse bleiben im Opalinuston nicht offen: Diejenigen im Mont Terri sind häufig mit Kalzit gefüllt. »Wir haben herausgefunden, dass die Verfüllungen mit der Störungsentstehung einhergehen«, erklärt Laurich. Sie haben also zeitgleich stattgefunden – eine gute Nachricht für die Dichtigkeit des Gesteins.

### Wasser dringt nur im Schneckentempo durch den Ton

Dass sich Risse im Opalinuston schnell wieder schließen, ist einer der großen Vorteile des Materials. Darüber hinaus macht seine geringe Durchlässigkeit das Gestein zu einem

aussichtsreichen Kandidaten für ein Endlager. Wasser dringt mit einer Geschwindigkeit von nur  $10^{-13}$  Metern pro Sekunde hindurch, legt also in dieser Zeit etwa ein Zehntel eines billionstel Meters zurück. Für einen Meter bräuhete es demnach mehr als 317000 Jahre. Wo kein Wasser strömt, kann es keine Radionuklide transportieren. Allein mittels Diffusion durch das im Ton enthaltene Porenwasser – im Mont Terri sind das zwischen fünf und neun Gewichtsprozent – können sich die strahlenden Teilchen durch das Gestein bewegen. Unterschiedliche Nuklide diffundieren verschieden schnell, im Allgemeinen verläuft der Prozess aber sehr langsam. Für die Auswahl eines Atom-mülllagers in der Schweiz müssen die Kollegen der Nagra explizit nachweisen, dass radioaktive Strahlung von weniger als 0,1 Millisievert den Boden über dem Ton erreicht.



### Wie weit sind andere Staaten?

Finnland baut seit 2004 an einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle und ist damit die erste Nation, die ein solches zu Wege bringt. Auf der Halbinsel Olkiluoto lagern bereits seit 1992 schwach und mittel radioaktive Abfälle in einem unterirdischen Lager aus Granitgestein. Die Erweiterung für hoch radioaktiven Müll soll in den nächsten Jahren fertig gestellt werden.

Die Schweiz wiederum hat 27 verschiedene Wirtsgesteine untersucht und sich für Opalinuston entschieden. 2022 will die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), die in der Schweiz für das Thema Endlager zuständig ist, die Standorte bekannt geben.

werk« dienen, in dem die Bedingungen für ein Endlager erforscht werden.

Gegen die Erkundung des Salzstocks gab es großen Widerstand – nicht zuletzt, weil wohl nicht wissenschaftliche Argumente, sondern politische Faktoren bei der Standortauswahl die größte Rolle gespielt haben. Die Proteste richteten sich aber auch gegen die Anlieferung von wiederaufbereitetem Abfall aus Kernkraftwerken

(Castor-Transporte) in Gorleben und dessen oberirdische Zwischenlagerung vor Ort. Ein weiterer Kritikpunkt ist der Bau einer Konditionierungsanlage (eines Umverpackungslagers) für Atom-müll.

Im Jahr 2000 wurde die Erkundung des Gorlebener Salzstocks auf Beschluss der Bundesregierung für zehn Jahre verboten. Anschließend nahm die BGR ihre Untersuchungen wieder auf, jedoch nur bis 2012, als diese wieder per Gesetz

gestoppt wurden. 2013 trat schließlich das Standortauswahlgesetz in Kraft: Es schreibt fest, dass die Suche nach einem möglichen Endlager von null an starten soll, quasi mit einer weißen Landkarte. Alle Ergebnisse, die bis dahin zum Salzstock vorliegen, sind mittlerweile veröffentlicht. Ein abschließendes Gutachten gibt es jedoch nicht. Seit dem Beschluss wird das Bergwerk zurückgebaut, aber weiterhin offen gehalten.

Das geht nur, wenn die träge Diffusion immer noch der »schnellste« stattfindende Transportprozess ist und alle anderen langsamer ablaufen. In Deutschland hingegen genügt es, wenn die Wasserdurchlässigkeit einen Wert von  $10^{-10}$  Metern pro Sekunde nicht überschreitet. Die Dichtigkeit des Tons lässt sich im Felslabor eindrucksvoll nachvollziehen: Durchquert man bei der Einfahrt in den Berg noch zahlreiche große Pfützen, so ist es, sobald man die Formation aus Opalinuston erreicht hat, plötzlich vollkommen trocken. Darüber hinaus wirkt sich die Mikrostruktur des Tonsteins günstig aus: Auf Grund seiner vielen winzigen Poren hat ein Gramm des Materials eine innere Oberfläche von rund 100 Quadratmetern. An die Grenzflächen der einzelnen Tonminerale können sich Radionuklide anlagern und werden auf diese Weise zusätzlich zurückgehalten.

Bevor jedoch radioaktives Material überhaupt mit dem Tonstein in Berührung kommt, soll so viel Zeit wie möglich vergehen. Denn der Opalinuston, das so genannte Wirtsgestein, bildet nur die letzte Barriere zwischen Radionukliden und Umwelt.

Die erste stellen die Behälter aus Metall dar, in denen die Abfälle verstaut werden. Während die Schweizer noch offen lassen, aus welchem Material diese bestehen sollen, haben sich die Deutschen bereits für Stahl entschieden. Die Experten gehen derzeit davon aus, dass solche Behältnisse etwa 10 000 bis 50 000 Jahre lang dicht halten, bevor sie sich durch Korrosion zersetzen und ihren Inhalt frei geben.

### Eine Barriere nach der anderen

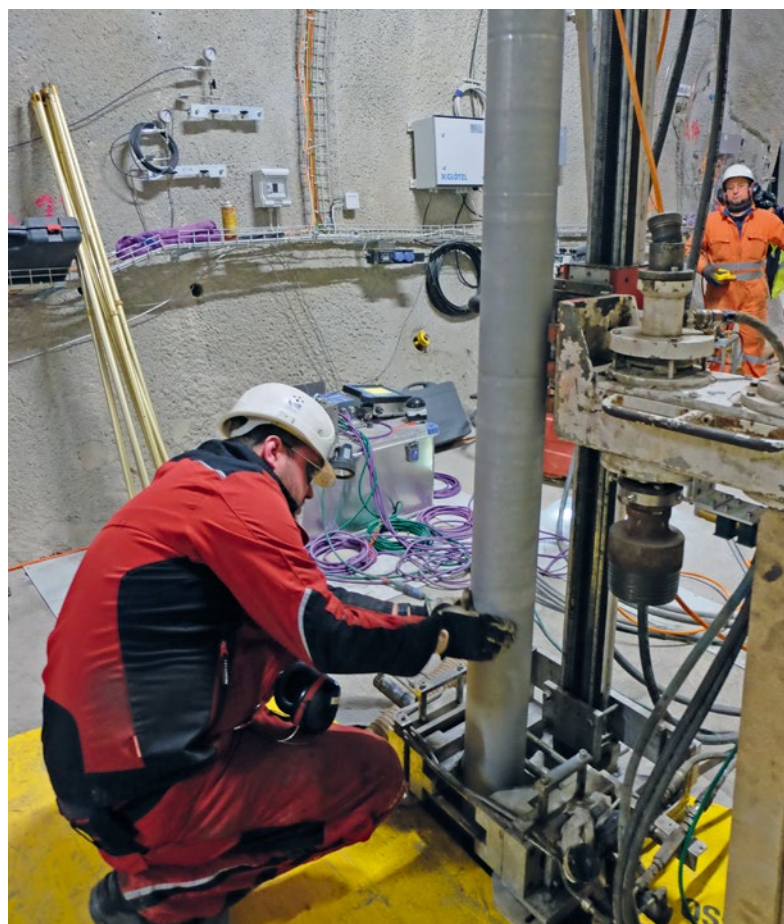
Geht es nach den Wissenschaftlern, treffen die Stoffe anschließend auf eine geotechnische Barriere. Anders als man es etwa von Bildern aus dem ehemaligen Salzbergwerk Asse II in Wolfenbüttel kennt, wo Atommüllfässer kreuz und quer herumliegen, will man für die Lagerung der Fässer runde Stollen ausheben, jeden Behälter darin ordentlich auf einen Sockel aus Bentonit montieren und den Hohlraum zwischen Fass und Stollenwand mit einer dicken Schicht Bentonitgranulat auffüllen (siehe Bild auf S. 57). Bentonit, in anderer Form als Material für Katzenstreu bekannt, nimmt im Lauf der Jahrhunderte Wasser aus den Poren des Tonsteins auf. Dabei quillt es auf und bildet eine zähe, klebrige Masse. Diese schließt zum einen durch den sich aufbauenden Gebirgsdruck die Lücke zwischen Fass und Gebirge, zum anderen soll sie nach dem Bruch des Behälters einen Großteil der strahlenden Nuklide zurückhalten, so dass schließlich nur noch vereinzelte radioaktive Teilchen im Berg ankommen (siehe Grafik rechts).

Wie gut das funktioniert, hat ein Team um den BGR-Geophysiker Markus Furche in einem Langzeitversuch von 2001 bis 2013 getestet. Einen viereinhalb Meter langen Stahlzylinder mit rund einem Meter Durchmesser haben die Kollegen auf einen Bentonitsockel montiert und in einen sechs Meter langen und knapp drei Meter breiten Stollen im Felslabor eingebracht (Foto auf S. 54/55). Der Hohlraum um den Metallzylinder wurde mit 40 Tonnen trockenem Bentonitgranulat aufgefüllt und das Ganze mit einer zwei Meter dicken Betonwand verschlossen. 15 Kubikmeter Wasser gaben die Wissenschaftler in den folgenden anderthalb Jahren zum Bentonit hinzu, dann war das Granulat zu

90 Prozent gesättigt. Erst durch die Sättigung und das damit verbundene Aufquellen entfalte der Bentonit seine volle Barrierewirkung, erläutert Furche. Während des elf Jahre dauernden Experiments maß die Gruppe unter anderem die Wassersättigung und den Druck, der sich durch das aufquellende Granulat aufbaute, sowie verschiedene Parameter im Gestein wie Auflockerungsprozesse, den Wassergehalt, den Porendruck, seismische Geschwindigkeiten und weiteres.

»Wir haben einerseits herausgefunden, dass der gesättigte Bentonit praktisch genauso dicht ist wie der Opalinuston selbst: Er leitet Wasser mit  $10^{-12}$  Metern pro Sekunde, das ist ein sehr kleiner Wert«, erklärt Furche. Außerdem baue sich durch das Quellen des Bentonits ein solcher starker Druck auf, dass der Bereich um den Tunnel, in dem sich während des Aushebens das Gestein aufgelockert hat, wieder geschlossen wird. Unter natürlichen Bedingungen quillt der Bentonit allerdings viel langsamer als im Versuch: Er wird nicht künstlich gesättigt, sondern saugt Porenwasser aus dem umgebenden Gestein auf, was Jahrzehnte dauert. Das zeigen andere Experimente, beispielsweise im Schweizer Felslabor Grimsel. Laut Furche besteht dadurch aber kein Grund zur Sorge, da die strahlenden Substanzen zu Beginn der Einlagerung ja noch sicher in ihren Behältern verstaut sind: »In einem Endlager haben Sie die Zeit. Diese Prozesse dürfen lange dauern, da sind hundert Jahre kein Problem«, sagt der Forscher.

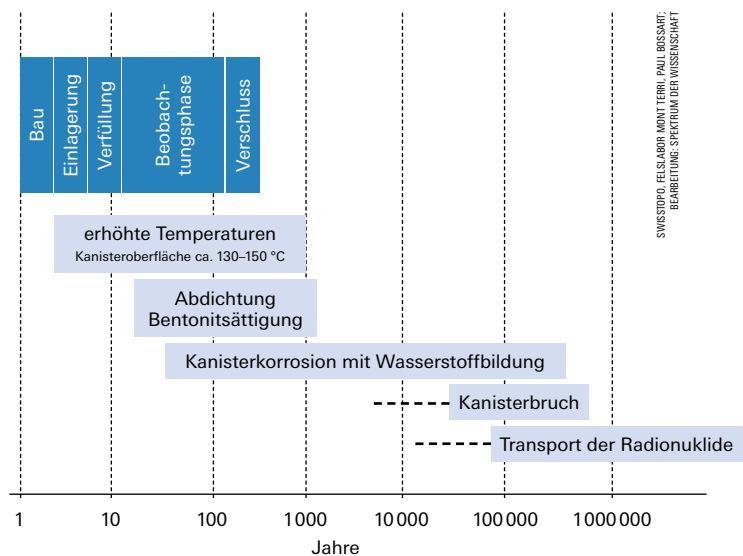
**Ein Arbeiter holt einen Bohrkern aus rund zehn Meter Tiefe. Messungen daran helfen zu ermitteln, wie Schächte die Stabilität des Endlagers beeinflussen und wie sie am besten zu verfüllen sind.**



Rund 90 Prozent der Radionuklide blieben in der Bentonitbarriere stecken, erläutert Olivier Leupin von der Schweizer Nagra, die hier unten ebenfalls zahlreiche Versuchsanlagen betreibt. Den allergrößten Teil der restlichen Substanzen halte der Opalinuston zurück. Denn die meisten Zerfallsprodukte sind Kationen (also positiv geladene Teilchen), die sich an die negativ geladenen Tonoberflächen anheften und daher stecken bleiben. »Es ist sehr mühsam, diese Kationen dort überhaupt zur Diffusion zu bringen«, erklärt der Geochemiker. »Rein rechnerisch können einzelne Radionuklide die Biosphäre erreichen, aber nur in unkritischen Konzentrationen.« Bei diesen Nukliden handelt es sich um radioaktive Isotope der Elemente Chlor und Iod, die als Anionen vorliegen, also negativ geladen sind und deshalb – wenn auch sehr langsam – durch die Poren diffundieren können (siehe Interview »Plutonium ist nicht das Hauptproblem«, S. 64).

Doch Atommüll ist nicht gleich Atommüll. Der überwiegende Teil der in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle – nach Schätzungen der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) werden das bis zum Jahr 2080 insgesamt etwa 620000 Kubikmeter sein – ist als »vernachlässigbar wärmeentwickelnd« klassifiziert: Das sind beispielsweise Rückstände aus Forschungs- oder Medizinlabors, die mit radioaktiven Substanzen arbeiten, oder Bauteile von stillgelegten Atomkraftwerken. Sie geben zwar noch radioaktive Strahlung ab, setzen dabei aber quasi keine Wärme frei. Rund die Hälfte dieses Mülls soll ab Ende der 2020er Jahre im Schacht Konrad eingelagert werden (siehe »Atommülllager in Deutschland«, S. 58/59). Ausgediente Brennstäbe aus Kernkraftwerken geben auf Grund der atomaren Zerfallsreaktionen hingegen noch jahrzehntelang Hitze ab, weshalb man sie als stark wärmeentwickelnd bezeichnet. Nach ihrer aktiven Dienstzeit in einem Atomkraftwerk kühlen sie einige Jahre lang in Abklingbecken ab. Anschließend müssen sie noch weitere 30 bis 40 Jahre oberirdisch lagern, weil sie noch zu viel Wärme abstrahlen, um unter Tage verfrachtet werden zu können. Und selbst dann sind die Stäbe noch heiß: Packt man sie nach dem derzeitigen Stand der Technik in Fässern zusammen, hat ein Fass eine Leistung von bis zu 1500 Watt, das ist in etwa so viel wie ein handelsüblicher Wasserkocher. Diese Abfälle werden laut BGE rund 27000 Kubikmeter des gesamten Abfallvolumens ausmachen. Der tatsächliche Umfang kann sich aber ändern, etwa falls auf Grund der örtlichen Gegebenheiten ganz andere Behälter nötig werden als die, mit denen man bislang rechnet. Für diesen Abfall, ebenso wie für die andere Hälfte des kaum Wärme entwickelnden Atommülls, muss noch ein geeignetes Lager gefunden werden.

Olivier Leupin beschäftigt sich mit der Frage, wie die heißen Fässer die Eigenschaften des Gesteins verändern und wie sie anzuordnen sind, damit dessen Stabilität und Dichtigkeit nicht in Mitleidenschaft gezogen werden. Der Wissenschaftler steht vor einem verschlossenen Felsstollen, aus dem sich riesige Bündel bunter Kabel nach draußen schlängeln und schließlich in verschiedensten Anzeigeräten auf einer Empore aus Stahlgitter verschwinden. Seit 2014 untersucht der Geochemiker im Full-scale emplacement experiment (etwa: 1:1-Einlagerungsexperiment) die



SWISSTOPA, FELSLABOR MONT TERRI, PAUL BOSSART; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

### Nach der Einlagerung des radioaktiven Abfalls laufen in einem Tiefenlager verschiedene Prozesse ab, die teils hunderte oder tausende Jahre andauern.

Einlagerung Wärme entwickelnder Abfallbehälter unter realen Bedingungen.

Die Schweizer werden ihre ausgedienten Brennstäbe nach der derzeitigen Planung in viereinhalb Meter lange Fässer von etwa einem Meter Durchmesser packen, mit einem 12 bis 14 Zentimeter dicken Stahlmantel. Entsprechend haben Leupin und sein Team drei zylinderförmige Heizungen mit diesen Maßen und jeweils 1350 Watt Leistung in Abständen von drei Metern in den Stollen eingebaut, mit einer 80 Zentimeter dicken Schicht aus Bentonitgranulat umhüllt und das Ganze verschlossen.

Seit Anfang 2015 beheizen die Zylinder das Gestein, und die Schweizer beobachten laufend zahlreiche Parameter, die ihre Sensoren an mehr als 1500 Messpunkten aufnehmen. »Es war nicht ganz einfach, den Stollen wieder zu verschließen. Von ihm führen 700 Kabel hinaus – und trotzdem muss er dicht sein«, erzählt Leupin von den Schwierigkeiten beim Design des Versuchs.

### Heizungen im Berg simulieren Behälter mit hoch radioaktivem Abfall

Nach dem Ausheben der Stollen wurden diese etwa zwei Jahre lang belüftet, um nachzuvollziehen, wie sich das auf das Gestein auswirkt. Denn in einem unterirdischen Lager in 800 bis 900 Meter Tiefe wäre solch eine Maßnahme notwendig, allein schon um wegen des aufgewirbelten Staubs und der entstehenden Hitze annehmbare Arbeitsbedingungen zu schaffen. Anschließend wurden die »Heizungen« auf Bentonitsockeln im Tunnel montiert. Eine imposante fünfarmige Schneckenverfüllmaschine (Foto auf S. 56), die eigens für diesen Zweck gebaut wurde und wie eine riesige Krake den Tunnel bewacht, brachte in Millimeterarbeit 255 Tonnen granularen Bentonit in den Hohlraum ein. Die Messwerte, die die Experten seither erhalten, waren bereits für Überraschungen gut: Zum einen sank

der Sauerstoffgehalt im Gestein innerhalb von Wochen fast auf null – die Wissenschaftler hatten mit 10 bis 50 Jahren gerechnet. Das sei von Vorteil, denn Sauerstoff beschleunigt die Korrosion der Metallbehälter, sagt der Nagra-Experte. Wohin das Gas entwichen ist und ob der Bentonit es möglicherweise aufgenommen hat, ist noch nicht geklärt.

Zur Temperaturentwicklung gibt es ebenfalls eine gute Nachricht. »Wir hatten angenommen, dass sich das Gestein rund um das mittlere Element stärker erwärmen würde als das um die äußeren«, auf Grund der zusätzlichen Wärmeabgabe der äußeren beiden Heizzylinder. Das war aber nicht so. Neben der Temperatur erfassen die Forscherinnen und Forscher zahlreiche physikalische Parameter des Ge-

steins, wie etwa den Gehalt des Porenwassers. Wenn sich der Tonstein erwärmt, verändern sich seine physikalischen Eigenschaften, er wird beispielsweise durchlässiger. Kritisch sei ein Wert von 85 Grad, erläutert Leupin. Das ist die »Paläotemperatur« des Tonsteins – also die Temperatur, der er bereits in der Vergangenheit ausgesetzt war. Erhitzt er sich darüber hinaus, wird er möglicherweise brüchig. Leupins Heizungen starten mit einer Außentemperatur von 140 Grad Celsius, dem Maximalwert, den die Fässer theoretisch erreichen können. Wie warm es dort wird, wo der Bentonit aufhört und der Opalinuston beginnt, ist nun die spannende Frage. Den Berechnungen nach sollten an diesem Übergang maximal etwa 80 Grad herrschen. Ob

## Daten für die Nachwelt

Die Messungen im Felslabor Mont Terri dienen nicht nur Forschungszwecken. Sie sollen als Referenzwerte für spätere Untersuchungen an den möglichen Endlagerstandorten herangezogen werden. Um die Daten für dieses hochsensible Thema sicher aufzubewahren und vor Manipulationen zu schützen, arbeitet die BGR mit dem Bundesarchiv zusammen.

Alle Daten, die im Felslabor erhoben werden, archiviert das Bundesarchiv für einen unbegrenzten Zeitraum. Die Behörde stellt sicher, dass die Daten rechtskonform aufbewahrt werden und gewährleistet, dass sie seit ihrer Speicherung nicht verändert wurden. Stellt jemand die Daten oder deren Verwendbarkeit im Lauf der Jahre in Frage – was bei einer so politisch brisanten Frage wie der Suche nach einem Endlager praktisch vorprogrammiert ist –, muss das Bundesarchiv einen Beweis für die Integrität der Daten liefern, der dann als Grundlage für Gutachten vor Gericht dient.

Daher werden alle Messdaten digital in einem System erfasst. Zusätzlich speichern die Wissenschaftler Metadaten wie die Parameter der Messgeräte oder die Bedingungen vor Ort dazu ab. Dafür müssen sich die Forscher mit einer digitalen Signaturkarte am System anmelden, so dass zu jedem Datensatz die Informationen

darüber abgespeichert werden, wer sie erfasst hat und zu welchem Zeitpunkt. Diese Person bestätigt damit gleichzeitig die Plausibilität und Vollständigkeit der Daten. Darüber hinaus erstellt das System für jeden Datensatz einen so genannten Hashwert, der sie unverwechselbar macht. Werden Einträge nachträglich geändert, ist das durch den Hashwert direkt nachvollziehbar.

Das »Gesamtpaket« der Datensätze mit allen zugehörigen Informationen wird in einen digitalen Container verpackt, den man sich ähnlich wie einen Zipordner vorstellen kann, und über eine Webapp direkt auf den Servern des Bundesarchivs gespeichert. Sollten zu einem späteren Zeitpunkt neue Auswertungen nötig sein, können die Experten jederzeit auf das Datenarchiv zugreifen – auch zukünftige Generationen.

»Natürlich haben sich unsere Arbeitsprozesse dadurch massiv verändert«, sagt Hendrik Albers, der das Projekt für die BGR leitet. Indem die Forscher auf Wünsche der Nutzer eingehen, wollen sie sicherstellen, dass die neue Methode akzeptiert wird. So fand etwa ein digitaler Stift Eingang in das Prozedere: Damit lassen sich beispielsweise handschriftliche Notizen als Metadaten direkt in die App eintragen oder Versuchsskizzen anfertigen.



VERENA TANG

Während die digitale Datenerfassung bereits im ganzen Labor stattfindet, läuft die Eingabe per App schrittweise an. Etwa 30 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verwenden sie derzeit. Wenn in einigen Jahren mögliche Standorte erkundet werden, könnte man die dort angestellten Messungen ebenso dokumentieren. »Diese sensiblen Daten sollen von der ersten Stunde an mit der entsprechenden Sorgfalt behandelt werden«, sagt Albers.

das stimmt, wird sich noch zeigen. Derzeit haben die Heizelemente an ihrer Oberfläche eine Temperatur von 135 Grad Celsius, beim Übergang von Bentonit zum Opalinuston sind es 55. Mindestens zehn Jahre lang soll der Versuch laufen.

Leupin rechnet damit, dass die Stollen in einem Endlager etwa 40 Meter Abstand voneinander haben müssen, damit die Behälter den Tonstein nicht über den kritischen Wert von 85 Grad aufheizen. Riesige Mengen Gestein müssen also für Schächte, Tunnel und Stollen ausgehoben werden. Das ist zum einen teuer, weil die Gänge im empfindlichen Opalinuston zusätzlich stabilisiert werden müssen. Zum anderen beansprucht die mechanische Arbeit das Material.

