

# Spektrum

der Wissenschaft

## Angriff auf den eigenen Körper

So entstehen  
Autoimmunkrankheiten

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



**PHYSIK** Raumzeitteilchen im Labor

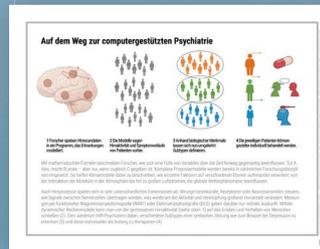
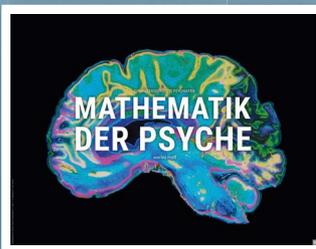
**ZOOLOGIE** Wie Wespen Kakerlaken in Zombies verwandeln

**PLATTENTEKTONIK** Ein neues Modell der Erde

# Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung. Wählen Sie unter mehr als 300 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



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



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



# EDITORIAL ANGRIFF AUF DAS SELBST

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

Seit Monaten ist das Immunsystem ins Rampenlicht gerückt – Covid-19 sei Dank. Während wir in Ausgabe 8.21 jenes Wunderwerk der Natur, das uns vor Krankheitserregern und anderen Bedrohungen meist recht effektiv schützt, näher betrachteten, konzentriert sich unser aktuelles Titelthema auf die Schattenseite der Körperabwehr: Wenn diese sich gegen den eigenen Organismus wendet, können Autoimmunkrankheiten wie multiple Sklerose oder Diabetes Typ 1 resultieren.

Lange schob man die Schuld undifferenziert einem irregeleiteten Immunsystem zu, das ohne konkreten Auslöser plötzlich anfängt, Zellen und Gewebe zu attackieren. Doch als Fachleute begannen, genauer hinzusehen, entdeckten sie, dass die Sachlage weniger eindeutig ist. Beispielsweise zirkulieren bei Gesunden ähnlich viele Killerzellen im Blut wie bei Typ-1-Diabetikern. Offenbar tragen auch die angegriffenen Strukturen ihren Teil dazu bei, indem sie sich dem Abwehrsystem unfreiwillig als Opfer anbieten.

Wie die Neurowissenschaftlerin Stephani Sutherland ab S. 12 beschreibt, senden sie falsche Alarmsignale aus, worauf das Immunsystem entsprechend reagiert. Als Ursache für die irrtümlichen Hilferufe kommen bestimmte Empfindlichkeiten dieser Gewebe, aber auch Virusinfektionen oder Umweltfaktoren wie Giftstoffe in Frage. Möglicherweise spielt zudem eine Veränderung des Mikrobioms, also der Darmflora, eine Rolle. Zusammen mit einer grafischen Übersicht über die fast 80 heute bekannten Autoimmunerkrankungen eröffnet der Artikel eine neue dreiteilige Serie zum Thema »Autoimmunität«.

Nicht nur in unserem Körper, auch in Redaktionen läuft nicht immer alles wie vorgesehen. Letzteres kann dazu führen, dass angekündigte Texte kurzfristig verschoben werden müssen. Das war etwa bei dem für die Dezemberausgabe vorgesehenen Schwerpunkt zur Plattentektonik sowie dem Artikel zur Perkolationsstheorie der Fall, worauf uns prompt Leseranfragen erreichten, ob diese noch erscheinen würden. Das Interesse hat uns sehr gefreut – jetzt ist es so weit. Vielen Dank für Ihre Geduld!

Herzlich ihr,



## NEU AM KIOSK!

Spektrum GESCHICHTE 6.21 schlägt den Bogen von der steinzeitlichen Ernährung über die Besiedlung Arabiens bis zu Kinderschicksalen im Zweiten Weltkrieg.

## IN DIESER AUSGABE



### KENNETH C. CATANIA

Der US-Biologe hat sich auf die Sinnessysteme von Tierarten spezialisiert, die außergewöhnliches Verhalten zeigen. Ab S. 30 stellt er einen besonders skurrilen Fall vor.



### NICOLAS COLTICE

hat sich lange gefragt, wie sich die Erde im Ganzen mathematisch modellieren lässt. Wie dem Geodynamiker das gelungen ist, schreibt er ab S. 50.



FRANK-WINKELEIN FÜR MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KOHLENFORSCHUNG

### BENJAMIN LIST

Der deutsche Chemiker hat die asymmetrische organische Katalyse mitbegründet. Im Interview ab S. 38 erzählt der Nobelpreisträger von seiner ersten Idee und präsentiert eine neue, visionäre Reaktion.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

**Gipfelstürmer aus Not**

Alpine Schmetterlinge flüchten nach oben.

**Günstiger Ionenantrieb**

Jod macht Satellitenbewegungen erschwinglicher.

**Wie viele werden wir?**

Fachleute streiten über Bevölkerungsprognosen.

29 SPRINGERS EINWÜRFE

**Pandemie der Einsamkeit**

Folgen von Isolation verdienen mehr Aufmerksamkeit.

70 SCHLICHTING!

**Eisstrukturen zwischen Mangel und Überfluss**

In kalten Nächten wachsen verzweigte Kristalle heran.

87 FREISTETTERS FORMELWELT

**Die Türme der Apokalypse**

Wann bringen indische Mönche ein Spiel zu Ende?

88 REZENSIONEN

93 IMPRESSUM

95 ZEITREISE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

Serie: Der Feind im eigenen Körper (Teil 1)

12 MEDIZIN **ANGRIFF VON INNEN**

Bei Autoimmunerkrankungen attackiert der Organismus sich selbst. Der Auslöser hierfür sind offenbar Körperzellen, die falsche Alarmsignale senden, was die Abwehrtruppen anlockt.

Von Stephani Sutherland

19 AUTOIMMUNITÄT **DATEN UND FAKTEN**

Mediziner kennen zahlreiche Erkrankungen, bei denen das Immunsystem den eigenen Körper angreift.

Von Maddie Bender, Jen Christiansen und Miriam Quick

30 PARASITISMUS **ZOMBIE MIT SECHS BEINEN**

Mit gezielten Stichen verwandelt die Juwelwespe wehrhafte Kakerlaken in hilflose Wirte für ihren Nachwuchs.

Von Kenneth C. Catania

38 INTERVIEW **EIN REVOLUTIONÄRES MOLEKÜL**

Benjamin List, der Chemie-Nobelpreisträger von 2021, spricht über die Entdeckung der organischen Katalyse und teilt seine Zukunftsvision.

Von Verena Tang

44 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **KATALYSE ALS FARBENSPIEL**

Neue Experimente lassen uns Katalysatoren bei der Arbeit beobachten.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

50 GEOPHYSIK **DAS HENNE-EI-PROBLEM DER PLATTENTEKTONIK**

Computersimulationen der kompletten Erde zeigen, wie die äußeren und inneren Kräfte des Planeten zusammenspielen.

Von Nicolas Coltice

60 PLATTENTEKTONIK **EIN SPURT, DER KEINER WAR**

Eine plötzliche Beschleunigung der Indischen Platte stellte Fachleute lange vor ein Rätsel. Bis Lucía Pérez-Díaz herausfand, dass alles ganz anders war.

Von Robin George Andrews

64 QUANTENGRAVITATION **EIN LABOR FÜR DIE RAUMZEIT**

Kalte Atome und deren Wechselwirkungen sollen Theorien zum Ursprung des Gefüges von Raum und Zeit auf den Prüfstand stellen.

Von Adam Becker

72 PERKOLATIONSTHEORIE **MATHEMATIK VERBINDET**

Der theoretische Ansatz beschreibt das Verhalten verschiedener Netzwerke: von Mobilfunkverbindungen bis zur Übertragung von Krankheiten.

Von Kelsey Houston-Edwards

80 PHYSIK **TOPOLOGISCHE QUANTENCOMPUTER**

Eine neue Art von Qubit könnte den Weg zu Quantencomputern ebnen. Noch ist aber nicht klar, ob solche Informationseinheiten existieren.

Von Philip Ball



12

TITELTHEMA  
**AUTOIMMUNKRANKHEITEN**

DR. MICROBE / GETTY IMAGES / ISTOCK



30

PARASITISMUS  
**ZOMBIE MIT SECHS BEINEN**

ALAMY / FELPA / EMANUELE BIGGI



50

GEOPHYSIK  
**PLATTENTEKTONIK**

OLIVER DE LA HAYE / ISTOCK.JADIBE.COM



64

QUANTENGRAVITATION  
**EIN LABOR FÜR DIE RAUMZEIT**

XIHO / GETTY IMAGES / ISTOCK



80

PHYSIK  
**TOPOLOGISCHE QUANTENCOMPUTER**

PAMELADEMPERARANE / GETTY IMAGES / ISTOCK



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

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

## SCHWERGEWICHTIGES PAAR

▶ Mit Hilfe des Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte haben Astronomen erstmals ein Paar supermassereicher Schwarzer Löcher direkt nachgewiesen und ihre Massen bestimmt. Die beiden Objekte befinden sich 89 Millionen Lichtjahre entfernt in der Galaxie NGC 7727 (oben im Bild) – von uns aus gesehen im Sternbild Wassermann. Ihr Abstand untereinander beträgt rund 1600 Lichtjahre.

Indem das Team beobachtete, wie die beiden Monster (im Bild rechts) die Bewegungen um sie kreisender Sterne beeinflussen, konnte es deren Massen abschätzen. Das größere vereinigt 154 Millionen Sonnenmassen in sich, das kleinere immerhin noch 6,3 Millionen Sonnenmassen. Ihre Entfernung untereinander sowie ihre Geschwindigkeiten deuten darauf hin, dass sie binnen der nächsten 250 Millionen Jahre verschmelzen werden.

*Astronomy & Astrophysics 10.1051/0004-6361/202140827, 2021*



## ARCHÄOLOGIE STEINZEIT-VENEDIG GING IM STARKREGEN UNTER

► Die gewaltige Stadt Liangzhu, die vor 5300 Jahren im Osten Chinas entstand, ging rund 1000 Jahre später schlagartig unter. Warum, war lange Zeit rätselhaft. Nun haben Geologen um Haiwei Zhang von der Xi'an-Jiaotong-Universität in Xi'an die Ursache offenbar gefunden: Starke Monsunregen hätten zu Überschwemmungen geführt, die das Jangtse-Delta weithin unbewohnbar machten. Gestützt wird diese These von Isotopenanalysen an Stalagmiten in Tropfsteinhöhlen.

Liangzhu war eine ummauerte Metropole und beherbergte einst schätzungsweise 35000 Einwohner. Die Stadt und ihr Umland waren über ein weit verzweigtes Netz aus Kanälen schiffbar; mächtige Dämme und Speicherseen regulierten die Wasserwege. Liangzhu, das von zirka 3300 bis 2300 v. Chr. existierte, gilt daher als

»Venedig der Steinzeit«. Für seinen Untergang machten viele Forscher bisher Flutwellen aus dem Ostchinesischen Meer verantwortlich, auf die etwa Sedimentschichten über ehemaligen Stadtbauten und dem Umland hindeuten. Das eingeschwemmte Salzwasser habe den Reisanbau unmöglich gemacht.

Haiwei Zhang und seine Kollegen favorisieren ein anderes Szenario. Sie untersuchten Proben aus Tropfsteinhöhlen, die ungefähr 350 Kilometer von Liangzhu entfernt liegen. In den dortigen Stalagmiten registrierten sie Kohlenstoff-Isotopenwerte, die für eine extrem niederschlagsreiche Phase zwischen 2345 und 2324 v. Chr. sprechen. Der gleichen Zeitspanne rechnet das Team die erwähnten Sedimentschichten zu. Bekannt ist zudem, dass das Klima in der Region vom ostasiati-

schen Sommermonsun geprägt wird und die Niederschläge stark unter dem Einfluss von El Niño und der südlichen Oszillation stehen.

Die Wissenschaftler schließen aus alledem, damals hätten massive Monsunregen eingesetzt, die zu Überflutungen des Jangtse und seiner Seitenarme führten. Liangzhus Dämme und Kanäle hätten den Wassermassen nicht standgehalten; die Stadt sei zerstört worden und den Menschen nur die Flucht geblieben. Auch während der folgenden 300 Jahre blieb das Klima meist feucht. Später kam es zu Dürrephasen, denen vermutlich weitere jungsteinzeitliche Kulturen im Jangtse-Delta zum Opfer fielen.

*Science Advances 10.1126/sciadv.abi9275, 2021*

**GRABUNG IN LIANGZHU** Die Fundstätte mit den Resten der einstigen Kanalstadt ist 2019 zum UNESCO-Weltkulturerbe erklärt worden.



## ENTOMOLOGIE BIENEN, DIE AAS FRESSEN

► Nirgendwo ist die Insektenvielfalt höher als in tropischen Regenwäldern, wo die Evolution diverse Sonderfälle hervorgebracht hat. Dazu gehören die so genannten Geierbienen, die sich völlig anders ernähren als die meisten anderen Wildbienen. Sie fressen Aas und besitzen ein hierauf spezialisiertes Mikrobiom, berichtet ein Team um Laura Figueroa von der Cornell University in Ithaca.

Figueroa und ihre Kollegen haben rund 160 Bienen von 17 verschiedenen Arten im Regenwald Costa Ricas gesammelt und untersucht, die sich entweder von Pollen, Aas oder beidem ernähren. Die Geierbienen ließen sich dabei mit Hühnchenfleisch anlocken. Sie sammeln Aasbröckchen, so wie andere Bienen das mit Pollen tun, und transportieren sie zu ihrem Nest.

Um die Nahrung zu verarbeiten, setzen Geierbienen auf ein Mikrobiom, das im Vergleich zu anderen Wildbienen deutlich aus dem Rahmen fällt. In ihrer Darmflora finden sich

etwa Säure liebende Bakterien, die bei Honigbienen, Hummeln & Co. nicht vorkommen. »Diese Mikroben gleichen jenen, die bei Geiern oder Hyänen den Verdauungstrakt besiedeln«, sagt der Entomologe Quinn McFrederick, der an den Arbeiten beteiligt war. »Sie helfen wahrscheinlich dabei, ihre Wirte vor Pathogenen im Aas zu schützen.« Andere Anteile der Geierbienen-Darmflora unterstützen die Fleischverdauung. Bienenarten hingegen, die sich gemischt ernähren und sowohl Pollen als auch gelegentlich Fleisch verzehren, ähneln hinsichtlich ihres Mikrobioms den reinen Pollenverwertern.

Geierbienen erzeugen Honig, der essbar und ziemlich süß ist. Die Tiere bewahren ihn in Kammern auf, die von jenen mit gelagertem Fleisch getrennt sind. Sie geben ihn nicht ohne Gegenwehr her: Zwar besitzen sie keinen Stachel, mehrere Arten verfügen aber über kräftige Mundwerkzeuge, mit denen sie schmerzhaft zubeißen. Und manche produzieren zusätzlich ätzende Sekrete im Kiefer, die bei Kontakt üble Hautblasen hervorbringen.

*mBio 10.1128/mBio.02317-21, 2021*

QUINN MCFREDERICK, UNIVERSITY OF CALIFORNIA RIVERSIDE (UNCI)



**VORLIEBE FÜR FLEISCH** Geierbienen (unten) mögen Huhn (oben).

RICARDO AVILA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



## GEOWISSENSCHAFTEN TEKTONISCHER DURCHBRUCH MACHTE ANTARKTIS ZUR EISWELT

► Vor 34 Millionen Jahren öffnete sich zwischen der Südspitze Südamerikas und der Antarktischen Halbinsel eine neue Meeresstraße: die Drake-Passage. Dies führte zu einem dramatischen Klimawandel. Aus der bis dahin eher mild temperierten Antarktis wurde die Eiswelt, die wir heute kennen. Schuld war die Umorganisation der Meeresströmungen, postulieren Isabel Sauerer und ihr Team von der Universität Utrecht und ihr Team.

Die Arbeitsgruppe hat in hochauflösenden Simulationen berechnet, was geschieht, wenn in geologisch kurzer Zeit eine neue, tiefe Verbindung zwischen Ozeanen entsteht. Vor allem große Meereswirbel spielen dabei eine Rolle. Als die Drake-Passa-

ge noch flach war, befördern diese Wirbel große Mengen warmen Wassers zur Antarktis hin, was dort die klimatischen Bedingungen milderte – ähnlich wie heute der Golfstrom vor Westeuropa.

Laut den Modellen galt das jedoch nur, solange die Wasserstraße maximal 300 Meter tief war. Als sie sich, tektonisch bedingt, noch deutlich stärker eintiefte, kam der Warmwassertransport zum Erliegen. Zugleich entwickelte sich eine zirkumpolare Strömung um die Antarktis, die den Kontinent von der Wärmezufuhr abschnitt. Südlich dieser Barriere kühlten die Gewässer um bis zu fünf Grad Celsius ab, was die Vereisung des Südpols einleitete. Die Folgen

waren global spürbar, unter anderem weil Eisflächen ein höheres Reflexionsvermögen (Albedo) haben und deshalb weniger Strahlung absorbieren.

Vor 40 Millionen Jahren gab es noch eine geschlossene Landbrücke zwischen Patagonien und der Antarktis. Als die Südamerikanische und die Antarktische Platte aber ihre Bewegungsrichtung änderten, verschwand die Verbindung und machte letztlich der Drake-Passage Platz. Dem Forscherteam zufolge trug das maßgeblich zur antarktischen Abkühlung bei – zusätzlich zum damaligen Absinken des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts.

*Nature Communications 10.1038/s41467-021-26658-1, 2021*

## ASTRONOMIE WEISSER ZWERG DREHT SICH REKORDSCHNELL

► Nur 25 Sekunden braucht der Sternüberrest LAMOST J024048.51+195226.9, um sich einmal um seine Achse zu drehen. Er ist damit der am schnellsten rotierende Weiße Zwerg, den Wissenschaftler kennen, berichtet eine Arbeitsgruppe um Ingrid Pelisoli von der University of Warwick. Der Himmelskörper befindet sich rund 2000 Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Widder.

LAMOST J024048.51+195226.9 ist zudem erst der zweite bekannte Vertreter einer kuriosen Sternklasse namens Magnetpropeller. Dabei handelt es sich um Weiße Zwerge, die mit ihrer Schwerkraft das Plasma eines Begleitsterns an sich ziehen, aber ein derart starkes Magnetfeld besitzen, dass die Materie nicht auf ihre Oberfläche fällt. Stattdessen beschleunigt die schnelle

Drehbewegung des Sternüberrests und seines Magnetfelds das Plasma auf tausende Kilometer pro Sekunde, so dass es ins All schießt.

Zu seinem enormen Rotations-tempo kam J024048.51+195226.9 vermutlich, indem Materie vom Begleitstern auf ihn stürzte und ihm mit diesem Impuls ein immer größeres Drehmoment verschaffte. Irgendwann ging er als Magnetpropeller dazu über, das herabfallende Plasma in den Weltraum zu schleudern, statt es sich einzuverleiben. Das bewahrte ihn vor dem Schicksal, eine kritische Masse zu überschreiten und in einer

Supernova des Typs Ia zu explodieren. Ein kleiner Teil der eintreffenden Materie nähert sich dem Weißen Zwerg an seinen Magnetpolen – ähnlich den geladenen Teilchen des Sonnenwinds, die auf der Erde die Polarlichter verursachen. Für die Forscherinnen und Forscher ist das ein Glücksfall, denn auf diese Weise entstehen über J02s4048.51+195226.9 quasi Superpolarlichter, die es erleichtern, die Rotationsperiode des Himmelskörpers zu messen.

*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 10.1093/mnras/116, 2021*

**VERSCHLEUDERT** Ein Magnetpropeller (blau) katapultiert Plasma eines Begleitsterns ins All (Illustration).

UNIVERSITY OF WARWICK/MARK GARLICK

## MEDIZIN NÄCHTLICHE MAHLZEITEN ERHÖHEN DIABETESRISIKO

► Regelmäßig nachts zu essen, steigert das Risiko, die Zuckerkrankheit Diabetes Typ 2 zu bekommen. Mahlzeiten nur tagsüber einzunehmen, hilft diese Gefahr einzudämmen – sogar dann, wenn der Schlafrhythmus verschoben ist. Zu diesem Schluss kommt ein Forscherteam um die Medizinerin Sarah Chellappa von der Harvard Medical School in Boston.

Chellappa und ihr Team führten eine Studie mit sieben Frauen und zwölf Männern durch. Die Probanden verbrachten zwei Wochen in einer streng kontrollierten Laborumgebung, in der sich die Hell-dunkel-Phasen immer weiter verschoben, bis sie sich um zwölf Stunden von der natürlichen Tageszeit unterschieden. Das diente dazu, nächtliche Schichtarbeit zu simulieren. Zehn Teilnehmer bekamen ihre Mahlzeiten angepasst an den veränderten Tagesablauf, also auch während der natürlichen Nachtstunden. Die übrigen neun durften ledig-

lich während der natürlichen Tageszeiten essen – trotz verschobenem Schlaf-wach-Rhythmus.

In der ersten Gruppe, die nachts aß, entkoppelte sich der Blutzuckerspiegel von der Körperkerntemperatur: Während die Temperatur in gleich bleibendem Rhythmus stieg und fiel, gerieten die Blutzuckerschwankungen um zwölf Stunden aus dem Takt. Die Forscher werten das Zeichen dafür, dass es zu einer Abweichung zwischen dem zentralen Taktgeber im Gehirn und den organeigenen Uhren der Leber oder des Darms gekommen war. »Während der zentrale Schrittmacher noch auf Bostoner Zeit eingestellt war, hatten sich einige periphere Uhren, etwa in der Leber, auf eine neue Zeitzone umgestellt«, sagt Frank Scheer, ein beteiligter Wissenschaftler.

Zudem konnten die Teilnehmer der ersten Gruppe ihren Blutzuckerspiegel nur noch eingeschränkt kontrollieren. Nach dem Essen schnellte er stärker

empor und blieb länger erhöht; das blutzuckersenkende Hormon Insulin wurde verzögert ausgeschüttet. Über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg hatten diese Personen einen höheren mittleren Blutzuckerwert. Bei den Probanden hingegen, die nur während der natürlichen Tageszeit aßen, blieben solche Effekte – trotz simulierter Nachtarbeit – aus: Weder kam es zu einer Entkopplung der Körperuhren noch zu einer schlechteren Blutzuckerkontrolle.

Es ist bekannt, dass ständige Verschiebungen des Schlaf-wach-Rhythmus, etwa im Rahmen von Schichtarbeit, das Diabetesrisiko erhöhen. Chellappa und ihr Team vermuten, dass dafür vor allem das veränderte Essverhalten betroffener Personen verantwortlich ist – insbesondere das nächtliche Einnehmen von Mahlzeiten.

*Science Advances 10.1126/sciadv.abg9910, 2021*

**ÖKOLOGIE****BAUMSTERBEN IN EUROPA BESCHLEUNIGT SICH**

► Wichtige europäische Baumarten sterben vermehrt ab, und die Wälder geraten unter Druck – verursacht von den Dürren der zurückliegenden Jahre. Zu diesem Schluss kommen Jan-Peter George von der Universität Tartu in Estland und sein Team. Besonders stark betroffen ist der »Brotbaum« der Forstwirtschaft, die Fichte: Ihre jährliche Sterberate lag zwischen 2010 und 2020 um 60 Prozent höher als zwischen 1995 und 2009. Auch Kiefern (40 Prozent) und Buchen (36 Prozent) litten unter den Folgen der Trockenheit, während bei Eichen die Mortalität nur um 3,6 Prozent zunahm.

Die Arbeitsgruppe verließ sich beim Ermitteln der Baumverluste nicht nur auf Satellitenbilder, da sich aus diesen nicht immer sicher schließen lässt, ob ein Baum abgestorben ist oder gefällt wurde. Stattdessen ergänzten die

Wissenschaftler ihren Datensatz mit mehreren Millionen Vor-Ort-Beobachtungen, gemacht im Rahmen des Langzeitforschungsprojekts »International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests«.

Bei allen untersuchten Baumarten liegt die Sterblichkeit seit 2012 über den langjährigen Durchschnittswerten zwischen 1995 und 2009, es sterben also regelmäßig mehr Bäume ab als zuvor üblich. Das geht vor allem auf trockene Böden zurück, wie Feuchtedaten belegen. Auf ein Dürrejahr folgt stets ein überdurchschnittlich ausgeprägtes Baumsterben im Jahr darauf.

Die außergewöhnliche Trockenheit 2018 beispielsweise vernichtete in Deutschland nach Schätzungen des Landwirtschaftsministeriums bereits im selben Jahr mehrere Millionen

Bäume, die insgesamt 2450 Quadratkilometer bedeckten. 2019 setzte sich das Sterben fort, zumal auch dieses Jahr zu trocken ausfiel, was den bereits geschwächten Pflanzen weiter zusetzte. Da fast alle europäischen Regionen in den zurückliegenden Jahren von Trockenheit und Dürren betroffen waren, ist das Baumsterben ein kontinentweites Phänomen.

Übermäßig trockene Perioden lassen Bäume nicht nur verkümmern, sie machen sie auch anfälliger für Krankheiten und Schädlinge. So fallen gestresste Fichten vermehrt Borkenkäfern zum Opfer, weil sie nicht genügend Harz bilden, um die Schädlinge abzuwehren. Zudem geraten trockene Wälder leichter in Brand, und das Feuer breitet sich schneller aus.

*bioRxiv 10.1101/2021.11.01.466723, 2021*

**ASTRONOMIE****IRDISCHES WASSER KÖNNTE TEILS VON DER SONNE KOMMEN**

► Woher das Wasser auf der Erde stammt, ist nicht vollständig geklärt. Forscherinnen und Forscher um Luke Daly von der University of Glasgow stellen nun eine neue These dazu auf. Demnach hat – wenigstens zum Teil – die Sonne dazu beigetragen, dass unser Planet ziemlich nass ist.

Das Team suchte nach möglichen Quellen, die Wasser mit dem für die

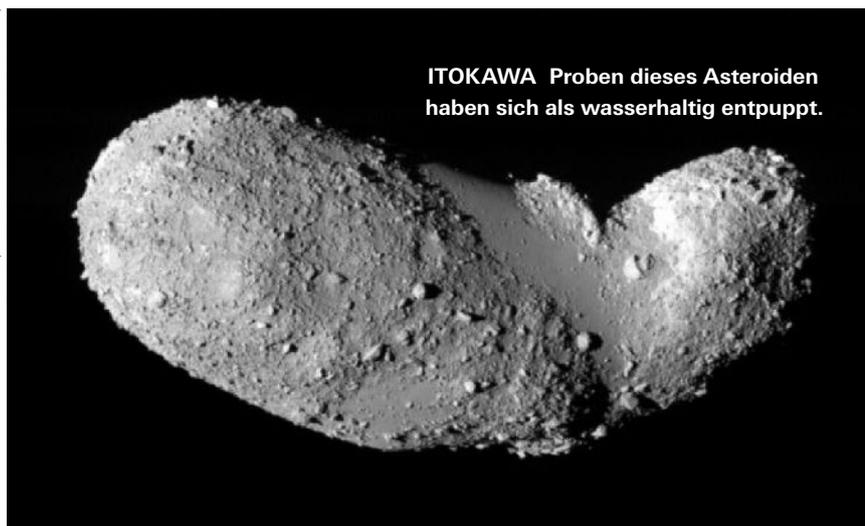
Erde typischen Isotopenverhältnis geliefert haben könnten. Fachleute vermuten, solche Lieferanten sind aus dem äußeren Sonnensystem gekommen – etwa in Form von Asteroiden, die aus dem gleichen Material bestanden wie die »kohligen Chondrite«, urtümliche Meteoriten. Kohlige Chondrite enthalten Wasser, das eine halbwegs passende Isotopensignatur aufweist: Das Verhältnis von Deuterium zu normalem Wasserstoff entspricht in etwa dem von irdischem H<sub>2</sub>O. Allerdings nicht ganz, denn vor allem das Wasser im Erdmantel birgt anteilig etwas weniger Deuterium.

Daly und sein Team haben Bodenproben vom Asteroiden Itokawa untersucht, welche die japanische Raumsonde »Hayabusa« zur Erde gebracht hatte. Laut Analysen haben die obersten 50 Nanometer der Staubbrockchen einen Wassergehalt von 20 Liter pro Kubikmeter. Und jenes Wasser enthält relativ wenig Deuterium. Offenbar entstand es, als Protonen des Sonnenwinds mit Sauerstoff im Silikatgestein des Asteroiden reagierten. Das bestätigen Experimente, in denen die Forscher Protonen auf Gestein schossen und anschließend H<sub>2</sub>O-Moleküle darin nachwiesen.

Die Forscher betonen, der Effekt finde überall statt, wo Silikatgestein dem Sonnenwind ausgesetzt sei. Demnach könnten Meteoriten, die infolge von Sonnenwindbeschuss H<sub>2</sub>O enthielten, massenhaft Wasser auf die Erde transportiert haben. Dort könnte es sich mit dem Wasser der kohligen Chondrite vermischt haben, woraus das Isotopenverhältnis hervorging, das heute für die Erde charakteristisch ist.

*Nature Astronomy 10.1038/s41550-021-01487-w, 2021*

ISSAJANA, SPEKTRUM, JAXA, PHAYABUSA/PHOTO/ITOKAWA/HTML



**ITOKAWA** Proben dieses Asteroiden haben sich als wasserhaltig entpuppt.



# MEDIZIN ANGRIFF VON INNEN

Bei Autoimmunerkrankungen attackiert der Organismus sich selbst. Virusinfekte, Reizstoffe oder eine veränderte Darmflora bringen Körperzellen offenbar dazu, falsche Alarmsignale zu senden, was die Abwehrtruppen anlockt.



**Stephani Sutherland** ist Neurowissenschaftlerin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Südkalifornien.

» [spektrum.de/artikel/1959622](https://spektrum.de/artikel/1959622)



SERIE

**Der Feind im eigenen Körper**

**Teil 1: Februar 2022**

**Angriff von innen**

Stephani Sutherland

**Autoimmunkrankheiten: Daten und Fakten**

Maddie Bender, Jen Christiansen, Miriam Quick

**Teil 2: März 2022**

**Das Leid der Frauen**

Melinda Wenner Moyer

**Teil 3: April 2022**

**Wider die Selbstzerstörung**

Marla Broadfoot

**FATALE OFFENSIVE** Wenn Antikörper Zellen des eigenen Körpers wie in dieser Illustration angreifen, kann das zu schweren Krankheiten führen.

► In den 1980er Jahren begann der Endokrinologe Decio Eizirik damit, Patienten zu behandeln, die an Diabetes Typ 1 litten. Er war überzeugt davon, zu wissen, was hinter der Krankheit steckt: ein außer Kontrolle geratenes Immunsystem. Den Erkrankten fehlt das wichtige Hormon Insulin, weil die Betazellen in der Bauchspeicheldrüse – die Insulinfabriken des Körpers – von der Körperabwehr angegriffen und zerstört werden. »Damals kam die Idee auf, dass sich Diabetes möglicherweise verhindern lässt, indem man der Immunabwehr Zügel anlegt«, erinnert sich Eizirik, der heute am Indiana Biosciences Research Institute (USA) sowie an der Vrije Universiteit Brussel (Belgien) forscht.

Diabetes Typ 1 schien der klassische Fall einer Autoimmunerkrankung zu sein: Abwehrzellen des Organismus wenden sich gegen körpereigenes Gewebe und zerstören es. Letzteres galt dabei als unschuldiges Opfer. »Die Betazellen glichen einer Leiche auf einer Beerdigung: Im Zentrum des Geschehens, aber selbst vollkommen passiv«, schildert der Endokrinologe.

Im Licht späterer Erkenntnisse wirken die Betazellen allerdings nicht mehr ganz so unbeteiligt. Wissenschaftler wie Eizirik sind mittlerweile zu der Überzeugung gelangt, dass die Insulin produzierenden Zellen einen Diabetes Typ 1 selbst auslösen können. Bereits Ende der 1990er Jahre zeigte sich, wie sie das tun. Demnach stellen Betazellen unter bestimmten Umständen entzündliche Signalstoffe her und ziehen damit die Aufmerksamkeit des Immunsystems auf sich.

Was genau diese verhängnisvolle Entwicklung auslöst, ist unklar. Es könnte eine Virusinfektion sein, vielleicht auch eine Stressreaktion der Zellen. So oder so »beginnt alles im angegriffenen Körpergewebe«, wie Sonia Sharma sagt, eine Immunologin am La Jolla Institute for Immunology in Kalifornien: »Wir wissen jetzt, dass das Zielgewebe nicht nur Zuschauer ist, sondern aktiv an der Autoimmunreaktion beteiligt.«

Was für Diabetes Typ 1 gilt, scheint ebenso auf andere Autoimmunerkrankungen zuzutreffen. Laut jüngsten geneti-

schen Untersuchungen besitzen Körperzellen, die von rheumatoider Arthritis und multipler Sklerose betroffen sind, übermäßig aktive Erbanlagen, die für krankheitsassoziierte Proteine codieren. Damit lenken sie den Angriff von Immunzellen auf sich. Sharma zufolge können zwischen einem auslösenden Ereignis und der daraus folgenden Autoimmunreaktion zehn aufeinander aufbauende Schritte liegen. »Bisher haben wir immer nur auf den zehnten Schritt geschaut, wir sollten uns aber mit dem ersten, zweiten und dritten befassen«, sagt die Immunologin. Würden Forscherinnen und Forscher die frühen Phasen einer Autoimmunerkrankung besser verstehen, könnten sie daraus wirksamere Methoden zur Diagnose, Behandlung und vielleicht sogar Vermeidung entwickeln.

### **Der Wächter zwischen uns und dem Chaos**

Es gibt allerdings nachvollziehbare Gründe, warum Fachleute die Autoimmunerkrankheiten zunächst quasi vom Ende her betrachtet haben. Diese Leiden erscheinen wie ein Verrat jenes Abwehrsystems, das uns vor eindringenden Erregern schützt, Krebsvorstufen vernichtet und an der Reparatur von Verletzungen mitwirkt. Das Immunsystem ist der Wächter im Körper, der zwischen uns und dem Chaos steht, manchmal aber selbst Chaos verursacht. Wir wissen heute, dass wichtige Teile der Körperabwehr, insbesondere B- und T-Lymphozyten, bei Autoimmunerkrankheiten eine entscheidende Rolle spielen. Erfolgreiche Therapieverfahren erforderten eine Doppelstrategie, die sowohl auf diese Zellen als auch ihre Angriffsziele abstelle, betont Eizirik. »Das Immunsystem ist hartnäckig, und es hat ein Gedächtnis wie ein Elefant«, sagt der Endokrinologe. »Haben die T-Lymphozyten erst einmal gelernt, körpereigene Strukturen als feindlich zu erkennen und zu bekämpfen, machen sie damit immer weiter.«

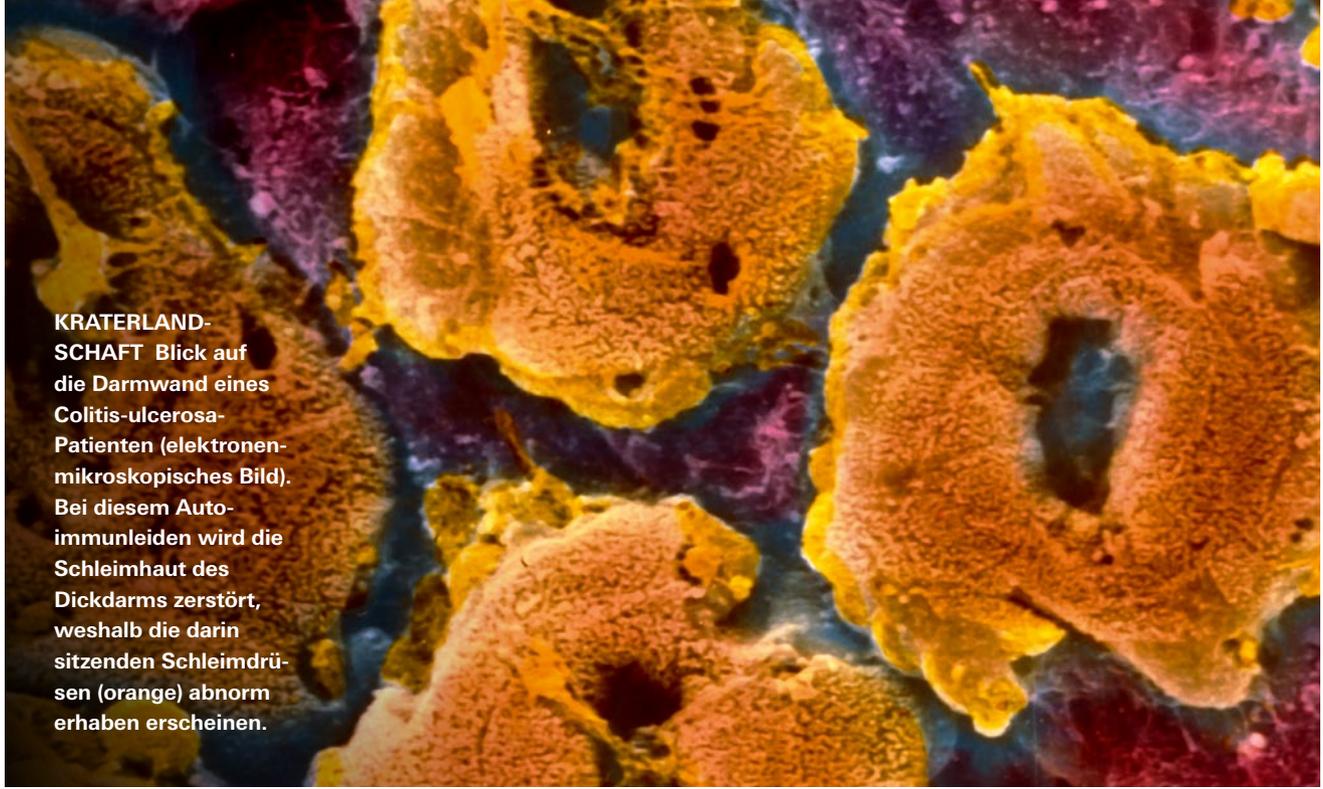
Die Forschungsarbeiten der zurückliegenden 50 Jahre konzentrierten sich auf ein klassisches Merkmal von Autoimmunerkrankheiten: so genannte Autoantikörper. Antikörper sind winzige Proteine, hergestellt von den B-Lymphozyten des Immunsystems, und sie heften sich an bestimmte Moleküle, die auf körperfremden Eindringlingen wie Bakterien und Viren sitzen – Fachleute sprechen hier von den Antigenen. Auf die Weise kennzeichnen Antikörper die fremden Invasoren als »gefährlich« und geben sie dem Immunsystem gegenüber zum Abschuss frei. Anders sieht das bei Autoantikörpern aus: Diese binden sich an »Selbstantigene«, also Strukturen auf unseren eigenen Körperzellen. Und auch dort locken sie spezialisierte Zerstörer an, die zytotoxischen T-Lymphozyten, welche die markierten Zellen abtöten. Wissenschaftler, die Mechanismen der Autoimmunität erforschen, suchen deshalb häufig nach charakteristischen Autoantikörper-Lymphozyt-Paaren.

Wie sich in den zurückliegenden Jahren gezeigt hat, deutet die Anwesenheit von zytotoxischen T-Lymphozyten (auch »Killerzellen« genannt) und Autoantikörpern zwar auf ein Autoimmunproblem hin, doch ihr Aufenthaltsort scheint wichtiger zu sein als die bloße Tatsache ihrer Existenz. Gesunde Menschen haben Killerzellen im Blut, ohne krank zu werden. Im Jahr 2018 veröffentlichte ein Team um den Immunologen Roberto Mallone vom französischen Inserm

## **AUF EINEN BLICK SICH SELBST DAS GRAB GESCHAUFELT**

- 1** Bei einer Autoimmunerkrankung richtet sich die Körperabwehr gegen den eigenen Organismus.
- 2** Früher nahmen Forscher an, dies gehe von einem fehlerhaften Immunsystem aus. Nun häufen sich die Belege dafür, dass die angegriffenen Körperzellen selbst die Attacke einleiten.
- 3** Autoimmunerkrankheiten werden vermutlich von Virusinfekten, Reizstoffen oder einem veränderten Mikrobiom verursacht, doch die genauen Mechanismen sind noch unklar.

**KRATERLAND-SCHAFT** Blick auf die Darmwand eines Colitis-ulcerosa-Patienten (elektronenmikroskopisches Bild). Bei diesem Autoimmunleiden wird die Schleimhaut des Dickdarms zerstört, weshalb die darin sitzenden Schleimdrüsen (orange) abnorm erhaben erscheinen.



(Institut national de la santé et de la recherche médicale) eine aufschlussreiche Studie. Darin hatten sie drei Gruppen miteinander verglichen: Menschen mit Diabetes Typ 1, solche mit Diabetes Typ 2 (eine Stoffwechselstörung, die nicht durch Autoimmunreaktionen zu Stande kommt) sowie Gesunde. Die Menge an zytotoxischen T-Lymphozyten im Blut war bei allen bemerkenswert ähnlich, einschließlich der Nichtdiabetiker. Würde man Killerzellen als Kennzeichen einer Autoimmunerkrankung ansehen, dann wären wir laut Mallone »alle krank«.

Die Gruppen unterschieden sich jedoch hinsichtlich der Bauchspeicheldrüse. In diesem Organ, das wieson Mallone und sein Team nach, zirkulieren bei Typ-1-Diabetikern mehr »autoreaktive« T-Lymphozyten, die körpereigene Strukturen attackieren. Sie dürften sich nicht zufällig dort aufhalten, so die Vermutung der Forscher, sondern auf Grund eines Problems mit den Betazellen.

Genetische Studien haben gezeigt: Erbanlagen, die mit Autoimmunerkrankheiten in Zusammenhang stehen, sind nicht nur in Immun-, sondern auch in den angegriffenen Körperzellen aktiv. Seit den frühen 2000er Jahren ist es möglich, menschliche Genome nahezu vollständig zu entschlüsseln. Derartige Untersuchungen haben viele Gene offengelegt, die, wenn sie mutiert sind, mit einem höheren Risiko für Autoimmunprobleme einhergehen. Entsprechend veränderte Erbanlagen finden sich in B- und T-Lymphozyten sowie in Zellen, die nicht zur Körperabwehr gehören.

Letztere verfügen beispielsweise über Gene, die es ihnen ermöglichen, Zytokine und Chemokine zu produzieren – chemische Signalstoffe, die Immunreaktionen provozieren. Das hat für den Organismus eine große Bedeutung, denn jede seiner Zellen ist potenziell anfällig dafür, zu einer Krebszelle zu entarten oder von Mikroben infiziert zu werden. Tritt das ein, muss sie der Körperabwehr mitteilen können, dass sie sich in Schwierigkeiten befindet. Mutationen in den dafür verantwortlichen Genen können aber dazu führen, dass die Zellen Notsignale senden, obwohl sie gar

nicht geschädigt sind. Das Immunsystem reagiert dann so, als ob sie es wären, und greift ein.

Eizirik und sein Team haben diesen Mechanismus in einer Übersichtsarbeit von 2021 nachgewiesen. Die Gruppe sichtete zuvor veröffentlichte Genomstudien und fand heraus: Mehr als 80 Prozent aller bisher identifizierten Genvarianten, die zu falschen Alarmsignalen an die Immunabwehr führen, zeigen sich in attackierten Körperzellen von Autoimmunkranken übermäßig aktiv – sowohl bei Diabetes Typ 1 als auch bei multipler Sklerose, Lupus erythematodes und rheumatoider Arthritis. Das beweisen Analysen von Gewebeproben, die Betroffenen entnommen wurden. Dazu gehörten Bauchspeicheldrüsenzellen von Diabetespatienten, Gelenkgewebe von Arthritis-, Nierenzellen von Lupus-Patienten und sogar Hirngewebe von Verstorbenen, die an multipler Sklerose gelitten hatten.

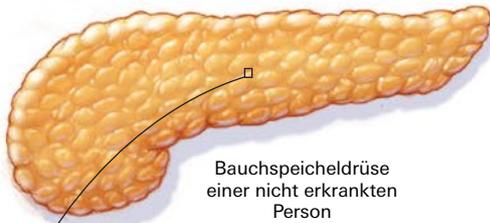
#### **Verschiedene Krankheiten, gleiche Funktionsweisen**

Die Übersichtsarbeit von Eizirik und seiner Gruppe belegt, dass etliche dieser Genvarianten bei mehreren verschiedenen Autoimmunerkrankheiten aktiv sind, was auf gemeinsame zu Grunde liegende Mechanismen hindeutet. Es handelt sich beispielsweise um Erbanlagen, die mit Interferonen in Zusammenhang stehen – einer Klasse entzündungsfördernder Zytokine. Zellen setzen solche Signalstoffe üblicherweise frei, um die Körperabwehr auf ein Problem aufmerksam zu machen, etwa eine Virusinfektion.

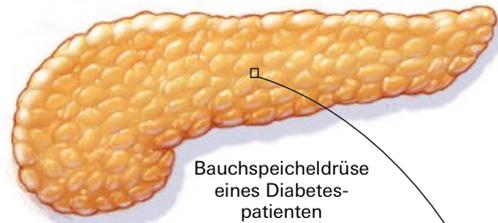
Körpergewebe, die bei Autoimmunerkrankheiten unter Beschuss stehen, weisen darüber hinaus nichtgenetische Merkmale auf, die sie anfällig für Angriffe machen. »Sie haben mindestens drei Schwächen«, fasst Mallone zusammen. Erstens befänden sich viele von ihnen in Drüsen, beispielsweise in der Schild- und der Bauchspeicheldrüse, wo sie enorme Mengen an Hormonen ausschütten. Da sie dadurch stark beansprucht seien, könnten zusätzliche Belastungen sie aus dem Takt bringen, Fehlfunktionen verursachen und falsche Alarmsignale an die Körperabwehr

## Unter Eigenbeschuss

Stellt der Körper das lebenswichtige Hormon Insulin nicht in ausreichender Menge her, führt das zur Zuckerkrankheit Diabetes Typ 1. Zu einem solchen Hormonmangel kommt es, wenn die Insulin produzierenden Betazellen der Bauchspeicheldrüse absterben, weil sie von zytotoxischen T-Lymphozyten des Immunsystems angegriffen werden. Jahrelang waren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler davon überzeugt, die attackierenden Killerzellen seien daran schuld und würden falsch reagieren. Bei gesunden Menschen findet sich allerdings die gleiche Art und Menge von T-Lymphozyten im Blut (pink), ohne dass es zu einer Offensive auf die Betazellen kommt. Daher tendieren viele Forscher jetzt zu der These, die Betazellen selbst würden den Angriff auf sich lenken.



Bauchspeicheldrüse einer nicht erkrankten Person



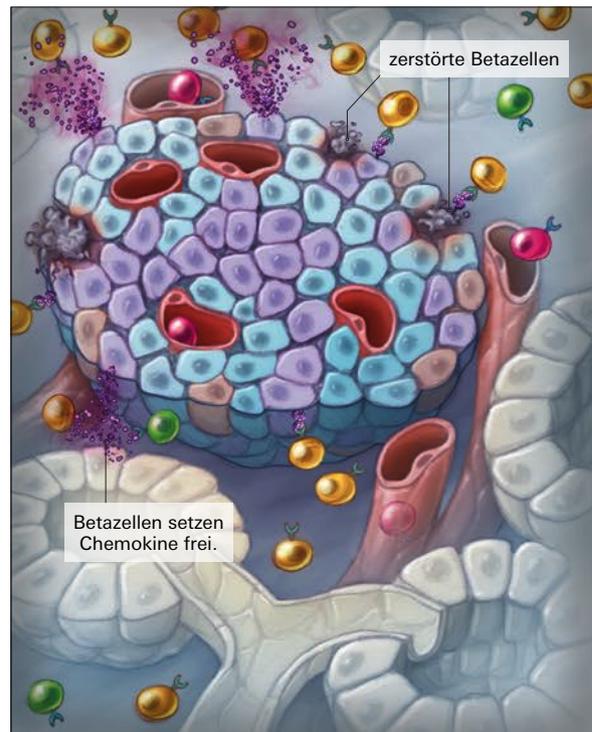
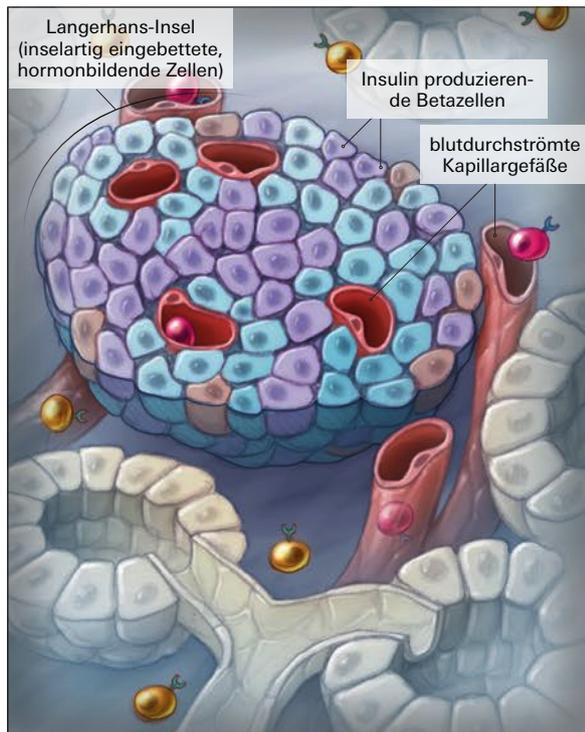
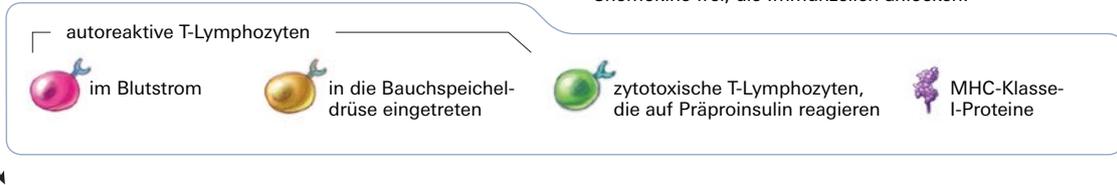
Bauchspeicheldrüse eines Diabetespatienten

### Gesundes Gleichgewicht:

Die Betazellen sind inselartig in die Bauchspeicheldrüse eingebettet. Zytotoxische T-Lymphozyten (so genannte CD8<sup>+</sup>-T-Zellen) zirkulieren im Blut und treten auch in die Bauchspeicheldrüse ein, greifen die Betazellen aber nicht an, so dass diese weiterhin Insulin erzeugen können.

### Diabetes Typ 1:

Die zytotoxischen T-Lymphozyten sammeln sich in der Bauchspeicheldrüse und starten den Angriff. Studien deuten darauf hin, dass die Betazellen übermäßig viele Moleküle produzieren, die den Killerzellen als Zielmarkierung dienen. Eines davon ist der Insulinvorläufer »Präproinsulin« (PPI), ein anderes gehört zu den so genannten MHC-Klasse-I-Proteinen. Unter Stress setzen Betazellen zudem Signalsubstanzen namens Chemokine frei, die Immunzellen anlocken.



DAVID CHENEY NACH BERBER, C. ET AL.: NEW INSIGHTS INTO THE ROLE OF AUTOACTIVE CD8 T CELLS AND CYTOKINES IN HUMAN TYPE 1 DIABETES. FRONTIERS OF ENDOCRINOLOGY 11, 2021, FIG. 1. SCIENTIFIC AMERICAN, SEPTEMBER 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

nach sich ziehen. Zweitens, so Mallone, würden die betroffenen Gewebe ihre ausgeschütteten Signalstoffe direkt in die Blutbahn abgeben. Die Moleküle wanderten dann durch den ganzen Organismus und würden »das Immunsystem aus der Ferne sensibilisieren«. Drittens seien die gefährdeten Körpergewebe von zahlreichen Blutgefäßen durchzogen. »Das bedeutet, dass die aufmerksam gemachte Immunabwehr leicht an sie herankommt.«

Möglicherweise spielen weitere Aspekte eine Rolle. Manche Zellarten des Organismus zerstören sich selbst, wenn sie von Viren befallen werden, so dass sie die Infektion kaum weitergeben und das Immunsystem relativ wenig eingreifen muss. Andere dagegen liegen nur in begrenzter Zahl vor, etwa Neurone und Betazellen, die beide häufig an Autoimmunkrankheiten beteiligt sind. Bei einer Virusinfektion vorsorglich gleich abzusterben, kommt für sie nicht in Frage, weil ihr Ausfall gravierende Folgen für den Körper hätte. Der Organismus versucht deshalb, sie am Leben zu erhalten, wodurch sie im Fall einer Funktionsstörung anhaltend falsche Notsignale senden. Die Körperabwehr interpretiert das als Zeichen dafür, dass alle Zellen der entsprechenden Klasse in Schwierigkeiten sind, und startet einen Angriff auf sie.

Ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie Schwachpunkte von Körperzellen zu einer Immunreaktion führen, sind entzündliche Blutgefäßerkrankungen aus der Gruppe der Vaskulitiden. Bei diesen Leiden handelt es sich nicht um klassische Autoimmunerkrankungen, da sie nicht auf Autoantikörpern beruhen. Sie gehören vielmehr zu den autoinflammatorischen Syndromen, die von der unspezifischen, angeborenen Immunabwehr vermittelt werden. Vaskulitiden zeichnen sich durch einen Angriff des Immunsystems auf jene Zellen aus, die Arterien, Venen und Kapillaren bilden. Eine seltene, aggressive Form bei Kindern entsteht infolge einer Mutation in dem Gen mit der Bauanleitung des Enzyms Adenosin-Desaminase 2. Dieses spielt eine wichtige Rolle für die DNA-Synthese und es reguliert die Aktivität sowohl der angreifenden Immun- als auch der attackierten Blutgefäßzellen, wie die Immunologin Sonia Sharma und ihr Team 2020 in einer Studie gezeigt haben. »Wenn das Enzym nicht mehr funktioniert, hat das weitreichende Konsequenzen«, beschreibt Sharma. »Die Gefäßzellen schaufeln sich dann gewissermaßen ihr eigenes Grab, indem sie beginnen, Zytokine zu produzieren, und damit die Immunabwehr auf sich lenken.«

Doch nicht immer ziehen gefährdete Zellen Autoimmunreaktionen auf sich. Wie erwähnt, zirkulieren im Blut von Gesunden zytotoxische T-Lymphozyten, die Betazellen angreifen könnten, es aber nicht tun. Irgendetwas muss bei Zuckerkranken eintreten, damit es zu einer solchen Attacke kommt. Viele Experten vermuten, dabei könnte es sich um eine Virusinfektion handeln oder um die Einwirkung giftiger Chemikalien. Dieses auslösende Ereignis kann, möglicherweise Jahre bevor sich die Autoimmunkrankheit bemerkbar macht, stattgefunden haben.

Ein Erreger, der seit Langem unter Verdacht steht, Diabetes Typ 1 zu verursachen, ist das Coxsackie-Virus. Es ist weit verbreitet und bewirkt Infektionen, die häufig un bemerkt oder mit milden Symptomen verlaufen: Fieber, Un-

wohlsein und Kopfschmerzen, gelegentlich Rachenentzündungen und Schnupfen sowie Übelkeit. Doch unter bestimmten Umständen kann das Virus die Bauchspeicheldrüse angreifen, sagt Mallone: »Ist eine ausreichende Viruslast vorhanden, können Betazellen infiziert werden und zu Grunde gehen.« Das könne eine Entzündung nach sich ziehen, die weitere Immunzellen anlockt. In ihrem Totenkampf setzen die Betazellen vermutlich Selbstantigene frei, die in der Nähe befindliche T-Lymphozyten sensibilisieren, woraufhin diese sich auf weitere Betazellen mit ähnlichen Selbstantigenen stürzen.

Damit eine Autoimmunerkrankung entsteht, müsse Verschiedenes aufeinandertreffen, betont Mallone: »Man braucht drei Zutaten: Selbstantigene, ein entzündliches Umfeld und eine entsprechende Veranlagung. Und diese Zutaten müssen am selben Ort und zur selben Zeit zusammenkommen. Das ist wahrscheinlich einer der Gründe, warum es so schwierig ist, umweltbedingte Auslöser zu identifizieren: weil wir alle gefährdet sind, es aber von den spezifischen Umständen abhängt, ob sich die Krankheit wirklich ausprägt.«

### **Ähnlichkeit zu Krankheitserregern führt vermutlich nicht in den Untergang**

Diese Sichtweise macht eine ältere These obsolet, wonach Viren Autoimmunreaktionen auslösen, weil ihre Proteine den körpereigenen molekular ähneln und die Immunzellen davon so verwirrt werden, dass sie den Organismus selbst angreifen. Von diesem hypothetischen Mechanismus, als »virale Mimikry« bezeichnet, waren die Forscher umso weniger überzeugt, je mehr Belege dafür auftauchten, dass derartige molekulare Doppelgänger häufig vorkommen, aber nur selten Krankheiten verursachen. Es gibt zahlreiche Moleküle im menschlichen Körper beziehungsweise in Krankheitserregern, die einander gleichen, potenziell ähnliche Immunreaktionen auslösen können und daher als kreuzreaktiv bezeichnet werden. »Kreuzreaktivität ist extrem weit verbreitet«, sagt DeLisa Fairweather, Immunologin an der Mayo Clinic in Jacksonville, Florida. »Würde sie immer zu Krankheiten führen, müssten wir viel mehr Patienten sehen.« Daher neigen die Fachleute jetzt eher zu der Annahme, dass Viren mitunter Körperzellen abtöten und dies eine Entzündung hervorruft, die das Immunsystem auf die Proteine der absterbenden Zellen aufmerksam macht.

Reizstoffe aus der Umwelt, etwa Arzneistoffe und andere Chemikalien, können solche entzündlichen Zustände ebenfalls hervorrufen und das Immunsystem damit fehlleiten. Einige Wissenschaftler nehmen an, die gehäufte Begegnung mit derartigen Stoffen stehe hinter der zunehmenden Zahl von Autoimmunkrankheiten in den zurückliegenden Jahrzehnten. Im Jahr 2020 veröffentlichte ein Team um den Rheumatologen Frederick Miller vom National Institute of Environmental Health Sciences (North Carolina) eine Studie zur Häufigkeit antinukleärer Antikörper – einer Untergruppe von Autoantikörpern, die sich gegen Proteine im Zellkern richten. An der Untersuchung nahmen mehr als 14 000 US-Bürger über einen Zeitraum von 25 Jahren hinweg teil. Zwischen 1988 und 1991 hatten 11 Prozent der Getesteten entsprechende Antikörper besessen. Dieser Anteil blieb bis

2004 in etwa konstant, mit einer kleinen Zunahme gegen Ende. Doch von da an schnellte er sprunghaft empor, bis er 2012 fast 16 Prozent erreicht hatte. Auffällig war der starke Anstieg bei Jugendlichen, was für Miller »das Beängstigendste« war, denn es könnte auf eine bevorstehende Welle von Autoimmunkrankheiten hindeuten.

Was hat diese plötzliche Steigerung verursacht? »Das wissen wir noch nicht«, sagt Miller. Er kann aber Umwelt- und Verhaltensfaktoren aufzählen, die vermutlich eine Rolle gespielt haben. So wurden während der Laufzeit der Studie 80 000 bis 90 000 neue Chemikalien zur Nutzung zugelassen. »Wir ernähren uns heute völlig anders als noch vor ein paar Jahrzehnten«, fährt der Rheumatologe fort, »und wir nutzen viel mehr Elektronik, was zwar praktisch und nützlich ist, aber auch dazu führt, dass wir nicht mehr genug Schlaf bekommen.« Überdies habe die Verschmutzung von Luft, Wasser und Lebensmitteln zugenommen. »Es gibt hunderte Unterschiede zwischen dem Leben heute und vor 30 Jahren«, resümiert Miller.

Eine andere These lautet, unser Immunsystem habe nicht mehr genügend Kontakt mit der natürlichen Außenwelt und reagiere deshalb über, wenn es auf relativ harmlose Moleküle treffe. Diese Idee ist verwandt mit der so genannten Hygienehypothese, die Ende des 20. Jahrhunderts aufkam. Demnach geht das Leben unter den hygienischen Bedingungen der modernen Gesellschaft mit zahlreichen Veränderungen unseres Mikrobioms einher, insbesondere der Darmbakterien, und das führt – so die Annahme – zu mehr Allergien und Autoimmunkrankheiten.

### Von der Hygiene- zur Biodiversitäts-Hypothese

Eine geopolitische Besonderheit bot die Chance, diese Vermutung zu überprüfen. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Region Karelien in Nordosteuropa zwischen Finnland und Russland aufgeteilt. Die Einwohner beider Teile ähneln sich genetisch sehr, aber die finnischen Gebiete erfuhren eine rasche Modernisierung, während die russischen weitgehend unverändert ländlich geprägt blieben. Man könnte meinen, die verbesserten Lebensbedingungen im finnischen Teil hätten die Krankheitslast verringert, aber das ist zumindest bei den Autoimmunkrankheiten nicht der Fall. Im Gegenteil: Diabetes Typ 1 kommt – bezogen auf die Einwohnerzahl – in den finnischen Gebieten so häufig vor wie nirgends sonst auf der Welt, und rund sechsmal so oft wie in Russisch-Karelien. Auch bei anderen Autoimmunkomplikationen, etwa der Zöliakie, liegen die Inzidenzen in Finnland sechs- bis zehnmal höher als in Russland.

Der Mediziner Mikael Knip von der Universität Helsinki und sein Team gehen davon aus, dass Veränderungen im Mikrobiom der karelischen Einwohner dafür verantwortlich sind. Unsere Darmflora baut sich schon während der Kindheit auf – ein Prozess, auf den die Umwelt großen Einfluss hat. Für eine 2016 veröffentlichte Studie untersuchten Knip und seine Mitarbeiter deshalb die Stuhlproben von bis zu dreijährigen Säuglingen, die auf beiden Seiten der finnisch-russischen Grenze lebten. »Als wir die Daten analysierten, sahen wir einen deutlichen Unterschied zwischen den Gruppen«, beschreibt er.

Unter den Darmmikroben der russischen Kinder dominierte eine (nicht krank machende) Form des Bakteriums *Escherichia coli*. Bei den finnischen hingegen war die Bakteriengattung *Bacteroides* am stärksten vertreten, die das Immunsystem deutlich weniger stark aktiviert als *E. coli*. »Die Auseinandersetzung mit den Mikroben der Umwelt und des Mikrobioms prägt unser Immunsystem, insbesondere im ersten Lebensjahr«, sagt Knip. In diesem Licht betrachtet deuten die Daten darauf hin, dass die Körperabwehr der finnischen Kinder ein ineffektives Training durchlaufen hatte. Zudem wiesen die finnischen Mikrobiome eine geringere Diversität auf als die russischen. Knip betont, es sei zu früh, um daraus abzuleiten, eine Verarmung der Darmflora sei der Grund für die Häufung von Autoimmunproblemen. Dennoch hält er es für wahrscheinlich, dass ein entsprechender Zusammenhang besteht: »Ich würde sagen, wir müssen die Hygienehypothese umbenennen in Biodiversitäts-Hypothese.«

Sharma stimmt Knip darin zu, dass die biologische Vielfalt der Darmflora wichtig ist und beispielsweise der Verzehr unverarbeiteter – oder zumindest weniger intensiv aufbereiteter – Lebensmittel bedeutend dazu beiträgt, das Immunsystem zu trainieren. »Das macht unsere Darmflora reichhaltiger und diverser«, sagt sie. Und es gäbe der Körperabwehr die Chance, sich an Moleküle zu gewöhnen, die weitgehend ungefährlich sind, was Überreaktionen vermeiden helfe.

Um Autoimmunerkrankungen besser zu verstehen und behandeln zu können, werde es letztlich nötig sein, sich von dem engen Blick auf Immunzellen, Körpergewebe oder das Mikrobiom zu lösen, meint Miller. Gebraucht werde eine ganzheitlichere Sichtweise. Ähnlich einem alten indischen Gleichnis »betrachten alle die Autoimmunität wie blinde Männer, die um einen Elefanten herumtasten, wobei jeder verschiedene Dinge wahrnimmt und keiner es schafft, sie in einen Zusammenhang zu bringen«, sagt der Rheumatologe. Um das übergeordnete immunologische Bild zu erkennen, seien mehr biomolekulare Studien an breiten Bevölkerungsgruppen erforderlich. Es führe kein Weg daran vorbei, große Datenmengen zu erheben und auszuwerten. Autoimmunerkrankungen sind demnach ein komplexes Problem, das sich nur mit komplexen Analysen lösen lässt. ◀

### QUELLEN

**Culina, S. et al.:** Islet-reactive CD8 + T cell frequencies in the pancreas, but not in blood, distinguish type 1 diabetic patients from healthy donors. *Science Immunology* 10.1126/sciimmunol.aao4013, 2018

**Dhanwani, R. et al.:** Cellular sensing of extracellular purine nucleosides triggers an innate IFN- $\beta$  response. *Science Advances* 10.1126/sciadv.aba3688, 2020

**Szymczak, F. et al.:** Gene expression signatures of target tissues in type 1 diabetes, lupus erythematosus, multiple sclerosis, and rheumatoid arthritis. *Science Advances* 10.1126/sciadv.abd7600, 2021

**Vatanen, T. et al.:** Variation in microbiome LPS immunogenicity contributes to autoimmunity in humans. *Cell* 10.1016/j.cell.2016.04.007, 2016

# AUTOIMMUNITÄT DATEN UND FAKTEN

**Mediziner kennen zahlreiche Erkrankungen, bei denen das Immunsystem den eigenen Körper attackiert.**



**Maddie Bender** (Foto; Text) ist Wissenschaftsjournalistin in Boston (USA). **Jen Christiansen** (Grafik) ist leitende Grafikerin bei »Scientific American«. **Miriam Quick** (Recherche) ist Datenjournalistin in London (Großbritannien).