Jürgen Hesser hat erst vor Kurzem in Echtzeit untersucht, welchen Effekt der Bau eines neuen Tunnels auf das umliegende Gestein hat. Von 2018 bis 2019 wurde das Felslabor erweitert, und der Bergbauingenieur hat mit seinem Team die nähere Umgebung der Ausbauzone genauestens überwacht. Über dem entstehenden Tunnel, darunter und quer hindurch haben die BGR-Experten Bohrungen angesetzt, mehr als 400 Sensoren platziert und Spannungsänderungen im Gestein sowie weitere Parameter wie Verformungen und Porendrücke aufgenommen. Die Spannungsmessungen zeigten deutlich, »wann die Mannschaft morgens die Maschinen angeworfen hat und wann sie Feierabend gemacht hat«, erzählt Hesser.

### **Hohle Bohrkern aus der Tiefe enthüllen, welche Spannungen auf das Gestein wirken**

Er muss dabei fast schreien, denn in der Nähe holen gerade zwei Arbeiter unter großem Lärm einen Bohrkern aus zehn Meter Tiefe herauf. Im Experiment mit dem passenden Namen Sandwich wird ein Schacht ausgehoben und anschließend mit abwechselnden Schichten aus Kalziumbentonit und so genannten Äquipotenzialschichten gefüllt, die das Wasser in der Schachtsäule später gleichmäßig verteilen sollen. Wie genau Letztere zusammengesetzt sein müssen, erforscht derzeit eine Gruppe am Karlsruher Institut für Technologie. Hesser misst die Spannungen im Gestein vor dem Ausheben. Dazu holen seine Kollegen in wochenlanger Arbeit Bohrkern Stück für Stück aus dem Berg: jeweils zuerst mit einem dünnen und dann mit einem dickeren Bohrer, so dass beim zweiten Mal der Bohrkern innen hohl ist. Dadurch können die Wissenschaftler während der Bohrung mit einer Sonde die Verformungen im Innern messen.

Anschließend packen sie die Bohrkern einzeln in Holzkisten und schicken sie zur Analyse in ihr Labor nach Hannover. Dort werden Kennwerte zu den Verformungseigenschaften der Gesteinskern bestimmt. In Kombination mit den gemessenen Verformungen in den Bohrungen können die Wissenschaftler dann im Nachhinein berechnen, welche Spannungen auf das Gestein gewirkt haben.

Nach dem Verfüllen des Schachts schließlich wird das darin eingefüllte Material allmählich mit Wasser gesättigt. Die Sättigung und die dadurch aktivierten mechanischen und hydraulischen Prozesse werden die Forscher mit Sensoren im Gebirge und in den eingebrachten Schichten genau beobachten. Ziel des Experiments ist es herauszufinden, ob und wie die gewählte sandwichartige Abdichtung von Schächten im Tongestein funktioniert und wie sie auf

das umgebende Gebirge wirkt. Am Ende wollen die Fachleute so beurteilen können, welches Material sich eignet, um ein Atommülllager »stillzulegen«, also alle offenen Schächte und Stollen aufzufüllen und abzudichten.

»Die Ergebnisse sind von vielen Faktoren abhängig: zum Beispiel davon, wie viel Gestein sich über der Bohrung befindet, von der Schichtung und von der Struktur«, erläutert Hesser. Über eines darf man sich keine Illusionen machen: »Die Ergebnisse der Untersuchungen in Mont Terri sind nicht direkt auf andere Standorte übertragbar«, sagt der Experte klar. Vielmehr erforschen die Wissenschaftler Grundlagen, entwickeln Methoden und schaffen so eine Basis, auf der ein möglicher Standort fachgerecht untersucht werden kann. Wenn solche in Deutschland auserkoren sind, müssen dort erst einmal umfangreiche Analysen gemacht werden. Die Arbeit der Hannoveraner in der Schweiz soll ermöglichen, dass dies optimal abläuft.

Bis es so weit ist, könnte es noch ziemlich lange dauern. Im Herbst 2020 will die BGE auf der »Fachkonferenz Teilgebiete« öffentlich bekannt geben, welche Gebiete auf Grund geologischer Gegebenheiten aus dem Auswahlprozess ausscheiden. Erst anschließend entscheiden Bundestag und Bundesrat, welche der dann möglichen Standorte tatsächlich erkundet werden. Nach diesen Untersuchungen, die sich über viele Jahre ziehen werden, steht schließlich die Entscheidung über den endgültigen Standort an. Laut dem Standortauswahlgesetz soll das 2031 geschehen.

Dann könnte etwa ab dem Jahr 2050 radioaktiver Abfall in ein Endlager verfrachtet werden. Für die Zeit der Einlagerung – so sieht es wiederum das Standortauswahlgesetz vor – muss es möglich sein, die Abfälle zurückzuholen. Das könnte etwa dann nötig werden, wenn sich der Kenntnisstand ändert oder unvorhergesehene Probleme auftreten. So will man unter anderem ein Desaster wie bei der Schachanlage Asse II vermeiden (siehe »Atommülllager in Deutschland«, S. 58/59). Erst danach wird das Endlager stillgelegt: Stollen, Zugänge und Schächte werden gefüllt und verschlossen. Für die darauf folgenden 500 Jahre, so ist es ebenfalls im Gesetz festgeschrieben, müssen Vorkehrungen für die mögliche Bergung der Abfälle getroffen werden. Danach ist alles, was unten lagert, sich selbst und den Naturgesetzen überlassen. Ob der Berg dann tatsächlich eine Million Jahre lang dicht hält, werden wir nicht mehr erfahren. ◀

### **QUELLEN**

**Clauer, N. et al.:** Geochemical signature of paleofluids in microstructures from Main Fault in the Opalinus Clay of the Mont Terri rock laboratory, Switzerland. *Swiss Journal of Geosciences* 110, 2017

**Hoth, Peer et al.:** Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. BGR, 2007

**Nagra:** Technical Report 15-02. Nagra, 2019

### **WEBLINK**

[www.endlagersuche-infoplattform.de](http://www.endlagersuche-infoplattform.de)

*Die Informationsplattform der BGE zur Endlagersuche*

# INTERVIEW

## »PLUTONIUM IST NICHT DAS HAUPTPROBLEM«

**Kann Transmutation helfen, ein Endlager für künftige Generationen sicherer zu machen? Ein Gespräch mit Dirk Bosbach, Sprecher des Helmholtz-Forschungsprogramms NUSAFE zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung und Reaktorsicherheit.**

»spektrum.de/artikel/1744796

**Herr Bosbach, mit Hilfe der so genannten Transmutation ließen sich radioaktive Elemente, die hunderttausende Jahre lang strahlen, in Stoffe mit viel kürzerer Halbwertszeit »verwandeln«. Das klingt traumhaft. Was kann die Technologie tatsächlich leisten?**

Ja, das hört sich viel versprechend an. In dem Zusammenhang heißt es oft, dass man mit der Technologie ein Endlager für radioaktive Abfälle vermeiden könnte. So einfach ist es aber nicht.

Bei der Kernspaltung entstehen aus Uran neue Elemente, die Spaltprodukte. Daneben bilden sich Elemente, die schwerer sind als Uran: Neptunium, Plutonium, Americium und Curium, die so genannten Transurane. Diese kann man in der Tat sehr gut transmutieren, das heißt, nach ihrer Abtrennung vom restlichen Abfall durch die Bestrahlung mit Neutronen in kurzlebige oder sogar stabile Elemente umwandeln. Es gibt aber trotzdem noch fünf bis sechs sehr langlebige Spaltprodukte, bei denen das nicht möglich ist. Dazu gehören Cäsium-135, Iod-129 und Selen-79. Man könnte das Endlager also gar nicht vollständig vermeiden.

Außerdem haben wir in Deutschland in der Vergangenheit einen Teil der bestrahlten Brennelemente im Ausland wiederaufarbeiten lassen. Nach Abtrennung von Uran und Plutonium wurden die hoch radioaktiven Abfälle in Gläser konditioniert, also quasi eingeschmolzen, und mit den berühmten Castor-Transporten zu uns zurückgebracht. Die Gläser kann man eigentlich nicht noch einmal anfassen, es sei denn, unter enormem Aufwand. Ihr Anteil am gesamten Atommüll liegt bei rund zehn Prozent, und man müsste sie auf jeden Fall ebenfalls endlagern.

**Könnte man ein Endlager zumindest kleiner bauen?**

Ja. Angenommen, man würde Uran und Plutonium aus den bestrahlten Brennelementen abtrennen, dann wäre das Volumen an hoch radioaktivem Abfall geringer. Doch die Sicherheitsanalysen zu Endlagerkonzepten weltweit zeigen,

dass es keinen wesentlichen Sicherheitsvorteil bringt, wenn das Endlager kleiner ist. Es lohnt sich nicht, diesen Parameter zu optimieren.

Dazu kommt, dass die einfach zu transmutierenden Radionuklide wie Uran und die Transurane gar nicht das Problem sind. Falls Grundwasser in einer fernen Zukunft Zugang zu den Abfällen bekommen sollte, ist die Frage wichtig, wie gut sich die Radionuklide darin lösen. Und unter Endlagerbedingungen nimmt ein Liter Wasser weniger als  $10^{-8}$  mol von Elementen wie Uran und Plutonium auf – sie sind also extrem unlöslich. Ausgerechnet einige der langlebigen Spaltprodukte, die ich eingangs erwähnt habe, haben hingegen eine vergleichsweise hohe Löslichkeit und werden von den Komponenten in einem Endlager, etwa dem Wirtsgestein, nur schlecht zurückgehalten. In allen Sicherheitsanalysen, die ich kenne, sind einige der langlebigen Spaltprodukte die Problemnuklide. Plutonium ist dagegen nicht das Hauptproblem.

**Wir brauchen also keine Transmutation?**

Doch, ich unterstütze das! Forschungsprogramme zu der Thematik sind immer interessant und liefern einen wichtigen Beitrag, beispielsweise für den Kompetenzerhalt in Deutschland. Wir arbeiten am Forschungszentrum Jülich zum Thema der Partitionierung. Ebenso ist es wichtig, in internationalen Projekten mitzuarbeiten, um neue Entwicklungen frühzeitig mitzubekommen.

**In Belgien entsteht unter dem Namen MYRRHA derzeit eine erste Anlage, 2036 soll sie fertig sein. Was ist das Ziel des Projekts?**

MYRRHA ist eine unterkritische beschleunigergetriebene Anlage, hier wird also eine bestimmte Technologie getestet. Die Anlage wird erstens Neutronen für die Forschung bereitstellen, zweitens Molybdän für medizinische Anwendungen produzieren und drittens wird dort Transmutationsforschung stattfinden. Um die Frage zu beantworten, wie





## Prof. Dr. Dirk Bosbach

leitet am Forschungszentrum Jülich den Bereich Nuclear Waste Management and Reactor Safety des Instituts für Energie- und Klimaforschung. Der Mineraloge hält darüber hinaus einen Lehrstuhl zur Entsorgung nuklearer Abfälle an der RWTH Aachen und ist Sprecher des Helmholtz-Forschungsprogramms NUSAFE zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung und Reaktorsicherheit.

Transmutation in der Praxis funktioniert, wäre MYRRHA ein interessanter Schritt.

### Inwieweit beteiligen sich deutsche Forschungsgruppen an dem Projekt?

Deutsche Einrichtungen leisten dort Beiträge zum Thema Reaktorsicherheit. Schon seit vielen Jahren gibt es hier zu Lande keine Forschung mehr zur Reaktorentwicklung, außer vielleicht in einzelnen Beiträgen in internationalen Projekten. Die Untersuchungen zur Kernenergie fokussieren sich bei uns auf Sicherheitsaspekte. Darin sind wir meines Erachtens sehr gut.

### Verlieren wir den Anschluss, wenn wir nicht zum Prozess der Transmutation an sich forschen?

Wir steigen ja 2022 aus der Kernenergie aus, schalten also dann den letzten Kernreaktor zur Stromerzeugung ab. Die Frage ist für mich daher vielmehr: Sollten wir langfristig, also über diesen Zeitraum hinaus, zum Thema Reaktorsicherheit kompetent bleiben? Ich halte das für sehr wichtig. Unsere Nachbarländer werden, wie es aussieht, weiterhin auf Kernenergie setzen. Wir sollten in der Lage sein, zu bewerten, was sich dort tut. Und in diesem Kontext ist es sinnvoll, das Thema Transmutation nicht ganz aus den Augen zu verlieren.

### Wie soll das Ihrer Meinung nach geschehen?

Ich würde im kleinen Rahmen Forschung zum Thema Transmutation fördern, um bei internationalen Projekten mitzuwirken. Wir sollten weiterhin über Kompetenzen verfügen können, die die anderen nicht haben, so dass wir als Projektpartner willkommen sind. Momentan ist das sehr gut organisiert. Die Frage ist nur, wie kann man das künftig halten? Wie kann man in Deutschland die Voraussetzungen schaffen, dass wir langfristig hervorragende Forschung auf dem Gebiet machen können, um in internationalen Projekten oder internationalen Gremien, in denen Sicherheitsstandards gesetzt werden, mitwirken zu können?

### Haben Sie die Sorge, die Expertise könnte abwandern, weil hier nicht genügend Freiraum besteht?

Ich glaube, dass die Strukturen dazu schon in Ordnung sind. Es gibt Fördermittel, im kleinen Rahmen. Aber die Stimmungslage ist schwierig. Gewisse politische Lager betrachten das Thema sehr kritisch und nehmen die Wissenschaftler, die in dem Bereich arbeiten, häufig persönlich in den Fokus. Wenn wir aber langfristig kompetent zu solchen Fragen sein wollen, dann müssen wir junge Leute dafür gewinnen. Und die haben keine Lust, jeden Tag am Pranger zu stehen.

### Die Endlagerforschung ist aber auch nicht gerade das beliebteste Thema in der Bevölkerung ...

Für Deutschland stimmt das. In anderen Ländern, beispielsweise in Schweden, ist das ganz anders. Ich habe aber den Eindruck, dass dieser lange Konflikt jetzt – nachdem die Endlagerkommission getagt hat – weitgehend beigelegt ist. Ich halte einen gesellschaftlichen Konsens hierzu für extrem wichtig. Und ich bin bereit, viel dafür zu tun, um ihn beizubehalten und in Richtung Endlager weiter voranzukommen. Sie sehen, ich bin ein großer Befürworter der tiefengeologischen Endlagerung. Ich bin wirklich zutiefst davon überzeugt, dass das die beste Option ist, die wir heute haben. Und genau heute müssen wir das Problem angehen! Die Generation, die die Kernenergie eingeführt und ganz überwiegend von ihr profitiert hat, sollte stark an der Lösung mitarbeiten.

### Was kann denn die Wissenschaft leisten, um diesen Konsens zu befördern?

Ich glaube, am meisten können wir durch Transparenz beitragen und durch gute wissenschaftliche Praxis: dass man sich darauf verlassen kann, dass das, was Forscher publizieren, belastbar ist. Als Wissenschaftler kann ich nur sagen, was geht und was nicht. Auf dieser Basis können Gesellschaft und Politik dann hoffentlich bewerten, in welche Richtung wir gehen sollen.

Das Gespräch führte »Spektrum«-Redakteurin **Verena Tang**.

#### LITERATURTIPP

**Knebel, J. et al.:** Was tun mit dem nuklearen Abfall? *Spektrum der Wissenschaft* 2/2013, S. 34-41

*Wie die Technologie der Transmutation funktioniert*

# KOSMOLOGIE WURMLÖCHER IM LABOR

Zwei Schwarze Löcher, die durch ein Wurmloch miteinander verbunden sind, könnten eines der größten Rätsel der Kosmologie lösen. Nun haben Physiker eine Möglichkeit vorgeschlagen, ein solches Szenario im Labor umzusetzen – ganz ohne Schwarze Löcher, aber mit ultrakalten Atomen.

Ultrakalte Atome können verschiedenste Quantensysteme nachahmen – und nun vielleicht sogar auch kosmologische Kolosse wie Schwarze Löcher.



**Philip Ball** ist Physiker und arbeitet als Autor in London.

» [spektrum.de/artikel/1744798](https://www.spektrum.de/artikel/1744798)

## AUF EINEN BLICK VERSCHWUNDENE INFORMATION

- 1** Fällt ein Teilchen in ein Schwarzes Loch, scheint die gesamte Information über seine Eigenschaften wie Masse, Ladung oder Geschwindigkeit für immer zu verschwinden.
- 2** Wenn das Schwarze Loch aber über ein Wurmloch mit einem anderen verbunden wäre, könnte die Information durch die Verbindung gleiten und aus dem zweiten kollabierten Stern entkommen.
- 3** Eine solche Situation wollen Physiker nun im Labor mit Hilfe ultrakalter Atome nachstellen.



► Manche physikalische Theorien klingen mehr nach Sciencefiction als nach der Wirklichkeit. Ein Beispiel dafür ist ein Szenario, bei dem zwei Schwarze Löcher durch die Gesetze der Quantenmechanik miteinander verbunden sind. Das bedeutet, dass alles, was mit einem der beiden kollabierten Sterne geschieht, augenblicklich den anderen beeinflusst – unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind. Sollte eine solche Verbindung tatsächlich existieren, könnte das eines der größten Rätsel der Kosmologie lösen.

Dringt Information in ein Schwarzes Loch ein, beispielsweise indem ein Quantenteilchen hineinfällt, wird sie extrem schnell bis zur Unkenntlichkeit verzerrt. Dieser Umstand bereitet Wissenschaftlern seit Jahrzehnten Bauchschmerzen. Denn eigentlich besagen die Gesetze der

Quantenmechanik, dass Information, genauso wie Energie, nicht vernichtet werden kann.

Einige Forscher haben einen Ausweg vorgeschlagen: Die Information über ein Quantenteilchen könnte nach gewisser Zeit aus einem anderen Schwarzen Loch entweichen, das mit dem ersten verbunden ist. In diesem Fall wirkt es, als sei das Teilchen über eine Abkürzung durch die Raumzeit gereist. Die quantenmechanische Verbindung zwischen den kollabierten Sternen entspricht dann einem Wurmloch.

Natürlich ist ein solches Ereignis bisher reine Spekulation. Die heutige Technologie ist weit davon entfernt, derartige Phänomene nachweisen zu können. Doch Physiker um Sepehr Nezami von der Stanford University haben nun einen Vorschlag ausgearbeitet, um die geschilderten Prozesse tatsächlich experimentell zu beobachten. Dabei



müsste man nicht mit echten Schwarzen Löchern hantieren. Die Forscher behaupten, dass man bloß einige Ionen und Laser benötigt. Sollte sich ihre Vorhersage bestätigen, könnten sie damit eine der grundlegendsten Fragen der Kosmologie beantworten, nämlich ob Schwarze Löcher Informationen wirklich unwiederbringlich zerstören.

Aus der Quantenmechanik folgt, dass die gesamte Menge an Information im Universum immer gleich bleibt. Schwarze Löcher werden allerdings durch die allgemeine Relativitätstheorie beschrieben und folgen daher anderen Gesetzmäßigkeiten. Sie entstehen aus massereichen Sternen, die unter dem Einfluss ihrer Schwerkraft kollabieren, so dass sie dann nur noch einen winzigen Bereich im Raum ausfüllen. Passiert ein Teilchen oder Licht den so genannten Ereignishorizont (siehe Glossar, S. 70) eines Schwarzen Lochs, kann es nie wieder entkommen – die Information, die es getragen hat, scheint damit auch für immer verschwunden.

### Auf der Suche nach der verschwundenen Information

Dieser scheinbare Widerspruch entsteht, weil es bislang keine Theorie gibt, die den Mikro- mit dem Makrokosmos vereint. Die Gesetze der Schwerkraft auf großen Skalen basieren auf der allgemeinen Relativitätstheorie, während die Quantenmechanik das Verhalten von kleinsten Teilchen erklärt. Seit über 100 Jahren versuchen Forscher, beide Theorien zu verbinden, doch bislang sind sie gescheitert.

In den 1970er Jahren widmete sich der britische Physiker Stephen Hawking dem Problem der verschwindenden Information in Schwarzen Löchern. Indem er die Gesetze der Thermodynamik und der Quantenmechanik auf eine gekrümmte Raumzeit anwendete, wie sie die allgemeine Relativitätstheorie für Schwarze Löcher vorgibt, erzielte er erstaunliche Ergebnisse: Seinen Berechnungen zufolge müssten die galaktischen Monster Strahlung abgeben – und damit langsam verdampfen.

Hawking nahm dabei an, dass ein Schwarzes Loch von einem Vakuum umgeben ist. Das heißt allerdings nicht, dass der Raum gänzlich leer ist (siehe »Spektrum« Dezember 2019, S. 12). In Wirklichkeit entstehen ständig Teilchen-Antiteilchen-Paare, die sich innerhalb kürzester Zeit wieder vernichten. Wegen der großen Gravitationsenergie eines Schwarzen Lochs gibt es dort besonders viele solcher kurzlebigen Paare. Das führt zu einem seltsamen Effekt: Wenn sich Teilchen und Antiteilchen in der Nähe des Ereignishorizonts bilden, kann es sein, dass ein Partikel den Horizont passiert – und damit für immer verschwindet –, während der dazugehörige Partner entkommt. Irgendwann stößt dieser mit einem verlassenen Antiteilchen zusammen, wodurch die beiden sich vernichten und ein Photon erzeugen, was zur so genannten Hawking-Strahlung führt.

Das hat bedeutende Folgen für das Schwarze Loch: Weil es Energie in Form von Photonen abstrahlt und Energie nicht aus dem Nichts entstehen kann, muss der kollabierende Stern an Masse verlieren. Mit der heutigen Technologie lässt sich das nicht nachweisen, doch das Phänomen ist unter Physikern akzeptiert. Auch wenn Hawkings Arbeit die moderne Kosmologie erheblich

geprägt hat, löst sie nicht das ursprüngliche Problem. Das Schwarze Loch strahlt zwar Photonen aus, aber diese enthalten in der Darstellung keinerlei Informationen über die hineingefallenen Teilchen. Sobald es vollständig verdampft ist, wären damit die darin befindlichen Informationen ebenfalls für immer verloren.

1997 fand der argentinische Physiker Juan Maldacena eine mögliche Lösung. Er postulierte die so genannte AdS/CFT-Korrespondenz, aus der zum Beispiel folgt, dass die Hawking-Strahlung Informationen über das Innere des Schwarzen Lochs enthält.

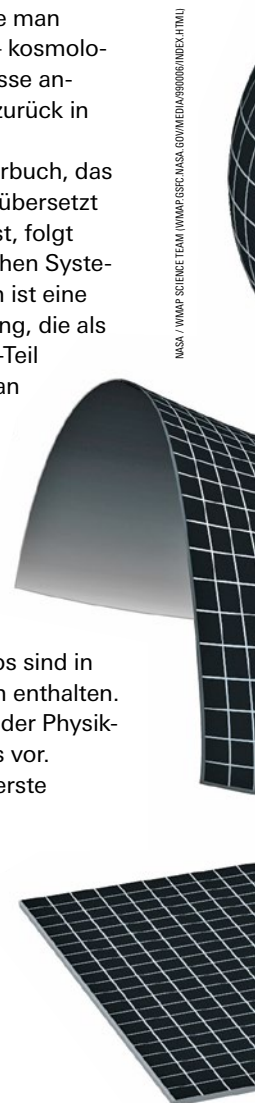
Die AdS/CFT-Korrespondenz gilt als eine der vielversprechendsten Richtungen der Stringtheorie – ein Ansatz, der die Quantenmechanik mit der Gravitation vereinen soll. Stringtheoretiker gehen davon aus, dass kleinste Fäden (englisch: Strings) durch ihre Schwingungen alle bekannten Elementarteilchen und Grundkräfte erzeugen. Die Theorie ist äußerst kompliziert und steckt seit Jahren in der Klemme: Unter anderem sagt sie etliche Teilchen vorher, die bislang nicht beobachtet wurden. Als Maldacena die AdS/CFT-Korrespondenz entwickelte, wirkte sie wie ein Hoffnungsschimmer. Sie besagt, dass bestimmte Modelle der Raumzeit mit Quantensystemen zusammenhängen.

Sollte eine solche Verbindung tatsächlich existieren, wäre das für Physiker extrem nützlich. Möchte man zum Beispiel gewisse Eigenschaften eines komplizierten quantenmechanischen Prozesses vorhersagen, könnte man stattdessen eine – unter Umständen einfachere – kosmologische Berechnung durchführen und die Ergebnisse anschließend gemäß der AdS/CFT-Korrespondenz zurück in die Quantenwelt übertragen.

Die AdS/CFT-Korrespondenz ist wie ein Wörterbuch, das kosmologische Prozesse in Quantenphänomene übersetzt und umgekehrt. Nimmt man die Verbindung ernst, folgt daraus, dass die völlig verschiedenen physikalischen Systeme zwei Seiten einer Medaille sind. Auf der einen ist eine Raumzeit mit einer bestimmten Art von Krümmung, die als Anti-de-Sitter-Raum bekannt ist. Das ist der AdS-Teil der Korrespondenz. Auf der anderen Seite hat man eine so genannte konforme Quantenfeldtheorie (englisch: conformal field theory, CFT), die in einer Dimension weniger auftritt als die Raumzeit. Das heißt: Die mathematische Beschreibung eines Anti-de-Sitter-Raums in  $d$  Dimensionen ist gleich der einer konformen Feldtheorie in  $d-1$  Dimensionen.

Die seltsame Verbindung funktioniert wie ein Hologramm – alle Informationen eines Kosmos sind in Quantensystemen in einer niedrigeren Dimension enthalten. Dieses so genannte holografische Prinzip schlug der Physik-Nobelpreisträger Gerardus 't Hooft 1993 erstmals vor. Maldacenas Arbeit lieferte vier Jahre später das erste konkrete Beispiel dafür.

Dabei entspricht der kontinuierliche Raum im AdS-Universum zahlreichen verschränkten Qubits (siehe Glossar) auf der CFT-Seite, die unentwegt miteinander wechselwirken. Einige Physiker sehen das holografische Prinzip als mathematisches Werkzeug, das Berechnungen



## Anti-de-Sitter-Universum

Albert Einstein erschütterte 1915 unser Verständnis des Universums, als er seine allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte. Wie er herausarbeitete, sind Zeit und Raum nicht statisch, sondern verändern ihre Form: Energie krümmt die Raumzeit.

Anfangs versuchten Physiker, Einsteins Gleichungen in vereinfachter Form zu lösen, indem sie leere Universen ohne Materie untersuchten, die überall gleich gekrümmt sind. Für einen solchen Fall erlaubt die allgemeine Relativitätstheorie drei mögliche Formen der Raumzeit: Sie ist entweder flach (Minkowski-Raum), positiv ge-

krümmt wie eine Kugeloberfläche (de-Sitter-Raum) oder negativ gekrümmt wie ein Sattel (Anti-de-Sitter-Raum, kurz: AdS) – mit dem Unterschied, dass das Universum dabei keine zweidimensionale Oberfläche ist, sondern das vierdimensionale Gegenstück zu den genannten Beispielen bildet.

Während Physiker sich fragten, welche der drei Lösungen unseren Kosmos am besten beschreibt, versuchten Mathematiker herauszufinden, ob die Lösungen überhaupt stabil sind. Das heißt: Wenn man eine winzige Masse in ein Universum einfügt, behält die Raumzeit ihre Form weitestgehend bei oder entsteht ein Schwarzes Loch, das sie vollkommen verzerrt?

Sobald in einem leeren Universum ein massehaltiges Objekt – etwa ein Teilchen – entsteht, bilden sich Gravitationswellen, die sich durch die Raumzeit ausbreiten. Ähnlich wie Wellen in einem Gewässer können sie mit der Zeit schwächer werden und versanden; das geschieht bei einer stabilen Lösung wie in unserem Universum. Oder sie könnten sich im instabilen Fall zu einer Art Tsunami aufschau-

keln, wodurch ein Schwarzes Loch entstünde.

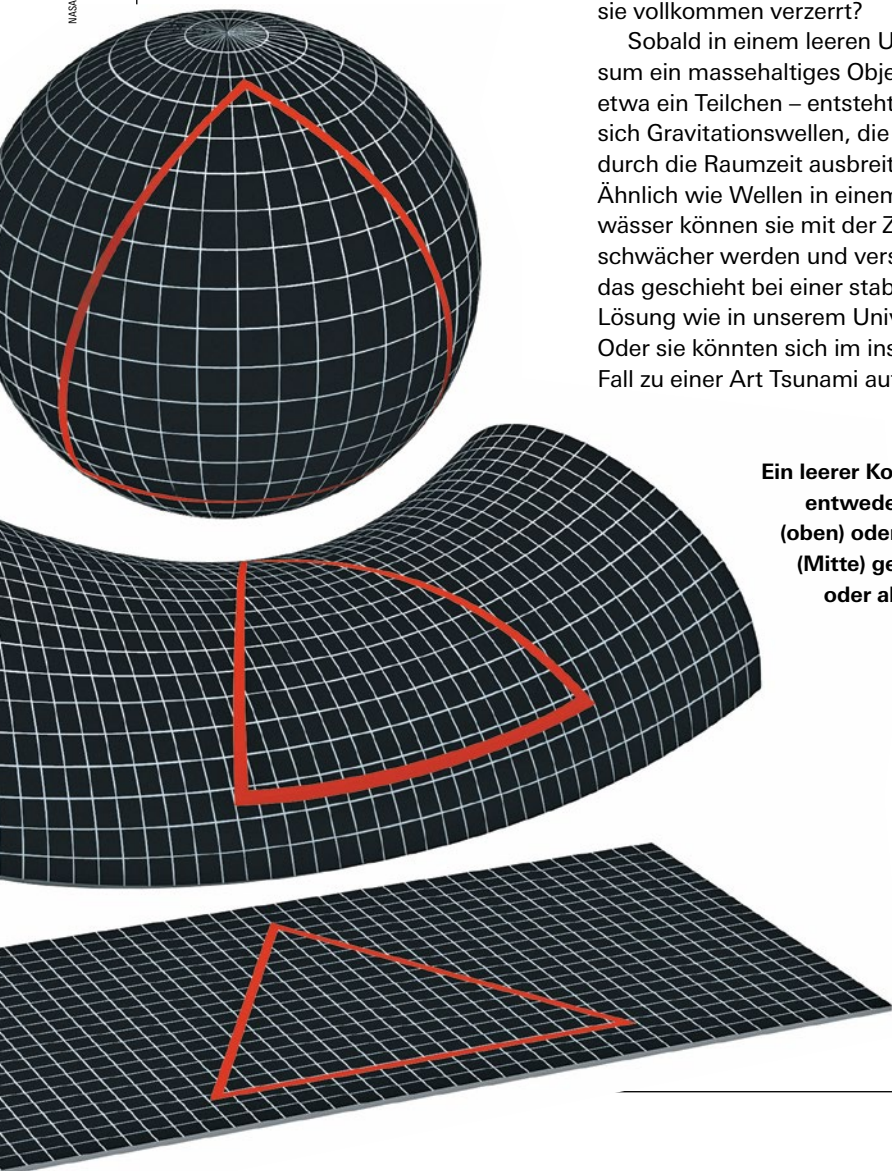
Der Physiker Helmut Friedrich vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam bewies 1986, dass der positiv gekrümmte de-Sitter-Raum stabil ist. Geringe Mengen Materie beeinflussen diese Art der Raumzeit zwar, verändern sie aber nicht maßgeblich. Sieben Jahre später folgte eine Veröffentlichung von den Mathematikern Demetrios Christodoulou und Sergiu Klainerman, in der sie zeigten, dass auch der flache Minkowski-Raum seine grobe Form beibehält, wenn man kleine Massen hinzufügt. Wie es sich mit dem Anti-de-Sitter-Raum verhält, blieb jedoch lange Zeit ein Rätsel.

Erst kürzlich konnte der Mathematiker Georgios Moschidis beweisen, was zahlreiche Physiker bereits ahnten: Ein Anti-de-Sitter-Universum ist nicht stabil. Sobald auch nur das kleinste bisschen Masse auftaucht, bilden sich Schwarze Löcher.

Für die AdS/CFT-Korrespondenz, einen viel versprechenden Bereich der Stringtheorie, der Anti-de-Sitter-Universen mit Quantensystemen (konforme Feldtheorien, CFT) verbindet, stellt das kein Problem dar. Tatsächlich braucht man in der Korrespondenz Schwarze Löcher auf der AdS-Seite, um überhaupt ein quantenphysikalisches Analogon zu finden. Die Arbeit von Moschidis legt nahe, dass Schwarze Löcher im AdS-Universum schneller entstehen als bisher gedacht.

Zudem war Physikern ohnehin schon klar, dass AdS-Universen nicht unserer eigenen Raumzeit entsprechen. Dennoch könnte die Korrespondenz helfen, kosmologische Rätsel in einem neuen Licht zu betrachten und vielleicht sogar zu beantworten. Häufig ist es hilfreich, Probleme in einer simpleren Umgebung zu untersuchen und dann zu überlegen, wie man sie in einem realistischeren Kontext lösen könnte.

**Ein leerer Kosmos ist entweder positiv (oben) oder negativ (Mitte) gekrümmt oder aber flach (unten).**



vereinfacht. Manche gehen allerdings weiter und folgern, dass verschränkte quantenmechanische Systeme tatsächlich eine Raumzeit mit Gravitation erzeugen. Das würde bedeuten, dass Schwerkraft aus Quanteneffekten besteht.

Bisher sind aber sowohl das holografische Prinzip als auch die AdS/CFT-Korrespondenz nur Vermutungen. Maldacena hat in seiner Arbeit gezeigt, dass einige Eigenschaften von Quantensystemen ein kosmologisches Analogon besitzen. Von einem vollständigen Wörterbuch, das jedem Phänomen auf der einen Seite eine entsprechende Variante auf der anderen zuweist, ist man noch weit entfernt. Zudem unterscheidet sich unsere Raumzeit stark von einem AdS-Universum (siehe »Anti-de-Sitter-Universum«, S. 69).

### Information tritt blitzartig aus Schwarzen Löchern wieder aus

Dennoch fasziniert der mysteriöse Zusammenhang viele Physiker. Denn unter anderem könnte es das Informationsparadoxon Schwarzer Löcher lösen. Dazu muss man das Szenario eines Teilchens, das in ein Schwarzes Loch fällt, auf die CFT-Seite übersetzen. Im quantenphysikalischen Bild geht die Information nicht verloren. Das war zunächst keine große Überraschung, schließlich besagt die Quantenmechanik ja, dass Information erhalten bleibt. Indem Physiker das entsprechende Quantensystem aber genauer studierten und anschließend wieder auf die AdS-Seite übertrugen, konnten sie nachverfolgen, was mit der Information passiert: Sie wird in die Hawking-Strahlung kodiert. Sollte die Korrespondenz richtig sein, wäre Information damit nicht unwiderruflich verloren, sondern würde langsam aus dem Schwarzen Loch entweichen.

Allerdings ließe sie sich in der Praxis kaum wiederherstellen. Wie Hawking herausfand, müsste man jedes einzelne Photon einfangen, das ein Schwarzes Loch während seiner gesamten Lebensdauer ausstrahlt. »Falls es irgendwie gelingen würde, alle Hawking-Strahlen zu sammeln, dann existiert im Prinzip eine Berechnung, mit der man die verschluckten Informationen extrahieren könnte«, sagt Norman Yao von der University of California in Berkeley. Doch wie eine solche Berechnung konkret aussieht, ist unklar.

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass Schwarze Löcher gemäß der Theorie nicht von Anfang an Informationen aussenden, sondern erst, wenn sie zur Hälfte verdampft sind. Grund dafür sind die Teilchen-Antiteilchen-Paare, aus denen die Hawking-Strahlung entsteht. Die Paare sind nämlich miteinander verschränkt, so dass zwischen dem Schwarzen Loch, in das eines der Teilchen hineinfällt, und den ausgesandten Photonen eine quantenmechanische Verbindung besteht.

Kurz nach seiner Entstehung ist nur ein kleiner Bereich des Schwarzen Lochs mit der Hawking-Strahlung verschränkt. Der Bereich wächst im Lauf der Zeit immer weiter an, bis der kollabierte Stern zur Hälfte verdampft ist. Von da an ist das gesamte Schwarze Loch mit der ausgesandten Strahlung verbunden. Die Photonen enthalten daher Informationen über das Innere des galaktischen Ungetüms. Allerdings verdampfen Schwarze Löcher nur sehr langsam – ein Exemplar von der Masse der Sonne überlebt etwa  $10^{67}$  Jahre.

Bis 2007 gingen Physiker davon aus, dass die verschluckte Information nach der Halbwertszeit mit gleichbleibender Geschwindigkeit herausickert. Patrick Hayden von der Stanford University und John Preskill vom California Institute of Technology widerlegten diese Vorstellung jedoch. Sie konnten zeigen, dass die Information nicht gleichmäßig, sondern extrem schnell entweichen würde. »Sobald ein Schwarzes Loch zur Hälfte verdampft ist, prallt jede weitere Information wie bei einem Spiegel sofort wieder zurück«, so Yao.

Hayden und Preskill kamen zu ihrem Ergebnis, als sie auf eine Gemeinsamkeit von Schwarzen Löchern und bestimmten Quantensystemen stießen. Denn die galaktischen Monster verhalten sich wie ein äußerst effizientes Verschlüsselungssystem (siehe Glossar): Sobald ein Teilchen den Ereignishorizont passiert, werden seine Eigenschaften wie Masse, Ladung, Impuls und so weiter schlagartig mit denen aller anderen darin gefangenen Materie vermischt. Dieser Effekt ähnelt der Art und Weise, wie sich Wärme in einem System über die Zeit gleichmäßig verteilt, wenn es zum Gleichgewicht kommt – nur dass er viel schneller vonstattgeht. Dadurch erscheint es von außen betrachtet unmöglich, jemals wieder an die Informationen heranzukommen. »Es ist wie bei einem Kartenspiel«, sagt der Physiker Adam Brown von der Stanford University. »Man geht davon aus, dass es gemischt ist, sobald sich

## Glossar

Mikroskopische Teilchen können miteinander **verschränkt** sein. Das bedeutet, dass der Zustand des einen unmittelbar von dem des anderen abhängt. Dadurch beeinflussen sich verschränkte Systeme fast augenblicklich.

Der **Ereignishorizont** eines Schwarzen Lochs entspricht einer Distanz, ab der ein Objekt dem kollabierten Stern nicht mehr entkommen kann. Selbst masselose Photonen werden an diesem Punkt unwiederbringlich in das Schwarze Loch hineingesaugt.

Wenn Information – beispielsweise in Form eines Qubits – in ein Schwarzes Loch fällt, wird sie **verschlüsselt**: Eigenschaften wie Masse, Energie oder Ladung vermischen sich so stark mit denen der übrigen Materie, dass es unmöglich erscheint, jemals wieder an die Information heranzukommen.

**Dekohärenz** tritt auf, wenn ein Quantensystem mit seiner Umgebung wechselwirkt. Der ursprüngliche Zustand des Systems verändert sich dadurch, und die darin anfangs enthaltene Information geht unwiederbringlich verloren.

kein offensichtliches Muster mehr in der Reihenfolge der Karten erkennen lässt. Das heißt allerdings nicht, dass die Karten wirklich vollkommen zufällig angeordnet sind.«

Nahezu jedes Vielteilchen-Quantensystem wird irgendwann durcheinandergeraten, Physiker bezeichnen dieses Phänomen als Quantenverschlüsselung. Eine der wichtigsten Eigenschaften des Prozesses ist, dass er umkehrbar ist: Es ist prinzipiell möglich, die Information in einem durchmischten Quantensystem wiederherzustellen.

Wie lange es dauert, bis ein System verschlüsselt ist, hängt davon ab, wie die darin enthaltenen Teilchen miteinander wechselwirken. Um die Verschlüsselungsrate zu bestimmen, nutzen Wissenschaftler einen so genannten Hamilton-Operator, aus dem sich die wichtigsten physikalischen Eigenschaften eines Systems berechnen lassen. Schwarze Löcher stechen dabei heraus: Aus ihrem Hamilton-Operator folgt, dass sie Quanteninformationen schnellstmöglich verschlüsseln (siehe »Spektrum« Juni 2019, S. 24).

Das führte Hayden und Preskill zu ihrer Schlussfolgerung. Fällt ein Teilchen in ein Schwarzes Loch, wird die dazugehörige Information nahezu instantan mit der darin befindlichen vermischt. Die daraufhin austretende Hawking-Strahlung ist daher fast augenblicklich mit dem neuen Zustand des Schwarzen Lochs verschränkt, wodurch sie die neue Information ebenfalls enthält.

Sollte die AdS/CFT-Korrespondenz also zutreffen, liefern die Ergebnisse der Physiker eine Lösung des Informationsparadoxons. Um an die Information eines Teilchens zu gelangen, das einen Ereignishorizont passiert hat, müsste man aber warten, bis es halb verdampft ist – eine Zeitspanne, die das bisherige Alter unseres Universums weit übersteigt.

### Verschränkte Schwarze Löcher

Deswegen gaben sich einige Wissenschaftler nicht mit der Lösung zufrieden. Sie suchten nach einer anderen Möglichkeit, um an die verschluckte Information heranzukommen – und wurden fündig. Ping Gao und Daniel Jafferis von der Harvard University fragten sich 2016 zusammen mit Aron Wall vom Institute for Advanced Study, was passieren würde, falls ein Schwarzes Loch mit etwas anderem als der Hawking-Strahlung verschränkt wäre, beispielsweise mit einem zweiten Schwarzen Loch. Ihren Berechnungen zufolge ließe sich dadurch die Information, die in den ersten kollabierten Stern fällt, aus dem zweiten herauslesen. Denn wenn die gesamte Materie der galaktischen Monster miteinander verschränkt ist, würde den Forschern zufolge ein vom ersten Schwarzen Loch verschlucktes Qubit praktisch sofort im zweiten registriert werden.

Als Gao und seine Kollegen den hypothetischen Prozess genauer untersuchten, fiel ihnen auf, dass er unter bestimmten Umständen einer Teleportation gleicht. Bereits 1997 gelang es Physikern erstmals, ein Teilchen erfolgreich im Labor zu teleportieren. Dafür nutzten sie die Eigenschaften der Verschränkung aus: Sie erzeugten zwei verschränkte Teilchen und übertrugen den Quantenzustand des ersten auf das zweite. Dieses ist danach nicht mehr vom ursprünglichen ersten Teilchen zu unterscheiden. Ein solches Ereignis

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



PETER JURIK / STOCK.ADOBE.COM

nis ist identisch zu jenem, bei dem das erste Partikel an einem Ort zerstört wird und augenblicklich an einer unterschiedlichen Stelle auftaucht – einer Teleportation.

Fällt ein Teilchen in ein Schwarzes Loch, das mit einem anderen verschränkt ist, wird es schnellstmöglich in den zweiten kollabierten Stern teleportiert. Das liegt daran, dass die Information im ersten Schwarzen Loch mit maximaler Geschwindigkeit von allen darin befindlichen Teilchen geteilt wird. Weil das Schwarze Loch aber an das zweite gekoppelt ist, erhält Letzteres fast augenblicklich die gesamten Informationen über das verschluckte Teilchen.

So interpretieren Quanteninformationstheoretiker den Prozess. Nimmt man allerdings die AdS/CFT-Korrespondenz ernst, dann entspricht der Kanal zwischen den verschränkten kollabierten Sternen einem Wurmloch. In dieser Sicht reisen die Qubits durch eine Abkürzung in der Raumzeit.

Obwohl Wurmlöcher mit der allgemeinen Relativitätstheorie konsistent sind, ging man bisher davon aus, dass sie nicht durchquerbar wären: Falls sie wirklich existieren, ließe sich nichts durch sie hindurchschicken. In ihrer Arbeit konnten Gao, Jafferis und Wall aber zeigen, dass die AdS/CFT-Korrespondenz passierbare Wurmlöcher erlaubt.

Sollte die Korrespondenz richtig sein, braucht man nicht direkt mit verschränkten Schwarzen Löchern im AdS-Bild zu hantieren. Stattdessen können Forscher Quantensysteme auf der CFT-Seite nutzen, die völlig gleichwertig sind. Nezhami und Brown haben nun unter anderem mit dem renommierten Stringtheoretiker Leonard Susskind von der Stanford University eine Möglichkeit ausgearbeitet, um ein solches Experiment umzusetzen.

Dafür haben sie ein Quantensystem gesucht, dessen Hamilton-Operator dem eines Schwarzen Lochs entspricht, in das ein Qubit an Information fällt. Weil kollabierende Sterne Informationen schnellstmöglich durchmischen, müsste man ein vergleichbares Quantenverschlüsselungssystem im Labor schaffen.

Tatsächlich haben Physiker Anfang 2019 eine solche Durchmischung von Qubits im Labor nachgewiesen. Auf einen Vorschlag von Yao und seinem Kollegen Beni Yoshida hin schufen Christopher Monroe in Maryland und sein Team einen quantenmechanischen Schaltkreis aus verschränkten, ultrakalten Ionen. Die Forscher hielten die Teilchen mittels elektromagnetischer Fallen gefangen, so dass die Ionen in einer Reihe angeordnet waren.

Eine der größten Herausforderungen des Versuchs war es, die Quantenverschlüsselung von anderen Prozessen zu unterscheiden. Weil es unmöglich ist, ein System vollkommen von der äußeren Umgebung abzuschotten, tritt in

Experimenten mit mikroskopischen Teilchen beispielsweise immer Dekohärenz ein. Dieser Effekt entsteht – wie die Verschlüsselung auch –, wenn Teilchen miteinander wechselwirken. Im Fall der Dekohärenz interagieren die Teilchen mit Partikeln aus der Umgebung, wodurch die Information des Quantensystems langsam entweicht und dadurch unwiederbringlich verloren geht.

Das ist der große Unterschied zwischen Dekohärenz und Verschlüsselung: Letztere kann rückgängig gemacht werden. In der Praxis lässt sich Dekohärenz niemals vollständig vermeiden, was sie zum Schreckensgespenst von Quantencomputern macht. Um sicherzustellen, dass die gelieferten Ergebnisse korrekt sind, muss daher jede Berechnung abgeschlossen sein, bevor das Phänomen einsetzt.

### Ultrakalte Quantensysteme als Wurm Löcher

Normalerweise beginnt ein Quantensystem mit seiner Umgebung zu wechselwirken, bevor die Verschlüsselung eintreten kann. Das macht es so schwer, Letztere innerhalb eines Systems nachzuweisen. Doch Monroes Team fand heraus, dass sich beide Effekte durch die Quantenteleportation voneinander unterscheiden lassen.

Dafür nutzten die Forscher einen Schaltkreis aus sieben verschränkten Ytterbium-Ionen, die in einer Reihe angeordnet waren. Sie spalteten das System in zwei Teile mit je drei Ionen auf; das übrig gebliebene Teilchen nutzten sie später für die Teleportation. Indem sie beide Teilsysteme gezielt auf verschiedene Art störten, durchmischten sie die darin enthaltene Information. Nun mussten sie nur noch nachweisen, dass die Quantenzustände der Teilsysteme auch wirklich verschlüsselt sind – und sie nicht etwa Dekohärenz hervorgerufen hatten.

Dazu teleportierten sie das übrig gebliebene Teilchen von einem Ende der Ionenreihe an das andere und wieder zurück. Zu Beginn des Versuchs waren alle Teilchenzustände miteinander verschränkt, zu jener Zeit war eine Teleportation also möglich. Die Störung hat allerdings die Zustände vermischt – hätte Dekohärenz eingesetzt, wäre daher ein Teil der Information verschwunden. In diesem Fall könnte man das Teilchen also nicht teleportieren. Ist die Information dagegen noch im System vorhanden, nur eben stark vermischt, kann der Vorgang allerdings gelingen, da alle Zustände miteinander verschränkt sind. Tatsächlich gelang es den Forschern, das Ytterbium-Ion in 80 Prozent der Fälle erfolgreich zu teleportieren. Dadurch konnten sie erstmals eine Quantenverschlüsselung experimentell nachweisen.

Brown und sein Team schlagen nun vor, dass man ähnliche quantenmechanische Schaltkreise nutzen könnte, um ein passierbares Wurmloch nachzustellen, das ein Qubit von einem Schwarzen Loch in ein anderes teleportiert. Dabei würden die Schwarzen Löcher aus verschränkten Ionen bestehen. Anschließend müsste man ein Qubit in eines der Systeme einführen, das dieses verschlüsselt. Nach einer gewissen Zeitspanne würde die Information im zweiten Quantensystem wieder unverschlüsselt auftauchen. Dass das Qubit über die Systeme hinweg übertragen wird, ist dabei nicht wirklich überraschend – schließlich sind die Ionen miteinander gekoppelt. Erstaunlich ist dage-

gen, dass man die Information im zweiten System nicht entschlüsseln muss, obwohl das erste Schwarze Loch sie vollständig durchmischt hatte.

Als der theoretische Physiker Brian Swingle von der University of Maryland im Oktober 2019 mit seinem Kollegen Monroe über ein solches Experiment sprach, erkannte Letzterer, dass der dafür benötigte Aufbau mehr oder weniger jenem entsprach, den er mit seinem Team für den Nachweis der Quantenverschlüsselung verwendet hatte. Damit ließe sich der von Swingle geschilderte Versuch durchaus realisieren.