» [spektrum.de/artikel/1959625](https://spektrum.de/artikel/1959625)

1901 wollte der Immunologe und spätere Nobelpreisträger Paul Ehrlich (1854–1915) nicht daran glauben, dass das Immunsystem den eigenen Organismus angreifen könnte. Eine solche Vorstellung hielt er als Horror autotoxicus (etwa »Furcht vor Selbstzerstörung«) für vollkommen abwegig. Inzwischen wissen wir es besser: Schätzungsweise 4,5 Prozent der Weltbevölkerung sind von den verschiedensten Autoimmunkrankheiten betroffen. Die Vielfalt und die Zahlen, die Sie auf der nächsten Doppelseite finden, zeichnen ein erschreckendes Bild.

Die Liste der hier aufgeführten 76 Erkrankungen basiert auf einer 2012 veröffentlichten Analyse der Immunologen Scott Hayter und Matthew Cook von der Australian National University, die wir ergänzt und aktualisiert haben. Die Krankheiten befallen verschiedene Körperteile, mitunter sogar mehrere Organe gleichzeitig. Meist sind Frauen öfter als Männer betroffen, wenngleich sich das Geschlechterverhältnis bei den einzelnen Syndromen unterscheidet. Ebenfalls variieren das Durchschnittsalter bei Krankheitsbeginn sowie die Häufigkeit in der Bevölkerung.

Als Verursacher der Leiden gelten einerseits Autoantikörper – also Proteine des Immunsystems, die Zellen oder Gewebe für die Zerstörung markieren – sowie andererseits T- und B-Zellen, welche diesen Angriff durchführen. Dank moderner molekularbiologischer Methoden konnten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die dabei ablaufenden Mechanismen immer genauer aufklären, so dass die grundlegenden Prinzipien der Autoimmunkrankheiten heute klarer erscheinen als zu Ehrlichs Zeiten. Die Details bleiben allerdings nach wie vor umstritten.

Je nach Beteiligung von Autoantikörpern lassen sich die hier vorgestellten Erkrankungen in drei Kategorien einteilen: Als Erstes sind Krankheiten wie Morbus Basedow zu nen-

nen, bei denen definitiv Autoantikörper zu Entzündungen führen. Bei vielen anderen Leiden wie dem Guillain-Barré-Syndrom treten Autoantikörper zwar auf, aber die zu Grunde liegende Pathologie bleibt unklar. Und schließlich gibt es Krankheiten ohne eindeutig nachweisbare Autoantikörper, die aber dennoch gut auf Immuntherapien ansprechen. Colitis ulcerosa und Schuppenflechte (Psoriasis) stellen zwei Beispiele für diese Gruppe dar.

Einige Erkrankungen, bei denen Autoantikörper erscheinen, fehlen in der Liste – teils weil sie von Cook und Hayter nicht genannt wurden, teils weil bestimmte biologische Merkmale gegen den Status als Autoimmunkrankheit sprechen. Hierzu gehören Myokarditis, Neuromyelitis optica, primäre membranöse Nephropathie oder thrombotisch-thrombozytopenische Purpura.

## QUELLEN

**Almutairi, K. et al.:** The global prevalence of rheumatoid arthritis: A meta-analysis based on a systematic review. *Rheumatology International* 41, 2021

**Furue, K. et al.:** Autoimmunity and autoimmune co-morbidities in psoriasis. *Immunology* 154, 2018

**Hayter, S. M., Cook, M. C.:** Updated assessment of the prevalence, spectrum and case definition of autoimmune disease. *Autoimmunity Reviews* 11, 2012

## WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Matthew Cook, Australian National University, Canberra (Australien)

DeLisa Fairweather, Mayo Clinic, Jacksonville (USA)

Aimee Payne, University of Pennsylvania, Philadelphia (USA)

Mehr Wissen auf  
**Spektrum.de**

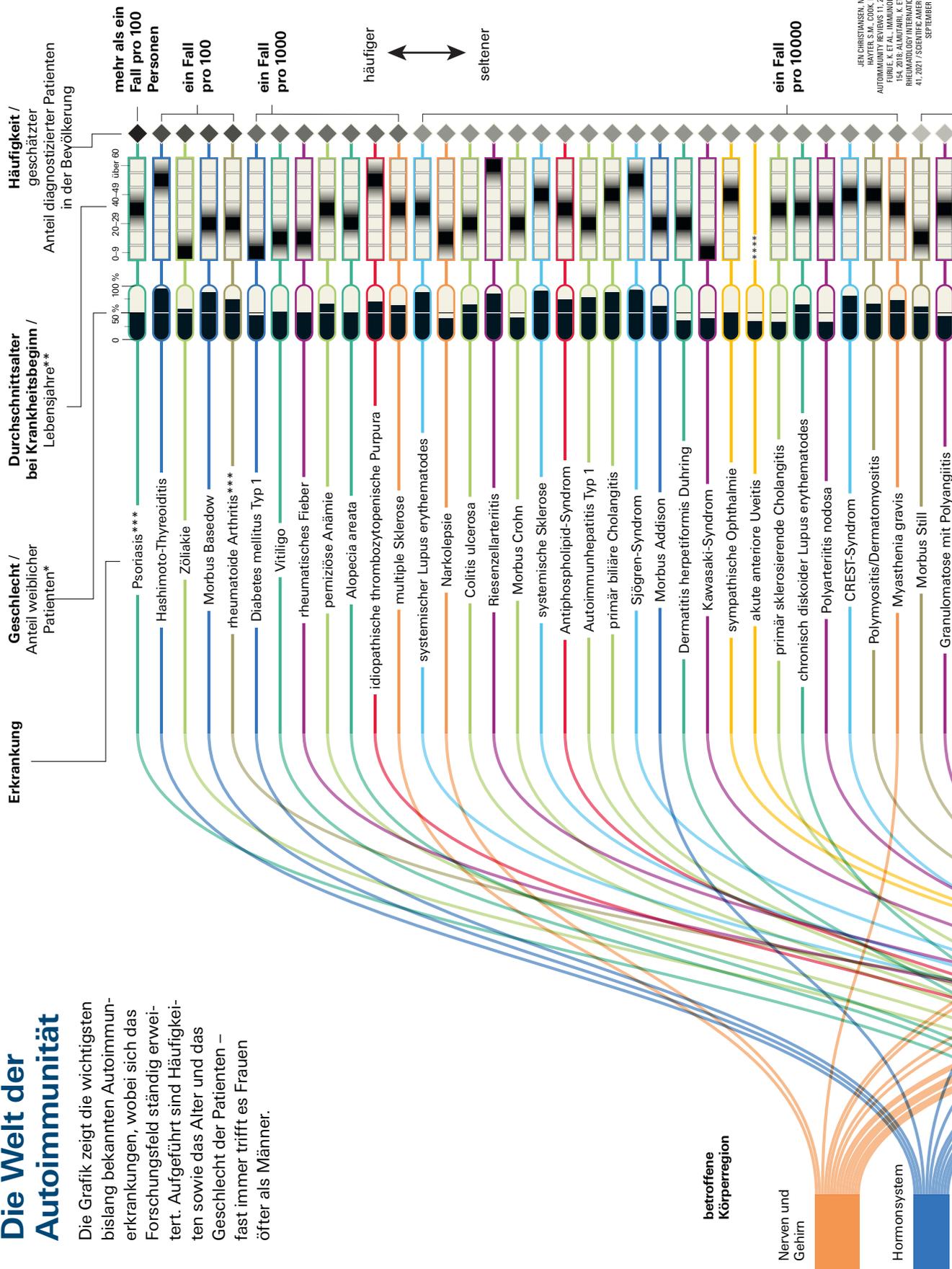
Unser Online-Dossier zum Thema  
finden Sie unter  
[spektrum.de/t/autoimmunitaet](https://spektrum.de/t/autoimmunitaet)

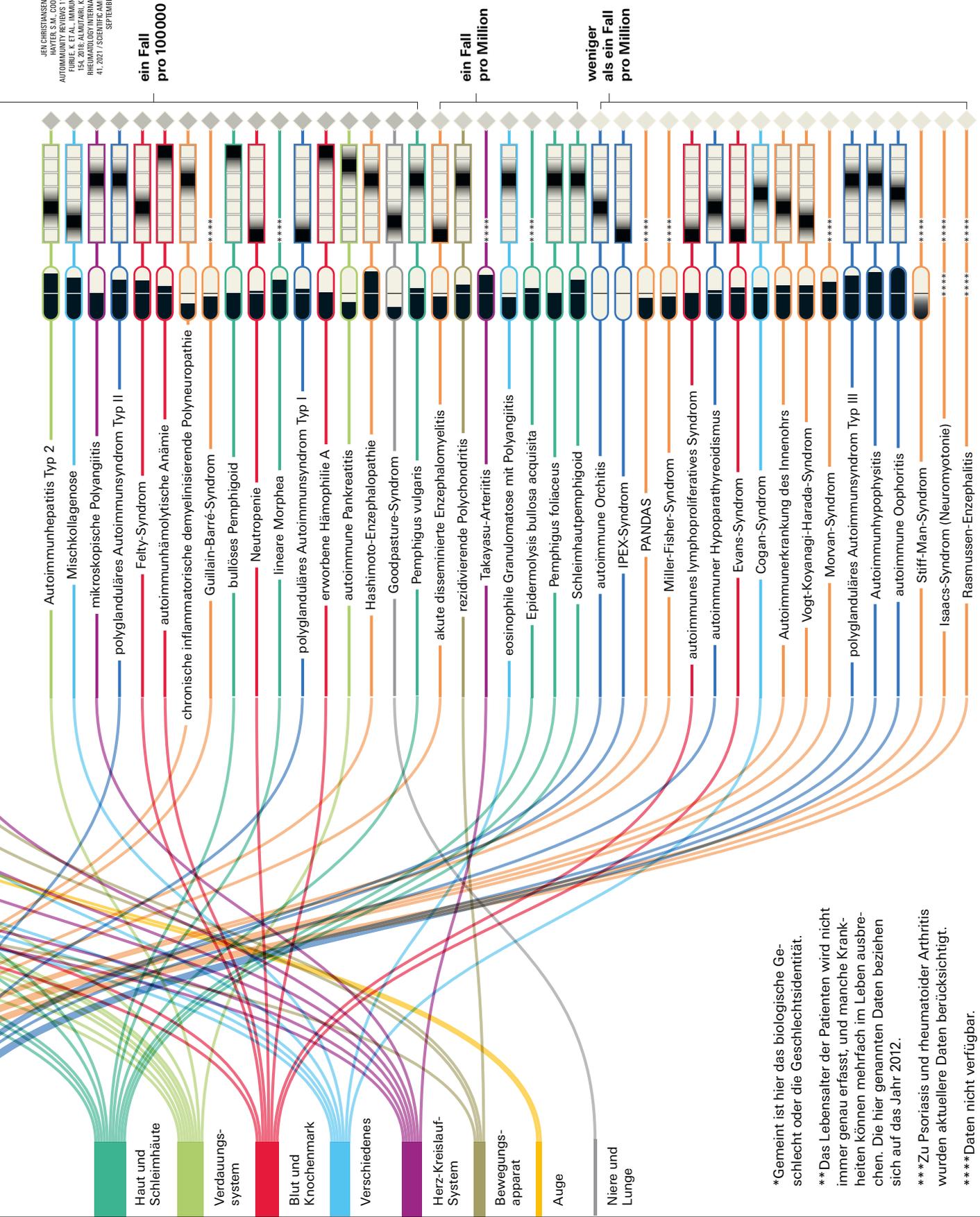


TIMOTHY TRICHE, NATIONAL CANCER INSTITUTE

# Die Welt der Autoimmunität

Die Grafik zeigt die wichtigsten bislang bekannten Autoimmunerkrankungen, wobei sich das Forschungsfeld ständig erweitert. Aufgeführt sind Häufigkeiten sowie das Alter und das Geschlecht der Patienten – fast immer trifft es Frauen öfter als Männer.





\*Gemeint ist hier das biologische Geschlecht oder die Geschlechtsidentität.  
 \*\* Das Lebensalter der Patienten wird nicht immer genau erfasst, und manche Krankheiten können mehrfach im Leben ausbrechen. Die hier genannten Daten beziehen sich auf das Jahr 2012.  
 \*\*\* Zu Psoriasis und rheumatoider Arthritis wurden aktuellere Daten berücksichtigt.  
 \*\*\*\* Daten nicht verfügbar.

## ÖKOLOGIE GIPFELSTÜRMER AUS NOT

**Bereits seit mehreren Jahrzehnten ziehen sich alpine Schmetterlingsarten auf Grund des Klimawandels in zunehmend höhere Gebirgszonen zurück. Das Problem: Diese Flucht endet spätestens am Gipfel.**

Die Folgen der Klimakrise beeinträchtigen nicht nur die Menschheit in Form von Dürren, Hungersnöten oder Unwetterschäden. Betroffen sind auch viele Tier- und Pflanzenarten, die besondere Ansprüche an ihre Umwelt stellen. Während sich Wärme liebende Spezies dem Temperaturanstieg folgend über Nordeuropa oder in höhere Lagen der Gebirge ausbreiten können, wird es für diejenigen eng, die an kühle Witterung angepasst sind.

So profitiert von der Klimaerwärmung die als Krankheitsüberträger bekannte, aus den Tropen und Subtropen stammende Asiatische Tigermücke (*Aedes albopictus*), die entlang der Autobahnen nach Mitteleuropa eingeschleppt wurde. Immer häufigere Fundmeldungen – zunächst nur sporadisch im sommerlich warmen Oberrheintal, später sogar in den Halbhöhenlagen des Schwarzwalds – lassen vermuten, dass sie inzwischen zumindest in Süddeutschland erfolgreich überwintert und langfristig eine stabile Population etablieren wird. Zu den Verlierern gehört dagegen der als Brutparasit bekannte Kuckuck. Sein Ruf ist hier zu Lande unter anderem wohl deshalb nur noch selten zu hören, weil die als Pflegeeltern ausgewählten Singvögel immer zeitiger mit dem Nestbau und der Jungenaufzucht beginnen. Solange der Kuckuck seinen Rückflugtermin nicht an diese Entwicklung angepasst hat, gelangt das Kuckucksei zu spät in das Nest, und das geschlüpfte Junge kann die um das Futter konkurrierenden Stiefgeschwister nicht mehr hinauswerfen.

Auch die Schmetterlinge der Nordhalbkugel werden überwiegend durch die Klimaerwärmung in Mitleidenschaft gezogen. Zwar eignen sich warme, sonnige Standorte für die

Ansiedlung artenreicher Schmetterlingspopulationen; aber auf lange Sicht wirkt sich die Häufung heißer und trockener Sommer nachteilig aus. Innerhalb der letzten Jahrzehnte hat sich deshalb das Vorkommen bestimmter, an das gemäßigte Klima Mitteleuropas angepasster Tagfalterarten verändert: An der südlichen Verbreitungsgrenze treten sie seltener auf, stattdessen weichen sie nach Norden aus. Infolgedessen hat sich bei zahlreichen europäischen Arten das Verbreitungsgebiet insgesamt polwärts verschoben.

### Glazialrelikte

Die Flucht nach Norden gelingt allerdings nur den Flachlandbewohnern. Schmetterlinge im Alpenraum, die noch stärker an kühle Witterung angepasst sind, stehen vor einer zusätzlichen Herausforderung. Das europäische Tiefland konnten sie nur während der letzten Kaltzeit besiedeln; nach der Schmelze der großen Gletscherschilde haben sie sich als sogenannte Glazialrelikte in die kühlen Regionen Skandinaviens oder die Höhenlagen der Alpen zurückgezogen. Wird es nun den Populationen im Alpenraum zu warm, können sie lediglich noch weiter nach oben ausweichen. Polwärts auszuwandern kommt für sie nicht in Frage, denn um klimatisch geeignete Regionen Skandinaviens zu erreichen, müssten sie über riesige Entfernungen das wärmere Tiefland durchqueren.

Wie solche alpinen Schmetterlinge mit dem Klimawandel zurechtkommen, untersuchte nun eine Gruppe von Insektenkundlern um Jan Christian Habel von der Universität Salzburg in Österreich. Wie stark das betrachtete Gebiet im Salzburger Land mit Höhen von weniger als 400 bis fast

4000 Metern über dem Meeresspiegel vom Klimawandel betroffen ist, zeigen bereits deutlich sichtbare Veränderungen der Vegetation. Die Forscher konzentrierten sich auf die Verbreitung von 37 Schmetterlingsarten im Zeitraum von 1960 bis 2019, in dem die Temperatur in den Ostalpen deutlich anstieg. Für die Rekonstruktion der Verbreitungsgebiete griffen die Wissenschaftler auf Langzeitbeobachtungen zurück, bei denen Fundort und -datum exakt protokolliert und in einer Datenbank des Hauses der Natur in Salzburg hinterlegt worden waren.

Beim Betrachten der letzten 60 Jahre ergaben sich teilweise dramatische Veränderungen: Mehr als zwei Drittel der untersuchten Schmetterlingsarten waren am höchsten Fundort wesentlich später beobachtet worden als am niedrigsten. Und mehr als die Hälfte der Spezies war nach 1980 vom niedrigsten Fundort verschwunden.

Die Forscher waren sich bewusst, dass historische Belege von Freilandfunden, die nicht unter standardisierten Bedingungen durchgeführt wurden, stets fehlerbehaftet sind. Daher stützten sie ihre Studie auf ein zweites Standbein: Ausgehend von den Kenntnissen über die Biologie der untersuchten Arten, der Geländestruktur sowie der lokalen Veränderungen von Temperatur, Strahlung und Niederschlägen entwickelten sie ein computergestütztes Modellsystem, um einzuschätzen, wie sich das bevorzugte Verbreitungsgebiet der jeweiligen Art im besagten Zeitraum verschiebt.

Diese Modellberechnungen bestätigten im Wesentlichen die bei den Freilandfunden erkennbare Tendenz: Bei allen untersuchten Arten nahm die Ausdehnung ihres potenziellen Verbreitungsgebiets von 1965 bis 2015 ab. Und bei den meisten alpinen Schmetterlin-



### *EUPHYDRAS INTERMEDIA*

Der Geißblatt-Scheckenfalter liebt lichte Bergwälder. Seine Raupen sind auf gute Bestände des Blauen Geißblatts angewiesen.

gen schrumpften die Areale nicht nur, sondern verschoben sich auch in Richtung der Gipfel um durchschnittlich 300 Höhenmeter. Entsprechend ging die Biodiversität vor allem in tieferen Lagen zurück.

Die Beobachtungen stimmen mit Berichten aus der Sierra de Guadarrama in Spanien überein, wo ganze Schmetterlingsgemeinschaften vergleichbar weit in die Gipfelregionen abgewandert sind. Ähnliches gilt für die Alpenhummel (*Bombus alpinus*), die in den Hochalpen bis zur Gletschergrenze heimisch ist. Deren untere Verbreitungsgrenze stieg inzwischen um fast 500 Meter an.

#### **Sackgasse Berggipfel**

Diese Entwicklungen erscheinen besonders alarmierend, weil bei weiterer Erwärmung die Ausweichmöglichkeiten am Berggipfel enden. Bereits vor zehn Jahren berichtete ein Team um Petra Dieker, damals am Musée national d'histoire naturelle in Luxemburg, dass das Hochalpenwiderchen (*Zygaena exulans*) in den Pyrenäen

klimabedingt die Gipfellagen erreicht hat und mit zunehmender Lufttemperatur nicht mehr weiter ausweichen kann. Dazu kommt, dass Schmetterlinge auch klimatisch günstige Lebensräume nur dann erfolgreich besiedeln können, wenn sie dort für ihre Raupen geeignete Futterpflanzen finden, zumal sich manche Arten in dieser Hinsicht als sehr wählerisch zeigen. Die Raupen sind auf wenige, im Extremfall sogar nur eine einzige Futterpflanze spezialisiert, und solche Vorlieben berücksichtigen die Schmetterlingsweibchen bereits bei der Eiablage. Dass die meisten Pflanzen ihrerseits, bedingt durch ihre Ansprüche an das Klima und die Bodenbeschaffenheit, bevorzugt in bestimmten Höhenlagen vorkommen, kann im Einzelfall die Verlagerung der Schmetterlingsvorkommen drastisch bremsen. Zwar passen sich auch die Vegetationszonen mit der Zeit an die Klimaerwärmung an, da aber nur die Samen der Pflanzen beweglich sind, geschieht das viel langsamer als bei den mobilen Schmetterlingen.

Der Klimawandel wirkt sich auf jede einzelne Schmetterlingsart unterschiedlich aus: Generalisten, die ein breites Spektrum von Futterpflanzen nutzen, können neue Lebensräume relativ leicht erobern. Nahrungsspezialisten hingegen haben hier schlechtere Karten. Dazu gehören in den Salzburger Alpen unter anderem der Hochalpen-Apollo (*Parnassius phoebus*), der Geißblatt-Scheckenfalter (*Euphydryas intermedia*) oder der in hoch gelegenen Schutthalden und Moränenlandschaften heimische Eis-Mohrenfalter (*Erebia pluto*).

Für den Natterwurz-Perlmutterfalter (*Boloria titania*) sagt die Modellrechnung sogar voraus, dass bei gleichbleibender Tendenz der Höhenwanderung sein klimatisch bevorzugtes Verbreitungsgebiet über kurz oder lang nicht mehr mit dem der wichtigsten Futterpflanze, des Schlangen-Knöterichs (*Bistorta officinalis*), überlappen wird. Das Überleben dieser Schmetterlingsart wäre damit akut gefährdet. Ähnlich dramatische Konsequenzen drohen nach anderen Beobachtungen auch

dem Apollofalter *Parnassius smintheus* in den Rocky Mountains.

Weitere anthropogene Einflüsse wie die Landnutzung oder der Eintrag von Stickstoff aus der Atmosphäre beeinflussen ebenfalls die Verbreitung von Insekten. Auch das hat die Arbeitsgruppe von Jan Christian Habel untersucht. In den vom Menschen gestalteten Agrarlandschaften können sich vor allem die Generalisten behaupten, die selbst in monotonen Agrarwüsten geeignete Futterpflanzen finden. Die Artenvielfalt der Spezialisten dagegen wird in höhere Lagen abgedrängt, wo steile und unwegsame Hänge vom Menschen weniger intensiv genutzt werden und deshalb eine vielfältige,

naturnahe Vegetation beibehalten. Da aber auch Generalisten sich unten rar machen, häufen sich die Indizien, dass die Gipfelwanderung der Schmetterlinge im Salzburger Land nicht durch die Landwirtschaft, sondern durch den Klimawandel ausgelöst ist.

Nachteilige Folgen der Klimakrise beschränken sich also nicht auf ferne Gebiete, wo Wüstenbildung, Überflutungen und Korallenbleiche schon länger Schlagzeilen machen. Auch vor unserer Haustür vollzieht sich, von der Öffentlichkeit bislang weitgehend unbeachtet, ein Wandel mit dramatischen Folgen. Denn mit den Schmetterlingen und anderen Insekten verschwinden nicht nur ein paar bunte

Farbtupfer aus unserer Landschaft, sondern auch die Nahrungsgrundlage für zahlreiche Insektenfresser. Und dies mündet letztlich im Rückgang unserer vielfältigen Vogelwelt.

**Annette Hille-Rehfeld** ist habilitierte Biologin, Wissenschaftsjournalistin und Autorin in Stuttgart.

## QUELLEN

**Habel, J. C. et al.:** Land use and climate change affects butterfly diversity across northern Austria. *Landscape Ecology* 36, 2021

**Rödger, D. et al.:** Climate change drives mountain butterflies towards the summits. *Scientific Reports* 11, 2021

## RAUMFAHRT GÜNSTIGER IONENANTRIEB MIT JOD

**Festes Jod wird beim Erhitzen direkt gasförmig, was sich für billige, kompakte Triebwerke nutzen ließe. Das Prinzip wurde nun erfolgreich im All getestet und könnte die Kommerzialisierung von Netzwerken aus Kleinsatelliten voranbringen.**

▶ Satelliten, die gemeinsam in so genannten Konstellationen operieren, ermöglichen flexiblere und weniger störungsanfällige Missionen. Allerdings müssen die Umlaufbahnen häufig nachreguliert werden, und das erfordert kostengünstige, zuverlässige und effiziente Triebwerke. Viele vernetzte Satelliten verfügen zu dem Zweck über einen Ionenantrieb. Ein solcher erzeugt Schub, indem er die Atome eines Gases ionisiert, in einem elektrischen Feld beschleunigt und ausstößt. Üblicherweise wird dafür Xenon verwendet. Dessen Ionisierung braucht zwar relativ wenig Energie, aber Xenon ist teuer und passt nur komprimiert in Hochdrucktanks an Bord eines Satelliten. Krypton ist billiger, erfordert allerdings immer noch ein komplexes Speicher- und Versorgungssystem. Nun hat ein Team um den Plasmaphysiker Dmytro Rafalskyi, Mitgründer und technischer Leiter eines französischen Start-ups, erfolgreich ein auf Jod basierendes

Ionenantriebwerk im Weltraum eingesetzt. Es erweist sich als eine günstigere und technisch einfachere Alternative.

Jod unterscheidet sich von anderen potenziellen Treibstoffen dadurch, dass es als Festkörper vorliegt und bei Wärmezufuhr sublimiert, also direkt gasförmig wird. So kann es unmittelbar im Triebwerk gelagert werden (siehe »Triebwerk«), was sperrige Drucktanks und eine komplexe Gas-einspeisung überflüssig macht. Die Jodkristalle werden einfach erhitzt und in Gas umgewandelt; da dies nur ein Watt Leistung benötigt, lässt sich dafür Solarenergie nutzen.

Anschließend strömt das Jodgas in eine Kammer, wo es mit Elektronen beschossen wird. So entsteht ein geladenes Plasma aus Ionen und Elektronen. Ausgangspunkt dafür sind einige freie Elektronen, die nicht an ein Molekül oder Atom gebunden sind und die es in jedem neutralen Gas gibt. Normalerweise bewegen sie sich

langsam, so dass sie beim Zusammenstoß mit einem Gasteilchen einfach abprallen und dessen elektrische Ladung neutral bleibt. Um das Gas in Plasma umzuwandeln, verwendete Rafalskyis Team Hochfrequenzstrahlung. Diese beschleunigt die Elektronen in der Kammer, woraufhin sie Ladungen aus den Jodmolekülen schlagen.

### Atom für Atom zu großen Geschwindigkeiten

Dadurch entstehen Jodionen, die ein elektrisch geladenes Gitter anschließend aus dem Plasma zieht und in Richtung des Auslasses des Triebwerks beschleunigt. Dort injiziert eine Kathode Elektronen in den Strahl herausschießender Ionen. Das neutralisiert diese, ohne sie merklich zu verlangsamen. Die ausgestoßenen, ungeladenen Teilchen können von den Feldern des Triebwerks nicht wieder angezogen werden, verlassen den Satelliten also endgültig und drücken

ihn so – da der Gesamtimpuls erhalten bleiben muss – vorwärts. Ein Abschalten der Heizung stellt den Schub ab. Dann kühlt das Gas rasch ab und wandelt sich wieder in einen Feststoff um. Dabei bildet das im kleinen Verbindungsrohr zum Tank befindliche Gas einen festen Jodpfropfen. Er verhindert Treibstoffverluste und macht ein Regelventil überflüssig.

Die Konstruktion ist nicht nur bemerkenswert funktional, leicht und kostengünstig, sondern auch effizient. Bevor sie das Prinzip im Weltraum zum Einsatz brachten, testeten die Forscher den Aufbau zum Vergleich mit Xenon aus einem externen Gastank. Sie stellten fest: Der aus dem Plasma ausgestoßene Strom von Ionen war im Fall von Jod um fast 50 Prozent stärker als bei Xenon, obwohl die Flussrate des Gases und die Hochfrequenzleistung in beiden Fällen gleich waren. Das liegt daran, dass Jod eine niedrigere Ionisierungsenergie hat als Xenon und weitere Eigenschaften besitzt, die leichter ein Plasma entstehen lassen. Dieses enthält obendrein weniger energiereiche Elektronen als beim ionisierten Xenon und verliert deswegen nicht so viel Energie durch Wechselwirkungen mit den Wänden der Einschlusskammer.

Das Triebwerk startete schließlich im November 2020 als Teil des chinesischen kommerziellen Forschungs-satelliten Beihangkongshi-1. Die Bahn-

verfolgung mittels Bodenstationen und GPS zeigte, dass die Manöver im Orbit wie geplant verliefen. Nach diesem erfolgreichen Nachweis der Funktionsfähigkeit könnte das einfache und leistungsfähige Prinzip eine bedeutende Rolle für Kleinsatelliten erhalten. Deren Zahl ist im letzten Jahrzehnt enorm gestiegen, von wenigen Dutzend, die 2011 gestartet wurden, auf mehr als 1200 im Jahr 2020. Weltweit wird intensiv an ähnlichen Konzepten gearbeitet. So bietet das US-Unternehmen Busek eine Reihe von Triebwerken mit einer Leistung von 100 Watt bis 20 Kilowatt an. Sie können je nach den Anforderungen der Mission mit Xenon oder Jod gespeist werden.

#### Kleine Vorteile summieren sich

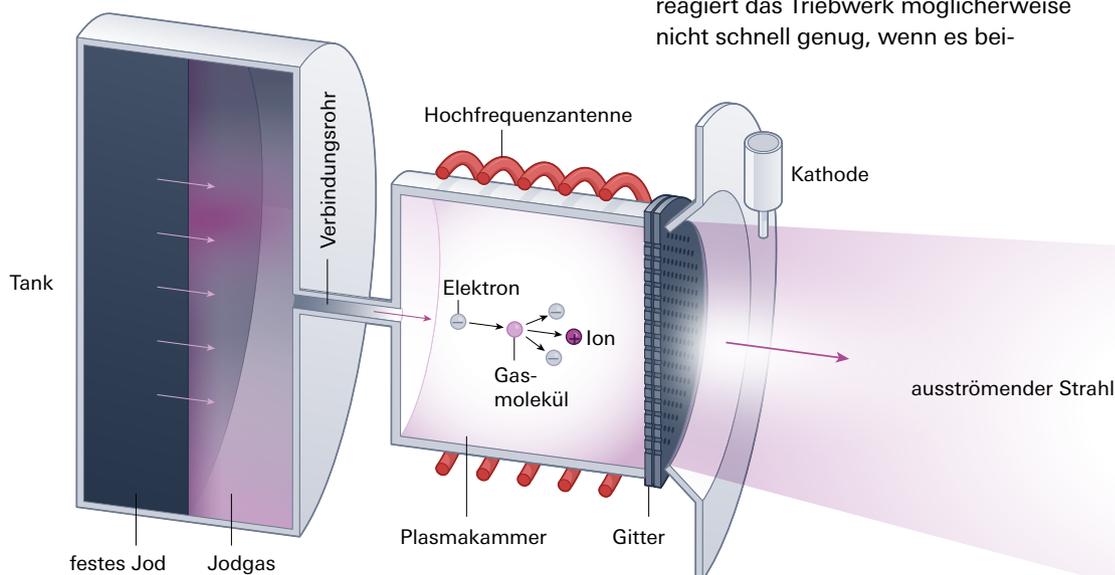
Das Bestreben, Technik zu möglichst niedrigen Preisen und für eine längere Nutzungsdauer in den Orbit zu bringen, ist heute stärker denn je. Die Firmen können inzwischen günstige, wieder verwendbare Raketen einsetzen, die mehrere Satelliten gleichzeitig starten. Bei großen Konstellationen, wie dem vom US-Raumfahrtunternehmen SpaceX geplanten Starlink-System mit 42000 Satelliten, könnte ein Wechsel von Xenon oder Krypton zu Jod Millionen einsparen. Außerdem reduzieren die einfachere Lagerung und Treibstoffzufuhr die Masse des Triebwerks, was die Startkosten senkt.

Nicht nur Satellitenkonstellationen könnten von der Technologie profitieren. Es laufen bereits Planungen für eine kommerzielle Fertigungsindustrie in der Schwerelosigkeit des Welt-raums. In solchen Anlagen sollen Produkte hergestellt werden, bei denen eine Fertigung unter irdischer Gravitation kaum möglich wäre. So demonstrierte das in Moskau ansässige Unternehmen 3D Bioprinting Solutions 2018 mit einem Gerät auf der Internationalen Raumstation den Formprozess eines biologischen Gewebes, bei dem die Zellen nicht entlang eines Gerüsts in ihre dreidimensionale Struktur gebracht wurden, sondern durch Magnetfelder. Kostengünstige Jodtriebwerke könnten dabei helfen, solche speziellen Erzeugnisse aus der Umlaufbahn zurück zur Erde zu manövrieren.

Jod ist allerdings stark korrosiv und damit eine potenzielle Gefahr für die Elektronik und andere Teile des Satelliten. Das Team um Rafalskyi hat die Metallkomponenten des Systems mit Keramik und widerstandsfähigen Polymerschichten geschützt. Außerdem mussten die Forscher die festen Jodkristalle zur mechanischen Stabilisierung des Treibstoffs in eine poröse Aluminiumoxidmatrix einbetten, was das Gewicht und das Volumen des Systems erhöhte. Darüber hinaus benötigt festes Jod mit etwa zehn Minuten relativ lang, um auf Sublimationstemperatur zu kommen. Dadurch reagiert das Triebwerk möglicherweise nicht schnell genug, wenn es bei-

#### TRIEBWERK

Jod wird durch Elektronenbeschuss ionisiert und dann in Richtung eines Gitters beschleunigt. Eine Kathode neutralisiert die ausgestoßenen Ionen.



NATURE, NACH RAFALSKYI, D. ET AL.: IN-ORBIT DEMONSTRATION OF AN IODINE ELECTRIC PROPULSION SYSTEM. NATURE 599, 2021, FIG. 1; LEVCHENKO, I., BAZAKA, K.: IODINE POWERS LOW-COST ENGINES FOR SATELLITES. NATURE 599, 2021, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

spielsweise darum geht, Kollisionen in der Umlaufbahn zu vermeiden. Erst nach Beseitigung solcher Probleme wird sich die Technologie serienmäßig nutzen lassen. Nichtsdestotrotz ist das System nach seinem Ersteinsatz im Weltraum schon jetzt ein viel versprechender Neuzugang auf dem sich rasch verändernden Spielfeld der elektrischen Antriebstechnologien.

**Igor Levchenko** erforscht elektrische Antriebssysteme an der Technischen Universität Nanyang in Singapur. **Kateryna Bazaka** lehrt am College of Engineering and Computer Science an der Australian National University in Canberra.

#### QUELLEN

**Parfenov, V.A. et al.:** Magnetic levitational bioassembly of 3D tissue construct in space. *Science Advances* 6, 2020

**Rafalskyi, D. et al.:** In-orbit demonstration of an iodine electric propulsion system. *Nature* 599, 2021

#### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
*Nature* 599, S. 373–374, 2021

## BEVÖLKERUNGSWACHSTUM WIE VIELE WERDEN WIR NOCH?

**Laut den Vereinten Nationen werden Ende des Jahrhunderts fast elf Milliarden Menschen auf der Erde leben. Andere Forschungsgruppen sagen hingegen voraus, dass die Weltbevölkerung etwa ab 2070 langsam abnehmen wird.**

Im Jahr 2100, so die Vereinten Nationen (UN), wird die Erde rund 10,9 Milliarden Menschen beherbergen. Ein neuer Rekordwert in der Reihe von Bevölkerungsprojektionen, die die Abteilung Bevölkerungsfragen der UN seit Jahrzehnten regelmäßig veröffentlicht. Doch in den letzten Jahren haben konkurrierende Forschungsgruppen eigene Techniken zur Bevölkerungsvoraussage entwickelt und substanziell unterschiedliche Ergebnisse hervorgebracht. Bis 2060, vielleicht 2070 wird die Menschheit ihren Schätzungen zufolge noch anwachsen, aber nur auf 9,7 Milliarden. Danach soll Schluss sein mit Wachstum: Wir werden wohl wieder weniger.

In der Fachwelt schwelen seither erbitterte Streits. Die unterschiedlichen Zahlen bedeuten aber selbst abseits der akademischen Diskussion für all diejenigen ein Problem, die auf ihrer Grundlage für die Zukunft kalkulieren, etwa Regierungen und Unternehmen: Bevölkerungsentwicklung beeinflusst nicht nur die Planung der Infrastruktur oder die Kalkulation künftiger Steuereinnahmen, sie wirkt sich auch auf die Ziele für internationale Entwicklung aus und ist wichtig, wenn man über die Reduktion der Treibhausgasemissionen spricht.

Jede Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung beginnt mit der Frage, wie viele Menschen zum gegenwärtigen Zeitpunkt auf der Erde leben. Dieses Problem haben schon die Babylonier im Jahr 4000 v. Chr. mit Hilfe eines Zensus, also einer Volkszählung, gelöst. Anhand des Ergebnisses kalkulierten sie, wie viel Nahrung sie brauchten, um ihr Land zu versorgen. Die alten Ägypter, Römer und Chinesen führten ebenfalls regelmäßige Zählungen durch.

#### Das Problem mit der Fertilität

Auch heute noch finden klassische Zensus statt – und ausgehend von den aktuellen Bevölkerungszahlen ermitteln Demografen dann verschiedene mögliche Verläufe für die Zukunft. Dabei berücksichtigen sie Geburten und Sterbefälle sowie Ein- und Auswanderung.

Wie alle Simulationen künftiger Ereignisse, vom Klimawandel bis zum Verlauf einer Epidemie, werden die Prognosen umso weniger verlässlich, je weiter sie in die Zukunft reichen. Eine Vorhersage über die nächsten 20 bis 30 Jahre betrachten Demografen gewöhnlich als sehr gut, weil die meisten Menschen, die in ein paar Jahrzehnten leben werden, heute bereits auf der Welt sind. Geburten-

und Sterberaten sowie Migrationszahlen lassen sich über einen solchen begrenzten Zeitraum ebenfalls recht leicht aus aktuellen Trends ableiten.

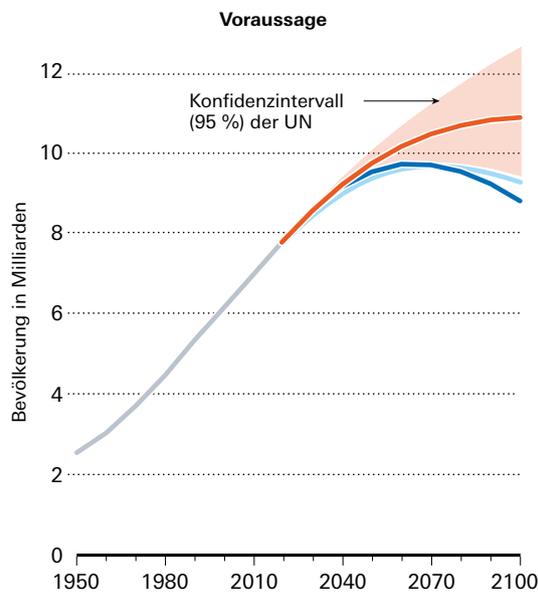
Die wohl wichtigste unter diesen Größen ist die so genannte Fertilitätsrate, die angibt, wie viele Kinder eine Frau im Durchschnitt bekommt. Sie kann erheblich schwanken und dadurch sowohl die aktuelle Bevölkerungsgröße als auch die zukünftige beeinflussen, während Sterberaten und Migrationszahlen im Vergleich dazu normalerweise relativ stabil sind.

In Singapur lag die Fertilitätsrate 1972 beispielsweise bei geschätzt 3,04 und sollte Vorhersagen zufolge stark steigen. Um eine zu heftige Bevölkerungszunahme zu vermeiden, hielt die Regierung Familien dazu an, höchstens zwei Kinder zu bekommen. Mit dem frapierenden Erfolg, dass die Rate 1986 auf 1,43 abgefallen war! Die Behörden versuchten nun, das Steuer herumzureißen, und flehten die Menschen quasi an, mehr Babys in die Welt zu setzen. Bis 2018 sank die Kennzahl jedoch weiter auf 1,14 und liegt heute bei 1,23 – einem Besorgnis erregend niedrigen Wert. Denn nur, wenn Frauen im Schnitt 2,1 Kinder bekommen, bleibt die Bevölkerungszahl ohne Einwanderung stabil (man spricht vom Reproduktionsniveau).

## Deutliche Unterschiede

Die Vereinten Nationen erwarten, dass im Jahr 2100 fast elf Milliarden Menschen auf der Erde leben. Zwei andere Forschungsorganisationen rechnen mit wesentlich weniger.

- Vereinte Nationen (UN)
- Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME)
- International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)



Um den Verlauf von Fertilitätsraten vorauszusagen, müssen Demografen wohl begründete Vermutungen darüber anstellen, wie die Menschen sich unter wechselnden Umständen verhalten. In Ländern mit hohem Einkommen haben darauf vor allem wirtschaftliche Faktoren einen Einfluss: Mit wachsenden Möglichkeiten messen Frauen ihrer Karriere höhere Priorität bei, während einer Rezession schieben Paare die Familienplanung auf.

In weniger wohlhabenden Ländern hingegen kommt es auf andere Faktoren an: Wenn mehr Mädchen Zugang zu Bildung haben, bringen sie nicht nur später, sondern auch weniger Kinder zur Welt. Wird die Gesundheitsversorgung besser, bekommen mehr Menschen Zugang zu Verhütungsmitteln. In dieser Hinsicht spiegeln sinkende Fertilitätsraten wirtschaftlichen Aufschwung wider.

Vorherzusagen, wie sich solche Zahlen über Jahrzehnte entwickeln, ist schwierig. Und hier beginnt die Kontroverse.

Lange hatte die Abteilung Bevölkerungsfragen der Vereinten Nationen das Feld der langfristigen Bevölkerungsprognosen größtenteils für sich

und veröffentlichte alle paar Jahre regelmäßige Updates. Im neuesten Report von 2019 sagten die Experten voraus, dass die Menschheit bis zum Jahr 2100 von aktuell 7,7 auf knapp 11 Milliarden anwachsen wird.

### Grundlegend andere Methoden

Bereits 2014 veröffentlichte jedoch eine Gruppe am International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Wien ihre eigene Vorhersage. Ihr zufolge sollen im Jahr 2070 rund 9,4 Milliarden Menschen auf der Erde leben. Von da an soll ihre Zahl abnehmen, auf 9 Milliarden bis Ende des Jahrhunderts. In einer neueren Version aktualisierten die Fachleute den Höchstwert ihrer Schätzung auf etwas unter 9,7 Milliarden im Jahr 2070.

Und 2020 deutete eine Veröffentlichung eines Teams vom Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) an der University of Washington in Seattle in eine ganz ähnliche Richtung: Die Weltbevölkerung sollte der Studie zufolge bis 2064 auf rund 9,7 Milliarden Menschen ansteigen und dann sinken, so dass unser Planet im Jahr 2100 nur noch etwa 8,8 Milliarden Bewohner hätte.

In 23 Ländern könnte sich die Bevölkerung laut dieser Vorhersage bis Ende des Jahrhunderts sogar halbiert haben, unter anderem in Japan, Thailand, Italien und Spanien.

Die großen Differenzen zwischen den Studien (siehe »Deutliche Unterschiede«) kommen zu Stande, weil jede Forschungsgruppe nach einer anderen Methode gearbeitet hat. »Alle drei gehen von ähnlichen aktuellen Bevölkerungszahlen aus – hier liegt das Problem also offensichtlich nicht«, sagt Toshiko Kaneda, Demograf beim Population Reference Bureau, einer unabhängigen Forschungsorganisation in Washington, D.C. »Es geht vielmehr darum, wie stark die Kurve ansteigt. Hier fangen die Missverständnisse an.«

Im Zentrum des Disputs steht die Frage, wie sich die Fertilitätsraten mit der angenommenen wirtschaftlichen Entwicklung ändern. Und die drei Modelle erfassen das auf unterschiedliche Weise. Die Modellierer der Vereinten Nationen unterteilen den Verlauf der Fertilitätsrate in verschiedene Phasen – etwa, wenn sie langsamer wächst, abfällt und sich dann wieder erholt. Jedes Land wird basierend darauf, wie sich die Zahl der Geburten in den letzten Jahren entwickelt hat, in eine dieser Phasen eingeordnet. Anschließend modellieren die Fachleute rund 1000 mögliche künftige Verläufe. Den Median der Projektionen stellen die Vereinten Nationen als das wahrscheinlichste Szenario vor.

Die Forschungsgruppe des IIASA hingegen stützte sich nicht auf Daten und bisherige Trends, sondern befragte Experten. Rund 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, darunter Fachleute aus Wirtschaft, Demografie und Soziologie, prognostizierten die Fertilitätsraten für einzelne Länder für die Jahre 2030 und 2050, und zwar basierend darauf, wie sich verschiedene soziale, gesundheitliche und wirtschaftliche Faktoren ihrer Ansicht nach entwickeln würden. Manche der Schätzungen unterschieden sich beträchtlich: So reichten die vorausgesagten Fertilitätsraten für Indien beispielsweise von 1,5 bis 2,5 für das Jahr 2030 und von 1,1 bis 2,5 für 2050.

Insgesamt liegen die Prognosen des IIASA merklich unter den von der UN veröffentlichten Zahlen: So kommen die befragten Experten etwa zu dem Schluss, dass die Fertilität in jedem afrikanischen Land südlich der Sahara Ende des 21. Jahrhunderts unter dem Reproduktionsniveau von 2,1 liegen wird. Die Vereinten Nationen hingegen nehmen das nur für ein Drittel dieser Länder an.

## Unlogische Annahmen?

Das Team des IHME wiederum berücksichtigte die aktuellen Fruchtbarkeitsraten für seine Vorhersage erst gar nicht. Stattdessen verwendete die Gruppe die so genannte Kohortenfertilität oder endgültige Kinderzahl. Sie gibt an, wie viele Kinder eine Frau bis zum Alter von 50 Jahren geboren hat. Die Zahl unterscheidet sich subtil von der generellen Fertilitätsrate: Zum einen hängt sie weniger vom Alter ab, in dem die Frauen ihre Kinder gebären, zum anderen erholt sie sich nicht automatisch, nachdem sie auf ein niedriges Niveau gefallen ist.

Und noch etwas machte die dritte Gruppe grundsätzlich anders: Statt für spezifische Zeitpunkte in der Zukunft einen Wert für die endgültige Kinderzahl anzunehmen, arbeiteten die Fachleute anhand von echten Daten heraus, wie diese Kennziffer mit ihren zwei wichtigsten Treibern zusammenhängt – dem Bildungsniveau und der Verfügbarkeit von Kontrazeptiva. Daher konnten sie Länderdaten zu Bildung und Verhütung sowie deren wahrscheinliche Entwicklung in ihr Modell einfließen lassen und mussten keine Fruchtbarkeiten abschätzen.

Laut Christopher Murray, dem Leiter des Teams, macht das die Vorhersage verlässlicher und wertvoller. Denn dank der Methode könnten die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen testen, wie sich ihre Änderungen und Annahmen auswirken. So ließe sich mit dem Modell voraussagen, welchen Effekt es hat, wenn Mädchen länger zur Schule gehen oder die Menschen dank besserer Gesundheitsversorgung leichter an Verhütungsmitteln kommen. »Für die Politik sind solche Modelle mit kausa-

len Zusammenhängen viel nützlicher«, sagt Murray.

Zahlreiche Fachleute sind da anderer Meinung. Stuart Gietel-Basten, Demograf an der Hong Kong University of Science and Technology, hat zusammen mit Tomáš Sobotka, einem Bevölkerungsforscher am Vienna Institute of Demography, eine noch nicht begutachtete Methodenkritik der IHME-Studie veröffentlicht. Die Wissenschaftler heben darin auf »innere Inkonsistenzen, Diskrepanzen sowie unlogische und nicht plausible Trends« ab.

Beispielsweise nehmen die beiden den Irak in den Blick: Laut der Gruppe vom IHME wird das Land im Jahr 2100 die weltweit vierthöchste Lebenserwartung für Frauen aufweisen und in den folgenden Jahrzehnten riesige Mengen an Einwanderern willkommen heißen. Das sei höchst unwahrscheinlich, urteilen die Kritiker. Sobotka und Gietel-Basten haben außerdem einen von 170 Demografinnen und Demografen unterzeichneten Brief an das Medizinjournal »The Lancet« geschickt, in dem die IHME-Studie erschienen war. Der Brief wurde im August 2021 veröffentlicht.

»Ich sehe das deshalb mit großer Sorge, weil eine Vorhersage die Zukunft beeinflussen kann«, sagt Gietel-Basten. Werde für ein Land niedrige Fertilität, eine rasche Alterung und eine Stagnation der Bevölkerungszahlen prognostiziert, dann wollten Regierungen gegensteuern. »Als Reaktion darauf könnten sie beispielsweise den Zugang zur Familienplanung, zu Abtreibungen oder Sterilisationen einschränken«, befürchtet er.

Laut Kaneda haben die Autorinnen und Autoren der IHME-Studie nur einen geringen demografiewissenschaftlichen Hintergrund. Vielmehr sagten sie die Bevölkerungsentwicklung auf Grund von Methoden voraus, die sie einst entwickelt haben, um die »Global Burden of Disease« zu erstellen, eine regelmäßig erscheinende Gesundheitsstatistik.

Murray weist die Kritik zurück. Das Modell der Vereinten Nationen trage seinerseits »merkwürdige« Annahmen in sich, und die wissenschaftliche Gemeinschaft der Demografen sei

nicht bereit, Ideen von außerhalb ihrer Disziplin zu akzeptieren. Er bezweifelt, dass sich bestimmte Voraussagen der UN, etwa zur Bevölkerungsentwicklung in China, Korea oder Singapur, bewahrheiten werden.

In der Vergangenheit waren die Vereinten Nationen mit ihren Vorausschätzungen bemerkenswert erfolgreich. So prognostizierten sie 1968, dass die Weltbevölkerung 1990 bei 5,44 Milliarden liegen würde. Damit lagen sie weniger als 2 Prozent über der tatsächlichen Zahl von 5,34 Milliarden. 2010 lebten auf der Welt schätzungsweise 7 Milliarden Menschen, vorausgesagt hatte die Organisation zwischen 6,8 und 7,2 Milliarden. Für Bevölkerungszahlen in speziellen Ländern nutzen die Fachleute außerdem neue, bessere Datenquellen, um ihre historischen Aufzeichnungen zu aktualisieren, sagt Patrick Gerland, der die Abteilung Bevölkerungsfragen bei der UN leitet. Das werde die Modellierungen genauer machen und häufigere turnusmäßige Updates ermöglichen.

Die nächste UN-Prognose soll 2022 kommen. Ob sie ähnlich richtig liegt wie bisher oder ob die anderen Forschungsgruppen Recht haben, werden wir erst in einigen Jahrzehnten wissen.

**David Adam** war Redakteur bei der Zeitschrift »Nature« und ist heute Wissenschaftsjournalist in London.

## QUELLEN

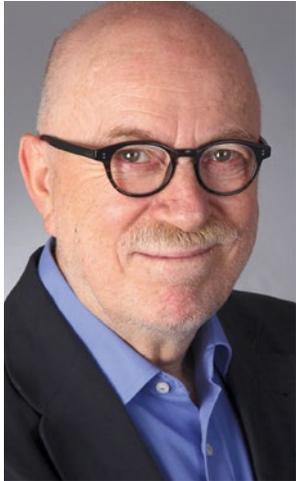
**Lutz, W. et al (Hrsg.):** Demographic and human capital scenarios for the 21st century. European Union, 2018

**Gietel-Basten, S., Sobotka, T.:** Uncertain population futures: Critical reflections on the IHME scenarios of future fertility, mortality, migration and population trends from 2017 to 2100. Vorabveröffentlichung auf SocArXiv, 23. September 2020

**Vollset, S.E. et al.:** Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study. The Lancet 396, 2020

## nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 597, S. 462–465, 2021



# SPRINGER'S EINWÜRFE PANDEMIE DER EINSAMKEIT

**Gegen die Ansteckung mit dem Covid-19-Virus ist soziale Distanzierung angesagt. Deren psychische Nebenwirkungen verdienen mehr Aufmerksamkeit.**

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

» [spektrum.de/artikel/1959628](https://spektrum.de/artikel/1959628)

Meine Wohnungsnachbarin engagiert sich in der Telefonseelsorge. Aus unseren Gesprächen weiß ich, dass diese karitative Einrichtung der beiden größten christlichen Kirchen den Beladenen jedes Glaubens oder Unglaubens Tag und Nacht Hilfe anbietet – durch geschultes, verständnisvolles Zuhören per Telefon oder neuerdings auch per Chat im Internet. Hin und wieder frage ich meine Nachbarin, wie sich die andauernde Pandemie in der Befindlichkeit der Anrufer widerspiegelt. Demnach zeichnet sich ein gewandeltes Bild ab: Anfangs häuften sich besorgte Fragen zu der neuen Seuche, doch nun dominieren Klagen über die grassierende Einsamkeit.

Diese anekdotische Einsicht wird durch eine Untersuchung erhärtet, die der Ökonom Marius Brühlhart von der Universität Lausanne und dem Centre for Economic Policy Research in London zusammen mit seinem Institutskollegen Rafael Lalive sowie mit Valentin Klotzbücher und Stephanie K. Reich von der Universität Freiburg durchgeführt hat. Das Team sammelte Daten von acht Millionen telefonischen Hilferufen aus Europa, den USA, China, Israel und dem Libanon, die zwischen 2019 und Anfang 2021 getätigt wurden (*Nature* 600, S. 121–126, 2021).

Gerade in Zeiten verschärfter sozialer Isolation ist die Analyse fernmündlicher Krisenberatungen der Königsweg, um zu einer zeitnahen Diagnose des seelischen Gesundheitszustands einer ganzen Gesellschaft zu gelangen. Dabei darf freilich nicht vergessen werden, dass sich im Datendunkel eine schweigende Mehrheit versteckt, die entweder stumm leidet oder halbwegs gut zurechtkommt – über deren Befinden man also nur spekulieren kann.

Jedenfalls zeigt die Studie einen deutlichen Zusammenhang zwischen Krankheitsausbrüchen und telefonischem Hilfsbedürfnis. Innerhalb von sechs Wochen nach dem Beginn einer landesweiten Infektionswelle erreichte die Anzahl der Anrufe ein Maximum, das

35 Prozent über dem vor der Pandemie üblichen Niveau lag. Dabei artikulierten die meisten Hilfe Suchenden ihre Furcht vor Ansteckung; zugleich wuchsen die Klagen über Vereinsamung durch soziale Distanzierung, gewissermaßen als Nebenwirkung der wichtigsten Maßnahme gegen drohende Infizierung.

Mit der Zeit gewöhnte man sich anscheinend einigermaßen an das Ansteckungsrisiko. Was blieb, war der Jammer des Alleinseins. Er übertönte viele der sonst üblichen Sorgen wie Partnerschaftsprobleme, psychische Beschwerden und Geldnöte.

Propos Finanzen. Im Gefolge der Pandemiewellen nahmen Anrufe, die mit Suizidgedanken einhergingen, merklich zu. Doch gerade die Häufigkeit solch ausnehmend dringender Hilfeschreie sank, sobald die Politik Maßnahmen zur Einkommenssicherung einleitete. Somit können das in Deutschland zügig bereitgestellte Kurzarbeitergeld sowie die – wenngleich oft allzu schleppend – gewährten Hilfgelder an Kleingewerbetreibende und Künstler in ihrer segensreichen Wirkung kaum überschätzt werden.

Geld sichert ja nicht nur die materielle Existenz, es ist außerdem ein Signal sozialer Wertschätzung. In der Hinsicht ist die Lage der Pflegenden besonders prekär. Sie sind privat genauso isoliert wie der Rest der Bevölkerung, werden aber obendrein beruflich fortwährend mit vulnerablen und mit mehr oder weniger schwer an Covid-19 erkrankten Mitmenschen konfrontiert. Wenn diese psychisch außerordentlich belasteten Berufszweige personell unterbesetzt und schlecht bezahlt bleiben, droht sich der Pflegenotstand zu perpetuieren.

Noch weiß niemand, wie lange die Pandemie andauern wird, und mit ihr die soziale Isolation. Wenigstens die materielle und damit auch ideelle Anerkennung der Menschen, die den Zustand mildern und auf sein Ende hinarbeiten, tut dringend not.



# PARASITISMUS ZOMBIE MIT SECHS BEINEN

Mit gezielten Stichen verwandelt die Juwelwespe wehrhafte Kakerlaken in hilflose Wirte für ihren Nachwuchs. Dazu muss sie sowohl ihr Gift als auch ihr Ei hochpräzise am Körper des Opfers platzieren. Neue Untersuchungen enthüllen, wie ihr das gelingt.



**Kenneth C. Catania** ist Professor für Biowissenschaften an der Vanderbilt University in Tennessee (USA). In seinen Studien zur vergleichenden Neurobiologie beschäftigt er sich mit tierischen Sinnessystemen.

» [spektrum.de/artikel/1959631](https://www.spektrum.de/artikel/1959631)



## AUF EINEN BLICK MAKABRES MARIONETTENSPIEL

- 1** Die Juwelwespe manipuliert das Nervensystem einer Kakerlake, um an dieser ein Ei abzulegen. Die schlüpfende Larve verzehrt die gelähmte Schabe und verpuppt sich in ihr.
- 2** Über die Platzierung des Eis selbst war bisher wenig bekannt. Sie muss äußerst genau erfolgen, damit die Larve eine Chance hat, durch eine Schwachstelle im Exoskelett der Kakerlake zu gelangen.
- 3** Nähere Untersuchungen haben nun aufgedeckt, dass die Wespe den Wirtskörper mit zusätzlichen Stichen zugänglich macht und ihren Hinterleib zum Ertasten der idealen Region verwendet.

**JUWELWESPE** Das aus den tropischen Gebieten der Alten Welt stammende Insekt (rechts im Bild) bedient sich der Amerikanischen Großschabe als Wirt für ihren Nachwuchs.

► »Sie scheinen immer noch nicht zu begreifen, womit Sie es zu tun haben: mit einem perfekten Organismus. Ich bewundere die konzeptionelle Reinheit. Geschaffen, um zu überleben. Kein Gewissen beeinflusst es.« So beschreibt der Androide Ash das von Regisseur Ridley Scott kreierte extraterrestrische Monster im Film »Alien«, der 1979 die Kinosäle füllte. Die Geschichte über ein außerirdisches Wesen, das sich an das Gesicht eines Besatzungsmitglieds heftet und diesem einen Embryo einpflanzt, der später, zu einer Bestie entwickelt, aus seinem Brustkorb hervorbricht, prägte eine ganze Generation von Sciencefiction-Fans. Fachsprachlich würde man das Alien als Parasitoiden bezeichnen, einen Organismus, der anders als die meisten Parasiten seinen Wirt letztendlich tötet.

Seit einiger Zeit teile ich Ashs Bewunderung über aus Wirtskörpern krabbelnde Parasitoiden in mancher Hinsicht. Meine Faszination gilt demjenigen Lebewesen auf der Erde, das dem fiktiven Alien wohl am nächsten kommt: der Juwelwespe *Ampulex compressa*. Sie verwandelt die Amerikanische Großschabe *Periplaneta americana* in einen regelrechten Zombie.

Ich arbeite als Neurobiologe an der Vanderbilt University im US-Bundesstaat Tennessee und halte jeden Herbst eine Vorlesung über das Gehirn und das Verhalten von Tieren. Passend zu Halloween präsentiere ich meinem Kurs gern etwas Unheimliches, um auf einprägsame Weise einige Grundlagen über das Nervensystem zu vermitteln. Als ich über die Juwelwespe zu dozieren begann, faszinierte mich

die Art zunehmend, und ich schaffte mir kurzerhand Exemplare für mein Labor an, um ihr Verhalten mit eigenen Augen zu sehen. Anfangs wollte ich lediglich ein paar Fotos und Videos für meine Vorlesung aufnehmen, aber schon bald ertappte ich mich dabei, wie ich das verblüffende Insekt selbst erforschte. In ihrer Eigenschaft als Parasitoid war die Juwelwespe zwar hinlänglich bekannt. Doch ich habe während meiner Experimente in den vergangenen Jahren herausgefunden, dass sie noch weitaus bemerkenswerter ist als bislang gedacht.

Jedes Weibchen muss zur Fortpflanzung einen nahrhaften Wirt für ihren Nachwuchs finden. Wie zahlreiche Arten von Parasitoiden ist auch die Wespe eine Spezialistin, für die nur ein einziger Organismus in Frage kommt, in ihrem Fall die Amerikanische Großschabe. In der Biologie zollt man der Juwelwespe wegen ihrer Angriffstaktik Respekt. Diese untersucht beispielsweise Frederic Libersat von der israelischen Ben-Gurion-Universität des Negev seit nunmehr gut zwei Jahrzehnten. Alle Befunde zusammengenommen ergibt sich eine Geschichte wie aus der Sciencefiction.

Die Juwelwespe bedient sich einer unglaublich differenzierten, geradezu neurochirurgischen Strategie. Wenn ein

**TÖDLICHE ENTWICKLUNG** Die Larve der Juwelwespe frisst die lebendige Schabe von innen auf ① und bricht schließlich als ausgewachsenes Insekt aus ihrem Körper hervor ②.

ALAMY / FIPA / EMANUELE BIGGI



Weibchen auf eine Kakerlake trifft, sticht sie ihr Opfer zunächst in einen Teil des Zentralnervensystems, das so genannte Prothorakalganglion, um es zu lähmen. Die Nervenstruktur beherbergt die für die Bewegungen der Vorderbeine zuständigen Motoneurone. Das Wespengift hemmt diese durch die darin enthaltene Gamma-Aminobuttersäure, einen inhibitorischen Neurotransmitter. Das paralyisiert die Beine vorübergehend und hindert die Schabe daran, ihren Kopf vor dem nächsten Stich zu schützen. Den dirigiert die Wespe durch weiche Häute am Hals geradewegs in das Gehirn. Auf heimtückische Weise bewirkt die zweite Giftdosis, dass sich die Kakerlake von einem heftig kämpfenden Gegner in einen fügsamen Wirt verwandelt.

### Vom wachsamem Insekt zur lebenden Speisekammer

Von da an geht es mit der Kakerlake ziemlich rasch bergab. Das beim Stich ins Gehirn injizierte Gift enthält den Neurotransmitter Dopamin, der die Schabe veranlasst, ihre Beine und Fühler unentwegt zu putzen, obwohl sie eigentlich einen Fluchtversuch unternehmen sollte. In der Zwischenzeit hält die Wespe nach einer Höhle Ausschau, in der sie ihr Opfer zusammen mit ihrem Ei unterbringen kann. Hat sie einen passenden Ort gefunden, kehrt die Wespe zurück und verfährt in einer Weise mit der Schabe, die selbst in einem Horrorfilm übertrieben anmuten würde. Sie ergreift eine der empfindlichen Antennen und beißt sie fast ihrer kompletten Länge nach ab, so dass lediglich ein blutiger Stumpfen zurückbleibt. Die zweite Antenne wird auf diesel-

be Art verkürzt. Daraufhin benutzt die Juwelwespe beide als Strohhalme und trinkt das Blut ihres Opfers. Das ist eine willkommene Nahrungsergänzung, die nach dem erbitterten Kampf frische Energie und Nährstoffe liefert. Als Nächstes packt die Wespe einen Antennenstummel, läuft rückwärts und zieht an ihm die Kakerlake vorwärts, die ihr brav wie ein Hund an der Leine folgt. Wenn beide das Innere der Grabkammer erreicht haben, legt die Wespe ein winziges Ei und klebt es an einem der beiden mittleren Schabenbeine fest. Dann verlässt sie die Kammer und verschließt den Eingang sicher mit herumliegenden Zweigstücken und Steinen.