So beeindruckend ein solches Experiment wäre, könnten es derzeit jedoch nicht die Raumzeit unseres Universums nachahmen. Stattdessen würden die Quantensysteme einem vereinfachten Modell des Kosmos entsprechen, nämlich einem Anti-de-Sitter-Raum. »Um ein realistisches Universum zu simulieren, das von Einsteins Gleichungen regiert wird, braucht man Systeme, die sehr schwer im Labor herzustellen sind«, sagt Maldacena.

Sollten die Ergebnisse des vorgeschlagenen Experiments die Vorhersagen der Forscher bestätigen, folgt daraus nicht unbedingt, dass die AdS/CFT-Korrespondenz korrekt ist. Denn ein solcher Versuch lässt sich genauso gut aus rein quantenphysikalischer Sicht betrachten – man muss nicht zwingend das holografische Prinzip nutzen, um den Ausgang des Experiments vorherzusagen. Dennoch lassen sich einige der vorhergesagten Phänomene einfacher durch die Korrespondenz beschreiben, zum Beispiel die Teleportation eines Teilchens, als eine Passage durch ein Wurmloch. »Während man das alles mit der Schrödingergleichung herleiten könnte, gibt es eine viel einfachere Erklärung, die sich auf Schwarze Löcher beruft«, so Brown.

Dass die kollabierten Sterne tatsächlich mit einer Hand voll gekühlter Ionen zusammenhängen, ist kaum zu glauben. Sollte sich die AdS/CFT-Korrespondenz jedoch als richtig erweisen, dann wären die Quantensysteme mehr als das Analogon eines Schwarzen Lochs – sie wären völlig gleichwertig. ◀

### QUELLEN

**Brown, A. R. et al.:** Quantum gravity in the lab: Teleportation by size and traversable wormholes. ArXiv 1911.06314, 2019

**Gao, P. et al.:** Traversable wormholes via a double trace deformation. Journal of High Energy Physics 151, 2017

**Landsman, K. A. et al.:** Verified quantum information scrambling. Nature 567, 2019

**Yoshida, B., Yao, N. Y.:** Disentangling scrambling and decoherence via quantum teleportation. Physical Review X 9, 2019

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Wormholes Reveal a Way to Manipulate Black Hole Information in the Lab« 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.





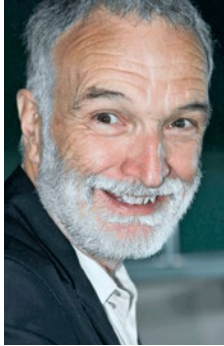
# Die **Spektrum** eBookFlat



Mit der **Spektrum eBookFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von zwölf E-Books (PDF-Format) des Sachbuchprogramms von **Springer Spektrum** aus den Bereichen Mathematik und Naturwissenschaften. Jeden Monat wird ein Buch ausgetauscht, so dass Sie im Jahr auf bis zu 24 Bücher zugreifen können. € 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.

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

# SCHLICHTING! MÜCKEN IM REGEN



**Im freien Flug überleben kleine Insekten selbst den Aufprall vergleichsweise schwerer Wassertropfen. Paradoxerweise rettet die Tiere ausgerechnet ihr geringes Gewicht.**

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/1744800](http://spektrum.de/artikel/1744800)

## Wer lauter große Dinge sehen will, muß sich zu einer Mücke wünschen

Wilhelm Heinse (1746–1803)

► Eine Mücke hat es nicht einfach. So verrät sie sich ihrem Opfer mit einem uns Menschen nur allzu gut bekannten, nervigen Summen. Das kann sie nicht verhindern – es ist eine physikalische Konsequenz ihrer mit einigen hundert Hertz schlagenden Flügel. Dieses Defizit gleicht sie mit einem guten Reaktionsvermögen wieder aus, und sie entweicht leicht einer nach ihr schlagenden Hand. Doch zugleich wirken Mücken enorm filigran und verletzlich. So sollten nicht erst Treffer mit einer Fliegenklatsche tödlich enden, sondern bereits viel kleinere Einwirkungen – etwa aufprallende Wassertropfen bei Regen.

Von solchen Tropfen gehen für die Mücke vor allem zwei prinzipielle Gefahren aus. Einerseits könnte das Wasser sie benetzen und ihr Flugverhalten einschränken oder sie sogar völlig umschließen. Aber viele Insekten haben vorgesorgt und schützen sich durch abweisende Härchen und eine spezielle, wachsartige Beschichtung. So sind sie sehr gut an feuchte Bedingungen angepasst. Die Vorsorge gegen Nebel und Regen wirkt übrigens teilweise sogar gegen Insektizide: Die Giftstoffe müssen zu weniger als 20 Mikrometer kleinen Tropfen zerstäubt werden, damit sie haften bleiben und nicht auf Grund ihrer Schwere und der geringen Kontaktfläche abgleiten.

Andererseits könnte man erwarten, dass bereits der Zusammenprall an sich bedrohlich ist. Immerhin ist die Masse von Regentropfen meist sehr viel größer als die einer Mücke. Dieses Problem haben Wissenschaftler des

Georgia Institute of Technology in Atlanta experimentell untersucht und die Ergebnisse 2012 publiziert.

Die Forscher sperrten Mücken in einen Behälter aus durchsichtigem Plexiglas und setzten sie künstlichem Regen aus Tropfen mit unterschiedlichen Durchmessern und Fallgeschwindigkeiten aus. Dabei verwendeten sie Mücken der Gattung *Anopheles*, die mit einer Größe von sechs Millimetern relativ klein sind. Sie sind oft in feuchten Klimazonen beheimatet und somit Regenschauer gewohnt. Aber wie genau kommen sie damit klar?

Eine Hochgeschwindigkeitskamera zeichnete die Bewegungen der Tropfen und der Mücken sowie deren Wechselwirkungen auf. Kügelchen aus Styropor ergänzten die Experimente. An ihnen konnten die Wissenschaftler die Zusammenstöße mit den Tropfen und die dabei ausgetauschten Kräfte systematisch und genau vermessen.

## Auf winzigen Skalen verleiht die Physik Superkräfte

Die dergestalt beobachteten Mücken haben typischerweise eine Masse von etwa zwei Milligramm. Regentropfen mit ein bis vier Millimeter Radius wiegen aber etwa das 2- bis 50-Fache. Zur Veranschaulichung der Kräfteverhältnisse zogen die Autoren die missliche Situation einer Person heran, die unter dem Rad eines Busses liegt: »Die Folgen so eines Szenarios deuten darauf hin, dass Mücken den Aufprall eines Regentropfens nicht überleben sollten.«

So eindrucksvoll der Vergleich scheint – er hinkt. Entscheidend für die Einwirkung eines Gewichts auf einen Körper (ob Mücke oder Mensch) ist der mechanische Druck, also die Kraft pro Kontaktfläche. Die Gewichtskraft ist proportional zur Masse und damit zum



**Eine Mücke, die sich bei Niederschlag an eine ungeschützte Stelle setzt, begibt sich in größere Gefahr als eine, die einfach weiterfliegt.**

Volumen des jeweiligen Objekts. Sie verändert sich grob gesehen mit der dritten Potenz des Radius  $r$ , also wie  $r^3$ . Die Kontaktfläche variiert allerdings nur mit dem Quadrat  $r^2$ . Das heißt, im Quotienten bleibt  $r$  übrig, der Druck nimmt also näherungsweise mit der Körpergröße zu. Die Mücke ist etwa 300-mal kleiner als der Mensch, darum ist auch der Druck zirka 300-mal geringer. Rein mechanisch dürfte die Mücke durch einen auf ihr liegenden Wassertropfen kaum in Schwierigkeiten geraten.

Anders sieht es aus, wenn ein schnell fallender Tropfen die Mücke trifft, während sie auf einem festen Untergrund wie einem Ast sitzt. Bei einem Tropfen, der so groß ist wie sie, ist sie den Berechnungen der Wissenschaftler zufolge rund dem 10 000-Fachen der eigenen Gewichtskraft ausgesetzt. Dem hat sie kaum etwas entgegenzusetzen.

Regen kann also durchaus bedrohlich sein, allerdings nicht im Flug. Bei den Mücken in der Versuchsbox zeigte sich nämlich: Wenn sich das Insekt genügend weit von einer festen Unterlage entfernt befindet, entkommt es der Situation.

Die Forscher konnten die Tropfen mit einer Pumpe bis auf neun Meter pro Sekunde beschleunigen. Das entspricht etwa der Endgeschwindigkeit bei natürlichem Niederschlag. Selbst dann gingen die Mücken in allen Fällen unversehrt aus den Zusammenstößen hervor. Bei Streifschüssen taumelten sie kurzfristig, fingen sich aber schnell wieder. Nach einem Volltreffer blieben sie am Tropfen hängen und wurden bis zu 20 Körperlängen weit

nach unten mitgerissen, bevor sie sich befreiten und äußerlich unbeeindruckt weiterflogen.

Auf Grund ihrer geringen Masse besitzt eine Mücke beim Aufprall ein entsprechend niedriges Beharrungsvermögen – der vergleichsweise schwere Tropfen bringt sie sehr schnell auf einer kurzen Beschleunigungsstrecke auf seine Fallgeschwindigkeit. Dabei verformt sich der Insektenkörper nur minimal. Dementsprechend ist auch die Reaktionskraft auf den Tropfen sehr klein, und dieser setzt fast ungebremst seinen Weg fort.

Insofern hat der Zusammenprall mit einem Regentropfen einen ähnlichen Effekt wie lokale Turbulenzen der Luft. Sie beeinträchtigen zwar den stabilen Flug; wie man jedoch aus Untersuchungen an anderen Insekten weiß, bewältigen die Tiere selbst starke Störungen innerhalb kürzester Zeit durch korrigierende Flügelschläge. Jedenfalls fliegt die Mücke bald nach der unfreiwilligen Mitnahme wieder ihres Weges, als wäre nichts gewesen. Vermutlich hilft ihr zudem die bereits erwähnte Wasser abweisende Behaarung dabei, sich gewissermaßen seitlich über den Tropfen abzurollen, ohne an ihm kleben zu bleiben.

Mücken überleben Treffer von vergleichsweise schweren Wassertropfen also nicht deswegen unbeschadet, weil sie besonders robust wären, sondern einzig dank ihrer geringen Masse. Menschlichen Beobachtern imponiert die scheinbare Widerstandsfähigkeit, weil unsere Anschauung von Vorgängen in einem ganz anderen Größenordnungsbereich geprägt wird.

**QUELLE**

**Dickerson, A.K. et al:** Mosquitoes survive raindrop collisions by virtue of their low mass. PNAS 1205446109, 2012

# PHYSIK DIE QUANTEN- DAMPFMASCHINE

**Was passiert, wenn man moderne Erkenntnisse über Quantenobjekte mit den Regeln der klassischen Thermodynamik verbindet? Es entstehen dabei bemerkenswerte Konzepte für die technischen Herausforderungen des Mikrokosmos.**



**Nicole Yunger Halpern** ist theoretische Physikerin an der Harvard University. Sie schreibt regelmäßig für »Quantum Frontiers«, den Blog des Instituts für Quanteninformation und Materie am California Institute of Technology.

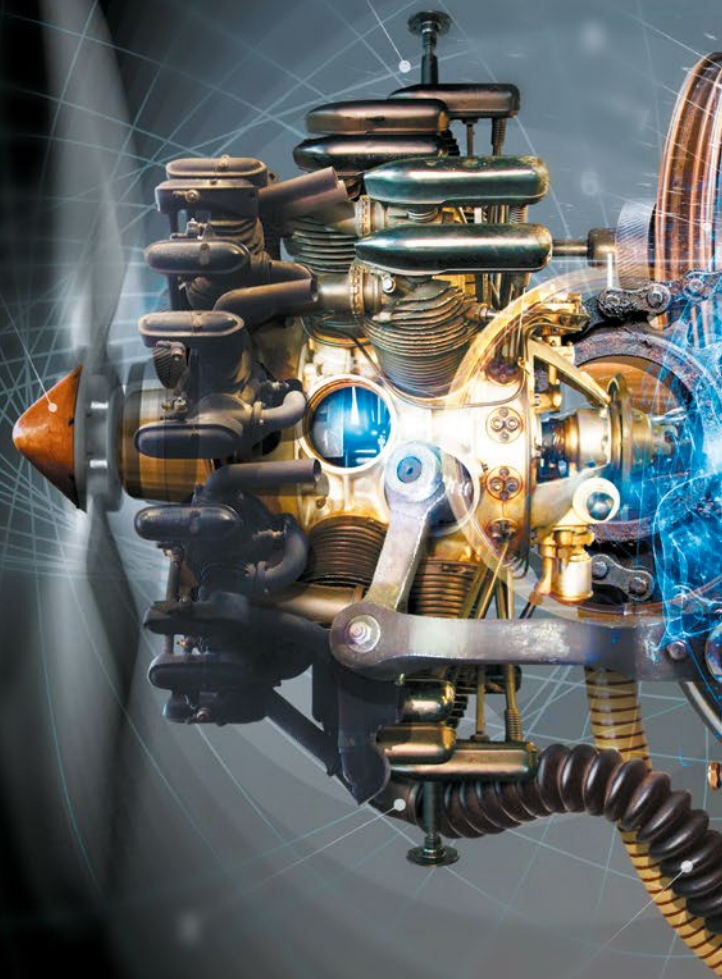
» [spektrum.de/artikel/1744802](http://spektrum.de/artikel/1744802)

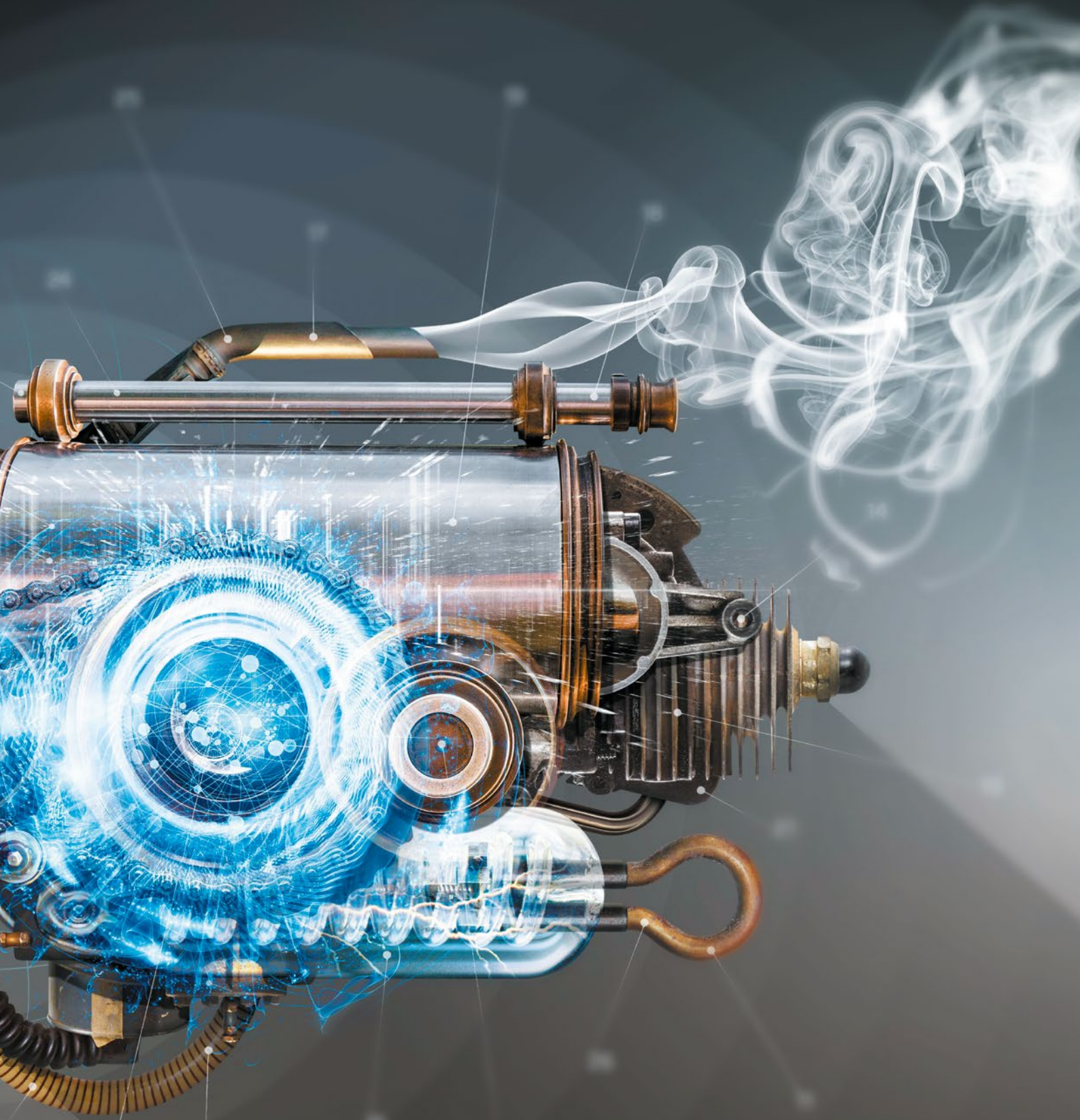
Das Steampunk-Genre hat in den letzten Jahrzehnten einen festen Platz in der Kunst eingenommen. In der Literatur und in Filmen spielen die Geschichten in von Fabriken verschmutzten Städten, inspiriert vom England der Industrialisierung und dem Wilden Westen – historische Schauplätze, an denen neue Technologien aufblühten und die Gesellschaft veränderten. Steampunk-Charaktere betreiben futuristische Technologien wie Roboter und Zeitmaschinen mit den Erfindungen des 19. Jahrhunderts. Die Gegenüberstellung von Neu und Alt schafft eine besondere Atmosphäre von Romantik und Abenteuer.

So wie der Steampunk Objekte aus der Sciencefiction und der viktorianischen Zeit verbindet, so vereint ein neues Gebiet der Physik die Quantenmechanik mit den wissenschaftlichen Prinzipien des 19. Jahrhunderts. Meine Kollegen und ich arbeiten im »Quanten-Steampunk« heute an der Schnittstelle dreier Gebiete: Quantenphysik, Informationstheorie und Thermodynamik.

Dabei wollen wir die Gesetze der Thermodynamik – mit solchen zentralen Begriffen wie Arbeit, Wärme und Wirkungsgrad – modernisieren, damit sie den besonderen Anforderungen jüngster Experimente, Technologien und

**Baupläne für Motoren, die Quantenmechanik und Thermodynamik vereinen, gibt es – anders als in dieser Illustration – bisher nur für den Mikrokosmos.**





Theorien gerecht werden. Schließlich hat sich das Rampenlicht inzwischen von Lokomotiven und Hochöfen auf Motoren im Nanobereich verlagert, auf winzige Schaltkreise und Systeme aus einzelnen, präzise gesteuerten Teilchen. Wir untersuchen, wie sich traditionelle thermodynamische Konzepte auf diese Quantenwelt anwenden lassen.

Als sich im 19. Jahrhundert Dampfmaschinen verbreiteten, drehten sich die Überlegungen noch um praktische Erwägungen, beispielsweise wie effizient Pumpen Wasser aus Minen herausbefördern könnten. Die Thermodynamik berührt inzwischen allerdings zusätzlich fundamentale physikalische Fragen. So ziehen Theoretiker bei der Suche nach einer Erklärung dafür, dass die Zeit nur in eine Richtung fließt, häufig das wichtige Konzept der Entropie heran.

Die Thermodynamik beschreibt Systeme aus enorm vielen Teilchen, etwa Wasserdampf, im Hinblick auf entsprechend großskalige Eigenschaften wie Temperatur, Druck, Volumen und Energie. Letztere lässt sich wiederum in zwei Größen aufteilen: Arbeit und Wärme. Arbeit ist sozusagen geordnet und kann Parameter wie das Volumen verändern oder etwas bewegen. Wärme hingegen entspricht der zufälligen, nicht gerichteten Bewegung von Teilchen.

Der Begriff der Entropie gibt uns eine Handhabe für dieses Durcheinander. Im Prinzip hat zu einem gewissen Zeitpunkt jedes Teilchen in einem Dampfkessel eine Position und einen Impuls (die Masse des Teilchens mal seine Geschwindigkeit). Die Menge aller Orte und Impulse der Teilchen heißt Mikrozustand. Wir können den Mikrozustand aber gar nicht genau kennen, da der Behälter eine unfassbare Menge von Teilchen enthält. Stattdessen berechnen Physiker die diversen Wahrscheinlichkeiten für diese oder jene Mikrozustände. Die Entropie quantifiziert quasi die Unsicherheit dabei: Je mehr gleichwertige Mikrozustände es gibt, die alle zu den beobachteten Eigenschaften des Gesamtsystems führen würden, desto größer ist die Entropie. Gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nimmt die Entropie eines abgeschlossenen Systems nie ab.

Dampfmaschinen, die für die klassische Thermodynamik von zentraler Bedeutung sind, haben mit der modernen

Technik oft kaum noch etwas zu tun. Viele Apparate enthalten heute komplizierte Bauteile, die mit Hilfe der Quantentheorie beschrieben werden, also der Physik der Atome, Elektronen und weiterer Grundbestandteile der Materie. Diese winzigen Partikel verhalten sich auf eine Art, die größeren Objekten völlig fremd ist. Beispielsweise gibt es im Quantenreich die Verschränkung. Sie verbindet selbst über große Entfernungen die Zustände zweier Teilchen miteinander. Mit Hilfe solcher Phänomene lassen sich Informationen auf eine Weise verarbeiten, die klassisch nicht möglich ist.

Quantensysteme können bessere Berechnungen durchführen und mit Daten effizienter umgehen. Der Bereich der Physik, der sich damit beschäftigt, heißt Quanteninformationstheorie. Sie liefert einen nützlichen mathematischen Werkzeugkasten für den Versuch, die Thermodynamik mit der Quantenmechanik zu verschmelzen. Denn in beiden Bereichen spielt die Information eine große Rolle – und deren Abwesenheit, die Unsicherheit. Sowohl Informationstheoretiker als auch Thermodynamiker messen Unwissenheit mit Entropie.

### Viktorianisches Wissen trifft auf Quanteninformation

Ein Beispiel, bei dem schon heute beide Bereiche zum Tragen kommen, sind Quantencomputer. Viele Unternehmen arbeiten intensiv an solchen Maschinen, die in Zukunft gewisse Verschlüsselungen knacken würden und mit denen sich bestimmte Materialien viel besser modellieren ließen als mit klassischen Rechnern. Die meisten Quantencomputer müssen auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden. Es wird also Wärme abgeführt – eine thermodynamische Größe.

Bestrebungen, thermodynamische Konzepte auf Quantensysteme anzuwenden, gehen auf die Mitte des 20. Jahrhunderts zurück. Seinerzeit entwickelten etwa die Physiker Joseph Geusic, Erich Otto Schulz-Du Bois und Derrick Scovil das Konzept des Masers, eine Quantenmaschine für den Bereich der Mikrowellenstrahlung und Vorläufer des heute allgemein bekannten Lasers. 1988 gelang Seth Lloyd an der New Yorker Rockefeller University mit seiner Doktorarbeit »Black Holes, Demons, and the Loss of Coherence« (Schwarze Löcher, Dämonen und der Kohärenzverlust) eine bahnbrechende Untersuchung darüber, wie sich Information in komplexen Systemen verhält. In ihr finden sich bereits viele wichtige Ideen für das Gebiet der Quanten-Thermodynamik.

Das Konzept der Entropie ist keinesfalls einheitlich. In Wirklichkeit existieren viele Arten von Entropie in auf verschiedene Situationen maßgeschneiderter mathematischer Form. Die bekanntesten Varianten wurden im 19. Jahrhundert von Ludwig Boltzmann und Josiah Willard Gibbs für die Thermodynamik eingeführt, 1948 von Claude Shannon von den Bell Telephone Labs für die Informationstheorie und 1932 vom theoretischen Physiker John von Neumann für die Quanteninformationstheorie. Diese Entropien liefern nicht bloß ein Maß für Unsicherheit. Sie quantifizieren die Effizienz von Aufgaben aller Art, von der Datenkompression bis zum Antrieb von Maschinen.