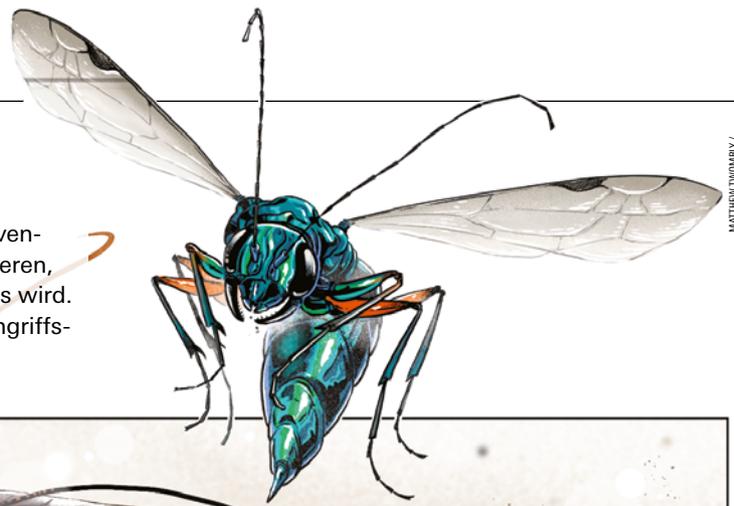
Das Vorgehen ist ein ganz erstaunliches Produkt der Evolution. Es ist generell nicht gerade leicht, scheue Beutetiere zu verfolgen, zu fangen und zu töten. Die Juwelwespe steht jedoch einer weitaus größeren Herausforderung gegenüber: Sie muss ihr Opfer gefangen nehmen, damit es ihrer Larve nach dem Schlüpfen als lebende Speisekammer dient. Dazu ist es nötig, ihr Gift zielgenau an zwei Punkten des Nervensystems zu injizieren – in den gepanzerten Körper eines Insekts, das von Natur aus vor Bedrohungen flüchtet. Kein weiteres bekanntes Tier verfügt über so ausgefeilte Methoden zur Manipulation des Nervensystems eines anderen Lebewesens. Und damit ist die Geschichte noch längst nicht zu Ende.

Bei »Alien« hat sich vermutlich niemals jemand im Publikum näher dafür interessiert, welche Abenteuer der kleine Parasitoid während seiner Entwicklung wohl durch-

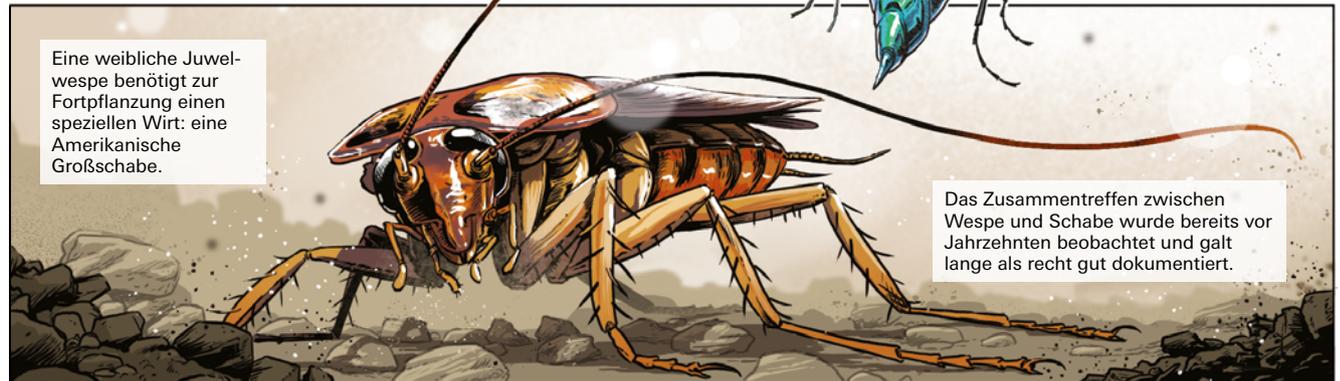


## Wespe gegen Schabe

Die Juwelwespe hat eine ausgefeilte Methode, das Nervensystem der Amerikanischen Großschabe so zu manipulieren, dass diese zu einer Nahrungsquelle für ihren Nachwuchs wird. Jüngste Forschungsarbeiten haben enthüllt, dass die Angriffstaktik sogar noch komplexer ist als bislang gedacht.



MATTHEW TWOMBLY /  
SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2021



Eine weibliche Juwelwespe benötigt zur Fortpflanzung einen speziellen Wirt: eine Amerikanische Großschabe.

Das Zusammentreffen zwischen Wespe und Schabe wurde bereits vor Jahrzehnten beobachtet und galt lange als recht gut dokumentiert.



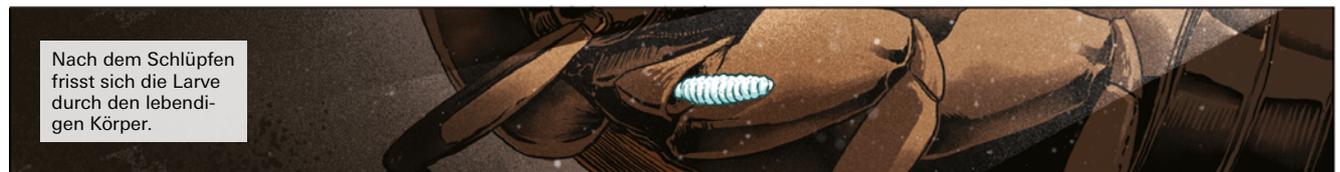
Die Wespe sticht eine Schabe und injiziert ein lähmendes Gift.



Die Schabe wird in eine Höhle dirigiert.



Nach der Eiablage auf dem gefügigen Wirt versiegelt die Wespe den Ausgang.



Nach dem Schlüpfen frisst sich die Larve durch den lebendigen Körper.



Im Inneren ernährt sie sich von der Schabe und spinnt ihren Kokon.



Nach 40 bis 60 Tagen bricht eine ausgewachsene Wespe aus der Hülle hervor.

Laut früheren Studien sticht die Wespe die Kakerlake während ihres Angriffs zweimal:

Der erste Stich erfolgt in einen Teil des zentralen Nervensystems, das Prothorakalganglion **1**, um die Vorderbeine der Schabe zu lähmen. Der zweite Stich zielt direkt ins Gehirn **2** und verwandelt die Schabe in einen Zombie.

Neue Forschungsarbeiten haben jedoch weitere Stiche der Wespe enthüllt.

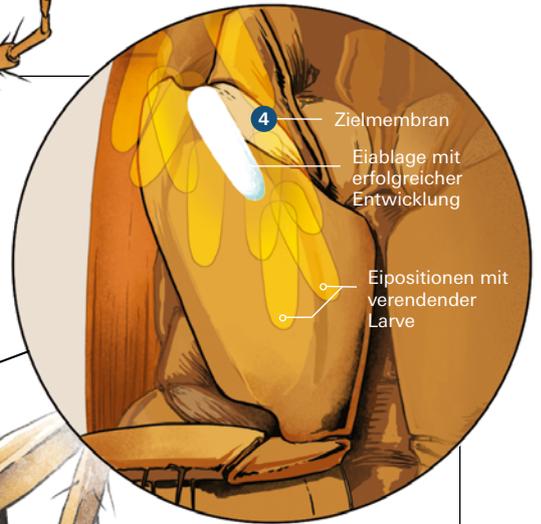
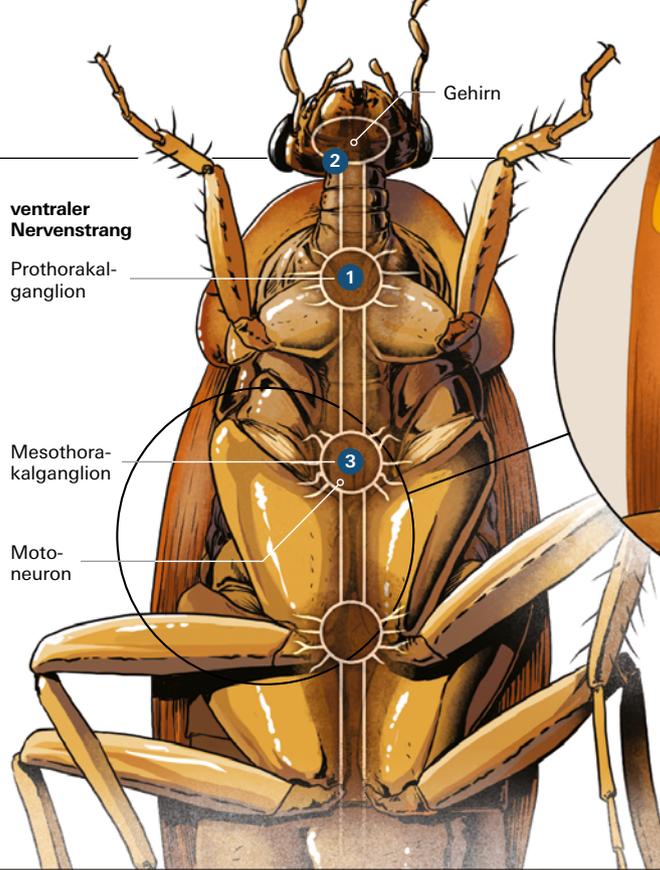
Unmittelbar vor der Eiablage injiziert sie Gift in einen anderen Teil des Zentralnervensystems, das Mesothorakalganglion **3**. Dabei werden Motoneurone aktiviert, die eine Streckung eines Mittelbeins veranlassen und dadurch die optimale Position für das Ei frei geben. Dessen richtige Platzierung ist für das Überleben der Wespenlarve entscheidend.

**ventraler Nervenstrang**

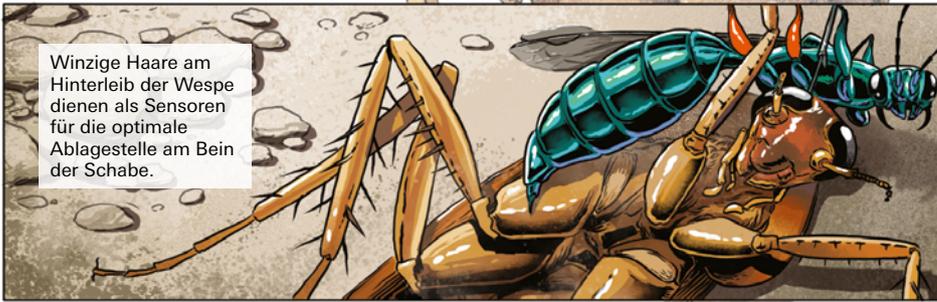
Prothorakalganglion

Mesothorakalganglion

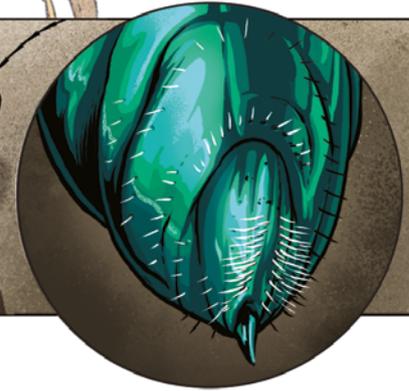
Motoneuron



Nach dem Schlüpfen muss die hilflose Larve eine Schwachstelle im Schabenpanzer finden, eine weiche Membran am Ansatz des Mittelbeins **4**, durch die sie sich beißen und ins Innere des Wirts gelangen kann.



Winzige Haare am Hinterleib der Wespe dienen als Sensoren für die optimale Ablagestelle am Bein der Schabe.



Die vielversprechendste Gegenstrategie der Schabe ist es, die Wespe gar nicht erst an sich herankommen zu lassen.

Mit ihren empfindlichen Antennen verfolgt sie die Wespe genau.

Zudem nutzt sie ihre Größe und Stärke zu ihrem Vorteil aus.



Sie dreht sich schnell von den Mundwerkzeugen der Wespe weg.



Sie wehrt den Angriff mit ihren stacheligen Beinen ab.



Auf fast gestreckten Beinen stehend, wahrt die Kakerlake Abstand und führt genau im richtigen Augenblick einen überraschenden Tritt gegen den Kopf der Wespe aus.

Mit ein paar einfachen Manövern kann die als anpassungsfähige Überlebenskünstlerin bekannte Kakerlake eine der raffiniertesten Räuberinnen abwehren, die von der Natur hervorgebracht wurden.



machen musste, bis er endlich aus dem Brustkorb des Crewmitglieds hervorbrechen konnte. Ähnliches gilt für Spekulationen über das Schicksal der Juwelwespenlarve. Sogar Fachleute, die sich näher mit dem Insekt beschäftigen, lassen es für gewöhnlich bei dem Moment bewenden, in dem die Wespe die Höhle mit der Schabe versiegelt. Man nimmt an, dass die Larve nach einiger Zeit ihr winziges Ei verlässt, eine empfindliche Stelle findet, an der sie knabbern und die Kutikula (das Außenskelett) durchbohren kann, um die Kakerlake anschließend bei lebendigem Leib von innen auszuhöhlen und später triumphal aus ihr hervorzugehen.

Aber bis dahin ist ihr Leben doch nicht ganz so einfach. Das fand ich heraus, als mich andere Projekte in Beschlag nahmen und deswegen meine Wespenkolonie beinahe ausstarb. Nach dem Zwischenfall kümmerte ich mich intensiv um jede einzelne Larve, in der Hoffnung, die Population irgendwann mit genügend Individuen zu stabilisieren. Sie hat es letzten Endes zwar überstanden, aber ich lernte aus der Begebenheit, dass die kleinen, weichhäutigen Larven im Gegensatz zu den beängstigend geschickten cineastischen »Facehuggern« nicht besonders mobil sind. Eine Wespenlarve bewegt sich – wenn überhaupt – lediglich langsam und kann ausschließlich an einer bestimmten dünnen Membran des Kakerlakenkörpers mit dem Fressen beginnen. Wenn sie ihr Ziel um den Bruchteil eines Millimeters verfehlt, stirbt sie. In dem Fall erholt sich die so dem Tod entgangene Schabe nach zirka einer Woche.

### **Abenteuerliche Intimrasur bei einem mikroskopisch kleinen Insekt**

Das setzt die Wespenmutter beträchtlich unter Druck: Damit ihr Nachwuchs überlebt, muss sie genau die richtige Position für die Eiablage identifizieren. Doch wie schafft die Wespe das? Um dieser Frage nachzugehen, baute ich mir eine spezielle Apparatur: Ich befestigte ein Stereomikroskop kopfüber unter einem Tisch und präparierte darauf eine Kammer mit durchsichtigem Boden als Höhle für die Wespe. Mit der Vorrichtung gelang es mir, den gesamten Prozess der Eiablage aus nächster Nähe zu filmen. Das Video zeigte, wie die Wespe das Bein der Schabe mit der Spitze ihres Hinterleibs gründlich inspizierte, um dann ihr Ei unmittelbar neben einer verwundbaren Stelle im Panzer abzulegen. Wie alle Insekten besitzen auch Kakerlaken ein hartes Exoskelett, das jedoch – ähnlich wie eine mittelalterliche Rüstung – an den Verbindungsstellen Schwachpunkte aufweist. Als ich mir die Spitze des Wespenhinterleibs unter einem Rasterelektronenmikroskop genauer anschaute, entdeckte ich eine Ansammlung kleinster Härchen, fast wie ein Satz winziger Schnurrhaare. Könnten dies womöglich die Sensoren sein, mit deren Hilfe die Wespe den geeigneten Platz für ihr Ei findet?

Um das zu überprüfen, betäubte ich einige Tiere und stutzte ihnen die Haare. Das war eine recht heikle Prozedur, die ich nur durchführen konnte, indem ich die benebelte Wespe mit zwei Fingern festhielt, während ich ihr Hinterteil gleichzeitig mit einem ultrascharfen Obsidianskalpell rasierete. Die abenteuerlich klingende Methode funktionierte letztlich, und die Ergebnisse bestätigten meinen Verdacht:

Enthaarte Wespen hatten Schwierigkeiten, ihr Ei am richtigen Ort zu hinterlassen. Meine Beobachtungen hatten nicht allein einen wichtigen Tastmechanismus für die Ablage des Eis enthüllt, sondern auch untermauert, dass dessen exakte Positionierung von zentraler Bedeutung ist. Eine am falschen Ort geschlüpfte Larve verendete normalerweise, bevor sie den wunden Punkt der Kakerlake fand.

Während ich mich mit den sensorischen Haaren der Wespe und dem Überleben ihrer Larve beschäftigte, machte ich eine weitere, völlig unerwartete Entdeckung. Bevor ein Wespenweibchen den idealen Platz für sein Ei fand, prüfte es mit der ausgestreckten Spitze seines Hinterleibs wiederholt eine Stelle an der Bauchseite der Schabe unmittelbar vor dem mittleren Beinpaar. Als Reaktion darauf streckte die Kakerlake häufig das Mittelbein auf der Seite der Wespe aus – als ob sie das Stochern an ihrer Unterseite störte.

Zunächst konnte ich mir auf das Verhalten keinen Reim machen. Es wirkte wie ein Nebenschauplatz, der die Wespe von ihrer Eiablage und mich von meinen Untersuchungen ablenkte. Aus Neugier entschloss ich mich schließlich dennoch, das Herumtasten unter einer stärkeren Vergrößerung genauer zu betrachten. Zu meinem Erstaunen stellte ich fest, dass die Wespe nicht bloß ziellos herumstocherte. Stattdessen sah ich, wie sich der ausgefahrene Stachel unter die zum Teil transparente Kutikula schob. Aber wie konnte das sein? Jeder, der die Juwelwespe untersucht, weiß, dass sie die Kakerlake zweimal sticht – einmal ins Prothorakalganglion, um die Vorderbeine zu lähmen, und einmal ins Gehirn, um aus der Schabe einen Zombie zu machen. Vielleicht hatte ich eine verwirrte Außenseiterin vor mir, die sich ungewöhnlich verhielt.

Ich entschied mich, meinen Fokus zu verändern – sowohl buchstäblich als auch im übertragenen Sinn – und der Beobachtung auf den Grund zu gehen. Schon bald fand ich heraus: Jede weibliche Juwelwespe sticht vor der Eiablage dreimal in die mittlere Körperregion der Kakerlake, und zwar unterhalb eines bestimmten Abschnitts ihres Panzers, der als Basisternum bezeichnet wird. Die Struktur liegt unmittelbar über dem Mesothorakalganglion, einem weiteren Element des zentralen Nervensystems. Der allererste Wespenstich, der zu Beginn der Attacke die Vorderbeine der Schabe lähmt, zielt auf das Prothorakalganglion. Im Mesothorakalganglion befinden sich Motoneurone, die für die mittleren zwei Beine der Kakerlake zuständig sind und von denen die Wespe eines als Ablageort für ihr Ei auswählen wird. Ich bemerkte weiterhin, dass die merkwürdige Beinstreckung nur wenige Sekunden nach den zusätzlichen Stichen erfolg-

## **Jede Wespe sticht vor der Eiablage nicht nur zwei-, sondern dreimal**

# Manche Kakerlaken rüsten sich zum Kampf

te. Anscheinend veranlassten diese die Kakerlake dazu, ihr Bein zu bewegen. Könnte der Ablauf womöglich ein weiterer Aspekt der Kontrollausübung über die Schabe sein?

Die Möglichkeit bestand durchaus, doch wie konnte ich feststellen, ob die Wespe tatsächlich ins Mesothorakalganglion vordrang, das tief im Inneren der Kakerlake liegt? Eine ähnliche Frage hatte man sich bereits im Zusammenhang mit dem ersten Stich ins Prothorakalganglion gestellt und lange Zeit kontrovers diskutiert, bis Libersat und sein damaliger Institutskollege Gal Haspel das Rätsel 2003 schließlich mit einem genialen Versuchsansatz lösten. Sie markierten die Wespe radioaktiv – und damit ihr Gift. Nach dem Stich konnten die beiden Forscher die strahlenden Stoffe im Prothorakalganglion der Schabe nachweisen.

Ich hatte weder den Mut, mit radioaktiven Wespen zu experimentieren, noch Interesse daran, den ganzen Papierkram zu erledigen, der mit der dafür notwendigen Genehmigung verbunden gewesen wäre. Zum Glück fand ich einen direkteren Weg für einen Einblick in den Ort der Giftinjektion. Ich anästhesierte eine Kakerlake und schnitt ein kleines Fenster in ihre Kutikula, so dass das Ganglion zu sehen war. Dann erhöhte ich die Vergrößerung an meinem Mikroskop und schaute der Wespe beim Angriff zu. So ein Ansatz hätte beim Verfolgen des ersten Wespenstichs übrigens nicht funktioniert, da dieser während des erbitterten Zweikampfs zwischen Schabe und Wespe stattfindet. Nun aber war klar zu erkennen: Der Stich zielte ins Mesothorakalganglion. Er richtete sich obendrein auf die Seite des Ganglions, die das Bein steuert, an dem die Wespe ihr Ei festklebt. Offensichtlich enthält das bei diesen späteren Stichen injizierte Gift eine Komponente, die Motoneurone aktiviert und dadurch die Streckung veranlasst.

## Für eine wehrhafte Kakerlake ist bei einer Begegnung noch nicht alle Hoffnung verloren

Aber wie hilft das gestreckte Kakerlakenbein der Wespe bei ihrer Fortpflanzung? In dem Fall lag die Antwort auf der Hand: Bei gebeugtem Mittelbein ist die Wespe außer Stande, die Körperoberfläche der Schabe mit ihren sensorischen Härchen zu erkunden, um die geeignete Position für ihr Ei zu finden, an der die Larve später knabbern und ins Innere der Schabe vordringen kann. Indem sie den neuronalen Schaltkreis für die Beinstreckung kontrolliert, nimmt die Wespe der Schabe die letzte verbliebene Möglichkeit, ihr grausiges Schicksal abzuwenden. Bislang ist unbekannt, auf welche Weise das Gift die Reaktion hervorruft; wir gehen davon aus, dass die Zielneurone durch den Neurotransmitter Azetylcholin aktiviert werden. Jener ist im Gift vieler Wespen enthalten. Dennoch wird sich erst bei weiteren Untersuchungen herausstellen, ob diese einfache Erklärung zutrifft oder womöglich eine andere chemische Komponente beteiligt ist.

Inzwischen sollte meine Faszination für die Juwelwespe gut nachvollziehbar sein. Das Insekt hat im Lauf der Evolution das notwendige Verhalten und einen passenden Giftcocktail entwickelt, um nacheinander drei Punkte im Nervensystem der Kakerlake ins Visier zu nehmen. Jeder Stich hat einen anderen Effekt, und jeder macht das Opfer zunehmend gefügiger. Am Ende ist eine normalerweise schwer zu fassende und wehrhafte Kakerlake bei lebendigem Leib einer kleinen, schwächtigen Larve ausgeliefert. Insgesamt sieht die Lage für die Schabe also düster aus. Im Film hingegen war nicht alle Hoffnung verloren – das Alien traf auf die ihm ebenbürtige Gegnerin Ellen Ripley, glänzend verkörpert von Sigourney Weaver. Was passiert in der realen Welt, falls eine Wespe plötzlich auf die Ripley unter den Kakerlaken trifft?

Wenn die Schabe von der Wespe überrascht wird oder wegläuft, gewinnt die Wespe leicht die Oberhand, indem sie sich ihr Opfer sofort oder bei einer Verfolgungsjagd im schnellen Flug schnappt. Ist es der Wespe gelungen, sich mit ihren Mundwerkzeugen an der Schabe festzubeißen, kann sie für gewöhnlich in Sekundenschnelle den ersten Stich setzen, der die Vorderbeine lähmt. Manche Kakerlaken zeigen allerdings ein besonderes Verhalten. Sie halten wachsam Ausschau und tasten mit ihren langen Antennen nach einer möglichen Bedrohung. Nähert sich eine Wespe, laufen sie nicht davon. Stattdessen rüsten sie sich zum Kampf, indem sie ihre langen Beine ausfahren und sich in voller Höhe aufrichten. In dieser »Stelzenhaltung« ähnelt die Kakerlake einem Fechter in der En-garde-Position. Tatsächlich dient die Positur einem ähnlichen Zweck: Sie schafft einen Abstand zwischen Schabekörper und Wespe und macht ihn damit zu einem schwerer zu erreichenden Ziel. Zugleich bilden die Kakerlakenbeine eine geschlossene Front aus spitzen Stacheln. Die beiden Kontrahenten umkreisen einander, während sie abwechselnd einen Vorstoß wagen oder zurückweichen. Oft macht die Wespe einen Ausfallschritt in Richtung Schabe, die hin und her tänzelt, um den Mundwerkzeugen zu entgehen.

Bei Beobachtungen solcher Zusammentreffen offenbarte sich mir (und wohl auch der Wespe) die wirkliche Überraschung in Form kräftiger Tritte durch die Kakerlake. Nicht selten landeten sie auf dem Kopf und katapultierten die Wespe durch die Luft, bis sie gegen das nächstgelegene Objekt krachte. Sie rappelte sich wieder auf, säuberte sich mit einem Putzreflex und setzte den Angriff fort – zumindest nach dem ersten Mal. Gelangen der Schabe jedoch mehrere Treffer, brach die Wespe gewöhnlich ihre Attacke ab. Wie es scheint, gilt für Kakerlaken und für Actionfilme die gleiche Erfolgsstrategie: auf der Hut sein, nicht weglaufen und immer auf den Kopf des Gegners zielen. ◀

## QUELLEN

**Catania, K. C.:** Getting the most out of your zombie: Abdominal sensors and neural manipulations help jewel wasps find the roach's weak spot. *Brain, Behavior and Evolution* 95, 2020

**Haspel, G., Libersat, F.:** Wasp venom blocks central cholinergic synapses to induce transient paralysis in cockroach prey. *Journal of Neurobiology* 54, 2003

# INTERVIEW EIN REVOLUTIONÄRES MOLEKÜL

**Der deutsche Chemiker Benjamin List erhielt zusammen mit David MacMillan den Chemie-Nobelpreis 2021. Wir sprachen mit List über seine Entdeckung, ihre Bedeutung für die Medikamentenentwicklung und wie sich mit Diamanten der Klimakrise beikommen ließe.**

»spektrum.de/artikel/1959634

▶ Bis Anfang der 2000er Jahre gab es im Prinzip zwei Möglichkeiten, eine chemische Reaktion zu Wege zu bringen oder zu beschleunigen – also zu katalysieren: Entweder bediente man sich eines Enzyms oder man nutzte ein Molekül auf Metallbasis. Doch dann legten zwei Forscher, Benjamin List und David MacMillan, unabhängig voneinander den Grundstein für ein ganz neues Feld der Chemie: die asymmetrische organische Katalyse. Ihre Idee war es, statt komplexer Enzyme oder giftiger Metallverbindungen organische Moleküle als Reaktionsbeschleuniger einzusetzen. Diese sind im Wesentlichen aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff aufgebaut und können darüber hinaus noch Stickstoff, Schwefel oder Phosphor enthalten. List und MacMillan bewiesen, dass bereits einfache solcher Verbindungen komplizierte Reaktionen antreiben können. Wichtig dabei: Wählt man das Molekül geschickt aus, dann entsteht in der Reaktion nur eine von zwei spiegelbildlichen Varianten der Zielsubstanz. Das ist entscheidend, denn solche Spiegelbilder – Enantiomere genannt – haben oft unterschiedliche Wirkungen, etwa auf den menschlichen Organismus. Eine asymmetrische Katalyse bedeutet, dass bevorzugt eine der spiegelbildlichen Varianten entsteht. Benjamin Lists erster Katalysator war dabei ein Molekül, das wir alle im Körper haben: die Aminosäure Prolin.

**»Spektrum«: Herr List, wenn ich Sie Anfang Oktober 2021 gefragt hätte, wer in dem Jahr den Chemie-Nobelpreis bekommt: Auf wen hätten Sie getippt?**

**Benjamin List:** Ich hätte auf Katalin Karikó getippt, sie hat die mRNA-Vakzine maßgeblich miterfunden, zusammen mit Drew Weissman vielleicht. Sie wäre meine Favoritin gewesen.

**Jetzt haben Sie ihn bekommen, herzlichen Glückwunsch! Sie haben eine kleine Aminosäure namens Prolin als Katalysator getestet. Wann hatten Sie dabei zum ersten Mal das Gefühl, dass Sie etwas Bedeutendem auf der Spur sind?**

Das allererste Experiment, das ich gemacht habe, hat gleich geklappt und zur ersten Publikation geführt. Es war das erste unabhängige Experiment, das ich in meinem Leben überhaupt durchgeführt habe.

**Dass es gleich funktioniert, ist ja eher selten in der Chemie.**

Ja, das ist absolut verrückt. In dem Moment, in dem ich gesehen habe, dass die Reaktion funktioniert, dachte ich: Wow – das könnte wirklich etwas Großes werden. Denn dann hat auf einmal alles zusammengepasst. Es war ja ein rational designtes Experiment: Ich hatte mir genau überlegt, wie Prolin diese Reaktion katalysiert. Wenn das dann klappt, ist das einfach toll und wirklich befriedigend.

**Sie haben sich also erst überlegt, wie es funktionieren könnte, und sind nicht durch Ausprobieren darauf gekommen?**

Genau. Wenn wir ehrlich sind, verstehen wir die Chemie nicht wirklich. Weil Moleküle und erst recht Reaktionen zu komplex sind, um sie vollständig quantenmechanisch vorauszuberechnen, besteht unsere Wissenschaft aus viel Ausprobieren. Doch bei diesem Experiment war es anders. Wir haben zuvor mit katalytischen Antikörpern gearbeitet, das heißt mit Antikörpern, die chemische Reaktionen antreiben. Als ich als Postdoc ans Scripps Research Institute in Kalifornien kam, wussten wir nicht genau, wie sie funktionieren und warum. Ich habe mir das dann als Allererstes genau angeschaut. Wir hatten gerade eine Röntgenstruktur-



**WIRTSCHAFTSFAKTOR**  
Katalyse trägt etwa zu einem  
Drittel zum weltweiten  
Bruttosozialprodukt bei. Kein  
Wunder: Kaum ein  
chemisches Industrieverfahren  
läuft ohne Katalysator.

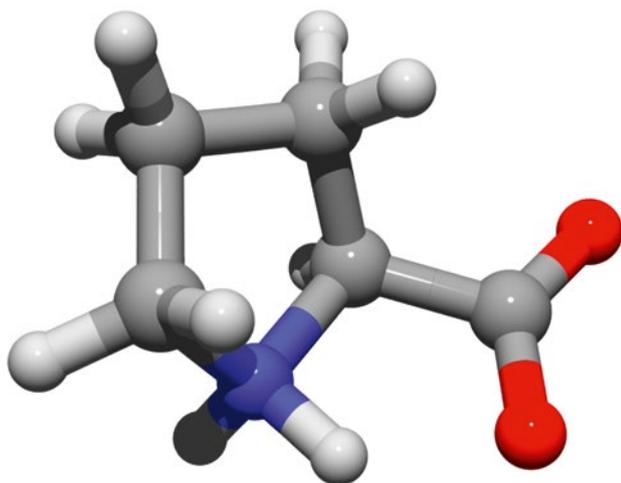
analyse der Antikörper durchgeführt und kannten dadurch das Reaktionszentrum. Es ist allerdings schwierig, Antikörper kristallografisch zu analysieren, weil sie nicht ohne Weiteres kristallisieren und die Auflösung nicht gut ist. Wir wussten also nicht hundertprozentig genau, was vor sich geht. Doch es sah so aus, als wären im aktiven Zentrum des Antikörpers zwei chemische Gruppen beteiligt: eine Aminogruppe und eine Säuregruppe. Daraufhin habe ich mir einen Mechanismus überlegt, der im Rückblick relativ trivial, aber auch wunderschön ist: Jeder einzelne Schritt wird durch diese beiden funktionellen Gruppen katalysiert. Wie wäre es also mit einer Aminosäure als Katalysator?

### Und dann haben Sie sich die Aminosäure Prolin ausgesucht?

Schon Ende der 1960er Jahre wurde in einem Patent sowie in Publikationen von Prolin als Katalysator berichtet. Industrieunternehmen wollten damit Steroide herstellen. Das Verrückte war jedoch: Der Mechanismus war komplett unverstanden. Er blieb es auch bis zum Jahr 2000! Bis zu unserem Experiment war völlig unklar, wie es diese Reaktion katalysiert. Rückblickend würde ich sagen, dass es mehr oder weniger eine Zufallsentdeckung war, unverstanden und nicht weiter verfolgt. Ich kam aber von der ganz anderen Seite, habe versucht, den Mechanismus zu verstehen, und mich darauf basierend gefragt: Kann ich nicht einfach kleine Moleküle einsetzen, die die Funktionalitäten des Enzyms oder des katalytischen Antikörpers haben?