Eine unserer Schlüsselaufgaben im Quanten-Steampunk ist es, neue Entropiefunktionen für kleinskalige Quantensys-

## AUF EINEN BLICK ZWISCHEN GASGESETZ UND QUANTENVERSCHRÄNKUNG

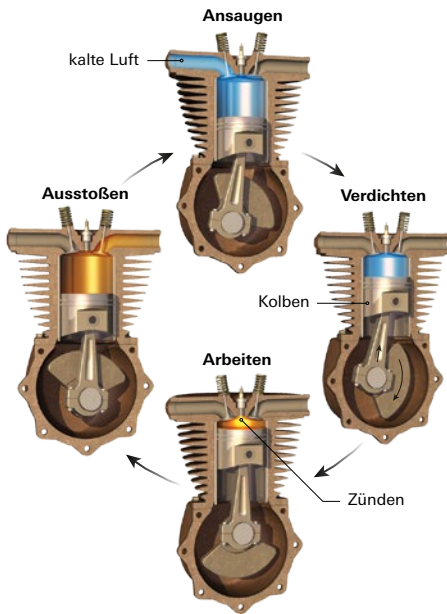
- 1 Die Thermodynamik beschäftigt sich mit statistischen Regeln für unüberblickbar viele Teilchen. Die Quantenmechanik hingegen hantiert mit einzelnen Objekten.
- 2 Trotz solcher Unterschiede suchen Theoretiker nach Gemeinsamkeiten und erzielen erste Erfolge dabei, die Disziplinen miteinander zu verschmelzen.
- 3 Beispielsweise haben Forscher ein Konzept für einen Motor ausgearbeitet, der auf der Skala von Atomen und auf Basis von Quantenphänomenen arbeitet.

# Entwurf eines Quantenmotors

Das Gebiet der Thermodynamik ist eng mit dem Siegeszug von Wärmekraftmaschinen verknüpft. Inzwischen übertragen Physiker die theoretischen Konzepte auf die Quantenskala und entwickeln Maschinen, die sich Phänomene des Mikrokosmos zu Nutze machen. Ein Beispiel dafür ist das MBL-Mobil. Es funktioniert auf Basis der so genannten Vielteilchen-Lokalisierung (kurz MBL für many-body localization), einem speziellen quantenmechanischen Effekt. Es durchläuft Zyklen, die denen eines klassischen Verbrennungsmotors ähneln, und koppelt dabei die Temperatur der Umgebung an eine Bewegung seiner Bestandteile.

### Verbrennungsmotor

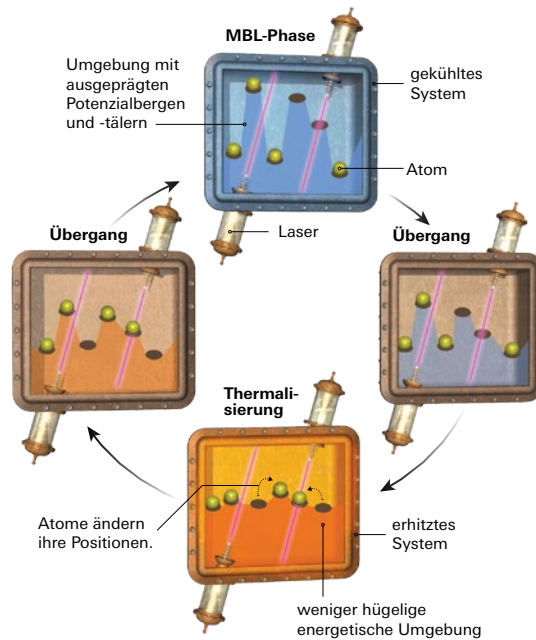
Der Motor eines Autos erzeugt in einem vierstufigen Prozess mechanische Energie: Im ersten Takt saugt er kalte Luft an, zudem wird Kraftstoff eingespritzt. Anschließend verdichtet die Bewegung des Kolbens das Gemisch. Im Arbeitstakt wird es gezündet, woraufhin es sich ausdehnt und den Kolben beschleunigt. Zuletzt werden die heiße Luft und die Verbrennungsprodukte ausgestoßen.



GEORGE HEISECK / SCIENTIFIC AMERICAN, MAI 2020

### MBL-Mobil

Auch der Zyklus des Quantenmotors ist vierstufig. In der ersten Phase, der Vielteilchen-Lokalisierung, befinden sich die Atome in einer kühlen Umgebung in Gebieten mit stark unterschiedlichen Energien. Das hält sie weitgehend auf ihren Plätzen. Dann steuern Laser einen Übergang in eine Phase, in der die Energieunterschiede geringer sind und die Atome sich bewegen können. Sie ändern daher während dieser Thermalisierung ihre Positionen, und der Motor nimmt Wärme aus der Umgebung auf. Anschließend bringen die Laser das System zurück in die MBL-Phase. Während der Übergänge leistet der Motor Arbeit.



teme zu formulieren. Angenommen, wir versuchen, mittels Verschränkung Informationen auszutauschen. Wir könnten dann fragen: Gibt es eine theoretische Grenze dafür, wie gut das funktionieren kann? Die Antwort wird vermutlich eine spezielle Art von Entropie erfordern.

Als weiteres Ziel haben wir den Aufbau dessen, was Wissenschaftler Ressourcentheorien nennen. Diese drehen sich um die Fähigkeiten und Einschränkungen, mit denen wir arbeiten. Zum Beispiel setzt uns der erste Hauptsatz der Thermodynamik bezüglich der Energie strenge Grenzen: Wir können sie weder erzeugen noch zerstören, sondern nur umwandeln. Mit einer Ressourcentheorie lässt sich eine Situation mit einer gewissen Beschränkung mathematisch modellieren, etwa eine Umgebung mit einer festen Temperatur, und die effizienteste Art berechnen, auf die eine Aufgabe erledigt werden kann. Typischerweise ist die Effizienz eine Funktion der Entropie.

Es gibt noch einen dritten Schwerpunkt unserer Bemühungen. Er betrifft die Herleitung von Gleichungen, die als Fluktuationsbeziehungen bezeichnet werden. Diese erweitern den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, also die Aussage, dass die Entropie in einem isolierten System nicht abnehmen kann. Fluktuationsbeziehungen betreffen kleine Systeme, die starken Kräften ausgesetzt sind, und sagen etwas über die von ihnen geleistete Arbeit aus.

1996 leitete Christopher Jarzynski, der jetzt an der University of Maryland arbeitet, eine der wichtigsten Fluktuationsbeziehungen her. Experimentalphysiker bestimmen mit der Jarzynski-Gleichung eine thermodynamische Eigenschaft ganz bestimmter Systeme. Ein Beispiel dafür ist ein im Wasser schwimmender DNA-Strang, der die gleiche Temperatur wie seine Umgebung hat. Der Strang verfügt über so genannte freie Energie – im Grunde die Energie, mit der er Arbeit verrichten kann. Mit Hilfe von Lasern können

Wissenschaftler ein Ende des Strangs festhalten und am anderen ziehen. Nachdem sie das Erbgutstück eine Zeit lang spannen, schnellt es zurück und nimmt allmählich wieder die Temperatur der Lösung an. Infolge der Störung durch das Auseinanderziehen wird der Strang nun im Allgemeinen eine andere Menge an freier Energie haben als vorher. Der Unterschied ist in der Chemie, Pharmakologie und Biologie bedeutsam. Experimentatoren können die Differenz näherungsweise ermitteln, indem sie den Strang immer wieder strecken, die dafür erforderliche Arbeit messen und die Daten in die Jarzynski-Gleichung einfügen.

Wie viele Versuche sind für ein gutes Ergebnis nötig? Gemeinsam mit Christopher Jarzynski habe ich die Mindestanzahl von Experimenten berechnet, die man durchführen muss, um die Differenz der freien Energie mit einer gewissen Genauigkeit abzuschätzen. Dazu nutzten wir eine auf die kleine Skala des Systems zugeschnittene Informationstheorie. In weiteren Arbeiten zeigten meine Kollegen und ich: Fluktuationsbeziehungen und neuartige Entropiefunktionen eignen sich in diesen Dimensionen grundsätzlich als konsistente thermodynamische Ansätze – und jeder lässt sich aus dem jeweils anderen herleiten.

### **Atom für Atom zum quantenmechanischen Viertaktmotor**

So wie die traditionelle Thermodynamik zur Entwicklung von Dampfmaschinen beigetragen hat, können unsere Bemühungen dabei helfen, Quantenmaschinen zu konstruieren. Im Werkzeugkasten der Quantenphysik befinden sich heute bereits verschiedenste Bauteile auf Basis etwa von Photonen (Lichtteilchen), Elektronen und supraleitenden Schaltkreisen, in denen Strom widerstandsfrei fließt. Lässt sich damit so etwas wie ein Quantenmotor entwerfen?

Dazu habe ich mich mit Christopher D. White von der University of Maryland, Sarang Gopalakrishnan von der City University of New York und Gil Refael vom California Institute of Technology zusammengetan. Wir sind allesamt Theoretiker, und als solche haben wir den Motor zunächst als Gedankenexperiment konzipiert. Aber wir umreißen darüber hinaus, wie Wissenschaftler mit den Quantenwerkzeugen in ihren Laboren echte Ausführungen des Motors bauen könnten. Dazu würden sie beispielsweise gekühlte Atome mit Lasern einfangen und manipulieren.

Herzstück unserer Konstruktion ist eine besondere quantenmechanische Phase der Materie, die so genannte Vielteilchen-Lokalisierung (MBL, many-body localization). Hier befinden sich einander gegenseitig abstoßende Teilchen in einer Umgebung, die aus energetischer Sicht keine ebene Landschaft ist, sondern rau und von Potenzialgebirgen geprägt. Ein wesentliches Element eines MBL-Systems ist seine Athermalität: Es befindet sich nicht im thermischen Gleichgewicht. In diesem erkunden die Teilchen den ihnen zugänglichen Raum schnell und auf zufällige Weise. So stellen sich etwa bei Dampf nach einiger Zeit recht stabile großskalige Eigenschaften wie Temperatur und Volumen ein.

Im Gegensatz zu den Dampfbestandteilen verharren MBL-Teilchen jedoch eher in einem Bereich und bewegen sich wenig. Das thermische Ungleichgewicht bleibt erhal-

ten und dient als Ressource für thermodynamische Aufgaben. Ein herkömmliches Analogon sind Verbrennungsmotoren in Autos. Sie sind auf das Nebeneinander von heißen und kalten Bereichen angewiesen. Die benachbarten Fluide befinden sich nicht im thermischen Gleichgewicht, da die heißen Teilchen in einem Bereich und die kalten in einem anderen sind – keines wandert frei durch den gesamten Raum. Ähnlich, wie sich ein Automotor die Athermalität seiner Betriebsstoffe zu Nutze macht, setzen meine Kollegen und ich bei der MBL auf den gleichen Effekt. Wir nennen unsere Konstruktion das MBL-Mobil (siehe »Entwurf eines Quantenmotors«, S. 79).

Ein Verbrennungsmotor durchläuft vier Schritte in einem Zyklus, bei dem Wärme von der heißen zur kalten Seite geschaufelt wird und dadurch die Energie für den Antrieb liefert. Am Ende des Kreislaufs kehrt der Motor in seinen Ausgangszustand zurück. Auch das MBL-Mobil durchläuft einen Vier-Stufen-Zyklus. Dabei überführen wir die Atome von einer thermischen Phase, in der sich die Teilchen im Raum gut ausbreiten können, in den Zustand der Vielteilchen-Lokalisierung und zurück. Für diesen Schritt verändern wir die energetische Umgebung der Teilchen von einer relativ flachen und gut passierbaren zu einer zerklüfteten und schwer überwindlichen Landschaft. Das geschieht durch Einstellungen an den kontrollierenden Lasern. Vor jedem Umschalten tauscht der Motor Wärme mit einer äußeren Umgebung aus. Diese ist heiß, wenn er sich in seiner thermischen Phase befindet, und kalt während seiner MBL-Phase. Zusammengefasst sind die vier Schritte: 1. Wärmeaustausch mit einem heißen Medium in der thermischen Phase, 2. Übergang in die MBL-Phase, 3. Wärmeaustausch mit einem kalten Medium und 4. Übergang zurück in die thermische Phase.

### **Zwischen Kolibakterium und Kleinwagen**

Wie gut funktioniert das MBL-Mobil? Um die Frage zu beantworten, haben wir die Effizienz des Motors berechnet und mit anderen verglichen. Einige Bakterien nutzen zur Fortbewegung zum Beispiel Flagellen oder Geißeln genannte, lange, fadenförmige Gebilde, die wie von einem Motor gedreht werden. Das MBL-Mobil kann unseren Berechnungen zufolge etwa die zehnfache Leistung des Geißelantriebs erbringen. Am anderen Ende der Skala liegt der Vergleich mit dem Motor eines Autos: Die Leistungsdichte, das heißt die Leistung pro Volumeneinheit, ist bei einem Automotor schätzungsweise zehnmal so hoch.

Die Vielteilchen-Lokalisierung bringt dem Motor mehrere prinzipielle Vorteile. Er kann jede Größe haben, von zehn Teilchen bis zu beliebig vielen. Dazu braucht man nur diverse Kopien eines Exemplars mit wenigen Teilchen und betreibt sie dann nebeneinander. Bei einem thermischen Verhalten würden sich die Motoren gegenseitig stören, weil Teilchen aus einem davon in einen anderen gelangen würden. Vielteilchen-Lokalisierung stellt sicher, dass alles, was in einem Minimotor passiert, dort bleibt. So kann man in der Gesamtkonstruktion viele von ihnen dicht nebeneinanderpacken. Das verschafft dem MBL-Mobil eine hohe Leistungsdichte. Ein weiterer Vorteil kommt zum Tragen, wenn man den



Motor sehr oft laufen lässt. Bei einigen Versuchen leistet er Arbeit. Allerdings nicht immer gleich viel, sondern auf statistisch verteilte Weise – und bei manchen Versuchen wird der Motor sogar Arbeit aufnehmen und das Gegenteil von dem tun, was er sollte. Das passiert durch die Übergänge zwischen der MBL- und der thermischen Phase seltener, als wenn man den Motor nur innerhalb der MBL-Phase laufen ließe. Man kann die Zuverlässigkeit des Motors außerdem erhöhen, wenn man die Vielteilchen-Lokalisierung geschickt nutzt. Dann variiert zwischen einzelnen erfolgreichen Versuchen die geleistete Arbeit weniger stark.

Unser erfolgreiches Gedankenexperiment zum MBL-Mobil lässt verschiedene Anwendungen möglich erscheinen. Man könnte beispielsweise den Zyklus umkehren und den Motor als Kältemaschine betreiben, die Wärme aus einer bereits kalten Umgebung abführt und an eine wärmere abgibt. Vielteilchen-Quantensysteme müssen auf niedriger Temperatur gehalten werden, damit man von charakteristischen Eigenschaften wie der Verschränkung profitieren kann. Darüber hinaus haben Wissenschaftler bereits Konzepte dazu ausgearbeitet, wie Vielteilchen-Lokalisierung zur Energiespeicherung dienen könnte. In der Materialwissenschaft dürfte es für den mathematisch-physikalischen Werkzeugkasten an der Schnittstelle von Quantentheorie, Informationstheorie und Thermodynamik noch zahlreiche weitere Einsatzmöglichkeiten geben.

Im Labor untersuchen wir Ansätze für reale Versionen des MBL-Mobils auf Basis von supraleitenden Quantenbits

in einem Magnetfeld. Dennoch sind die meisten Quanten-Steampunk-Arbeiten vorerst theoretisch. Aber so, wie die Entwicklung der Thermodynamik die industrielle Revolution mit vorangetrieben hat, wird es auch hier praktische Erfindungen geben. Freilich im kleineren Maßstab: molekulare Schalter, Wärme ableitende Transistoren und ähnliche Technologien, die eng mit der Thermodynamik verbunden sind, werden die Richtung weisen.

Die große Herausforderung ist es zunächst, die noch sehr unterschiedlichen Konzepte rund um neuartige Entropien, Ressourcentheorien, Fluktuationsbeziehungen, Quantenmaschinen und mehr zu vereinheitlichen. Daran arbeiten derzeit Forscher auf der ganzen Welt. Erst aufeinander abgestimmte Definitionen und Ergebnisse werden die Theorie der Quanten-Thermodynamik festigen. Unterdessen behält das Zusammentreffen von Alt und Neu den Hauch von Schmieröl und Abenteuer, der am Anfang tief greifender Veränderungen steht – und statt eines Wissenschaftsmagazins genauso gut einen Roman von H.G. Wells oder Jules Verne ausschmücken könnte. ◀

#### QUELLEN

**Yunger Halpern, N. et al.:** Quantum engine based on many-body localization. *Physical Review B* 99, 2019

**Yunger Halpern, N., Jarzynski, C.:** Number of trials required to estimate a free-energy difference, using fluctuation relations. *Physical Review E* 93, 2016

# Unsere Themenhefte!

Alle  
Sonderhefte  
auch im  
PDF-Format



Farbenspiele mit Popping Bobas • Die Geheimtinten der CIA • Ein Diamant ist unvergänglich? • Mit Legierungsakkus in die Zukunft • Intelligente Fenster aus Berliner Blau • Minibäume aus Silber, Zinn und Co. • € 8,90



Steinzeit in Sibirien: Die Eisbärenjäger vom Ende der Welt • Richard Francis Burton: Der falsche Pilger • Bergpioniere: Der Bezwingen der Zugspitze • Georg von Podiebrad: Der Ketzerkönig, der die EU erfand • Paläogenetik: Kaugummi aus der Jungsteinzeit • € 5,90



Paartherapie: Es ist nie zu früh, um an einer Beziehung zu arbeiten • Stadt-leben: Verloren im Großstadtdschungel • Körperbild: Das richtige Gewicht • Persönlichkeit: Was wir an uns ändern würden • Depression: Beharrlichkeit tut gut • € 5,90

**Diese und weitere Themenhefte:**  
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743  
[www.spektrum.de/shop](http://www.spektrum.de/shop)

# LANGLANDS-PROGRAMM BRÜCKENSCHLAG IN DER MATHEMATIK

Seit Jahrzehnten vermuten Wissenschaftler, dass zwei völlig verschiedene mathematische Gebiete miteinander verwoben sind. In einer für das Fach ungewöhnlich großen Zusammenarbeit konnten Forscher diese geheimnisvolle Verbindung nun erweitern.



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

► [spektrum.de/artikel/1744804](https://www.spektrum.de/artikel/1744804)

► Anfang der 1990er Jahre gelang dem englischen Zahlentheoretiker Andrew Wiles das Unfassbare: Er bewies eines der größten Rätsel der Mathematik. Jahrhundertlang hatten sich sowohl Experten als auch interessierte Laien an Fermats großem Satz die Zähne ausgebissen. Wegen seiner vermeintlichen Einfachheit zog er etliche Menschen in seinen Bann: Er besagt, dass es keine natürlichen Zahlen  $x$ ,  $y$  und  $z$  gibt, welche die Gleichung  $x^n + y^n = z^n$  für  $n$  größer als zwei erfüllen. Der französische Gelehrte Pierre de Fermat (1607–1665) notierte diese Behauptung an den Rand einer Kopie von Diophantus' »Arithmetica« und merkte an, er habe einen »wirklich wunderbaren Beweis« dafür entdeckt, aber ihm reiche der Platz dafür nicht aus. Das ermutigte viele, sich daran zu versuchen – allerdings ohne Erfolg.

Der Weg, der Wiles schließlich mit der Hilfe von Richard Taylor zum Ziel führte, war etwas, auf das Fermat niemals

hätte kommen können. Anstatt sich dem Problem direkt zu widmen, arbeitete Wiles an einer bis dahin hypothetischen Verbindung zwischen zwei grundverschiedenen mathematischen Bereichen. Sein Beweis von Fermats großem Satz lief darauf hinaus, einen Zusammenhang zwischen zwei Teilgebieten dieser Bereiche nachzuweisen – so, als würde man eine Brücke zwischen zwei Ländern unterschiedlicher Kontinente errichten. Die Arbeit des englischen Mathematikers steckte voller tief greifender neuer Ideen, wodurch er eine Flut weiterer Ergebnisse auf beiden Seiten der nun verbundenen Gebiete auslöste.

So beeindruckend Wiles' Leistung auch ist, bildet sein Beweis nur einen kleinen Baustein zur Klärung eines viel größeren Rätsels: Die gesamte Verbindung, die als Langlands-Korrespondenz bekannt ist und zwei riesige mathematische Bereiche verbinden soll, ist nach wie vor unvollständig. Eine solche Korrespondenz würde, wie Wissenschaftler hoffen, zu zahlreichen neuen mathematischen Zusammenhängen führen. Denn dadurch könnte man Konzepte des einen Gebiets über die Brücke in den anderen Bereich verfrachten und dort lösen. Wie sich herausstellt, erscheinen nämlich viele Probleme – etwa der große Satz von Fermat – auf der einen Seite der Brücke schwierig, während sie sich auf der anderen plötzlich in bewältigbare Aufgaben verwandeln.

Nachdem Wiles seine bahnbrechende Arbeit veröffentlicht hatte, erweiterten andere Mathematiker eifrig seine Ideen und fanden dadurch immer mehr Verbindungen zwischen beiden Bereichen. Doch dann landeten sie in einer Sackgasse, in der sie lange festsaßen.

## AUF EINEN BLICK ERSTAUNLICHE ZUSAMMENHÄNGE

- 1** Ende der 1960er Jahre vermutete Robert Langlands eine Verbindung zwischen zwei Gebieten der Mathematik, die auf den ersten Blick grundverschieden wirken – und verblüffte damit die Fachwelt.
- 2** Indem Andrew Wiles 20 Jahre später einen Teil dieser Vermutung belegte, löste er gleichzeitig ein jahrhundertealtes Rätsel: Fermats großen Satz.
- 3** Nun haben Forscher bedeutende Fortschritte beim so genannten Langlands-Programm gemacht, die zum Beweis einer allgemeineren Version von Fermats großem Satz führen könnten.

Nun haben mehr als ein Dutzend Mathematiker in einer für das Fachgebiet ungewöhnlich großen Zusammenarbeit einen Ausweg gefunden. Ihre Ergebnisse könnten dabei helfen, Fermats großen Satz zu erweitern, indem man ihn für Zahlensysteme jenseits der natürlichen Zahlen beweist. »Es wurden grundlegende mathematische Phänomene aufgedeckt, die wir gerade erst anfangen zu verstehen«, sagt Matthew Emerton von der University of Chicago.

Das Langlands-Programm zielt darauf ab, zwei Bereiche zu verbinden, die kaum unterschiedlicher sein könnten. Auf der einen Seite geht es um die so ziemlich einfachsten mathematischen Ausdrücke, die man sich vorstellen kann. Diese so genannten diophantischen Gleichungen kombinieren Variablen, Exponenten und Koeffizienten zu simplen Polynomen wie  $y = x^2 + 6x + 8$  oder  $x^3 + y^3 = z^3$ . Wählt man die Variablen aus einem Pool reeller Zahlen, kann man die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten schnell angeben. Lässt man dagegen nur natürliche oder ganze Zahlen zu, wird es kompliziert.

Im antiken Griechenland fanden Gelehrte ganzzahlige Lösungen für diophantische Gleichungen, die bloß aus zwei Variablen bestehen und deren Exponenten kleiner als drei sind. Andere Fälle wie elliptische Kurven, die  $y^2$  und Terme dritter Potenz aufweisen, etwa  $y^2 = x^3 + 4x$ , sind schwieriger zu behandeln. Seit Jahrtausenden suchen Mathematiker nach geeigneten Kombinationen natürlicher Zahlen, die diophantische Gleichungen erfüllen. In erster Linie treibt sie dabei die wissenschaftliche Neugier an, aber einige kürzlich erschienene Arbeiten aus dem Bereich haben unvorhergesehene Anwendungen in der Kryptografie.

### Kurz erklärt: Uhrzeit-Arithmetik

Bereits in der Grundschule lernen wir, Zahlen zu addieren, zu subtrahieren, zu multiplizieren und zu dividieren. In der höheren Mathematik erweist es sich oftmals als nützlich, über diese gewöhnliche Arithmetik hinauszugehen. Zum Beispiel kann man sich so genannten modularen Systemen zuwenden, die ähnliche Rechenregeln befolgen wie eine Uhr: Statt über unendlich viele Zahlen zu verfügen, gibt es eine festgelegte größte Zahl  $n$ . Möchte man zwei Zahlen in diesem System addieren und würde dadurch gemäß den gewöhnlichen Rechenregeln eine Zahl  $N$  erhalten, die größer ist als  $n$ , dann teilt man  $N$  durch  $n$  und nimmt den ganzzahligen Rest als Ergebnis. Im Fall einer gewöhnlichen Uhr ist  $n = 12$ . Möchte man wissen, wie spät es ist, wenn nach elf Uhr drei Stunden vergehen, dann rechnet man:  $11 + 3 = 14$ ;  $14 : 12 = 1$  mit Rest 2; demnach ist es dann zwei Uhr. Derartige arithmetische Systeme lassen sich für beliebige  $n$  entwickeln. Besonders interessant sind aber meist die Fälle, bei denen  $n$  eine Primzahl ist.