**Sowohl Sie als auch Ihr Mit-Laureat David MacMillan kamen auf Amine – das sind grob gesagt organische Moleküle mit einer  $\text{NH}_2$ -Gruppe –, und zwar von entgegengesetzten Polen: Er arbeitete mit Metallverbindungen, Sie mit Enzymen, und trotzdem haben Sie beide schließlich Amine ausgewählt. Warum sind ausgerechnet sie so gut geeignet für die Katalyse?**

**DIE AMINOSÄURE PROLIN: Jeder Mensch trägt sie in sich (grau: Kohlenstoff, hellgrau: Wasserstoff, blau: Stickstoff, rot: Sauerstoff).**



BENJAMIN LIST, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KOHLENFORSCHUNG

Unsere Inspiration kam von den katalytischen Antikörpern. Wie ein Amin mit den umgesetzten Verbindungen reagiert und welche Zwischenstufen sich dabei bilden, war in der Enzymforschung bekannt. Wir synthetischen Chemiker haben uns erst damit befasst, als Leute von unserem Fach mit katalytischen Antikörpern ganz gezielt bestimmte Moleküle hergestellt haben. Ich glaube, dass diese Arbeiten sowohl mich als auch Dave MacMillan inspiriert hatten. Das war die eine Komponente.

Die andere kam für mich von dem Chemiker Emil Knoevenagel: Er hat im 19. Jahrhundert Amine und Aminsalze als Katalysatoren eingesetzt. Es ist absolut faszinierend, wie er schon zu dieser Zeit mechanistisch darüber nachgedacht hat. Es gibt eine berühmte Reaktion, die nach ihm benannt ist, und sie ist bis heute eine der wichtigsten Reaktionen, um Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen aufzubauen. Sie wird technisch eingesetzt, weil sie so umfassend und allgemein funktioniert. Diese Reaktivität wurde aber in der Literatur nicht richtig als Katalyse wahrgenommen, denn wir Chemiker haben dafür immer Metalle als essenziell angesehen.

### Sie haben also Aminosäuren eingesetzt und damit im Prinzip zwei Arten der Katalyse betrieben: durch Amine und durch Säuren.

Wichtig ist bei dem Mechanismus, den ich vorhin beschrieben habe, dass die Aminogruppe und die Säuregruppe beide beteiligt sind. In meinem Labor machen wir heute fast nur noch asymmetrische Säurekatalyse und weniger Aminokatalyse. Das ist so ein faszinierendes Feld, weil Säuren quasi fast alle Reaktionen antreiben können, die überhaupt katalysierbar sind. Und zwar, weil die einzige Bedingung für ein Substrat der Säurekatalyse ist, dass es Elektronen enthält. Und die ist bei allen Stoffen gegeben.

### Die Säuren, die Sie dabei einsetzen, sind häufig recht komplex. Geht es bei der Organokatalyse nicht unter anderem darum, möglichst einfache, kleine Moleküle zu verwenden?

Es ist nicht grundsätzlich von Vorteil, wenn ein Molekül klein ist, sondern das kommt auf die Kriterien an. Ein Katalysator wird in der Reaktion ja nicht verbraucht, sondern man kann ihn zurückgewinnen, und das funktioniert mit den Säuren oft sehr gut. Man kann sie sogar an eine feste Phase anbinden: Wir haben zum Beispiel Textilkatalysatoren hergestellt, indem wir den Katalysator in das Textil imprägniert haben. Das Resultat kann man wie einen Teebeutel in die Lösung halten, die Reaktion durchführen und ihn wieder herausnehmen. Insofern ist nichts fundamental dagegen einzuwenden, komplexe Katalysatoren einzusetzen. Die Frage ist eher, wie teuer sie sind, wenn man sie technisch einsetzen will. Andere Fragen sind: Wie häufig katalysieren sie eine Reaktion? Wie schwierig sind sie herzustellen? So kann man argumentieren, doch die Größe an sich ist kein Problem.

### Oft heißt es, organische Katalyse sei besonders umweltfreundlich.



FRANK THUMEN FÜR MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KOHLENFORSCHUNG

## Prof. Dr. Benjamin List

Jahrgang 1968, promovierte 1997 an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt. Als Postdoc forschte er anschließend am Scripps Research Institute in La Jolla, Kalifornien, zu katalytischen Antikörpern. Dort legte er den Grundstein für die asymmetrische organische Katalyse. 1999 wurde er Assistenzprofessor und wechselte 2003 als Forschungsgruppenleiter an das Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr, wo er seit 2005 Direktor der Abteilung Homogene Katalyse ist. 2021 erhielt er mit David MacMillan den Nobelpreis für Chemie.

Da wäre ich vorsichtig. Die Aminosäure Prolin ist wunderbar, weil man sie essen kann. Der Körper stellt sie sogar selbst her, das Molekül ist ungiftig! Das ist bei den eingesetzten Säuren allerdings nicht so – ich weiß nicht genau, wie toxisch sie sind, aber irgendwann stellt sich die Frage.

### **Inwiefern kann die organische Katalyse denn helfen, chemische Herstellungsverfahren nachhaltiger und umweltverträglicher zu machen?**

Katalyse selbst macht Prozesse immer nachhaltiger und umweltfreundlicher, weil der Katalysator wiederverwendet werden kann. Insofern ist jede Katalyse besser als so genannte stöchiometrische Reaktionen, bei denen aus den Reagenzien Nebenprodukte entstehen, die dann zu entsorgen sind. Daher ist Katalyse als solche bereits eine Schlüsseltechnologie für die Menschheit. Wie bedeutend sie ist,

habe ich erst realisiert, als ich kürzlich gelernt habe, dass sie zu einem Drittel zum weltweiten Bruttosozialprodukt beiträgt. Das sind Billionen! Es gibt, glaube ich, keine Technologie auf der Welt, die wichtiger ist als die Katalyse. Nicht das Internet und auch nicht die Landwirtschaft, ist das nicht unglaublich?

### **Ein Drittel des Bruttosozialprodukts?**

Das liegt natürlich daran, dass riesige Mengen an Materialien – alles Mögliche, was wir so brauchen – mit Katalysatoren hergestellt werden. Und es ist auch ökonomisch reizvoll, wenn man nur eine Prise von etwas zugibt, um Massen von etwas anderem herzustellen.

Ich möchte mich aber nicht so verstanden wissen, dass keine organischen Katalysatoren außer Prolin umweltfreundlich sind. Viele lassen sich etwa auf Basis von Aminosäuren oder aus natürlichen Quellen herstellen, zum Beispiel Zucker oder Peptide. Sie sind inhärent umweltfreundlich, weil sie selbst nicht toxisch sind. Das Schöne an der Katalyse ist: Es fallen keine großen Mengen an Katalysatorabfall an. Und man braucht weniger Energie, weil der Katalysator einen einfacheren Reaktionsweg ermöglicht.

### **Warum kommen in den meisten industriellen Prozessen heute Metallkatalysatoren zum Einsatz und nicht organische?**

Metalle, vor allem die Übergangsmetalle, besitzen eine faszinierende Reaktivität. Die katalytischen Verfahren, die weltweit die größten Mengen umsetzen, werden bei der Aufbereitung von Erdöl zur Benzinherstellung verwendet. Das Erste, was das Öl sieht, wenn es aus dem Bohrloch kommt, sind Katalysatoren. Zunächst entzieht man dem Erdöl den Schwefel, das geschieht im Milliarden-Tonnen-Maßstab. Das vom Schwefel befreite Erdöl wird wiederum mit speziellen Katalysatoren, so genannten Zeolithen, umgesetzt. Dabei spaltet man die langkettigen Kohlenwasserstoffe in kürzere, die man zum Beispiel im Benzin einsetzen kann. Dafür braucht man typischerweise Metallkatalysatoren.

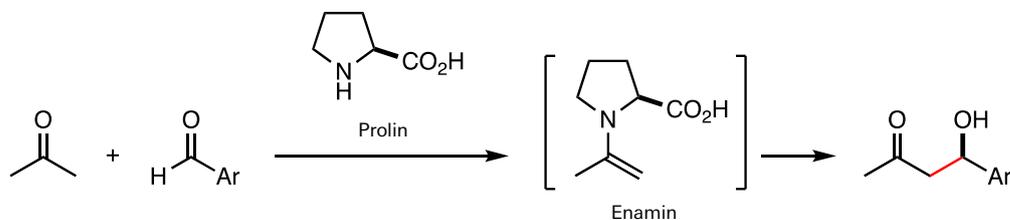
### **Genau wie in jedem Auto ...**

Die Prozesse, die im Autoabgas-Katalysator ablaufen, brauchen Platin, ein Schwermetall. Zwar benötigt ein einzelnes Fahrzeug nicht viel davon, aber alle Autos der Welt verlieren winzige Mengen an Platin, die im Straßendreck landen und dann aufgewühlt und von unseren Kindern eingeatmet werden. Doch hier könnte man keine organischen Katalysatoren einsetzen, weil die meisten von ihnen bei den hohen Temperaturen verbrennen würden. Es ist also nicht das Ziel der organischen Katalyse, alle Metalle zu ersetzen. Trotzdem hat sie großen Wert, vor allem in der Medikamentenherstellung.

### **Wofür wäre sie denn prädestiniert?**

Bei der Medikamentensynthese beispielsweise ist das sehr reizvoll. Denn Medikamente sind typischerweise chiral. Das bedeutet, dass Bild und Spiegelbild nicht identisch sind. Und wir wissen schon lange, dass diese Spiegelbilder – wir nennen sie Enantiomere – eine unterschiedliche Reaktivität

**ENAMIN-KATALYSE**  
**Prolin bildet mit einem der Reaktionspartner ein so genanntes Enamin. Das reagiert rasch mit dem anderen zum Produkt (rot: neue Bindung).**



aufweisen. Auch die komplette Biologie ist händisch, also chiral. Bis heute kann das niemand erklären. Unser Körper und unsere Enzyme können zwischen diesen beiden Spiegelbildern sehr wohl unterscheiden. Deshalb ist die Entwicklung von so genannten enantiomerenreinen Medikamenten wichtiger geworden – dabei wird nur das eine Spiegelbild hergestellt. Früher hat man die Enantiomere zunächst nach der Herstellung voneinander getrennt, zum Beispiel durch Kristallisation oder andere Techniken. Die übrig gebliebene, unerwünschte Form wurde verbrannt. Doch natürlich ist es umweltfreundlicher, von vornherein das Richtige katalytisch und enantioselektiv zu erzeugen.

#### **Dafür wurde schon einmal ein Nobelpreis verliehen ...**

2001 gab es dafür den Nobelpreis für Barry Sharpless, Ryoji Noyori und William Knowles (siehe »Spektrum« 12/2001, S. 22). Sie hatten metallhaltige Katalysatoren für eine solche asymmetrische Katalyse entwickelt. Asymmetrische Hydrierungen sind bis heute sehr beliebt in der technischen Katalyse. Aber ich glaube schon, dass die Organokatalyse hier einen Fortschritt bringen und viel mehr eingesetzt werden wird als asymmetrische Hydrierung. Denn es gibt fundamentale Vorteile, wenn man kein Schwermetall einsetzen muss, das vielleicht kostbar und rar ist. Palladium zum Beispiel wird immer seltener, weil es in so vielen Katalysatoren eingesetzt wird. Die Metalle werden daher immer teurer und diffundieren in die Welt. Die organischen Katalysatoren sind hingegen nachhaltiger, weil man sie aus der Natur entwickeln kann.

#### **Welche industriellen Verfahren verwenden heute bereits Organokatalysatoren?**

Eines, das ich sehr schön finde, weil es auch zu diesem Nobelpreis passt, basiert auf unserer prolinkatalysierten Reaktion, die MacMillan später leicht variiert hat. Das Verfahren – das quasi von uns beiden entwickelt wurde – wird eingesetzt, um Anti-HIV-Medikamente herzustellen. Sie haben geholfen, eine der schrecklichsten Pandemien unserer Zeit zu beenden! Ich war in den 1980er Jahren Schüler und erinnere mich sehr gut an diese schreckliche Zeit, als die Menschen zu Millionen an Aids starben. In den relativ wohlhabenden Ländern zumindest passiert das heute nicht mehr, weil wir die Patienten mit Medikamenten aus kleinen Molekülen behandeln können. Das finde ich faszinierend! Und auch, wenn Sie eine schwere Infektion haben und im Krankenhaus ein Antibiotikum erhalten, fühlen Sie sich nach drei Tagen blendend: Es ist ein Wunder, wie toll das funktioniert. Viele solcher Wirkstoffe werden von Chemikern designt und hergestellt.

#### **Noch einmal zurück zu den chemischen Prozessen: Müssen Industrieverfahren reglementiert werden, damit die Chemie grüner wird?**

Oft ist der Widerspruch zwischen grüner Chemie und maximalem kapitalistischem Erfolg gar nicht so groß. Denn die Industrie möchte auch ihre Moleküle auf die bestmögliche Weise herstellen. Ich spreche dabei immer von Atomökonomie. Das ist ein schöner Begriff aus der Wissenschaft, der besagt: Die Atome des Startmaterials müssen im Produkt auftauchen und nirgendwo anders. Das heißt, alle Atome aus dem Ausgangsstoff werden in ein Produkt umgesetzt, es gibt keine Nebenprodukte. Das wäre die perfekte chemische Reaktion. Deshalb weiß ich nicht, ob man das politisch regulieren muss. Können Politiker bessere chemische Prozesse designen als die Fachleute? Ich bin mir da nicht so sicher.

Es gibt ein grundsätzliches Unbehagen gegenüber der chemischen Industrie und der Pharmaindustrie. Vielleicht kommt das Missverhältnis daher, dass es sich inhuman anfühlt, wenn sich jemand an der Krankheit anderer Menschen bereichert. Aber in Wahrheit haben wir das Ganze nun mal kapitalistisch organisiert. Ich kann mir durchaus andere Modelle vorstellen, zum Beispiel mit staatlichen Medikamentenbehörden. Ob das funktioniert, kann ich nicht beurteilen. Beim HIV wurde damals etwa gefordert, dass die verarbeitende Industrie die Medikamente kostenlos abgibt – es kommt also der humanistische Aspekt hinzu. Ich finde es schwierig, das zusammenzubringen. Daher habe ich auch ein sehr ambivalentes Verhältnis zu der Frage, ob man Biontech jetzt die Patente wegnehmen soll.

#### **Sollte man das tun?**

Das finde ich schwierig. Sie haben den Covid-19-Impfstoff in solch kurzer Zeit entwickelt, hatten diese tolle Idee, waren hoch motiviert – natürlich auch, damit ihre Firma weiterläuft, sie ihre Mitarbeiter bezahlen und Arbeitsplätze schaffen können. Muss man ihnen das Patent jetzt wegnehmen? Ich finde, dazu kann man verschiedene Meinungen haben – und wie Sie schon merken, bin ich da skeptisch.

#### **Vor 20 Jahren haben Sie die organische Katalyse erfunden, die heute ein riesiges Feld mit zahlreichen Reaktionen ist. Welche Reaktion ist die nächste Herausforderung für Sie?**

Wenn man ehrlich ist, dann ist der wichtigste Beitrag, den wir Chemiker jetzt leisten können, die globale Erwärmung aufzuhalten. Wir müssen helfen, das CO<sub>2</sub> wieder aus der Atmosphäre zu holen. Ich finde, das ist eine wunderbare Aufgabe für den Rest meiner Karriere! Für mich ist die Idee extrem reizvoll, eine Art künstliche Fotosynthese zu ma-

chen, CO<sub>2</sub> aus der Luft zurückzuholen und etwas anderes damit anzustellen. Das ist natürlich keine nagelneue Idee, aber – das ist jetzt wirklich ein origineller Gedanke, den ich mit Ihnen teile: Wie wäre es mit der Reaktion: CO<sub>2</sub> → C + O<sub>2</sub>?

### Ähnlich wie bei der Methanpyrolyse?

Ich habe an eine photochemische – also durch Licht angetriebene – Reaktion gedacht, wie sie in der Natur stattfindet. Die Natur stellt aus CO<sub>2</sub> Kohlenhydrate her, indem sie Wasser hinzufügt: CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → CH<sub>2</sub>O + O<sub>2</sub>. Ich schlage die Reaktion ohne Wasser vor, sozusagen die konzentrierte Form der Fotosynthese: Wir nehmen nur CO<sub>2</sub> und machen daraus mit Licht Sauerstoff, der wieder zurück in die Atmosphäre geht, und Kohlenstoff. Letzterer könnte natürlich Kohle sein, was ich unproblematisch finde, weil man sie wieder in der Erde vergraben könnte. Die Chemiker würden aus der Kohle wiederum etwas Vernünftiges erschaffen, die gesamte organische Chemie steht ihnen hiermit offen. Über die Fischer-Tropsch-Synthese ließen sich etwa Kohlenwasserstoffe herstellen. Diese Technik, die hier bei uns am Institut erfunden wurde, ist schon 100 Jahre alt.

Man kann aus Kohlenstoff auch Benzin erzeugen, das man theoretisch sogar in Verbrennungsmotoren verwenden könnte, wenn man wollte. Wenn es gelänge, das CO<sub>2</sub> aus der Luft in Benzin umzuwandeln, wäre das völlig klimaneutral. Ich weiß nicht, wie praktisch das ist und ob es sich

jedemal realisieren lässt. In der Vergangenheit gab es aber immer wieder große Entdeckungen, kleine chemische Revolutionen, die die Welt verändert haben. Das wäre so eine. Die andere Idee wäre nicht Kohle, sondern Diamant.

### Das verkauft sich wohl auf jeden Fall besser ...

Das Problem ist ja auch ein Skalenproblem: Selbst wenn wir das CO<sub>2</sub> aus der Luft als alleinigen Rohstoff für die gesamte organische Chemie nähmen – Plastik, Medikamente und so weiter daraus herstellten –, selbst dann würden wir nicht genug davon verbrauchen, um die Klimaveränderung aufzuhalten. Doch wenn man CO<sub>2</sub> zu Sauerstoff und Diamant umwandeln könnte, dann könnte man aus dem Diamantstaub eine Art Zement gewinnen. Mit diesem Zement könnte man Hochhäuser bauen. So eine Reaktion im Gigatonnenmaßstab durchzuführen ist eine der verrücktesten Ideen, mit denen ich mich gelegentlich beschäftige.

### Aber verrückte Ideen sind manchmal die besten ...

Als ich damals mit dem Prolin angefangen habe, hatte ich ein ähnliches Gefühl: »Wird das klappen? Ist die Idee vielleicht naiv oder sogar dumm? Oder wissen die meisten guten Chemiker, dass das niemals funktionieren würde?« Jetzt versuche ich manchmal im Labor, dieses Gefühl wieder aufleben zu lassen. ◀

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

# Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS



## MEET AND GREET mit **Chefredakteur Daniel Lingenhöhl** und **Redakteurin Verena Tang**

Abonnentinnen und Abonnenten können am digitalen Redaktionsbesuch von **Spektrum** der Wissenschaft am 22. Februar 2022 teilnehmen.

Anmeldung und weitere Vorteile:

**Spektrum.de/plus**

# CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

## KATALYSE ALS FARBENSPIEL

**Katalysatoren beschleunigen viele wichtige biologische, technische und chemische Prozesse. Wie ihnen das gelingt, lässt sich an einem frappierenden Beispiel visuell veranschaulichen.**



**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.

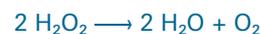
» [spektrum.de/artikel/1959637](https://www.spektrum.de/artikel/1959637)

Viele dürften den Begriff Katalysator vor allem von Kraftfahrzeugen kennen, wo der Kat den Ausstoß von Schadstoffen verringert. Doch spielen Katalysatoren in unserem Alltag eine viel zentralere Rolle, als dieses eine Anwendungsbeispiel erahnen lässt. Abgesehen von ihrer biologischen und physiologischen Funktion sind sie an der Produktion von etwa 90 Prozent aller chemieindustriellen Güter beteiligt. Sie gestalten Synthesen effizienter und reduzieren maßgeblich den Energieverbrauch, die Treibhausgasemissionen und die Kosten der hergestellten Stoffe. Laut Branchenverband DECHEMA haben sie das Potenzial, bis 2050 etwa 13 Exajoule an Energie einzusparen, was etwa dem jährlichen Energieverbrauch Deutschlands entspricht. Ihre Bedeutung zeigt sich auch daran, dass im

Jahr 2021 zum wiederholten Mal der Chemie-Nobelpreis für Arbeiten auf dem Gebiet der Katalyse vergeben wurde (siehe Interview »Ein revolutionäres Molekül«, S. 38).

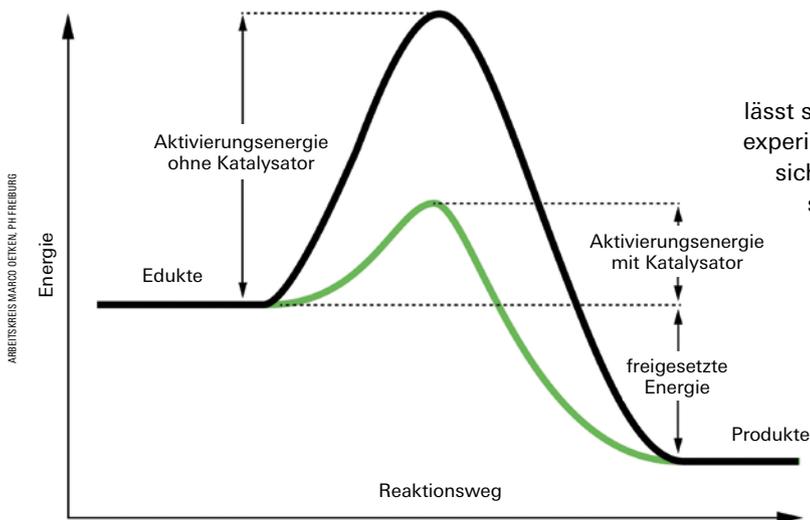
Um zu verstehen, wieso Katalysatoren zur Einsparung von Energie beitragen, müssen wir ihr Funktionsprinzip betrachten. Chemische Reaktionen können endergonisch oder exergonisch sein. Sie verbrauchen also entweder Energie oder setzen welche frei. Aber auch in letzterem Fall muss zunächst ein gewisser Energiebetrag zugeführt werden, damit die Umsetzung überhaupt startet: die so genannte Aktivierungsenergie. Ein Katalysator ermöglicht einen alternativen Reaktionsweg, für den die zum Start aufzuwendende Aktivierungsenergie deutlich geringer ist (siehe »Aktivierungsenergie«). Dabei geht er selbst unverändert aus der Reaktion hervor.

Am Beispiel des Zerfalls von Wasserstoffperoxid zu Wasser und Sauerstoff



lässt sich das Funktionsprinzip der Katalyse sehr schön experimentell verifizieren. Bei Raumtemperatur zersetzt sich Wasserstoffperoxid nur unmerklich, obwohl es sich hierbei um eine exergonische Reaktion handelt. Das liegt an der relativ hohen Aktivierungsenergie dieses Zerfalls von 76 kJ/mol. Sie muss

**AKTIVIERUNGSENERGIE** In diesem Energiediagramm einer exergonischen Reaktion sieht man, dass sie mit Katalysator (grün) eine geringere Aktivierungsenergie benötigt als ohne (schwarz).





ARBEITSKREIS MARCO DETKEN, PH FREIBURG

**ZERFALL BEI ZIMMERTEMPERATUR**  
 Wird ein Platindraht in eine Wasserstoffperoxidlösung getaucht, bilden sich Blasen aus Sauerstoff. Obwohl Wasserstoffperoxid bei Raumtemperatur stabil ist, zersetzt es sich also in diesem Fall.

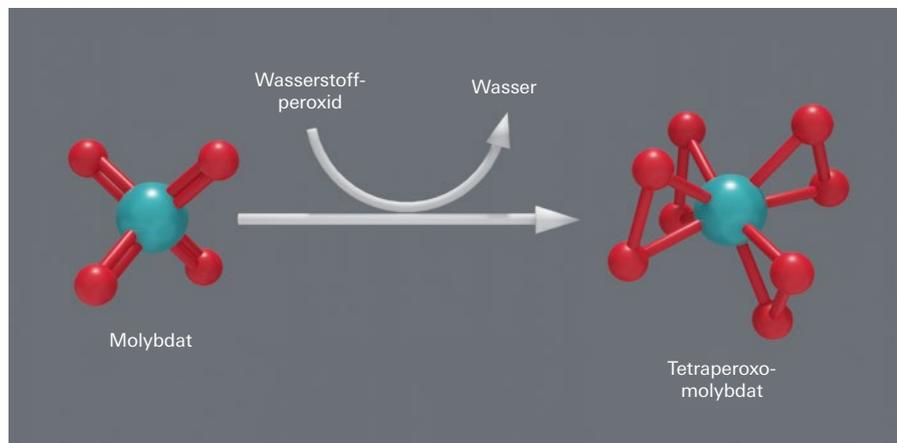


ARBEITSKREIS MARCO DETKEN, PH FREIBURG

**FARBWECHSEL** Während des durch Molybdat katalysierten Zerfalls von Wasserstoffperoxid färbt sich die Lösung zunächst dunkelrot und dann gelb. Diese Farbänderungen weisen auf temporäre Zwischenverbindungen hin. Am Ende ist die Lösung wieder farblos.

**ERSTER REAKTIONSSCHRITT** Im primären Reaktionsschritt werden die vier Oxogruppen des Molybdats (links) durch Wasserstoffperoxid oxidiert. Dabei entsteht das rote Tetraperoxomolybdat (rechts). Sauerstoffatome sind rot, Molybdän türkis dargestellt.

ARBEITSKREIS MARCO DETKEN, PH FREIBURG





ARBEITSKREIS MARCO DIETKEN, PH FREIBURG

in einem ersten Reaktionsschritt aufgebracht werden, um die stabile Sauerstoff-Sauerstoff-Bindung des Wasserstoffperoxids zu spalten. Wird einer Wasserstoffperoxidlösung jedoch ein Katalysator wie Platin zugegeben, beginnen sich sofort Gasblasen zu bilden. Sie enthalten den Sauerstoff, der bei der Zersetzung entsteht.

Der Katalysator setzt die Aktivierungsenergie für den Zerfall von Wasserstoffperoxid demnach so weit herab,

**ZWEISTUFIGE ZERSETZUNG** Natriumtetraperoxomolybdat (links) zerfällt nach dem punktuellen leichten Erwärmen der unteren linken Reagenzglaswand zu gelbem Diperoxomolybdat und Sauerstoff (Mitte). Dabei wird Wärme frei, die für den teilweisen weiteren Zerfall bis hin zum weißen Molybdat sorgt.

**INTERMEDIÄRPRODUKT** Die rote Zwischenverbindung des katalytischen Zerfalls von Wasserstoffperoxid lässt sich als Natriumsalzhydrat auskristallisieren.

dass die Reaktion schon bei Raumtemperatur sichtbar abläuft. Wird statt Platin Natriummolybdat ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ) als Beschleuniger verwendet, dann erlauben die experimentellen Beobachtungen sogar Rückschlüsse darauf, wie der alternative Reaktionsweg aussieht, der nur eine geringere Aktivierungsenergie benötigt. In diesem Fall färbt sich die anfangs noch farblose Lösung unmittelbar dunkelrot, sobald die Blasenbildung eingesetzt hat (siehe »Farbwechsel«).

Diese Farbänderung rührt vom ersten Reaktionsschritt des katalytischen Zerfalls her. Dabei bildet sich als tempo-



ARBEITSKREIS MARCO DIETKEN, PH FREIBURG

räre Zwischenverbindung das rote Tetraperoxomolybdat  $\text{Mo}(\text{O}_2)_4^{2-}$  (siehe »Erster Reaktionsschritt«).



Die vier Oxogruppen (O-Gruppen) des Molybdats reagieren hierbei mit dem Wasserstoffperoxid zu Peroxogruppen (O-O-Gruppen) und Wasser. Sowohl die Bindung zwischen Molybdän und Sauerstoff als auch die zwischen den beiden Sauerstoffatomen sind im Tetraperoxomolybdat wesentlich instabiler als die chemischen Bindungen im Wasserstoffperoxid. Deshalb zerfällt dieses temporäre Zwischenprodukt bereits bei Raumtemperatur sichtbar.

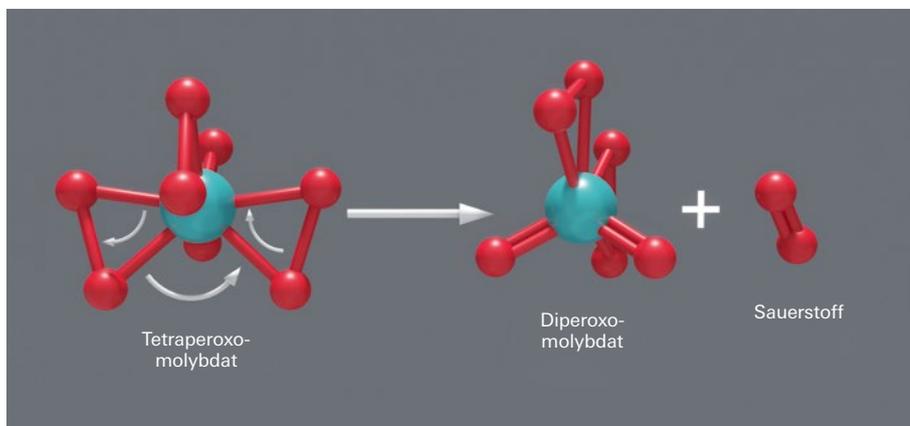
Während die Reaktion weiter abläuft, färbt sich die Lösung zunächst gelb und wird schließlich, während die Blasenbildung aufhört, langsam wieder farblos (siehe »Farbwechsel«). Die gelbe Farbe deutet darauf hin, dass auf diesem katalytischen Reaktionsweg mindestens eine weitere temporäre Zwischenverbindung auftritt.

Um die experimentellen Beobachtungen erklären und die Frage beantworten zu können, wie es im katalytischen Reaktionsverlauf genau zur Sauerstofffreisetzung kommt, würde es helfen, das rote Tetraperoxomolybdat isoliert zu betrachten. Tatsächlich erlaubt das Molybdat-Wasserstoffperoxid-System, dieses schnell und sicher auszukristallisieren. Das eröffnet die Möglichkeit, den weiteren katalytischen Reaktionsweg ab der ersten temporären Zwischenverbindung direkt zu untersuchen.

Beim Auskristallisieren erhält man Kristalle der Summenformel  $\text{Na}_2\text{Mo}(\text{O}_2)_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ . Das feste Natriumtetraperoxomolybdat lässt sich nun direkt durch kurzes Erhitzen in einem Reagenzglas auf sein Zerfallsverhalten hin untersuchen.

Es zeigt sich, dass die Substanz wie in ihrer wässrigen Lösung zunächst zu einer weiteren, gelb gefärbten Zwischenverbindung mutiert (siehe »Zweistufige Zersetzung«). Dabei wird Sauerstoff freigesetzt, wie sich mit einem

**FINALE ENTFÄRBUNG** Das feste, gelbe Diperoxomolybdat zersetzt sich, wenn es mit dem Bunsenbrenner erhitzt wird, unter Sauerstofffreisetzung zum weißen Molybdat.



ARBEITSKREIS MARCO OETKEN, PH FREIBURG

**ZWEITER REAKTIONSSCHRITT** Tetraperoxomolybdat zerfällt durch intramolekulare Reaktionen zweier Peroxogruppen unter Sauerstofffreisetzung zu Diperoxomolybdat.

glimmenden Holzspan nachweisen lässt (Glimmspanprobe). Er muss aus der in fester Form vorliegenden temporären Zwischenverbindung selbst stammen, da diese kein Wasserstoffperoxid mehr enthält.

Beim Zerfall von Tetraperoxomolybdat spalten sich von zwei Peroxogruppen insgesamt zwei Sauerstoffatome ab – und zwar von jeder der beiden Gruppe eines – und verbinden sich zu einem Sauerstoffmolekül. Folglich entsteht das Diperoxomolybdat-Anion  $\text{MoO}_2(\text{O}_2)_2^{2-}$ , das für die gelbe Farbe verantwortlich ist (siehe »Zweiter Reaktionsschritt«).

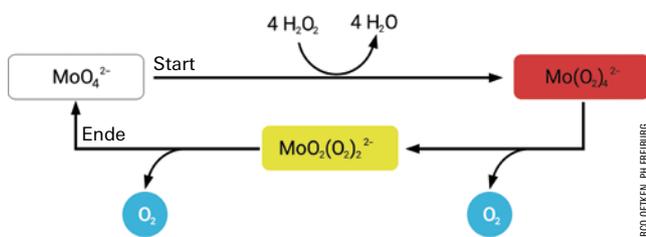


Dieses Anion ist ebenfalls als Feststoff isolierbar, so dass die katalytische Zersetzung von Wasserstoffperoxid auch beim zweiten temporären Zwischenprodukt angehalten und ihr weiterer Verlauf von da an untersucht werden kann. Beim längeren Erhitzen verliert Diperoxomolybdat seine gelbe Farbe (siehe »Finale Entfärbung«). Auch dabei wird Sauerstoff freigesetzt, der sich mit der Glimmspanprobe nachweisen lässt.