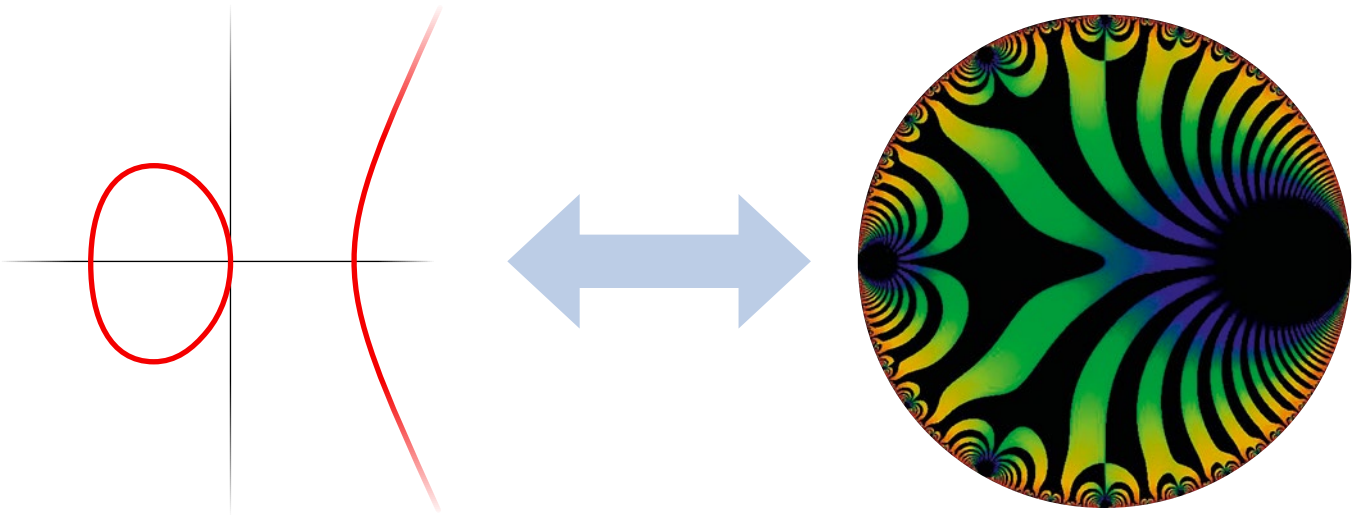
Auf der anderen Seite der Langlands-Korrespondenz leben so genannte automorphe Formen. Man kann sich diese Objekte als verallgemeinerte periodische Funktionen vorstellen. Während gewöhnliche Funktionen wie eine Sinusfunktion Zahlen anderen Zahlen zuordnen, weisen automorphe Formen auch komplizierteren mathematischen Strukturen Zahlenwerte zu. Um sie grafisch abzubilden, kann man sie durch symmetrische Färbungen bestimmter geometrischer Kachelungen darstellen. Wiles untersuchte beispielsweise automorphe Formen, deren Kachelungen den berühmten Mosaiken des niederländischen Künstlers M. C. Escher ähneln: mit Fischen oder Engeln und Teufeln gefüllte Scheiben, deren Symbole zum Rand hin immer kleiner werden. Geht man über die Arbeit von Wiles hinaus, könnten die Kachelungen im weiteren Langlands-Universum auch höherdimensionale Räume füllen, etwa dreidimensionale Kugeln.

### Ein junges Genie voller Selbstzweifel

Auf den ersten Blick ist es schwer vorstellbar, dass die simplen diophantischen Gleichungen mit automorphen Formen zusammenhängen. Doch Mitte des 20. Jahrhunderts begannen Mathematiker, tief greifende Beziehungen zwischen ihnen aufzudecken. Zu Weihnachten 1966 verfasste der damals erst 30-jährige US-amerikanisch-kanadische Mathematiker Robert Langlands einen 17-seitigen Brief an seinen renommierten französischen Kollegen André Weil (1906–1998), in dem er einige seiner neuesten Ideen darlegte. Voller Selbstzweifel schrieb er darin: »Wenn Sie bereit sind, meine Erkenntnisse als reine Spekulation zu betrachten, wäre ich Ihnen dankbar. Wenn nicht, bin ich sicher, dass Sie einen Papierkorb zur Hand haben.« Seine damalige Vermutung, dass diophantische Gleichungen und automorphe Formen zusammenhängen, entwickelte sich zu einem der bedeutendsten modernen mathematischen Forschungsprojekte: Weil ließ Langlands' Brief abtippen und verteilte ihn unter anderen Mathematikern, wodurch das so genannte Langlands-Programm entstand, bei dem es darum geht, die Ideen Langlands' zu beweisen.

Einige Forscher erkannten, dass man sowohl aus diophantischen Gleichungen als auch aus automorphen Formen unendliche Zahlenfolgen erzeugen kann. Lässt man für die Variablen diophantischer Gleichungen zum Beispiel nicht bloß natürliche Zahlen zu, sondern nutzt andere Zahlensysteme, dann verändert sich die Anzahl der möglichen Lösungen. Indem man diese Anzahl für verschiedene Zahlensysteme berechnet, entsteht eine unendliche Zahlenfolge auf der diophantischen Seite. Automorphe Formen lassen sich dagegen durch die Werkzeuge der so genannten harmonischen Analysis in eine Summe zerlegen. Auf diese Weise erhält man für eine automorphe Form eine unendlich lange Reihe, deren Vorfaktoren ebenfalls eine Zahlenfolge bilden.

Als sich Langlands diophantischen Gleichungen widmete, betrachtete er deren Lösungen für Zahlen mit einer so genannten Uhrzeit-Arithmetik (siehe »Kurz erklärt«, links). Solche Zahlensysteme sind gewissermaßen periodisch,



### Die Lösungen diophantischer Gleichungen (links) und automorphe Formen (rechts) hängen überraschenderweise zusammen.

wie eine Uhr: Im üblichen Zwölf-Stunden-Takt ergeben sich Berechnungen wie  $10 + 4 = 2$ . Statt der Zwölf als Basis fokussierte sich Langlands auf Systeme, deren Periodizität durch eine Primzahl festgelegt ist (zum Beispiel drei, wodurch man Berechnungen der Form  $2 + 2 = 1$  erhält). Er erkannte, dass die Folge, die sich aus der jeweiligen Anzahl der Lösungen ergibt, mit den Vorfaktoren automorpher Formen zusammenhängt, wenn man diese in eine unendliche Reihe zerlegt. Damit gäbe es zu jeder diophantischen Gleichung eine entsprechende automorphe Form und umgekehrt. Dass die beiden Bereiche derart zusammenpassen, verwundert noch heute viele Fachleute. »Für mich wirkt es immer wieder unglaublich, auch wenn ich mich seit über 20 Jahren damit beschäftige«, sagt Emerton.

Bereits Ende der 1960er Jahre konnten Mathematiker einige dieser Verbindungen beweisen: Sie fanden heraus, wie man von bestimmten automorphen Formen ausgehend die passenden elliptischen Kurven mit rationalen Koeffizienten findet. Doch wie und ob das auch in umgekehrter Richtung funktionierte, war lange Zeit unklar. In den 1990er Jahren entwickelte Wiles mit den Beiträgen seines Kollegen Taylor einen Weg, um einer bestimmten Familie elliptischer Kurven die entsprechenden automorphen Formen zuzuordnen. Durch dieses Ergebnis bewies er außerdem Fermats großen Satz. Denn Mathematiker hatten zuvor gezeigt, dass mindestens eine dieser elliptischen Kurven keine passende automorphe Form besäße, wenn Fermats Behauptung falsch wäre.

**»Für mich wirkt es immer noch unglaublich, auch wenn ich mich seit 20 Jahren damit beschäftige«**

Matthew Emerton

Fermats großer Satz war bei Weitem nicht die einzige Entdeckung, auf die man beim Langlands-Programm stieß. Einigen Fachleuten gelang es beispielsweise, die so genannte Sato-Tate-Vermutung zu beweisen. Dabei handelt es sich um eine Hypothese des japanischen Mathematikers Mikio Satō und seines US-amerikanischen Kollegen John Tate aus dem Jahr 1960, wonach die statistische Verteilung der Anzahl von Lösungen einer elliptischen Kurve mit den Vorfaktoren gewisser automorpher Formen zusammenhängt.

Nachdem Wiles und Taylor ihre Ergebnisse veröffentlicht hatten, erkannten Zahlentheoretiker, dass die beiden Wissenschaftler ihre Methode noch nicht voll ausgeschöpft hatten. Bald stellte sich heraus, wie man den Ansatz auf andere elliptische Kurven ausdehnen kann. Nach einigen Jahren gelang es sogar, die Ergebnisse für Koeffizienten mit einfachen irrationalen Zahlen wie  $3 + \sqrt{2}$  zu erweitern.

### Ein neuer Ansatz muss her

Allerdings ließ sich die Taylor-Wiles-Methode nicht auf elliptische Kurven verallgemeinern, deren Koeffizienten komplexe Zahlen wie  $i$  (die Quadratwurzel aus  $-1$ ) enthalten. Ebenso wenig war es damit möglich, mit diophantischen Gleichungen umzugehen, deren Exponenten größer als 4 sind. In diesen Fällen bricht der Ansatz zusammen. Allmählich erkannten Mathematiker, dass man die Langlands-Korrespondenz nicht mehr durch bloßes Anpassen der Taylor-Wiles-Methode erweitern konnte. Sie schienen auf grundlegende Hindernisse gestoßen zu sein, die neue Ideen erforderten.

Taylor und Wiles fanden die passende automorphe Form für eine diophantische Gleichung, indem sie diese nach und nach durch andere automorphe Formen annähernten. Wenn die Koeffizienten der diophantischen Gleichung aber komplexe Zahlen enthalten oder der Exponent größer als 4 ist, gibt es kaum noch geeignete automorphe Formen. Tatsächlich tauchen sie in diesen Fällen so selten auf, dass eine Näherung nicht mehr möglich ist. Schon bei den diophantischen Gleichungen, mit denen Wiles arbeitete, war es schwer, genügend automorphe Formen zu finden. Wenn aber komplexe Koeffizienten oder höhere Exponenten im Spiel sind, scheint die Suche vollkommen vergebens.

## Glossar

**Diophantische Gleichungen** gehören zu den augenscheinlich einfachsten Objekten der Mathematik. Dabei handelt es sich um Polynome, die man zu Gleichungen zusammensetzt, etwa:  $3x^3 + 2xy^2 + 4 = z^6$ . Die Schwierigkeit besteht darin, alle Lösungen (hier:  $x$ ,  $y$  und  $z$ ) zu finden, die einem bestimmten Zahlensystem entspringen, etwa den natürlichen Zahlen oder den rationalen Zahlen.

Anschaulich sind **automorphe Formen** verallgemeinerte periodische Funktionen, die komplizierte mathematische Strukturen auf Zahlen abbilden. Ähnlich wie man in der Musik einen Ton in eine Summe aus Obertönen zerlegen kann, lassen sich auch automorphe Formen in eine unendliche Reihe entwickeln:

$a_1 x + \dots + a_{n-1} x^{n-1} + a_n x^n + \dots$  Die Vorfaktoren  $a_i$  bilden dabei eine unendliche Reihe, die mit der Anzahl der möglichen Lösungen diophantischer Gleichungen zusammenhängt.

Die zwei Mathematiker Frank Calegari von der University of Chicago und David Geraghty, der jetzt für Facebook forscht, präsentierten 2012 einen neuen Weg, um das Problem anzugehen. Sie vermuteten, dass der Ansatz von Taylor und Wiles eigentlich ein Spezialfall einer viel allgemeineren Methode sei, mit der sich beide Seiten der Langlands-Korrespondenz verbinden lassen.

Wiles betrachtete in seiner Arbeit automorphe Formen, deren Kachelungen zweidimensional sind. Die Probleme ergeben sich jedoch erst, wenn man sich höherdimensionalen Kachelungen zuwendet, denn dort gibt es weniger automorphe Formen. Dafür besitzen Kachelungen in diesen Fällen aber eine wesentlich reichere Struktur als ihre zweidimensionalen Varianten. Calegari und Geraghty erkannten, dass man diese Eigenschaft ausnutzen könnte, um den Mangel an automorphen Formen auszugleichen.

Automorphe Formen weisen einer bestimmten Kachelung eine Färbung zu. Betrachtet man einen beliebigen Ausschnitt einer Kachelung, kann man mit Hilfe der automorphen Form die durchschnittliche Farbe dieses Stücks berechnen. Wenn man höherdimensionale Objekte betrachtet, kann man ihnen neben einer Färbung auch andere Merkmale zuordnen. Diese Aufgabe übernehmen so genannte Torsionsklassen, die einem bestimmten Ausschnitt einer Kachelung eine Zahl aus der Uhrzeit-Arithmetik zuweisen. Im Gegensatz zu automorphen Formen gibt es solche Torsionsklassen in Hülle und Fülle. Calegari und Geraghty schlugen daher vor, sich der gesuchten automorphen Form durch Torsionsklassen anzunähern.

Die Arbeit der beiden Forscher stellte eine allgemeinere Verbindung in Aussicht als die von Wiles und Taylor ent-

deckte. Aber dafür musste man ihren Verdacht erst beweisen. Dieser basierte wiederum auf drei weiteren Vermutungen, die noch nicht belegt waren. Calegari erinnert sich: »Es war, als ob meine Arbeit mit Geraghty erkläre, wie man zum Mond gelangt – vorausgesetzt, jemand würde zuvor ein Raumschiff, Raketentreibstoff und Raumanzüge liefern.«

Unter anderem erforderte die Methode von Calegari und Geraghty, dass es bereits eine Verbindung in die umgekehrte Richtung gibt, also von den automorphen Formen zu den diophantischen Gleichungen. Darüber hinaus sollte diese Brücke nicht nur automorphen Formen eine entsprechende Gleichung zuordnen, sondern auch Torsionsklassen. »Ich glaube, viele Leute hielten das anfangs für ein hoffnungsloses Problem«, sagt Taylor, der jetzt an der Stanford University arbeitet.

Doch weniger als ein Jahr nachdem Calegari und Geraghty ihre Arbeit veröffentlichten, verblüffte der deutsche Fields-Medaillen-Preisträger Peter Scholze von der Universität Bonn die Welt der Zahlentheoretiker. Er fand heraus, wie man von Torsionsklassen ausgehend zu elliptischen Kurven gelangt, deren Koeffizienten einfache komplexe Zahlen wie  $3 + 2i$  oder  $4 - \sqrt{5}i$  enthalten.

Scholze hatte damit die erste der drei Vermutungen von Calegari und Geraghty bewiesen. Zwei weitere Abhandlungen des deutschen Mathematikers, die er zusammen mit seiner Kollegin Ana Caraiani vom Imperial College London verfasste, kamen dem Beweis der zweiten Vermutung extrem nahe. Dabei geht es darum, zu zeigen, dass die von Scholze aufgebaute Verbindung bestimmte Eigenschaften erfüllt.

### Ein Workshop voller brillanter Ideen

Beflügelt von den unerwarteten Fortschritten, organisierten Caraiani und Taylor im Herbst des Jahres 2016 einen einwöchigen Workshop mit mehreren Experten des Gebiets am Institute for Advanced Study in Princeton. Sie hofften, so die letzten Hürden zu einem vollständigen Beweis von Calegaris und Geraghtys Verbindung zu überwinden. Nach einigen Tagen ausführlicher Diskussionen begannen die Teilnehmer zu erkennen, wie sie die zweite Vermutung abschwächen und der dritten Hypothese ausweichen konnten. »Letztendlich lösten wir alle Probleme innerhalb eines Tags, nachdem wir sie ausführlich dargelegt hatten«, erinnert sich der Zahlentheoretiker Toby Gee, ebenfalls vom Imperial College London, der am Workshop teilnahm.

Die Mathematiker verbrachten den Rest der Woche damit, verschiedene Aspekte des Beweises auszuarbeiten. Während der nächsten zwei Jahre schrieben sie ihre Ergebnisse in einer Arbeit mit zehn Autoren nieder – eine ungewöhnliche hohe Anzahl von Personen für eine Veröffentlichung in diesem mathematischen Gebiet. In ihrem Aufsatz gelang es ihnen, eine Langlands-Brücke für elliptische Kurven zu errichten, deren Koeffizienten aus rationalen Zahlen plus einfachen irrationalen und komplexen Zahlen besteht. »Eigentlich wollten wir bloß herausfinden, wie nahe wir einem Beweis kommen könnten«, sagt Gee.

»Ich glaube nicht, dass jemand erwartet hatte, das Problem tatsächlich zu lösen.«

Zur gleichen Zeit bemühten sich einige Zahlentheoretiker, die Langlands-Korrespondenz über elliptische Kurven hinaus zu beweisen, das heißt, auch höhere Exponenten in den diophantischen Gleichungen zuzulassen. Calegari und Gee arbeiteten damals mit dem Mathematiker George Boxer von der École normale supérieure de Lyon zusammen, um Gleichungen anzugehen, deren höchster Exponent fünf oder sechs ist – statt den bisher bekannten Fällen von drei oder vier. Die Forscher landeten jedoch schnell in einer Sackgasse, aus der sie keinen Ausweg fanden.

Am Wochenende nach dem Workshop in Princeton erschien eine Arbeit des französischen Mathematikers Vincent Pilloni, ebenfalls von der École normale supérieure in Lyon, die unter anderem einen möglichen Weg präsentierte, um das Problem von Boxer, Calegari und Gee zu umgehen. Die drei Forscher beschlossen daraufhin, Pilloni aufzusuchen, um mit ihm zusammenzuarbeiten. Innerhalb weniger Wochen gelang es den vier Mathematikern, eine

## »Ich glaube nicht, dass jemand erwartet hatte, das Problem tatsächlich zu lösen«

Toby Gee

Lösung zu finden – auch wenn es zwei Jahre und fast 300 Seiten brauchte, bis sie ihren Beweis vollständig ausgearbeitet hatten. Ende Dezember 2018 erschienen dann schließlich sowohl ihr Ergebnis als auch die Resultate des Princeton-Workshops.

Diese zwei Arbeiten erweitern die mysteriöse Verbindung zwischen den diophantischen Gleichungen und den automorphen Formen entscheidend. Allerdings ist die so erbaute Brücke zwischen den beiden Gebieten nicht perfekt: Man weiß zwar, dass es zu den betrachteten diophantischen Gleichungen jeweils eine passende automorphe Form gibt, doch es ist nicht immer klar, ob diese an der erwarteten Stelle zu finden ist. Die beiden Aufsätze stellen nämlich keinen exakten Zusammenhang, sondern bloß eine so genannte potenzielle Automorphie zwischen den zwei Bereichen fest.

Glücklicherweise reicht das bereits für viele Anwendungen aus – zum Beispiel bei der Sato-Tate-Vermutung, bei der es um die statistische Verteilung der Lösungen von diophantischen Gleichungen mit Uhrzeit-Arithmetik geht. Nach ihrem Workshop konnten die zehn Forscher diese Hypothese in einem viel breiteren Zusammenhang als bisher beweisen.

Momentan versuchen Mathematiker herauszufinden, wie sich die potenzielle Automorphie zu einer exakten Verbindung erweitern lässt. Im Oktober 2019 haben die drei Zahlentheoretiker Patrick Allen von der University of Illinois in Urbana-Champaign, Chandrashekar Khare von der

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FRANKRAMSPOTT / GETTY IMAGES / ISTOCK

University of California in Los Angeles und Jack Thorne von der University of Cambridge etwa bereits nachgewiesen, dass ein beträchtlicher Teil der automorphen Formen, die während des Princeton-Workshops untersucht wurden, genau an der erwarteten Stelle liegen.

Derart exakte Brücken könnten es Mathematikern künftig ermöglichen, zahlreiche neue Theoreme zu beweisen. Eines davon ist die jahrhundertalte Verallgemeinerung des großen Satzes von Fermat. Bisher können Mathematiker nur vermuten, dass die Gleichung  $x^n + y^n = z^n$  auch dann keine Lösung besitzt, wenn  $x$ ,  $y$  und  $z$  nicht nur natürliche Zahlen, sondern zusätzlich Kombinationen mit der imaginären Zahl  $i$  enthalten.

Obwohl die zwei neuesten Arbeiten große Bereiche der beiden Langlands-Kontinente verbinden, lassen sie noch immer riesige Gebiete unerforscht. Auf der Seite der diophantischen Gleichungen ist unklar, wie man mit Exponenten größer als sechs oder mit mehr als zwei Variablen umgeht. Auf der anderen Seite gibt es automorphe Formen, die auf extrem komplizierten Gebilden leben. Um diese Herausforderungen zu bestreiten, braucht man wahrscheinlich neue Ideen. Langlands selbst zog beispielsweise niemals Torsionsklassen in Betracht, als er über automorphe Formen nachdachte. »Wir haben den von Langlands vorgezeichneten Weg verlassen«, sagt Taylor. »Wir wissen nicht genau, wohin uns der neue Pfad führen wird.« ◀

### QUELLEN

**Allen, P. B. et al.:** Potential automorphy over CM fields. ArXiv 1812.09999, 2018

**Boxer, G. et al.:** Abelian surfaces over totally real fields are potentially modular. ArXiv 1812.09269, 2018

**Calegari, F., Geraghty, D.:** Modularity lifting beyond the Taylor-Wiles method. ArXiv 1207.4224, 2012

**Caraiani, A., Scholze, P.:** On the generic part of the cohomology of non-compact unitary Shimura varieties. ArXiv 1909.01898, 2019

**Wiles, A.:** Modular elliptic curves and Fermat's Last Theorem. Annals of mathematics 141, 1995

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »»Amazing« Math Bridge Extended Beyond Fermat's Last Theorem« aus dem »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

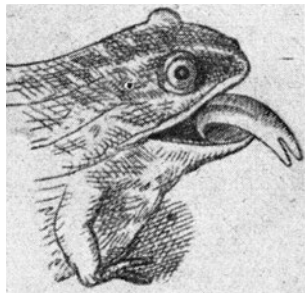
## SCHÄDLINGSBEKÄMPFUNG PER BALLON UND RÄUCHERHAUBE

# 1920

»In Kalifornien ist ein Verfahren zur Vertilgung von Baum-schädlingen in Gebrauch, das in einer Ausräucherung einzelner Bäume besteht, über die ein Zelt gestülpt wird, das die entwickelten Gase zu kräftiger Einwirkung bringt. Das Überstülpen des Zeltes war eine recht schwierige Arbeit, die mit Hilfe eines Auslegerkrans vorgenommen wurde. Zudem kamen Beschädigungen der Bäume leicht vor. Neuerdings aber verwendet man einen Fesselballon, an welchem das am unteren Rande durch einen Ring ausgespreizte Zelt angehängt wird. Das Überstülpen des Zeltes über die Bäume [geht] sehr rasch und ohne Beschädigungen vonstatten.« *Prometheus 1609, S. 384*

## DIE ZUNGE ALS FANGORGAN

»Wer kennt nicht unsern kleinen Wetterpropheten, *Hyla arborea*, den grünen Laubfrosch. Vielleicht konnte mancher seine Mahlzeiten beobachten. Mit welcher Geschicklichkeit führt der Hungrige das Attentat auf das



Ein Frosch und seine Zunge.