Das gelbe Diperoxomolybdat zersetzt sich nach demselben Mechanismus wie das rote Tetraperoxomolybdat, muss hierzu aber stärker erhitzt werden. Seine beiden



ARBEITSKREIS MARCO OETKEN, PH FREIBURG



ARBEITSREIS MARCO OETIKEN, FH FREIBURG

**KATALYSE-MECHANISMUS Vereinfachtes Reaktionsschema des katalytischen Zerfalls von Wasserstoffperoxid an Molybdat. Nach der Reaktion liegt der Katalysator wieder unverändert vor.**

Peroxogruppen reagieren miteinander zu einem Molekül Sauerstoff und zwei Oxogruppen.



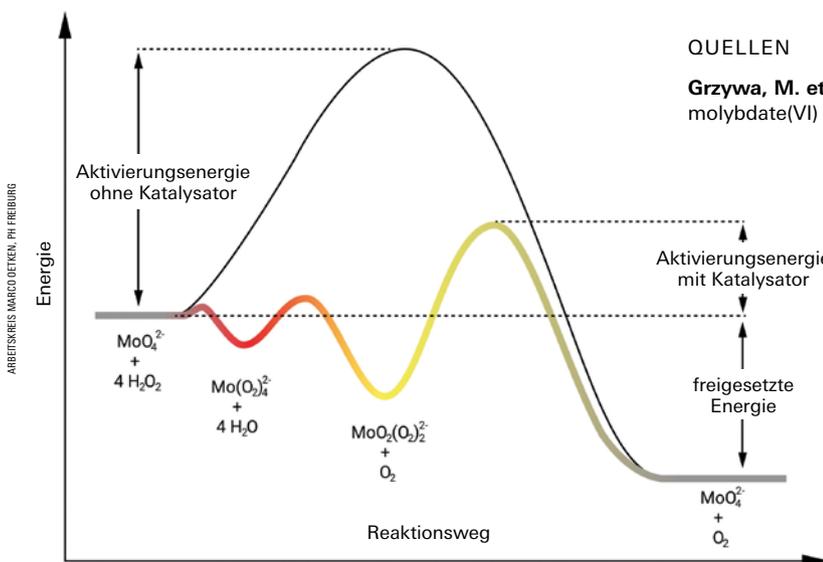
Aus den in den Experimenten gewonnenen Erkenntnissen lässt sich nun der vollständige Reaktionsweg dieser Katalyse rekonstruieren: In einem ersten Schritt reagiert der Katalysator Molybdat mit Wasserstoffperoxid zu Wasser und der roten temporären Zwischenverbindung Tetraperoxomolybdat. Dieses zerfällt im nächsten Schritt zu Sauerstoff und dem gelben Diperoxomolybdat, der zweiten temporären Zwischenverbindung. Auch sie zerfällt schließlich, wobei ein weiteres Molekül Sauerstoff abgegeben und der ursprüngliche Katalysator Molybdat zurückgebildet wird (siehe »Katalyse-Mechanismus«). Dass der Katalysator unverändert aus der Reaktion hervor-

geht, lässt sich leicht zeigen, indem man in eine fertig reagierte Lösung erneut Wasserstoffperoxid gibt.

Außerdem erlauben die Beobachtungen aus den Experimenten, zumindest qualitativ Rückschlüsse auf die Aktivierungsenergien der einzelnen Teilreaktionen zu ziehen. Dadurch können wir das ursprüngliche Energiediagramm um den alternativen Reaktionsweg ergänzen. Nach der Zugabe von Wasserstoffperoxid färbt sich die Lösung sofort rot. Für die Bildung des roten Tetraperoxomolybdats können wir daher eine sehr geringe Aktivierungsenergie annehmen. Diese Zwischenverbindung verwandelt sich dann nicht sofort, sondern erst nach einigen Sekunden unter heftiger Sauerstofffreisetzung zum gelben Diperoxomolybdat. Dem festen Tetraperoxomolybdat muss zudem kurz Energie in Form von Wärme zugeführt werden, um seinen Zerfall einzuleiten. Für diesen zweiten Reaktionsschritt ist die Aktivierungsenergie also vermutlich höher als für den ersten. Hat die Lösung die gelbe Farbe des Diperoxomolybdats angenommen, dauert es mehrere Minuten, bis sie sich entfärbt hat und die zweite Zwischenverbindung vollständig zu Molybdat und Sauerstoff zerfallen ist. Zugleich scheint die Sauerstoffentwicklung weniger heftig als beim Zerfall des roten Tetraperoxomolybdats. Demnach hat dieser Reaktionsschritt sehr wahrscheinlich die höchste Aktivierungsenergie (siehe »Erniedrigte Aktivierungsenergie«). Dafür spricht auch, dass das feste Diperoxomolybdat zu seiner Entfärbung bedeutend stärker erhitzt werden muss als das Tetraperoxomolybdat.

Das System aus Natriummolybdat und Wasserstoffperoxid erlaubt es also nicht nur, den Ablauf einer Katalyse visuell zu verfolgen, indem die auftretenden Zwischenstufen anhand ihrer Farben erkennbar werden. Es ermöglicht auch, die Reaktion bei den verschiedenen Zwischenstufen anzuhalten und die intermediär entstehenden Verbindungen zu isolieren und zu untersuchen. Damit bildet es ein eindrucksvolles Lehrbeispiel, mit dem sich höchst anschaulich zeigen lässt, wie Katalysatoren alternative Reaktionswege eröffnen und dadurch die Aktivierungsenergie herabsetzen. ◀

**ERNIEDRIGTE AKTIVIERUNGSENERGIE Die Erkenntnisse aus den insgesamt durchgeführten Versuchen erlauben eine vereinfachte, qualitative Ergänzung des Energiediagramms um Teilschritte und Aktivierungsenergien der katalytischen Reaktion.**



ARBEITSREIS MARCO OETIKEN, FH FREIBURG

**QUELLEN**

**Grzywa, M. et al.:** Crystal structure of potassium tetraperoxomolybdate(VI)  $\text{K}_2[\text{Mo}(\text{O}_2)_4]$ . Powder Diffraction 20, 2005

**Grzywa, M. et al.:** Synthesis, characterization and crystal structures of three dinuclear diperoxo complexes of Mo(VI):  $\text{K}_2\{\text{O}[\text{MoO}(\text{O}_2)_2\text{H}_2\text{O}]_2\} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{NH}_4)\{\text{O}[\text{MoO}(\text{O}_2)_2\text{H}_2\text{O}]_2\}$  and  $(\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{Na})\{\text{O}[\text{MoO}(\text{O}_2)_2\text{H}_2\text{O}]_2\}$ . Journal of Molecular Structure 888, 2008

**Grzywa, M. et al.:** Structural investigation of tetraperoxo complexes of Mo(VI) and W(VI). Journal of Solid State Chemistry 182, 2009

**Nardello, V. et al.:**  $^{90}\text{Mo}$  NMR and kinetic studies of peroxomolybdate intermediates involved in the catalytic disproportionation of hydrogen peroxide by molybdate ions. Inorganic Chemistry 34, 1995

# Die Spektrum eLearningFlat



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

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

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

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



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

# Die Spektrum eBookFlat



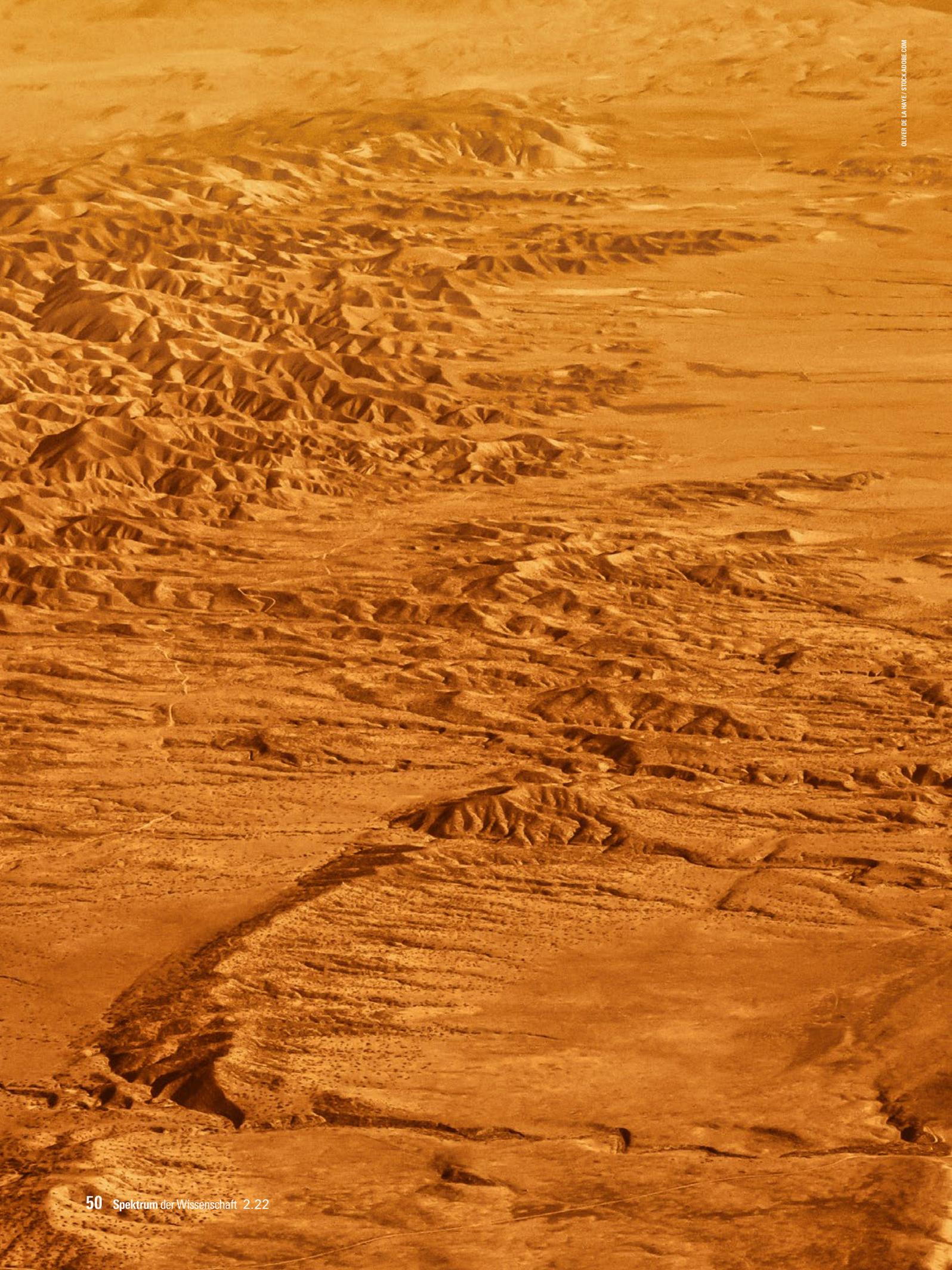
Mit der **Spektrum eBookFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von zwölf E-Books (PDF-Format) des Sachbuchprogramms von **Springer Spektrum** aus den Bereichen Mathematik und Naturwissenschaften.

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

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



ROUDESIGN / BETTY IMAGES / ISTOCK



# GEOPHYSIK DAS HENNE-EI- PROBLEM DER PLATTENTEKTONIK

Computersimulationen der kompletten Erde zeigen, wie die äußeren und inneren Kräfte des Planeten zusammenspielen.



**Nicolas Coltice** ist Professor für Geodynamik und leitet den Fachbereich Geowissenschaften der École normale supérieure in Paris. Er verbindet geologische, geophysikalische und geochemische Beobachtungen mit dynamischen Modellen. So will er die physikalischen Gesetze verstehen, die der Entwicklung von Planeten zu Grunde liegen.

» [spektrum.de/artikel/1959640](https://www.spektrum.de/artikel/1959640)

**DER GROSSE GRABEN** Die San-Andreas-Verwerfung zieht sich über 1200 Kilometer durch Kalifornien und bildet die Grenze zwischen der Nordamerikanischen und der Pazifischen Platte. An solchen Plattengrenzen können neue Gebirge, Täler und Vulkane entstehen. Modelle zeigen, wie die Bewegungen im Erdinnern mit den sichtbaren Änderungen an der Oberfläche zusammenhängen.

Im Jahr 2010 unternahm ich eine Zugfahrt, die den Beginn einer langen wissenschaftlichen Reise markieren sollte. Ich war unterwegs von meinem Wohnort Lyon in Frankreich nach Zürich in der Schweiz. Unterwegs querten wir die majestätischen Alpen, die sich in Millionen von Jahren durch enorme Kräfte gebildet haben. Meine Gedanken kreisten weniger um die beeindruckende Landschaft selbst als vielmehr um eines der größten Rätsel der Geowissenschaften: Wie hängen die gewaltigen, unsichtbaren Bewegungen tief im Erdinnern mit den kleinteiligen, dramatischen Umgestaltungen an der Erdoberfläche zusammen? Immerhin formen mächtige Prozesse in der Tiefe Gebirge, verschieben Kontinente und sorgen mit dafür, dass Leben auf unserem Planeten möglich ist.

Paul Tackley und sein damaliger Doktorand Tobias Rolf zeigten mir in Zürich ihre Arbeiten, die mich sehr beeindruckten. Tackley ist dort Professor für Geowissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) und hatte damals bereits drei Jahrzehnte lang Rechenstrategien entworfen, um die Mantelkonvektion im Erdinnern auf parallel arbeitenden Supercomputern zu modellieren. Ich hoffte, der Antwort auf meine Frage durch seine mathematischen Modelle und Algorithmen näher zu kommen. Denn ich hatte inzwischen verstanden, dass die Plattentektonik die Geophysik, die unseren Planeten formt, nur oberflächlich erklärt. Mich interessierte, wie sich die Temperatur unter den Kontinenten über geologische Zeiträume hinweg verändert. Tobias Rolf, der heute am Centre for Earth Evolution and Dynamics an der Universität Oslo in Norwegen forscht, beschäftigte sich mit ganz ähnlichen Problemen.

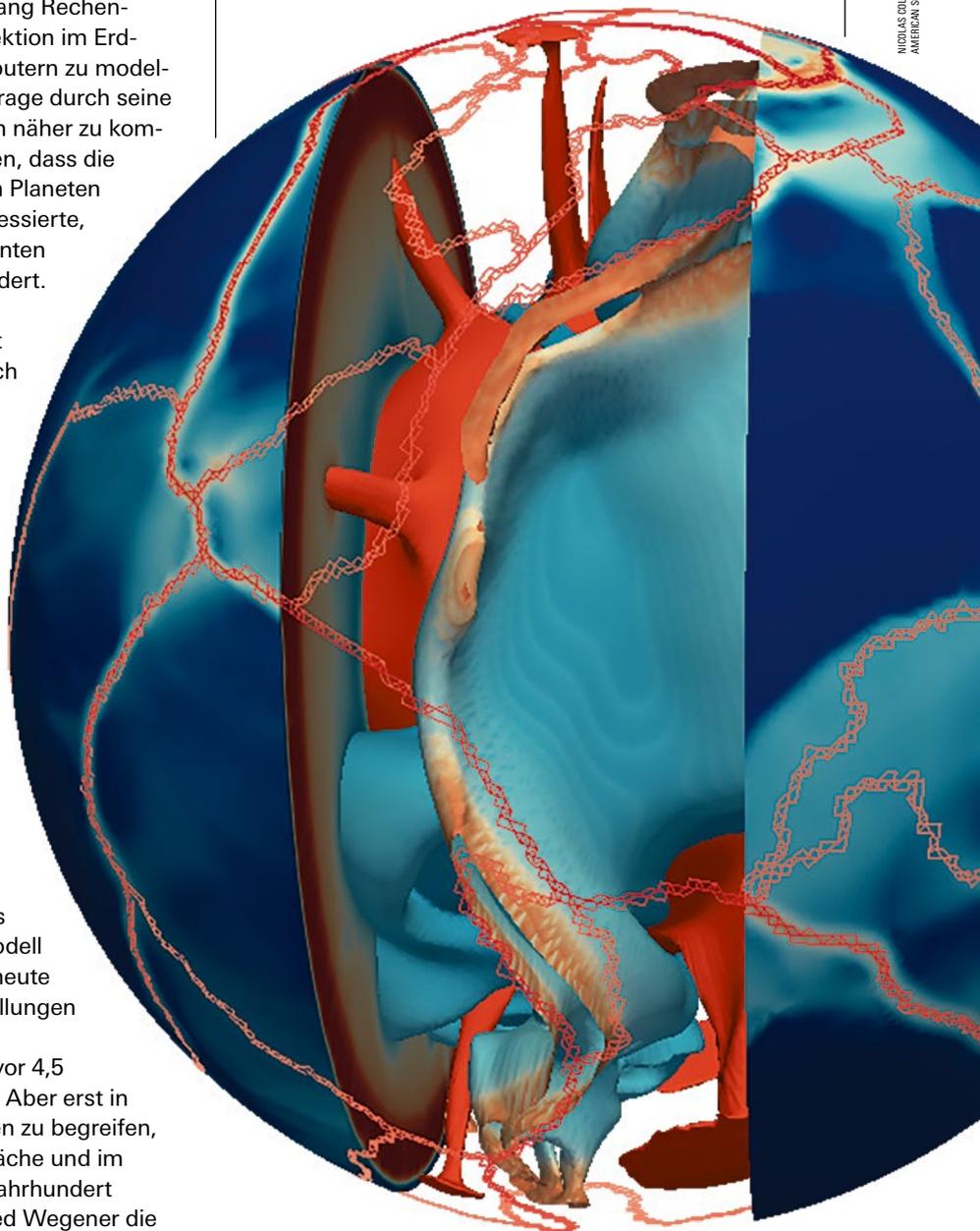
Die beiden Forscherkollegen zeigten mir faszinierende Animationen der Erde, die das Ergebnis jahrelanger harter Arbeit waren: Auf dem Bildschirm entstanden ausgeprägte untermeeri-sche Gebirgsrücken; währenddessen schoben sich Platten übereinander und wurden in den Mantel subduziert, dann klang das Ganze wieder ab.

Damit war es also möglich, Plattentektonik und Mantelkonvektion gleichzeitig zu simulieren! Am Abend in meinem Hotel wurde mir klar, dass wir auf Grundlage dieser Arbeiten die Bewegungen der Erde erstmals in ihrer Gänze modellieren könnten – analog zu Klimamodellen. Im Jahr 2018 haben wir schließlich das bisher umfassendste und realistischste Modell eines erdähnlichen Planeten erstellt. Und heute prägen solche Simulationen unsere Vorstellungen davon, wie sich Planeten entwickeln.

Die Erde hat sich seit ihrer Entstehung vor 4,5 Milliarden Jahren grundlegend gewandelt. Aber erst in den letzten 100 Jahren haben wir begonnen zu begreifen, wie geophysikalische Kräfte an der Oberfläche und im Innern sie laufend formen. Im frühen 20. Jahrhundert formulierte der deutsche Klimatologe Alfred Wegener die

## Wechselspiel

Die größten tektonischen Platten entstehen durch Bewegungen tief im Innern des Erdmantels. Ihr Widerstand nahe den Subduktionszonen wiederum lässt sie in kleinere Bruchstücke zersplittern. Das hier gezeigte Modell hat der Autor des Artikels mit Claire Mallard und weiteren Kollegen erstellt. Es zeigt die Viskosität der Erdoberfläche sowie die Strömungen im Erdmantel. Dunkelblaue Flächen stellen Kontinente dar (hochviskose Bereiche), rote Linien auf der Oberfläche zeigen die niedrigviskosen Plattengrenzen an. Im Innern des Modells stehen die roten Bereiche für Hotspots, hellblaue Areale für subduzierende Platten.



NICOLAS COFFICE, CLAIRE MALLARD, ET AL. / AMERICAN SCIENTIST (MAY/JUN 2021)

Idee der Kontinentaldrift und der Superkontinente und fasste sie 1915 in seinem Buch »Die Entstehung der Kontinente und Ozeane« zusammen. Allerdings beschrieb er Antriebsmechanismen und Driftgeschwindigkeiten zum Teil falsch. Etablierte Physiker ignorierten Wegeners Theorie damals weitgehend oder taten sie als lächerlich ab. Erst etwa 20 Jahre später fasste sie langsam Fuß.

Bis in die 1950er Jahre hinein erlangten Forscher die meisten Erkenntnisse über die Struktur der tieferen Schichten der Erde aus kontinentalen Gesteinsproben und geophysikalischen Daten, die sie etwa durch seismische oder Schwerkraftmessungen erhoben. Dann, in den 1950er und 1960er Jahren, kartierten Wissenschaftler den Meeresboden und untersuchten seine geologische Beschaffenheit auf ozeanografischen Forschungsmissionen. Dabei entdeckten sie gigantische Strukturen: kilometertief abfallende Steilhänge, riesige Vulkane, 100 Kilometer lange Verwerfungen wie die Große Sumatra-Verwerfung (die 2004 das Erdbeben und den Tsunami im Indischen Ozean verursachte) und mehrere tausend Meter tiefe Abgründe wie den Marianengraben im westlichen Pazifik. Beflügelt durch diese Entdeckungen meinten Geowissenschaftler das Prinzip erkannt zu haben, wie sich die Landschaften der Erde bildeten: die Spreizung des Meeresbodens durch kontinuierlich emporquellendes Magma aus dem Erdmantel. Alles deutete darauf hin, dass sich das Gestein der Erde ständig seitwärtsbewegte. Das passt mit den tatsächlichen Beobachtungen zusammen, denn die Kontinente driften mit einer Geschwindigkeit von ein bis zehn Zentimetern pro Jahr (ähnlich schnell wachsen übrigens Fingernägel und Haare). Heute können wir dank GPS die kontinuierlichen sowie die ruckartigen Bewegungen der Landmassen über Jahrzehnte hinweg messen.

### Die Erde verändert sich, weil auch Gestein elastisch und formbar ist

Diese Ideen lieferten die Grundlage für das Prinzip der Plattentektonik (siehe »Ein Puzzle aus Platten«, S. 58). Das Konzept betrachtet die Lithosphäre der Erde – die Kruste und den äußeren Erdmantel – vereinfacht als eine Reihe massiver, starrer Teile. Wenn sie zusammenstoßen, schieben sie sich übereinander, und der Rand der unteren Platte sinkt in den heißen Mantel ab.

Tatsächlich ist das Gestein jedoch viel elastischer und formbarer: Es verändert seine Gestalt mitunter vorübergehend oder sogar dauerhaft. Nicht nur die Meere gehorchen Gezeiten, sondern manchmal selbst der Ozeanboden – er hebt oder senkt sich dadurch stellenweise um bis zu 20 Zentimeter pro Tag. Verwerfungslinien verformen Platten dauerhaft, indem sie sie verschieben und seismische Wellen hervorrufen. Und sogar scheinbar feste Gesteine fließen in geologischen Zeiträumen, ähnlich wie das Eis eines Gletschers. Das Himalaja-Gebirge etwa weist wunderschöne Felsstrukturen auf, die durch solche Prozesse entstanden sind.

## AUF EINEN BLICK DIE ERDE IM MODELL

- 1 Die Plattentektonik beschreibt, wie sich die Gestalt der Erde verändert. Sie betrachtet aber gewisse Prozesse nicht detailliert genug.
- 2 Um zu verstehen, wie Bewegungen an der Oberfläche mit Kräften im Erdinnern zusammenspielen, braucht es umfangreiche Modelle.
- 3 Neue dreidimensionale Simulationen betrachten die inneren und äußeren Prozesse des Planeten gleichzeitig. Dank ihnen verstehen wir heute beispielsweise, wie Plattentektonik und Mantelkonvektion wechselwirken.

Der eigentümliche Plattenverband auf der Erde besteht vermutlich seit mindestens 150 Millionen Jahren. Einige wenige große Platten – heute sind es insgesamt sieben – sind mit etwa 50 kleineren Platten unterschiedlicher Größe verbunden. Die Pazifische Platte beispielsweise ist zehnmal so groß wie die USA und erstreckt sich von deren Pazifikküste über das Meer bis nach Japan und Neuseeland. An ihrem westlichen Rand ist sie mit der kleineren Philippinischen Platte verbunden, die nur etwa halb so groß ist wie die USA und im Westen an China, im Süden an Australien grenzt. Die kleineren Platten verteilen sich über die Erdoberfläche wie die Scherben eines zerbrochenen Glases.

Geodynamiker haben modelliert, welche Kräfte die Bewegungen hervorrufen, die letztlich unseren Planeten formen. Wo große Höhenunterschiede bestehen, prägt zum Beispiel die Schwerkraft das Erscheinungsbild großer Felsformationen mit. Mächtige, hohe Berge drücken die umliegende Landschaft hinunter – besonders, wenn die Bereiche unter dem Berg nur geringen Widerstand leisten. An der Erdoberfläche ist es so kalt, dass das Gestein dadurch bricht, doch in der heißen Umgebung tief im Erdmantel fließt es. Ganz Ähnliches geschieht demnach dort, wo Platten in der Tiefsee aufeinandertreffen und einen ozeanischen Rücken bilden: Das Gewicht des neuen, heißen, erstarrenden Magmas, das an die Oberfläche dringt, drückt die Platten nach unten und voneinander weg (Rückendruck oder »ridge push«). Durch Reibung verhaken sich die Platten manchmal ineinander, so dass ein Widerstand entsteht, wenn die eine über die andere gleitet. Wenn Platten zusammenstoßen und die eine unter die andere geschoben wird, entsteht wiederum eine Zugspannung (»slab pull«), weil der absinkende Teil der Platte während der Subduktion die restliche Platte ein Stück nach unten in Richtung Mantel zieht. Und schließlich besitzt der Erdmantel – das heiße, langsam fließende Gestein im Erdinnern – noch seine eigene Konvektion, die wie in einem riesigen Kochtopf Materie und Wärme aus dem Innern umwälzt. Diese Konvektion kann bis zur Oberfläche wirken und die Platten dort in den Mantel hineinzie-

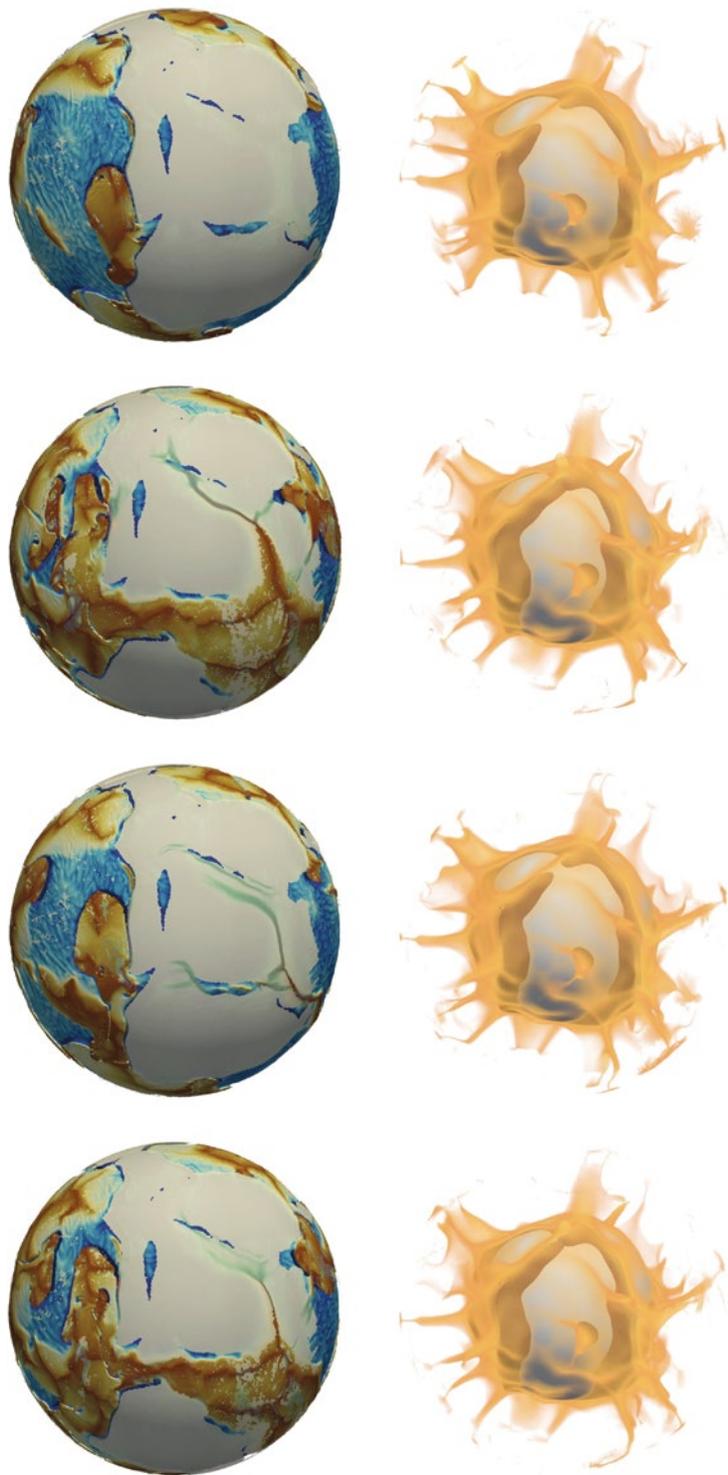
hen («mantle drag»). All diese Kräfte formen durch ihr langsames, stetiges Zusammenspiel unsere Erde.

Die Modellierungen haben eine grundsätzliche Frage aufgeworfen: Wird die Erde durch die inneren Kräfte geformt, oder formen die äußeren Strukturen ihr Inneres? Seit den 1970er Jahren entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Computermodelle, um die verschiedenen Kräfte zusammenzubringen und zu entscheiden, welche dominieren. Sie haben den Meeresboden modelliert und berechnet, welche Kräfte nötig sind, um die starren Blöcke der Erdkruste mit den Geschwindigkeiten zu verschieben, die wir an der Oberfläche beobachten. Die Ergebnisse waren widersprüchlich. In den meisten Fällen dominierte zwar die Zugspannung der subduzierenden Platte gegenüber dem Rückendruck. Während in einigen Modellen aber die von der Oberfläche ausgehende Sinkkraft stärker ist als die von innen rührende Konvektionskraft, legen andere genau das Gegenteil nahe.

Um diese Widersprüche aufzulösen, gingen die Forscher einen Schritt zurück. Sie versuchten nun, das gesamte System auf einmal zu betrachten. Der Erdmantel und die Erdkruste bestehen aus vergleichbaren Materialien – Silikatgesteinen –, und die Kräfte im tiefen Erdmantel überschneiden sich mit denen an der Oberfläche. Zur Lösung dieses Problems benötigten die Forscher umfassendere Computermodelle. Daher behandelten sie den Erdmantel und die Erdkruste jetzt als Teile eines globalen Systems und simulierten die Kräfte zwischen den beiden Untereinheiten. Solche Modelle legten einfache Materialeigenschaften zu Grunde und erstellten nur eine einzige Momentaufnahme der Geologie der Erde. Will man die Dynamik der Platten und die Konvektion des Erdmantels insgesamt modellieren, muss man hingegen abschätzen, wie sich das Gestein verformt und wie sich die Temperatur im Erdinnern über Millionen Jahre hinweg verändert.

### Zurück ins Labor

Nach einer Ableitung des 2. newtonschen Gesetzes lässt sich das Produkt aus Masse mal Beschleunigung aus der Differenz zwischen Spannungen und Auftrieb errechnen. Die Berechnung wird dadurch erleichtert, dass die Beschleunigung vernachlässigbar ist: Die Pazifische Platte bewegt sich zehn Zentimeter pro Jahr und besitzt damit eine relativ geringe kinetische Energie (dieselbe kinetische Energie hat ein Auto, das mit 40 Stundenkilometern fährt). Wie schnell eine tektonische Platte zu einem bestimmten Zeitpunkt gleitet, hängt deshalb nicht mehr von ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit ab. Stattdessen arbeiten die Modellierer daran, die Kräfte im Gestein abzuschätzen: die Spannungen und den Auftrieb in jeder kleinen Volumeneinheit des Systems aus Mantel und Kruste. Anders als bei der Modellierung der atmosphärischen oder ozeanischen Zirkulation muss man zur Errechnung der Spannungen verstehen, welchen Widerstand das Gestein leistet. Er hängt von der



**INNEN UND AUSSEN** Der Autor hat gemeinsam mit Maëlis Arnould und weiteren Kollegen ein komplettes geophysikalisches Modell eines erdähnlichen Planeten erstellt. Die linke Spalte zeigt die Erdoberfläche. Farblich hervorgehoben sind die Zonen, in denen Platten aufeinandertreffen und miteinander wechselwirken: Flache mittelozeanische Rücken sind orange dargestellt, tiefe Subduktionszonen blau. In der rechten Spalte sieht man die Konvektion im Erdinnern: Der heiße Mantel wälzt beständig Materie um. Dabei schießen Wolken heißen, weichen Gesteins (Manteldiapire) an die Oberfläche.