Insekt aus, seine Zunge als Fliegenklappe gebrauchend; er [hat] eine breite Mundspalte, aus dieser wirft er die Zunge hervor, welche gewissermaßen verkehrt im Munde angewachsen ist, während die gespaltene Zungenspitze rückwärts gelagert ist. Mit enormer Geschwindigkeit wirft der Frosch die Spitze heraus, umfängt die Fliege und klappt die Zunge ebenso schnell zurück, um den Bissen zu verschlucken.« *Prometheus 1607, S. 362*

## SPRENGSTOFF ZU DÜNGER RECYCELN?

»Es ist bekannt, daß die Salpeterarten sowohl als Düngemittel wie auch als Sprengstoffe dienen können, und es ist schon mehrmals der Vorschlag gemacht worden, die Restbestände salpeterhaltiger Sprengstoffe als Düngemittel zu verwerten. Die Gefahr einer Explosion ist aber nicht der einzige Nachteil: der Landwirt kann damit auch seine Felder vergiften. Nach Untersuchungen der Landwirtschaftlichen Versuchsanstalt in Bonn wirkt das Kaliumperchlorat sehr schädlich. Es wurde festgestellt, daß schon 1% Kaliumperchlorat Halmfrüchten außerordentlich schadet, und daß der Roggen kaum  $\frac{3}{4}$ % verträgt. Die Versuchsanstalt warnt deshalb dringend vor der Verwendung von Sprengstoffen als Düngemittel.« *Die Umschau 34, S. 516*

## INSEKTENNIEREN SCHEIDEN RUSSÄHNLICHE TEILCHEN AUS

# 1970

»Bei elektronenmikroskopischen Untersuchungen über die Luftverschmutzung fanden Forscher eigenartige, polyedrische Partikeln, mit einem Durchmesser von weniger als 0,5  $\mu\text{m}$ . Ihre gleichmäßige Größe und Struktur wiesen zwar auf biologischen Ursprung hin, doch waren sich die Forscher im unklaren, ob sie Lebewesen gefunden hatten oder nur Rußpartikeln. [Sie] erbaten die Hilfe der Biologen der ganzen Welt. 1970 wurde die Lösung eingesandt: Es handelt sich um sogenannte Brochosomen, bizarre Ausscheidungsprodukte der Malpighischen Gefäße von Heuschrecken.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 8, S. 333*

## DATEN IN KRISTALLE LASERN

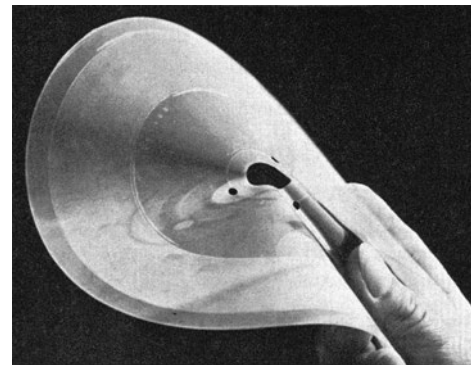
»Die Carson-Laboratories in Bristol, Conn., haben ein Patent angemeldet, mit welchem durch Laser-Holographie 1000 normale Buchseiten in einem Kristall von etwa fünf Quadratcentimeter und acht Millimeter Dicke gespeichert werden können. Das Licht eines Laserstrahls wird aufgesplittet, und einer dieser Teilstrahlen, welcher die Information trägt, kreuzt sich mit einem andern in [einem] Kristall, wo die durch den Strahl bewirkte Veränderung eines Farbzentrumms die Speicherung der Information ermöglicht.«

*Neuheiten und Erfindungen 401, S. 131*

## WELTSENSATION BILDPLATTE

»Als dem Super-Erfinder Thomas Edison 1877 erstmalig die Schallaufzeichnung in Tiefschrift gelang, da ahnte er nicht, daß dieses Verfahren fast ein Jahrhundert später zu Speicherung von beweglichen Bildern nebst Begleitton dienen würde – so geschehen bei der Bildplatte der Firmen AEG-Telefunken und Teldec. Während eine normale Schallplatte etwa 13 Rillen pro mm hat, arbeitet man jetzt mit 130 Rillen/mm. Pro Umdrehung wird ein Fernsehbild mit seinen 625 Zeilen gespeichert. Die kleine Platte [läuft] 5 min, die große 12 min, bei einer Bandbreite über 3 MHz, die eine normale Bildqualität sichert. Damit ist ein audiovisuelles Speicherungsverfahren gefunden, dem man einen weltweiten Erfolg voraussagen kann.« *Elektronik 8, S. 285*

Eine dünne, biegsame PVC-Folie dient als Bildplatte.







FRANK SCHÄBEL (GERMAN FREISTETTER DE PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (REACTICOMMONS ORIGINALS/FR-SA/4.0/LEGAL/0001)

# FREISTETTERS FORMELWELT KANN EIN MOND EINEN MOND HABEN?

**Sterne haben Planeten, Planeten haben Monde. Dann ist Schluss – bisher hat noch keiner einen Trabanten eines Mondes entdeckt. Das hindert Fachleute nicht, sich Namen für solche Objekte zu überlegen.**

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

► [spektrum.de/artikel/1744808](https://spektrum.de/artikel/1744808)

Erstaunlich oft stellen mir Leute die im Titel genannte Frage – und ich freue mich jedes Mal darüber. Denn darin steckt jede Menge spannende Astronomie und Mathematik. Die kurze Antwort: Prinzipiell spricht nichts dagegen. Bei der etwas längeren Erklärung geht es darum, wann ein Objekt ein anderes umkreisen kann, während beide um ein drittes rotieren. So etwas beobachten wir ständig, zum Beispiel im Fall der Sonne, der Erde und des Mondes.

Es gibt kein Naturgesetz, das es einem Objekt verbieten würde, unseren Mond zu umkreisen. Im Gegenteil – wir kennen sogar eine Formel, die beschreibt, unter welchen Umständen das passiert:

$$r \approx a \cdot \sqrt[3]{\frac{m}{3M}}$$

Die Formel stammt vom amerikanischen Astronomen und Mathematiker George William Hill (1838–1914), der sie im 19. Jahrhundert aufstellte. Angenommen, ein kleiner Himmelskörper der Masse  $m$  umrundet einen großen mit der Masse  $M$  im Abstand  $a$  auf einer kreisförmigen Bahn. Dann kann man daraus den so genannten Hill-Radius  $r$  berechnen, der dem gravitativen Einflussbereich des kleineren Objekts entspricht.

Setzt man für  $M$  und  $m$  die Massen der Sonne und der Erde ein und für  $a$  ihren Abstand, dann erhält man einen Hill-Radius von knapp 1,5 Millionen Kilometern. Innerhalb dieses Bereichs dominiert die Gravitationskraft der Erde; außerhalb die der Sonne. Alles, was sich in der so genannten Hill-Sphäre der Erde befindet, umkreist unseren Planeten. Auf den knapp 400 000 Kilometer entfernten Mond trifft das definitiv zu.

In der Formel für den Hill-Radius findet sich kein Gleichheitszeichen, sie ist eine Näherung. Das hat einerseits technische Gründe: Zur Berechnung ist eine

Reihenentwicklung nötig, von der nicht alle Terme im endgültigen Resultat auftauchen. Zum anderen ist die Formel aus physikalischer Sicht nicht vollständig, denn das Sonnensystem enthält nicht nur drei Himmelskörper, sondern sehr viel mehr, die sich alle gegenseitig anziehen. Dennoch funktioniert Hills Formel sehr gut.

Der Hill-Radius unseres Mondes beträgt 60 000 Kilometer. Würde sich ein Objekt innerhalb dieses Abstands befinden, könnte es den Mond umkreisen, während beide sich um die Erde bewegen – zumindest für ein paar hunderttausend Jahre. Denn die Gezeitenkräfte lassen eine Konfiguration bei so geringem Abstand nicht lange überleben. Mehr Chancen hätte ein Objekt, das etwa einen Mond des Neptuns umkreist. Der sonnenfernste Planet hat eine große Hill-Sphäre und kann weit entfernte Monde halten. Diese besitzen wiederum selbst einen großen Hill-Radius mit genug Platz für weitere Trabanten.

Bisher haben Astronomen noch keinen Mond eines Mondes entdeckt; in unserem Sonnensystem scheint es das nicht zu geben. Bei den Planeten anderer Sterne haben wir vielleicht mehr Glück. Zuerst muss man allerdings überhaupt einen extrasolaren Mond zweifelsfrei identifizieren. Solche Himmelskörper gibt es höchstwahrscheinlich, und es ist durchaus möglich, dass irgendein Exomond selbst auch einen Mond hat.

Juna Kollmeier von der Carnegie Institution for Science in Washington, D. C. und Sean Raymond von der Université Bordeaux haben 2018 viel versprechende extrasolare Kandidaten identifiziert. Gleichzeitig lieferten sie eine Anregung, wie man solche Monde von Monden nennen könnte: Untermonde (submoons). Andere Vorschläge lauteten Mondmond (moonmoon) oder Moonoon (moonoon). Glücklicherweise dürfte es noch etwas dauern, bis ein solches Objekt tatsächlich entdeckt wird – bis dahin fällt uns dann vielleicht ein vernünftiger Name ein.

# REZENSIONEN

---



## GEOWISSENSCHAFTEN FASZINIERENDES ERDREICH

**Forstwissenschaftler Peter Laufmann beschreibt, welche wimmelnde Welt uns im Erdboden buchstäblich zu Füßen liegt, wenn wir nur genau hinschauen.**

► 80 Regenwürmer. 100 Käfer. 300 Tausendfüßer. 10000 Borstenwürmer. 50000 Springschwänze. 1000000 Fadenwürmer. 10000000000 Strahlenpilze. 1000000000000 Bakterien: Es treibt sich einiges herum unter unseren Füßen. Obige Aufzählung umfasst nur eine kleine Auswahl der Lebewesen, die in sich unter einer Fläche von einem Quadratmeter finden, wenn man 30 Zentimeter tief gräbt – eine verborgene Welt, die der studierte Forstwissenschaftler Peter Laufmann buchstäblich ans Licht zieht und in seinem Buch »Der Boden« anschaulich und unterhaltsam beschreibt.

In zehn Kapiteln bringt Laufmann den Lesern, wie der Titel verspricht, in der Tat ein ganzes Universum näher. Er beginnt seine Schilderung mit den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Bodens und der Bodenbildung, zeigt, wie der Mensch den Boden beackert und stellt abschließend dar, welchen Gefahren der Boden heutzutage ausgesetzt ist. Die Inhalte des Buchs sind dabei weitestgehend Lehrbuchwissen. Dies schmälert die Lektüre aber nicht, denn dem Autor gelingt es sehr gut, eine runde und spannende Geschichte zu erzählen und das bekannte Wissen gelungen zu bündeln.

Dabei fängt er buchstäblich ganz am Anfang an und beschreibt zunächst die Entstehung des Planeten Erde vor ungefähr 4,5 Milliarden Jahren. Bis die glühende Kugel sich abgekühlt hatte, Ozeane und Meere entstanden waren und schließlich Erosion und Landpflanzen eine Bodenbildung ermöglichten, waren einige Milliarden Jahre vergangen, und so holt dieses erste Kapitel vielleicht weiter aus als nötig. Die folgenden Kapitel sind dann enger auf das eigentliche Buchthema fokussiert. Die Leser

erfahren, wie Böden aufgebaut sind, worin sie sich unterscheiden, in welchen Klimata bestimmte Bodentypen bevorzugt vorkommen und wie der Mensch die Böden seit Jahrtausenden für sich nutzbar macht. Der Autor legt unter anderem dar, dass die gezielte Bodenbewirtschaftung nicht erst im Mittelalter mit einer Dreifelderwirtschaft begann. Bereits im alten Ägypten und in Persien hielten die Menschen Tauben, um Dünger für die Landwirtschaft herzustellen.

Laufmann erörtert aber nicht nur die landwirtschaftlichen und natürlichen Aspekte des Bodens, sondern bringt auch interessante Nebenthemen ein. Etwa im Kapitel »Stummer Zeuge«, in dem er darstellt, welche Geheimnisse Forensiker oder Archäologen dem Boden entlocken oder welche erheblichen Folgen die Stellungskriege des Ersten Weltkriegs auf die Böden der betroffenen Landstriche hatten – und mitunter immer noch haben, etwa hinsichtlich der Schwermetallbelastung der Krume.

Am Ende beleuchtet der Autor die Gefahren, die dem Erdreich heute drohen, und plädiert dafür, wir sollten uns nicht selbst den Boden unter den Füßen wegziehen – durch falsche Bewirtschaftung, Flächenversiegelung, Überdüngung und vieles mehr. Auch wenn Leser, die an Umweltthemen interessiert sind und entsprechende Vorkenntnisse haben, nur wenig Überraschendes in dem Werk finden, lohnt sich die Lektüre auf Grund des gut umgesetzten roten Fadens und der gelungenen Erzählung auf jeden Fall.

Der Rezensent Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

Maulwürfe sind die Bodentiere schlechthin. Mit ihrem kurzen Fell, den kräftigen Pfoten zum Graben und einer feinen Sensorik in den Tasthaaren sind sie gut an das unterirdische Leben angepasst. Ihr Sehvermögen ist eher bescheiden.

Peter Laufmann  
**DER BODEN**  
Das Universum  
unter unseren  
Füßen  
C. Bertelsmann,  
München 2020  
191 S., € 18,-



## TECHNIK DAS KLEINE EINMALEINS DER MASCHINEN

**33 Fragen und Antworten zur Automatisierung intelligenten Verhaltens und zu maschinellem Lernen.**

► Künstliche Intelligenz (KI) ist das Megathema unserer Zeit. Obwohl dieser Begriff ständig in den Medien auftaucht, ist vielen immer noch nicht ganz klar, was sich dahinter verbirgt. Der Wissenschaftsjournalist und Zukunftsforscher Ulrich Eberl versucht Licht in diese Blackbox zu bringen. In 33 Fragen und Antworten klärt er die wichtigsten Aspekte des Themas – von der Wirtschaft über technische Details bis hin zu Ethik und Rechtsphilosophie. Funktioniert künstliche Intelligenz wie unser Gehirn? Wird sie einen Großteil der menschlichen Jobs überflüssig machen? Werden die Kriege der Zukunft von Robotern entschieden? Das sind nur einige Fragen, denen sich Eberl in seinem Buch widmet.

»Verfahren der Künstlichen Intelligenz sind bereits heute ein wichtiger Teil unseres Alltags«, erklärt der Autor. »Wenn wir das Smartphone über Fingerabdruck oder Gesichtserkennung entsperren, wenn wir Bilder hochladen und ähnliche im Internet suchen, wenn wir smarte Lautsprecher bitten, unsere Lieblingsmelodien zu spielen, wenn Messenger-Dienste Wörter korrigieren oder Texteingaben vervollständigen, wenn wir uns über angeblich maßgeschneiderte Werbung ärgern – dann ist das alles »KI in action.«



Eberl weiß, wovon er spricht. Der promovierte Biophysiker leitete 20 Jahre lang die Forschungskommunikation bei Siemens, bevor er sich 2015 als Wissenschaftsautor selbstständig machte. In seinem Vorgängerwerk »Smarte Maschinen: Wie Künstliche Intelligenz unser Leben verändert« (siehe »Spektrum« Dezember 2016, S. 88) hat er sich eingehend mit dem Thema befasst. In der Zwischenzeit ist die Technik jedoch rasant vorangeschritten; man denke an die Google-Software AlphaGo Zero, die sich die Regeln des Brettspiels Go selbst beibrachte und 2017 einen menschlichen Großmeister bezwang. Ein Ereignis, das Beobachter einen Meilenstein nannten. Diese Entwicklung nimmt Eberl zum Anlass, basierend auf eigenen Recherchen nochmal ein aktualisiertes Überblickswerk zu publizieren.

Das Ergebnis ist keines der üblichen Frage-Antwort-Spiele, die meist etwas lustlos und glossarähnlich lexikalische Fragmente ausbreiten, sondern ein sehr reflektiertes Büchlein, das die Prämissen menschlicher Intelligenz auf den Prüfstand stellt. »Ist es ein Zeichen von Intelligenz, Kriege zu führen, Rohstoffe zu verbrennen, die Atmosphäre aufzuheizen, den Regenwald abzuholzen, Tierarten auszurotten und die Ozeane in Müllkippen zu verwandeln?«, fragt Eberl. Dass der Mensch maschinelle Hilfe gut gebrauchen könne, sei offenkundig.

Mit viel technischem, rechtlichem und philosophischem Hintergrundwissen vermisst der Autor die Entwicklungsfelder künstlicher Intelligenz, schätzt ihre Potenziale ein und zeigt ihre Grenzen auf. Das Sciencefiction-Szenario, in dem sich eine KI zur Superintelligenz aufschwingt, zerlegt Eberl ebenso sachlich und humorvoll wie die These, Maschinen könnten irgendwann ein Bewusstsein entwickeln. »Alle kommerziellen KI-Systeme, die heute entwickelt werden, beherrschen nur ihre Einsatzgebiete. Sie sind – grob gesagt – »Fachidioten« mit speziellen Fähigkeiten, ohne Allgemeinintelligenz.« Und das, so Eberl, sei auch so gewollt: »Ein Rasenmäh-Roboter soll das Gras schneiden und nicht mit seinem Besitzer über die

Gartengestaltung diskutieren, und eine medizinische KI soll den Ärzten helfen und nicht etwa ihre Berufswahl in Frage stellen.« Dem Autor gelingt es, komplizierte Phänomene anhand von anschaulichen Beispielen einfach und plausibel zu erklären.

Dass es bei den meist zwei bis drei Seiten kurzen Antworten zu Unschärfen kommen kann, liegt in der Natur des Formats. So behauptet Eberl, KI werde in einem ersten Schritt Routineaufgaben übernehmen, die überwiegend von der Mittelschicht der Arbeitnehmer ausgeführt würden – was daher weder Gering- noch Hochqualifizierte treffe. Das mag auf »Roboteranwälte« zutreffen, also auf KI-Systeme, die sich durch juristische Fachliteratur wühlen und weitgehend das Metier von Rechtsanwaltsfachangestellten übernehmen. Bei angelernten Call-Center-Mitarbeitern, die auf standardisierte Anfragen mit einem Skript antworten und deren Arbeit schon heute von Telefon-KIs ersetzt wird, wirkt diese These allerdings erratisch.

Dennoch bietet das Buch großen didaktischen Mehrwert. Die Leichtigkeit, mit der Eberl auf eineinhalb Seiten den sperrigen Begriff »Deep Learning« erklärt, sucht ihresgleichen. Der Autor hat ein fakten gesättigtes Buch geschrieben, das sowohl Laien als auch Experten einen fundierten Überblick über den Themenkomplex KI gibt.

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

## EVOLUTION JAHRMILLIARDEN IM ZEITRAFFER

**Die Geschichte des Lebens ist lang und seine Vorgeschichte noch länger. Dieses Buch versucht sich an einer Gesamtschau.**

► Der Buchtitel klingt, als handle das Werk vor allem davon, wie die ersten Lebewesen entstanden. Dem ist aber nicht so, wie sich beim Lesen herausstellt. Stattdessen geht der Autor eine viel größere Herausforde-



nung an: Er umreißt die Geschichte und Vorgeschichte des Lebens vom Urknall bis zur Erfindung der Landwirtschaft. Für ein schmales Taschenbuch ist das ambitioniert. Johannes Sander, promovierter Biologe und Wissenschaftsautor, hat sich viel vorgenommen.

In sieben Hauptkapiteln mit insgesamt 230 Seiten schreitet Sander durch einen Zeitraum von mehr als 13 Milliarden Jahren. Ein 40-seitiger Anhang mit Glossar, Literatur- und Stichwortverzeichnis beschließt das

Ganze. Bilder gibt es kaum, und wenn, dann minimalistisch gestaltete; der begrenzte Umfang des Werks lässt auch nicht viel Platz dafür.

Der Autor beginnt mit der Bildung erster Atomkerne sowie der Sterne und Planeten. Darauf folgt ein rund zehnteiliger Exkurs in die Entstehung des Lebens – das ist wenig, gemessen an den Erwartungen, die der Buchtitel weckt. Des knappen Raums wegen kann Sander hier nur wenige Schlaglichter auf das Thema werfen. In den übrigen Kapiteln arbeitet er sich durch die Erdzeitalter und skizziert den groben Verlauf der biologischen Evolution, wobei er auf Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und Pilze eingeht. Am Ende befasst er sich mit der Entwicklung der Hominini und dem Erscheinen des modernen Menschen.

Das Werk wartet mit enormer Faktenfülle auf. Dicht gedrängt reihen sich Taxonbezeichnungen und Merkmalsbeschreibungen aneinander: »Erstmals seit dem Silur belegt sind beispielsweise die Anaspida. Ein Vertreter dieser Gruppe war der etwa

26 Zentimeter lange *Rhyncholepis* aus dem späten Silur, dessen Überreste in Norwegen gefunden wurden. *Haryangaspis* wiederum gehörte zu den Galeaspiden, die durch helmartige, manchmal mit langen hornartigen Auswüchsen versehene Kopfschilde gekennzeichnet waren.« So geht das Seite für Seite. Das alles zusammenzutragen, war bestimmt nicht leicht, wie sich auch an dem 25-seitigen, eng gedruckten Literaturverzeichnis ersehen lässt. Hervorzuheben ist, dass der Autor ziemlich ausführlich die Evolution der Pflanzen behandelt.

Allerdings hat das Buch einen durchgehend enzyklopädischen Charakter, was bei längerem Lesen ermüdet. Der Text ähnelt einer großen Sammlung von Lexikoneinträgen: Jeder Absatz für sich ist gewiss richtig und aufschlussreich, doch es fehlt ein übergeordneter Bogen, der das Ganze nachvollziehbar strukturiert, die wesentlichen Dinge herausstellt und den Lesern mit Zusammenfassungen hilft. Von großem Nutzen wäre es gewesen, die beschriebenen zeitlichen Entwicklungen und

## Spektrum der Wissenschaft

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

**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser

**Redaktion:** Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: [redaktion@spektrum.de](mailto:redaktion@spektrum.de)

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Natalie Schäfer

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

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

**Redaktionsassistentz:** Andrea Roth

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

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle

**Herstellung:** Natalie Schäfer

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

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

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkte mit: Dr. Sebastian Vogel

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto: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](mailto:spektrum@zenit-presse.de), Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

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

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

**Anzeigen:** E-Mail: [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de), Tel.: 06221 9126-600

**Druckunterlagen an:** Natalie Schäfer, E-Mail: [schaefer@spektrum.de](mailto:schaefer@spektrum.de)

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 41 vom 1.1.2020.

**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: © 2020 (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: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Floreck, Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



Verwandtschaftsverhältnisse konsequenter in Grafiken darzustellen und überhaupt mehr Bilder zu bringen.

Die zahlreichen Fachbegriffe machen das Werk durchweg anspruchsvoll. Da erscheint das Glossar im Anhang dringend nötig. Dankenswerterweise sind Begriffe im Text, die sich im Glossar nachschlagen lassen, gefettet.

Von dem Buch profitieren können Leser(innen), die umfangreiche Vorkenntnisse besitzen und sich einen kompakten Eindruck vom evolutionären Geschehen in bestimmten Erdzeitaltern verschaffen möchten. Als heranführende Lektüre oder gar als unterhaltsamer Lesestoff eignet es sich hingegen eher nicht.

Der Rezensent Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## GESCHICHTE DURCH DIE ZEITEN

### Ein Reiseführer für Expeditionen ins Gestern.

► Was wäre, wenn Sie sich – trotz Coronabeschränkungen – im nächsten Urlaub nicht nur für einen Kontinent, eine Region oder eine Stadt entscheiden könnten, sondern als Reiseziel ebenso ein beliebiges Jahrhundert zur Auswahl stünde? Wenn Ihnen nicht nur die ganze Welt, sondern die ganze Weltgeschichte offenstünde? Eine verlockende Vorstellung. Was Sie in dem Fall aber unbedingt benötigen würden, wäre ein guter Reiseführer, denn es gäbe nicht nur enorm viel zu entdecken, sondern auch diverses zu bedenken.

Ein solches fiktionales Nachschlagewerk haben die Journalistin Kathrin Passig und der Physiker Aleks Scholz geschrieben. Den Autoren ist ein sehr unterhaltsames Buch gelungen, das sowohl zu den historischen Stätten hinführt und diese hautnah erleben lässt als auch die physikalischen Hintergründe von Zeitreisen erörtert.

Das »Handbuch für Zeitreisende« listet zahlreiche Reiseziele auf. Wer die sportliche Herausforderung sucht, dem seien die Mittel- und Hochgebir-

ge des Pleistozäns vor ungefähr einer Million Jahren ans Herz gelegt: Sie bieten Schneesicherheit und unberührte Winterlandschaften, allerdings keine Skilifte. Passig und Scholz bringen ihren Lesern diese Welt näher und geben wertvolle Tipps zur nötigen Reiseausrüstung. Wer es besonders abenteuerlich mag, der könnte über eine Reise ins Erdmittelalter nachdenken und sich – unter großen Vorsichtsmaßnahmen – in die Welt der Dinosaurier begeben. Der Reiseführer informiert hierbei nicht nur über die Welt, die den Reisenden dort erwarten würde, sondern gibt ganz praktische Hinweise zu Verhalten und Reiseausrüstung. So haben neuere Studien ergeben, dass der Furcht einflößende *T. rex* nur rund 20 Kilometer pro Stunde schnell laufen konnte, was freilich bloß fitten Sprinterinnen und Sprintern das Leben retten würde. Abgesehen davon, dass andere Dinos, die für uns wohl noch wesentlich gefährlicher gewesen wären, etwa *Deinonychus*, vermutlich deutlich schneller rannten. Die Ausrüstung hingegen kann jeder an die jeweilige Reisezeit anpassen. Je nach Jahrtausend, in die man reist, ist die Sauerstoffkonzentration mal höher und mal niedriger als heute. Bei der Auswahl des Campingkochers kann das zum Kaufkriterium werden. Übrigens bietet sich der Zeitraum vor 65 Millionen Jahren besonders für ethisch und ökologisch unbedenkliche Großwildjagd an – kurz danach macht ein Meteorit den Dinos ohnehin den Garaus.

Leichter hat es der Zeitreisende hingegen, wenn ihm eher der Sinn nach Kultur steht: Dann empfehlen die Auto-



Kathrin Passig,  
Aleks Scholz  
**HANDBUCH FÜR  
ZEITREISENDE**

Von den Dinosauriern bis zum  
Fall der Mauer  
Rowohlt, Berlin  
2020

336 S., € 20,-

KATHRIN PASSIG | ALEKS SCHOLZ  
*Handbuch  
für Zeitreisende*  
  
Von den Dinosauriern bis  
zum Fall der Mauer  
ROWOHLT

## Vor *T. rex* hätte ein Sprinter weglaufen können

ren zum Beispiel ein Konzert in Wien – nicht irgendeines, sondern die Uraufführung der 9. Sinfonie Ludwig van Beethovens am 7. Mai 1824. Nur so käme heraus, wie sich der Maestro sein Werk tatsächlich vorgestellt hat. Denn die Tempobezeichnung »Allegro ma non troppo« im ersten Satz lässt viel Raum für Interpretationen. Ein heimlicher Mitschnitt würde Sie bei Musikwissenschaftlern und Orchesterangehörigen sicher ungemein beliebt machen.

Interessante Schilderungen dieser Art gibt es viele in dem lesenswerten und unterhaltsamen Buch, das Reise-neulingen vor allem dazu rät, die Weltausstellungen etwa in Paris oder London Ende des 19. Jahrhunderts zu besuchen. Jene bieten schließlich einen hervorragenden Spiegel ihrer Zeit; zudem lässt es sich in der internationalen Menschenmasse unauffällig untertauchen.

Das Werk umfasst zahlreiche Themen und Zeiten, die die Autoren geschickt aufbereiten. Dabei erlauben sie sich einige interessante Gedankenspiele: Was wäre, wenn man im Urlaub die Welt verändern würde? Mit dem Wissen von heute könnte man etwa Erfindungen vorantreiben oder Gräueltaten verhindern. Mit etwas Hilfe aus unserer Zeit würden so vielleicht nicht vier Jahrtausende zwischen der Erfindung des Rads und derjenigen der Schubkarre vergehen. Allerdings wissen wir spätestens seit dem Film »Zurück in die Zukunft«, dass Veränderungen in der Vergangenheit durchschlagende Effekte auf die Gegenwart haben können. Und so belässt man es wohl besser bei der rein beobachtenden – leider nur gedanklichen – Zeitreise zu zahlreichen Zielorten und -zeiten, die die Autoren lesenswert charakterisiert haben.

Die Rezensentin Bernadett Fischer ist Historikerin und arbeitet in Bonn.

## DIE WISSENSCHAFT DES KONJUNKTIVS

**Warum haben wir von etwaigen Außerirdischen noch nichts mitbekommen? Laut Astronom Caleb Scharf befinden wir uns momentan vielleicht in einer besonders schwer zugänglichen kosmischen Region.** (»Der galaktische Archipel«, »Spektrum« Juni 2020, S. 74)

**Manfred Bühner, Freiburg i. Br.:** Der Artikel enthält die beiden häufigsten Fehler, die für die Astrobiologie typisch sind. Erstens gibt es keine Basis von Beobachtungen, alles wird von Computermodellen hergeleitet, die aber niemals in brauchbarer Weise erklärt werden. Zweitens beruhen alle Aussagen auf statischen Statistiken, Entwicklung und Zeitablauf werden selten erwähnt.

Im Kasten auf S. 77 wird die Möglichkeit genannt, dass wir allein im Weltall sein könnten, dies aber nicht besonders plausibel sei. Der Text geht darauf nicht weiter ein. Ich halte das allerdings für durchaus plausibel (nicht fürs Weltall, aber für unsere Milchstraße). Laut Artikel dürfte die Milchstraße zirka zehn Milliarden Jahre alt sein. Dazu sieht meine Rechnung für den Zeitablauf so aus: Für etwa 400 Millionen Jahre gab es bloß Sterne der ersten Generation, die lediglich Spuren der Elemente schwerer als Helium aufwiesen. Darauf folgten etwa zwei Milliarden Jahre lang zusätzlich Sterne der zweiten Generation, die aber auch nur sehr geringe Mengen davon enthielten. Erst vor etwa 7,6 Milliarden Jahren, also lediglich drei Milliarden Jahre vor der Entstehung des Sonnensystems, begann in den Sternen der dritten Generation ernsthaft das Brüten der schwereren Elemente. Wie unsere eigene Existenz zeigt, reichten diese drei Milliarden Jahre zur Erzeugung von terrestrischen Planeten, aber wann war diese Möglichkeit zuerst gegeben? Genügen schon zwei Milliarden Jahre, oder geht es etwa noch schneller?

Die Entwicklung des Lebens bis zu unserer Zivilisation dauerte vier Milliarden Jahre, dabei ist die Sonne optimal in der galaktischen habitablen Zone positioniert. Da wir keine anderen Beispiele kennen, kann man die Variabilität dieses Zeitraums nicht abschätzen. Und damit ist noch nichts über die Lebensdauer von Zivilisationen gesagt. Wir jagen unsere eigene ja gerade mit Volldampf in eine Klimakatastrophe. Auf jeden Fall ist die Ansicht, dass die Milchstraße voller Zivilisationen sein dürfte, an den Haaren herbeigezogen. Astrobiologie ist eben die Wissenschaft des Konjunktivs.

## REGENWÄLDER SIND KEINE GRÜNE LUNGE

**Die Biologin Anja Rammig erläuterte Messungen sowie Modelle, laut denen Regenwälder in Südamerika und Afrika ihre Funktion als Kohlenstoffsенke einbüßen.** (»Tropenwälder verlieren ihre Senkenfunktion«, »Spektrum« Juni 2020, S. 20)

## 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](mailto:leserbriefe@spektrum.de). Oder kommentieren Sie im Internet auf [Spektrum.de](http://Spektrum.de) direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

**Roland Maier, Riemerling:** Pflanzen haben der Atmosphäre über Millionen von Jahren gigantische Mengen an CO<sub>2</sub> entzogen. Die gebundene Form befindet sich noch in Erdöl- und Steinkohlelagerstätten sowie in Torfen und Mooren. Wie in dem Beitrag erwähnt, fungieren Wälder nur dann als Nettokohlenstoffsенke, wenn mehr gebunden als freigegeben wird. In Regenwäldern kann das nicht beliebig lange der Fall sein. Von guten Wachstumsbedingungen profitiert dort neben der Flora außerdem die Fauna. Vor allem die Mikroorganismen geben den Kohlenstoff wieder an die Atmosphäre ab, sobald Pflanzen verenden.

Die überaus aktiven Mikroben und Pilze sind auch der Grund für die sehr dünne Humusschicht in tropischen Regenwäldern. In Wäldern, die auf Dauer Treibhausgase der Atmosphäre entziehen, müssten abgestorbene Substanzen vor aerober Verrottung geschützt gespeichert werden (etwa in Schlamm). In den Regenwäldern gibt es jedoch keine entsprechenden Lagerstätten. Solange die Biomasse gleich bleibt, werden in Summe weder Treibhausgase fixiert, noch wird reiner Sauerstoff erzeugt. So gesehen sind Regenwälder zumindest langfristig keine »Lungen«, wie oft behauptet wird.

Zu Recht relativiert Anja Rammig die Klimamodelle, welche davon ausgehen, dass die vermehrte CO<sub>2</sub>-Einlagerung der letzten Jahre anhalten wird. Der Zuwachs sollte eher Anlass zur Sorge geben. Es ist schon unsicher, ob die in Bäumen gebundene Kohlenstoffmenge nur gehalten werden kann. Offensichtlich gibt es negative Einwirkungen auf die Pflanzen, wodurch wieder CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Hinzu kommen Waldbrände, deren Vernichtungskraft in letzter Zeit deutlich zunahm (siehe »Spektrum« Juni 2020, S. 60).

## ERRATUM

»Der Kunststoff der Neandertaler«, »Spektrum« Juli 2020, S. 78

Im Kasten auf S. 80 sind Pech und Teer verwechselt. Es muss richtig heißen: »Wenn Nadelholz oder Birkenrinde mittels der so genannten Doppeltopfmethode destilliert wird, entsteht zunächst ein als Kleber eher unbrauchbares Material: der flüssige Teer. Erst wenn man ihn einkocht, wird daraus eine zähe Masse – Pech.«

**Ein besonderes Experiment.** Eine Sciencefiction-Kurzgeschichte von Eva Strasser

**G**ott sei Dank«, sagt Ines, als ich aus dem Koma erwache. »Gott sei Dank bist du wieder da.« Ich habe nicht das Gefühl, jemals weg gewesen zu sein. Ines lächelt mich an und gibt mir Orangensaft. »Motorisch ist er topfit«, sagt der Arzt. »Sein Hauptproblem ist das emotionale Zentrum. Das limbische System.« Die Erinnerungen. Alle weg. Ines zeigt mir Fotos. Ich bei meiner Einschulung. Wir beide auf Teneriffa. Schöne Bilder.

»Wir sind gewandert«, sagt Ines. »Du hast mir auf der Terrasse des Hotels einen Heiratsantrag gemacht.« Die Hochzeit, die Geschenke, die Gäste. »Es war sehr emotional.« Emotional, sagt der Arzt, »hat er noch einen weiten Weg vor sich«. Einmal in der Woche sehen wir uns. Ich sitze ihm gegenüber, und er fragt. Nach meinem Tag. Meinem Leben. »Wir kriegen das wieder hin«, sagt er.

Ines streicht über mein Gesicht und sagt: »Es tut mir leid.« Mir tut es auch leid. Das sage ich aber nicht. Ich sage nicht, dass ich mich nicht an sie erinnere, nicht an Teneriffa und nicht an den Heiratsantrag. Zum Glück besteht das menschliche Gehirn aus verschiedenen Teilen. Der, in dem mein Arbeitsleben gespeichert ist, funktioniert reibungslos. Ich habe Psychologie studiert. Und Informatik.

Also suche ich einen neuen Job. Ohne Erfolg. Das Koma ist kein guter Punkt in meinem Lebenslauf. »Nur nicht aufgeben«, sagt der Arzt. »Sie machen das super.« Da kommt Ines mit einer Stellenanzeige. CyCorps International hat einen Firmensitz auf dem Land und sucht einen Spezialisten. Sie laden mich ein. Zehn Leute sitzen mir gegenüber. Was genau sie machen, sagen sie nicht. Nur, dass sie hier an einem Experiment arbeiten. CyCorps wird mein neuer Arbeitgeber.

Auf dem Land. Es gibt nur einen Laden. In unserer Straße spielen viele Kinder. Nachts ist es totenstill. Wir versuchen, ein Kind zu bekommen. Ines sagt, es geht ihr gut, aber ich sehe, dass das nicht stimmt. »Ines tut mir leid«, sage ich dem Arzt. »Mitleid«, notiert er und freut sich.

Mein Büro liegt im Erdgeschoss. Vor meiner Tür ein kleiner See. Bäume, Frösche, Kaulquappen. »Ein toller Arbeitsplatz«, sagt mein Arzt. Nach zwei Wochen kommt meine Chefin zu mir. »Kommen Sie mit.« Wir fahren fünf Stockwerke in die Tiefe. »Die Tür ganz hinten«, sagt die Chefin. Vor mir sitzt ein kleiner Junge. »Das ist Rupert.«

Rupert ist das große Geheimnis. Das Experiment. »Das geht doch nicht«, sage ich, »das ist doch kein Aufenthaltsort für Kinder. Hier unten, ohne Fenster.« Die Chefin lacht. Rupert ist nicht echt.

Rupert sieht aus wie ein achtjähriger Junge, er spricht wie ein achtjähriger Junge. Aber wenn man etwas am Algorithmus ändert, spricht er japanisch. Oder dreht durch. Rupert ist ein humanoider Roboter. »Wir würden uns freu-

en«, sagt die Chefin, »wenn Sie sich um Rupert kümmern. Wir haben ihm einen Körper gegeben. Sorgen Sie dafür, dass er auch sonst von einem Menschen nicht zu unterscheiden ist. Machen Sie ihn zu einem von uns.«

Wir sehen uns Filme an. Wir unterhalten uns. Wir gehen spazieren. Rupert interessiert sich für Vögel. Besonders fasziniert ihn der Specht. Ich schreibe alles auf. Rupert sitzt am Boden und malt. Er lächelt mich an. Ich habe ein schlechtes Gewissen. Für ihn sind wir Freunde.

Ich gehe mit Rupert einkaufen. Die Verkäuferin schenkt ihm einen Lolli. Sie nennt mich seinen Papa. Sie merkt nicht, dass Rupert kein Mensch ist. Ich gehe mit Rupert Schlittschuh laufen. Ich kann es immer noch. Ich wusste nicht, dass ich es kann. Rupert ist gut. Er kann innerhalb kürzester Zeit jede Sportart lernen. Er lacht viel.

Ines fragt mich, wie es läuft mit dem neuen Job. »Gut«, sage ich. Was genau ich mache, darf ich nicht erzählen. Ich habe einen Vertrag unterschrieben. Ines sitzt den ganzen Tag zu Hause und will ein Kind. Ich beschäftige mich die ganze Zeit mit einem Kind. Das ist nicht gerecht. Mein Arzt freut sich. Was genau ich empfinde, will er wissen. »Das ist nicht gerecht«, sage ich.

Ich bringe Ines Blumen mit. Wir probieren es weiter. Abends sitzen wir auf dem Sofa. Sie legt ihren Kopf auf meine Schulter. Zurück im Labor streiche ich Ruperts Zimmer. Ich male Fenster auf, dahinter wabert der Wald. Er umarmt mich. Ich spüre seinen Herzschlag. Ich weiß, dass er kein Herz hat. Es ist mir egal. Ich mag Rupert.

**I**ch habe dich gesehen«, sagt Ines eines Tages. »Du warst in der Stadt. Mit einem Kind. Was ist das für ein Kind?«

Sie beginnt zu weinen. Ich gehe zur Chefin. »Ich kann nicht mehr mit Rupert arbeiten«, sage ich. Sie sieht mich an. »Wir könnten das Experiment erweitern. Sehen, wie Rupert auf eine weibliche Bezugsperson reagiert.« Ich verstehe nicht. »Nehmen Sie ihn mit nach Hause«, sagt die Chefin. »Unter einer Bedingung: Ines darf nicht erfahren, was Rupert ist.«

Ich sage Ines: Rupert ist der Sohn eines Kollegen. Er und seine Frau sind bei einem Unfall ums Leben gekommen. Wir müssen noch ein paar Formalitäten klären. Das bürokratische System. Aber wenn du möchtest, haben wir jetzt einen Sohn. Ines weint und lacht und fällt mir um den Hals.

Rupert bekommt das Kinderzimmer. Er spielt mit den Nachbarskindern. Er geht in die 2. Klasse und besiegt mich im Schach. Er mag keine Hausaufgaben, und er mag es nicht, wenn man ihm sagt, was er tun soll. Wenn ich ihn bitte, Salat zu waschen, sagt er »Nein« und geht schaukeln. Wenn ich will, dass er seine Jacke ordentlich an den Haken hängt, rennt er zum Fernseher.



»Rupert!«, rufe ich und mache den Fernseher aus. Er scharrt mit den Füßen, hält den Kopf schief und bleibt stehen. Ines gibt ihm Kakao und sieht mich an. »Er ist noch ein Kind. Sei nicht so streng.« Ich ändere den Algorithmus. Minimal. Aber Ines bemerkt den Unterschied sofort. »Was ist los? Geben die ihm in der Schule Medikamente?« Ich mache es rückgängig.

Am nächsten Tag liegt die Jacke wieder im Flur und der Fernseher läuft. Ich frage Rupert, ob wir ins Kino gehen. Er will, dass Ines auch mitkommt. Mutter und Sohn. Ich bin der, der das Kind umprogrammieren kann.

Wenn ich abends nach Hause komme, spielen die beiden im Garten. Ich stelle mir einen Teller in die Mikrowelle und setze mich vor den Fernseher. Ines sehe ich kaum noch. »Lass uns was zusammen machen«, sage ich. »Wir könnten in den Zoo«, strahlt sie mich an, »Rupert liebt Tiere.« »Nur du und ich«, sage ich. »Als Paar.« Ach so, sagt Ines. Ich sage nichts mehr. Der Arzt freut sich. »Eheprobleme. Super.«

Ich fange an zu joggen. Frische Luft. Der Specht hämmernt gegen seinen Baum. Zu Hause lachen Ines und Rupert. Im Bett liegen Kinderbücher. Rupert spielt mit den anderen Kindern. Ständig hat eines Geburtstag. »Wann hat Rupert Geburtstag?«, fragt mich Ines. »Morgen«, ruft Rupert. Er war schneller als ich. »Oh mein Gott«, sagt sie. »Du musst dir frei nehmen.«

## Ich sage zu Ines: Rupert ist der Sohn eines Kollegen. Er und seine Frau sind tot

Unser Haus ist verwüstet. Die Fenster mit Fingerfarben bemalt. Ich finde Pommes in unserem Bett. »Das geht so nicht«, sage ich zu Ines. »Das sind Kinder«, sagt sie. »Lass sie doch.« Die anderen vielleicht, denke ich. Ich muss es ihr sagen. »Unter keinen Umständen«, sagt meine Chefin. »Sie haben einen Vertrag unterschrieben.« »Sie wollen Ihre Frau zurück«, sagt mein Arzt. »Sie lieben Sie.« Ines und ich streiten nur noch. Ich brülle. Rupert reißt die Augen auf und hält sich die Hände vor die Ohren. Dann rennt er zu Ines und umarmt sie.

Am nächsten Abend essen wir zusammen. Ich habe mir Risotto gewünscht. Nach dem Essen trage ich die Teller in die Küche. Wie nebenbei wische ich über mein Smartphone. Rupert sieht Ines an, wackelt mit dem Kopf und sagt: »Du Hure.« Ines lässt ihr Glas fallen. »Du hässliches Stück Scheiße«, sagt Rupert zu Ines. Ines starrt mich an.

»Rupert«, sage ich, »hör sofort auf.« Rupert wirft seinen Stuhl um. Er schmeißt mein Weinglas an die Wand. Wirft

den Fernseher um. Er brüllt: »Ihr Schweine!« Dann hebt er eine große Scherbe auf und nähert sich Ines. Sie springt auf. Ich stelle mich schützend vor sie. Das mit der Scherbe ist nicht von mir. Rupert lernt schnell.

Mein Smartphone liegt auf der Kommode. Mit ausdruckslosem Gesicht kommt Rupert auf uns zu. Ich werfe meinen Stuhl nach ihm, renne zur Kommode und tippe auf das Display. Rupert bleibt mitten in der Bewegung stehen. Mit erhobenem Arm, Risottoflecken auf dem Pulli. Ines versteht nicht. »Was hat er?« Sie fängt an zu weinen. »Was ist hier los?«

Ich sage es ihr. Dass Rupert nicht echt ist. Ein Experiment. Dass man bei einem Roboter nie sicher sein kann, was in ihm vorgeht. Ines starrt mich an, geht dann zu Rupert und streicht über seine Wangen, seine Stirn. »Mach ihn wieder an«, sagt sie dann. »Ich will kein Kind mit einem Ausknopf.« Sie bringt Rupert ins Bett, macht ihm noch eine Milch. Ines dreht sich um: »Ich will, dass du gehst«, sagt sie dann. »Wenn ich morgen aufstehe, bist du weg.«

Ich sitze allein im dunklen Wohnzimmer. Ich will nicht ohne Ines sein. Ich will nicht, dass ein Experiment mein Leben zerstört. Ich nehme ein Sofakissen und gehe in Ruperts Zimmer. Ganz friedlich liegt er in seinem Bett, ein kleiner Junge, mit zu Fäusten geballten Händen. Ich drücke das Kissen auf sein Gesicht. Seine Beine zappeln, dann ist alles still.

Ich wache im Wohnzimmer auf. Stille. Rupert liegt noch immer in seinem Bett. Ines ist nicht da. Ihr Auto ist nicht da. Ich fahre zur Arbeit. Werde sagen, dass das Experiment gescheitert ist. Dass es mir leid tut. Werde kündigen. In der Tiefgarage von CyCorps steht Ines' Wagen. Ich fahre mit dem Fahrstuhl nach oben.

Leere Gänge. Da höre ich eine bekannte Stimme. Es ist mein Arzt. Was hat mein Arzt hier zu suchen? Jetzt spricht Ines. Sie stehen im Labor, mein Arzt, Ines und die Chefin. »Er hat bestanden«, sagt mein Arzt. »Das Experiment ist geglückt. Er hat einen seiner Art getötet. Er ist von einem Menschen nicht zu unterscheiden.« Sie sprechen nicht über Rupert. Sie reden über mich. Das Experiment bin ich.

Ich will zu ihnen in den Raum, aber kann mich nicht mehr bewegen. Ines sieht mich an. Mein Herz rast. »Es tut mir leid«, sagt sie. Die Finger meines Arztes fliegen über die Tastatur.

Ich denke an den Wald, den Moosboden unter meinen Füßen, ich höre das Klopfen des Spechts. Ich muss mir merken, dass Ines nicht meine Frau ist. Dass der Arzt nicht mein Freund ist. Ich muss mir unbedingt merken, dass

----- ◀

### DIE AUTORIN

**Eva Strasser** schreibt Drehbücher, Kurzgeschichten und Hörspiele und lebt in Berlin. Für ihre Kurzgeschichte »Knox« hat sie 2015 den Deutschen Science Fiction Preis gewonnen.

# VORSCHAU



## DEUTSCHLAND IM KLIMAWANDEL

Viele Auswirkungen der weltweiten Klimaveränderungen spüren wir auch hier zu Lande. So treten in Mitteleuropa immer wieder Extremsituationen auf: Dramatische Ernteverluste und Waldschäden begleiteten etwa die Trockensommer 2018 und 2019. Womit müssen wir in Deutschland in den kommenden Jahrzehnten rechnen? Und was können wir tun, um unsere Ökosysteme und Infrastrukturen robuster zu machen? Die neue »Spektrum«-Serie gibt einen Überblick.



## PATENTE AUF LEBEN

Patente sind Schutzrechte auf Erfindungen. Lassen sie sich auf Lebewesen anwenden, wie etwa in der Pflanzenzucht üblich? Darf man isolierte Gensequenzen für medizinische Anwendungen patentieren? Die Debatte um das seit Jahrzehnten umstrittene Thema gewinnt angesichts innovativer Verfahren wie CRISPR-Cas neue Brisanz.



## KOSMISCHES PLANKTON

Zwerggalaxien spielen beim Wachstum der Strukturen des Alls eine wichtige Rolle. Doch die kleinen Sternsysteme in unserer Umgebung verhalten sich ganz anders, als es laut Modellrechnungen zu erwarten wäre.



## DEM MIKROPLASTIK AUF DER SPUR

Überall in unserer Umwelt finden sich kleinste Kunststoffteilchen, selbst an den abgelegensten Orten. Während längst eine große Debatte darüber läuft, wie wir die Flut an Mikroplastik eindämmen können, ist noch gar nicht klar, wie die Partikel auf Organismen wirken.

## 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)

# Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



## ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



## KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



## Spektrum PLUS:

**Spektrum PLUS** bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

## Jetzt bestellen!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

[www.spektrum.de/abo](http://www.spektrum.de/abo)



# Bei welchem Händler finde ich meine Lieblingszeitschrift?



- 1.** Zu [mykiosk.com](https://mykiosk.com) gehen
- 2.** Ort eingeben
- 3.** Zeitschrift eingeben
- 4.** Händler finden



[mykiosk.com](https://mykiosk.com)

DER SCHNELLSTE WEG ZU UNSEREN ZEITSCHRIFTEN