Temperatur, dem Druck und wiederum der Spannung selbst ab. Den Auftrieb beeinflusst in erster Linie die Temperatur, und auch die chemische Zusammensetzung ist dafür in den tiefsten Regionen des Mantels von Bedeutung.

Wie Druck oder Temperatur das Gestein verformen, erforschen Geowissenschaftler in Laborexperimenten. Dazu bringen sie kleine Gesteinszylinder in eine Presse und stellen eine bestimmte Temperatur ein. Ist sie geringer als 400 Grad Celsius, brechen die Zylinder unabhängig von der Art des Gesteins bei ganz ähnlichen Belastungsgrenzen. Bei Temperaturen über 500 Grad Celsius beginnt das Material zu fließen, wenn die Belastungsgrenze erreicht ist, und gibt schließlich nach. Die Wissenschaftler verfeinern die Experimente stetig, variieren Geräte, Probengrößen und -formen, führen die Versuche außerdem bei hohem Druck durch und untersuchen die Struktur ihrer Proben mit hochauflösenden Mikroskopen.

Bei mehr als 1500 Grad Celsius und hohem Druck sind die Verformungsgesetze und physikalischen Mechanismen eindeutig. Wie das Gestein bei geringeren Temperaturen fließt, lässt sich hingegen nicht so einfach beschreiben. Verschiedene Möglichkeiten, wie sich das Gestein auf mikroskopischer Ebene verformt, konkurrieren dann miteinander. Gemeinsam ist allen Prozessen die Wirkung auf das Material: Ist eine Belastungsgrenze erreicht, beginnt die feste Materie in kleinen Bereichen zu fließen, die dadurch sehr schwach werden. Erhöhen sich etwa Druck oder Dehnung, verformt sich das Gestein an diesen Stellen noch leichter, und die plastischen Bereiche breiten sich aus.

Die Auftriebskräfte im Erdmantel kommen durch Dichteunterschiede zwischen benachbarten Gesteinsmassen zu Stande. Mit steigender Temperatur nimmt die Dichte ab, da sich das Material bei Erwärmung ausdehnt. Daher sind heiße Bereiche im Erdinnern lokal leichter und neigen dazu, aufzusteigen, während kalte Bereiche dichter sind und absinken. Chemische Unterschiede beeinflussen den Auftrieb ebenfalls, denn eisenreiche Gesteine sind normalerweise dichter als magnesiumreiche. Seismologische Untersuchungen legen nahe, dass sich im tiefsten Erdmantel Areale in der Größe von Kontinenten befinden, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Um zu verstehen, wie sich ihr Auftrieb unter diesen Bedingungen verändert, experimentieren Wissenschaftler im Labor mit mikroskopisch kleinen Gesteinsproben unter extremen Drücken und Temperaturen.

Aber die winzigen Proben im Experiment verformen sich viel rascher als ganze Kontinentalblöcke während des natürlichen Prozesses. Erst wenn wir die Ergebnisse in ein Modell integrieren, das die Entwicklung des gesamten Planeten simuliert, sind wir in der Lage, anhand der mikroskopischen Effekte Phänomene wie Tektonik, Gebirge oder Strömungen im Erdmantel zu erklären.

Ende der 1990er Jahre erstellte eine kleine Gruppe von Geodynamikern ein Computerprogramm, das das oben beschriebene Kräftegleichgewicht nach der Differenz aus Spannungen und Auftrieb wie oben beschrieben auflöste und dabei die Gesteinsverformung in einem Volumen berücksichtigte, das mit dem des Erdmantels vergleichbar ist. Die Wissenschaftler vereinfachten das Fließverhalten

von Gesteinen bei niedrigen Temperaturen, wobei sie dessen Grundzüge beibehielten. Eine zentrale Herausforderung besteht allerdings bis heute darin, dass Gesteine über kurze Entfernungen unterschiedlich schnell fließen können. Fast alle Verformungen auf der Erdoberfläche treten an Plattengrenzen auf, die mancherorts nur um die zehn Kilometer breit sind. Daher mussten die Modellierer Algorithmen entwickeln, die wichtige Veränderungen auf dieser lokalen Ebene berücksichtigen und dabei einen ganzen Planeten umfassen. Außerdem führte die Modellierung der Strömungsgesetze, die aus den Laborexperimenten mit kleinen Gesteinsvolumina abgeleitet wurden, in dem viel größeren, erdähnlichen Maßstab nicht sofort zu Bewegungen, die denen der tektonischen Platten ähnelten. Wir mussten daher die mathematischen Parameter anpassen, bis unsere Lösungen der Realität nahe kamen: sprich, bis sich im Modell Bergrücken auftürmten und Gräben aufrissen, wenn große Gesteinsplatten sich voneinander entfernten oder miteinander kollidierten.

### **Uneinigkeit über die Beschaffenheit des Erdmantels – und ein Konsens**

Selbst mit verbesserten mathematischen Modellen benötigen solche Berechnungen extrem viel Rechenkapazität: Große Supercomputer mit parallelen Prozessoren waren monatelang damit beschäftigt. 1995 waren die Hochleistungsrechner schließlich so ausgereift, dass mehrere Forschungsgruppen von kleineren Konvektionsmodellen zu vollständig sphärischen 3-D-Modellen übergehen konnten. Um 2010 wurden solche Systeme deutlich günstiger und leichter zugänglich. Ab dann war es möglich, komplexere globale Modelle zu erstellen, die ebenso lokale Details berücksichtigen. Ungefähr zur selben Zeit hatte Tackley seinen Code verbessert: Er konnte jetzt Gleichungen mit variablen Materialeigenschaften lösen, so dass wir Strömungsgesetze mit Spannungsgrenzen einsetzen konnten. Letztlich ließen sich dadurch Konvektion und Tektonik gemeinsam untersuchen.

Bevor ich mit Tackley und Rolf an großen 3-D-Modellen arbeitete, untersuchte ich die chemische Struktur des Erdmantels. Jahrzehntlang gingen Geochemiker davon aus, dass er in eine obere und eine untere Schicht unterteilt ist, die sich in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. In der Geophysik hingegen nahm man an, dass sich die Gesteine durch den gesamten Erdmantel bewegen. Es war allerdings unklar, wie große Landmassen oder langlebige, unterschiedlich zusammengesetzte Bereiche in einem konvektiven, brodelnden System bestehen sollten. Daher habe ich chemische Untersuchungen von magmatischen Hotspots – etwa den mittelozeanischen Rücken, Hawaii oder den Galapagosinseln – mit geophysikalischen Beobachtungen abgeglichen. Das hat dazu beigetragen, einen Konsens zwischen den beiden Standpunkten herzustellen: Der Erdmantel ist nicht in Schichten aufgeteilt. Trotzdem existieren an verschiedenen Stellen chemisch unterschiedliche Bereiche, die sich teils Milliarden Jahre lang der Durchmischung von oben nach unten widersetzen.

Während meiner Arbeit an diesem Projekt erkannte ich, dass das größte Problem darin bestand, genau zu verste-

hen, wie sich die Kontinente gebildet haben. Denn wenn neue kontinentale Kruste entsteht, werden bestimmte chemische Elemente bevorzugt aus dem Mantel in die Kruste gezogen, wodurch sich die Zusammensetzung des Erdmantels verändert. Außerdem sind die Kontinente selbst ein Bestandteil der Mantelkonvektion und tragen langfristig dazu bei, dass sich unser Planet abkühlt. Bildete sich ein Superkontinent, würde sich das darunterliegende Gestein nämlich aufheizen, wie ich mit Petrologen in Simulationen gezeigt habe. Um der Entstehung der driftenden Kontinente auf die Spur zu kommen, musste ich in meinen Modellen ihr plattenartiges Verhalten berücksichtigen. Ursprünglich hatte ich Tackley deswegen kontaktiert.

Darüber hinaus hatte ich den Eindruck, dass Tackley und Rolf die volle Leistungsfähigkeit ihrer 3-D-Modelle noch nicht ganz erkannt hatten. Als ich 2010 in jenem Züricher Hotelzimmer im Bett lag, wurde mir klar, dass wir endlich über die Rechenleistung und die Algorithmen verfügten, um die Tiefen der Erde so zu modellieren, wie Klimawissenschaftler und Meteorologen die Atmosphärenschichten des Planeten nachbilden.

Ich wollte das Erdinnere mit der gleichen Detailgenauigkeit und Komplexität verstehen, mit der Klimaforscher atmosphärische Strömungen und Sturmfronten modellieren. Die Tektonik stößt irgendwann an ihre Grenzen, weil sie annimmt, dass die Platten auf der Erdoberfläche vollkommen starr sind. Deshalb lässt sie außer Acht, welche physikalischen Mechanismen wirken, wenn die einzelnen Platten miteinander interagieren. Dagegen ermöglichen es dynamische Modelle, wie sie bei der Klimamodellierung und der Wettervorhersage verwendet werden, weichere, »fließendere« Grenzen zu verwenden und zu beobachten, wie sich die Kräfte mit der Zeit verändern. Bei der Wettervorhersage ziehen Meteorologen Beobachtungen von verschiedenen Orten und Zeitpunkten heran und extrapolieren daraus mit Hilfe physikalischer Modelle die Bedingungen für die kommenden Tage. Ähnlich kann man das mit tektonischen Platten anstellen, allerdings extrapoliert man dabei Beobachtungen in die Vergangenheit, nicht in die Zukunft (und die Prozesse sind deutlich langsamer). Wir brauchten also ein neues Modell, das die Tektonik vorhersagen konnte, sowie eine Software, die in der Lage war, Beobachtungen zu berücksichtigen. Dann könnten wir die Entwicklungen der letzten 10 bis 100 Millionen Jahre auf unserem riesigen Planeten rekonstruieren.

Ich hatte jetzt ein klares Ziel vor Augen, doch es würde Jahre dauern, es zu verwirklichen. Zunächst mussten wir die Modelle von Tackley und Rolf so optimieren, dass sie die wesentlichen Züge der Tektonik erfassen konnten. Meine damalige Doktorandin Claire Mallard, die heute an der University of Sydney in Australien forscht, begann mit diesen Modellen so zu arbeiten, als würden sie einen echten Planeten darstellen. Dadurch verstand sie, was wir benötigten, um virtuelle Planeten mit einem erdähnlichen Puzzle aus Platten zu erzeugen.

Mallard entwarf eine Reihe von Modellen. Damit fanden wir heraus, dass die größten Platten durch Bewegungen tief im Innern des Mantels entstehen. Der Widerstand der Platten in der Nähe von Subduktionszonen hingegen lässt

**HORIZONTERWEITERND Komplexe geophysikalische Kräfte formen auch andere Planeten in unserem Sonnensystem. Der Mars etwa besitzt ein Netzwerk von Gräben und Brüchen. Im Bild rechts sieht man die Cerberus Fossae (Gräben des Zerberus), aufgenommen von der Raumsonde Mars Express der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Seismische Daten der aktuellen NASA-Mission Insight und Simulationen wie die des Autors helfen vielleicht eines Tages, zu entschlüsseln, wie sich der Rote Planet entwickelt hat.**

riesige Brocken Erdkruste in viele kleinere zersplittern. Beide Ergebnisse hängen von derselben physikalischen Eigenschaft ab: dem Widerstand des Gesteins nahe der Erdoberfläche. Ist er hoch, kommt es nur selten zu Subduktionen; große Platten bleiben dann erhalten. Ist das Material allerdings viel weicher, halten die mächtigen Platten dem Druck nicht stand, falten sich zusammen und zerbrechen in kleinere Stücke. Weil große und kleine Platten über die gesamte Erdoberfläche verteilt sind, müssen die Kräfte im Mantel ähnlich stark sein wie der Widerstand der Platten, und beide Faktoren bestimmen, wie sich der Meeresboden aufspreizt und wie die Kontinente driften. Mallards Arbeit hat uns somit eine klare Anleitung gegeben, welche Parameter wir innerhalb des Modells beachten müssen.

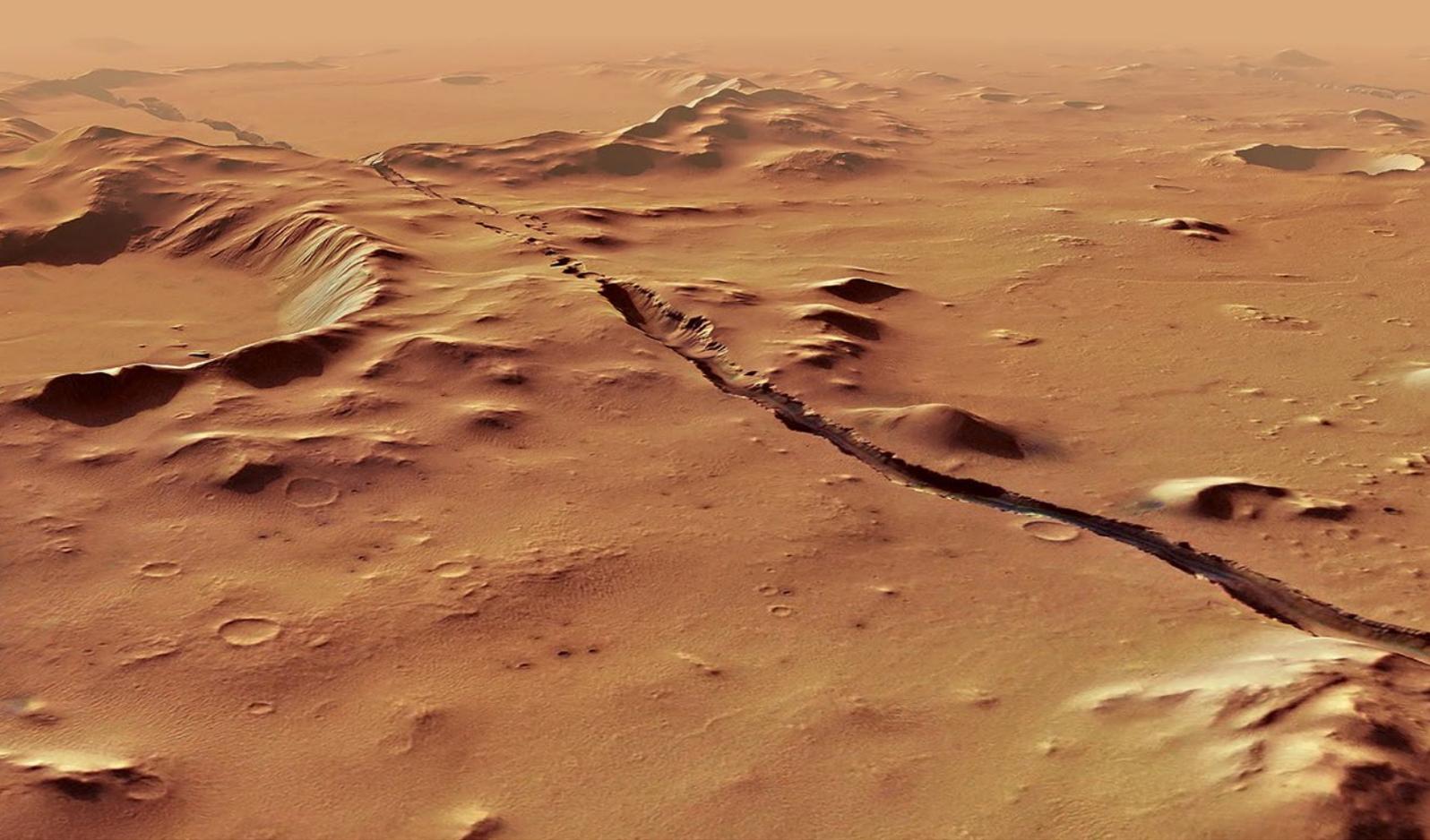
Mit Maëlis Arnould, heute Assistenzprofessorin an der Universität de Lyon, machte ich den nächsten Schritt: Wir wollten einen kompletten erdähnlichen Planeten modellieren, von der Kruste bis zum Innern. Dazu mussten wir aber erst unsere Computer dazu bringen, schneller zu rechnen, ohne dass die Qualität der Ergebnisse litt. Da die Berechnung eines ganzen Planeten in drei Dimensionen Monate dauern würde, bedurfte es darüber hinaus einiger Tricks, um die wichtigsten Parameter für unsere Gleichungen zu finden. Wir konnten uns nicht auf blindes Ausprobieren verlassen, wenn wir das vollständige 3-D-Modell laufen ließen.

### **Ein Erdmodell mit 50 Millionen dreidimensionalen Zellen und einer Milliarde Markierungen**

Um diese Tricks zu programmieren, ließ ich einen Sommer lang verschiedene Proberechnungen laufen. Nach jeweils einer Woche stoppte ich die Simulationen, wertete die Ergebnisse aus, passte die Parameter an und begann von vorn. Dadurch bekam ich ein Gefühl für die Modelle und verkürzte durch die richtigen Entscheidungen die Laufzeit der Simulation von Jahren auf Monate.

Während ich den rechnerischen Rahmen für unser großes Modell schuf, versuchte Arnould mit Hilfe zweidimensionaler Simulationen zu verstehen, wie Konvektionsströmungen die Topografie hervorbringen, die wir auf der Erde sehen. Mit Hilfe dieser Berechnungen konnten wir erklären, warum sich bestimmte Eigenschaften herausbilden: etwa dass sich der Meeresboden hebt oder sich die Kontinentalränder über tausende Kilometer verschieben.

In unseren Modellen spielt das Viskositätsgesetz eine zentrale Rolle. Es beschreibt, wie Gesteine fließen und sich



ESA/DFU/BERLIN (WWW.ESA.INT/ESA\_MULTIMEDIA/IMAGES/2018/09/PERSPECTIVE\_VIEW\_OF\_CERBERUS\_FOSSAE/CC-BY-SA 3.0) / CREATIVE COMMONS ORG/LICENSING/SAC/DIGITALECODE

verformen. Wir formulieren es temperaturabhängig: Kaltes Gestein ist starr, heißes ist weich. Dabei berücksichtigen wir ebenso, wie das Material unter Belastungen reagiert: Ab einem gewissen Schwellenwert sinkt die Viskosität, das Gestein wird weicher. Um die Bedingungen auf der Erde realistisch nachzubilden, muss der simulierte Erdmantel im Mittel so viskos sein, dass eine ausreichend starke Konvektion entsteht. Darüber hinaus müssen wir unsere Modelle an so vielen Gitterpunkten auf dem gesamten Globus rechnen, dass ein Supercomputer in der Lage ist, die Gleichungen aufzulösen und wir scharfe, detaillierte Bilder der Platten und ihrer Wechselwirkungen erhalten. Daher haben wir unseren Modellplaneten in 50 Millionen dreidimensionale Zellen unterteilt und eine Milliarde Markierungen in das System eingebaut, um die Materialeigenschaften während der Zirkulation zu verfolgen.

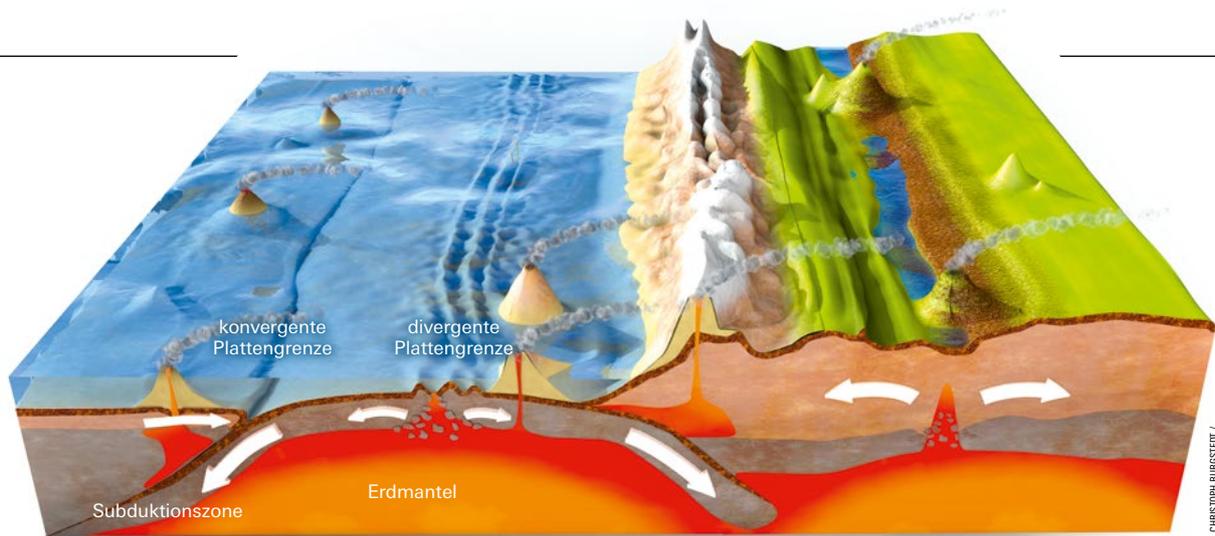
Ein einziger Schnappschuss unseres Modells erzeugte mehr als 20 Gigabyte an Daten. Eine zentrale Herausforderung bei dieser Modellierungsarbeit besteht darin, dass Konvektion und Platten als komplexes System zusammenwirken. Das tektonische Verhalten, das daraus resultiert, ist eine »emergente« Eigenschaft. Das heißt, es ergibt sich erst durch zahlreiche Wechselwirkungen. Solche Ergebnisse sind mehr als die Summe einzelner Größen im System und daher nicht vorhersagbar – so wie sich die Bewegung einer großen Menschenmenge nicht anhand der Laufwege Einzelner vorausbestimmen lässt. Obwohl wir eine Reihe von Parametern gewählt und unsere Berechnungen begonnen hatten, konnten wir folglich nicht wissen, ob sich eine erdähnliche Tektonik mit Subduktion und Superkontinentzyklen herausbilden würde. Die Eigenschaften des Modells sind so komplex miteinander verwoben, dass solche Simu-

lationen viele Monate lang laufen müssen – und wir hatten mehrere Modelle benötigt, um wirklich zu verstehen, wie unsere ursprünglichen Annahmen die Ergebnisse beeinflussten.

Wir würden also nur eine einzige Chance erhalten, um zu sehen, ob unser Modell funktioniert. Es fühlte sich ein wenig so an, als führe man allein mit einem Boot auf einen riesigen Ozean hinaus. 2018 waren wir schließlich so weit und starteten die Berechnungen. Sie sollten die bis dahin realistischste Simulation der Erde darstellen.

Es dauerte neun Monate, das gesamte Modell zu rechnen, doch wir überprüften den Fortschritt regelmäßig. Jeder Simulationstag entsprach mehreren Millionen Jahren auf der Erde. In diesem Zeitraum bewegt sich ein Kontinent etwa 100 Kilometer weit, das entspricht der Entfernung von Stuttgart nach Mannheim (Luftlinie). Wir benötigten zehn Rechentage, um 50 Millionen Jahre zu simulieren, das ist der Zeitraum, in dem die Alpen entstanden sind. Im Lauf der Zeit wurden wir immer aufgeregter, denn wir sahen, wie sich erdähnliche Merkmale herausbildeten: von driftenden Kontinenten bis hin zu steil abfallendem Meeresboden. Vor unseren Augen entstanden tiefe Grabenbrüche, über Hotspots wölbte sich die Erde. Bestandteile, die wie Platten aussahen, bildeten sich heraus, und von Zeit zu Zeit stieg an ihren Rändern heißes Material aus dem Erdmantel an die Oberfläche und löste eine Subduktion aus.

Obwohl ich Jahre in seine Entwicklung investiert hatte, begriff ich erst nach einigen Monaten, dass dieses dynamische Modell mehr war als nur ein beeindruckender Film – dass es nämlich einen echten wissenschaftlichen Sprung darstellte. Mit meiner Forschungsgruppe verbrachte ich zwei Wochen in Südfrankreich, um die Datenmassen



## Ein Puzzle aus Platten

Seit Jahrzehnten beschreiben Fachleute anhand der Plattentektonik, wie die Oberfläche der Erde entstanden ist und sich mit der Zeit verändert. Sie ist zwar ein vereinfachtes Konzept, beschreibt aber in groben Zügen gut, wie sich die kühlere Lithosphäre der Erde in Abhängigkeit von ihrem heißeren Innern bewegt.

Die Lithosphäre der Erde umfasst mehrere große und Dutzende kleinerer Platten, die sich ständig gegeneinander verschieben (weiße

Pfeile). An divergenten Plattengrenzen bewegen sich Platten voneinander weg, so dass zwischen ihren Rändern Magma aufsteigt und neue untermeerische Rücken bildet. An konvergenten Grenzen stoßen Platten zusammen. Dadurch wird eine Platte zusammengedrückt und unter eine andere geschoben, wo sie in einer Subduktionszone in den Mantel abtaucht. An anderen Plattengrenzen wiederum schieben sich Platten aneinander vorbei (nicht gezeigt).

Viele Kräfte spielen zusammen, um diese Bewegungen anzutreiben. An konvergenten Plattengrenzen übt der abtauchende Rand der subduzierenden Platte einen Zug auf die gesamte Platte aus. Dadurch entfernt sie sich am gegenüberliegenden Rand von einer anderen, so dass dort eine divergente Plattengrenze entsteht. An dieser Stelle quillt frisches Magma nach oben; das neue Gestein türmt sich an der Oberfläche auf und bildet einen Höhenrücken.

auszuwerten. Darunter waren einige Nachwuchswissenschaftler sowie Laurent Husson von der Universität Grenoble Alpes in Frankreich, Claudio Faccenna von der Universität Roma Tre und Thorsten Becker von der University of Texas in Austin. Gemeinsam mit ihnen nahm ich die Kräfte hinter der Plattentektonik genauer in den Blick.

In den von uns erstellten Modellen bilden Mantel und Platten ein einziges selbst organisiertes System, in dem Platten und Tektonik emergente Eigenschaften sind. Daher können wir anhand unserer Simulation untersuchen, wo die treibenden Kräfte in diesem System wirken und wie sie sich über geologische Zeiträume hinweg verändern. Wir erforschen und beschreiben die Beziehungen zwischen dem Innern der Erde und ihrem Äußeren: wie die Topografie beschaffen ist; wie sich die Rotationsachse im Verhältnis zu den festen Schalen der Erde bewegt; wie das tiefere Erdinnere und das Klima zusammenhängen; und schließlich, wie sich das magnetische Verhalten der Erde durch Mantelkonvektion und Tektonik verändert. Die Daten aus diesen Modellen können wir jetzt direkt mit

geologischen und geophysikalischen Beobachtungen abgleichen.

Eine einzige Simulation genügt indessen nicht, um das gesamte System Erde zu verstehen. Daher habe ich ergänzend zu unserer neunmonatigen Berechnung weitere kleinere, einfachere Modelle erstellt. Wenn wir diese Ergebnisse zusammen betrachten, wird klar: Das selbstorganisierende System mit der Mantelzirkulation hat die Plattentektonik hervorgebracht. Und die dominierenden Kräfte, die wir beobachten, befinden sich in den ersten 100 Kilometern unter der Erdoberfläche. Diese Kräfte entstehen im Wesentlichen in den Subduktionszonen. Dort folgt die Zirkulation im Mantel unter den absinkenden Platten nicht den Bewegungen an der Oberfläche. Sie verhält sich also anders als die Meeresoberfläche, über die der Wind weht.

In den kontinentalen Bereichen hingegen liegen die entscheidenden Kräfte in 100 bis 500 Kilometer Tiefe, insbesondere unter den wachsenden Gebirgen. An ihnen sehen wir, dass die Strömungen im Mantel mancherorts bis

an die Oberfläche wirken und die Gebirge »mitziehen«. In so einem Fall sind die Oberflächenbewegungen langsamer, als wenn die Kräfte in geringer Tiefe wirken – etwa einen Zentimeter pro Jahr statt zehn.

Die Kräfte aus größerer Tiefe dominieren, wenn Kontinente zusammenstoßen und dadurch Gebirge entstehen. In der Erdgeschichte ist das vor 300 Millionen Jahren passiert, als sich Pangäa bildete, und möglicherweise auch bei jüngeren Kontinentalzusammenstößen. Die Afrikanische Platte schiebt sich heute noch in die Eurasische, die Indische hat sich vor 50 Millionen Jahren zusammengeschlossen, und in den letzten Millionen Jahren hat sich Australien durch tektonische Kräfte auf Indonesien zubewegt. Wir könnten darüber hinaus untersuchen, welche Rolle Manteldiapire spielen: Das sind Ströme heißen Gesteins, die an einzelnen Stellen aus dem tieferen Erdmantel aufsteigen, auf die Unterseite der Platten treffen und dadurch vulkanische Aktivität auslösen. Hawaii und Island sind beispielsweise durch die magmatische Aktivität von Diapiren entstanden.

### Der grundsätzlichen Entwicklung von Planeten auf der Spur

Unsere Modelle deuten darauf hin, dass aufsteigende Diapire nicht die primäre Kraft sind, die Kontinente spaltet, sondern dass sie das Gestein aufheizen und aufweichen, wodurch sich die Platten leichter verformen lassen. Stehen die Kontinente unter Spannung, bilden sich in der Folge neue Plattengrenzen quer durch sie hindurch. Die Diapire, die sich heute unter Island, Tristan da Cunha oder Bouvet befinden, haben dazu beigetragen, den letzten Superkontinent Pangäa im Lauf der vergangenen 200 Millionen Jahre in verschiedene Teile zu zerlegen.

Das monatelange Warten auf die virtuelle Entwicklung des Planeten hat sich gelohnt. Denn weil wir die unterschiedlichen Modelle kombiniert haben, besitzen wir jetzt endlich ein umfassendes Bild davon, welche Kräfte die tektonischen Bewegungen antreiben, die wir heute beobachten (und die in der Vergangenheit stattgefunden haben).

Als Nächstes wollen wir Transformstörungen wie die San-Andreas-Verwerfung untersuchen. Während diese aktiven Grenzen in meinem Modell unscharf und breit erscheinen, bilden sie auf der Erde markante Strukturen aus. Wie sie zu Stande kommen und sich verändern, wissen wir noch nicht. Ebenso wollen wir ergünden, wie Berge entstehen und wie sich die Plattentektonik seit dem Archaikum – dem frühesten geologischen Zeitabschnitt der Erde – herausgebildet hat. Schließlich hoffen wir untersuchen zu können, wie Veränderungen in der Plattentektonik das Magnetfeld der Erde und das Klima beeinflussen. Diese Fragen waren schon immer wichtig, und jetzt, da wir ein globales Modell der Konvektion haben, können wir endlich nach umfassenden, genauen Antworten suchen.

Unsere Modelle sind ebenso wenig perfekt wie die Theorie der Plattentektonik. So unterschlagen sie einige Faktoren, beispielsweise Erosion, spröde Verwerfungen in der oberen Kruste, die Bewegung von Magma oder die Elastizität von Gestein. Aber mit ihnen lässt sich endlich die Physik erforschen, die der Plattentektonik zu Grunde liegt.

Es war nie mein Ziel, einen künstlichen Planeten zu erschaffen. Vielmehr wollte ich die notwendigen Werkzeuge und Daten liefern, um herauszufinden, wie die beobachtbaren Phänomene an der Oberfläche und die verborgenen Kräfte in der Tiefe des Planeten zusammenspielen. Die Physik in unseren Modellen ist daher nicht auf die Erde beschränkt – die Simulationen sollten ebenso für die Untersuchung anderer Planeten geeignet sein. So könnten wir zum Beispiel die Beziehungen zwischen innen und außen für unsere Nachbarn Merkur, Venus und Mars erforschen.

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



NASA EARTH OBSERVATORY, ROBERT SIMMON

Dieser Gedanke ist besonders verlockend, da die InSight-Mission der NASA jetzt seismische Messungen auf der Marsoberfläche durchführt und uns Einblicke in die Funktionsweise des Marsmantels gewährt. Ein Gestein, das Mallard, Patrice Rey und ich 2015 in der australischen Pilbara-Region gefunden haben, befindet sich heute auf dem Mars, um die SuperCam des Rovers Perseverance zu kalibrieren. Zusammen mit den Daten vom Roten Planeten hilft die Physik unserer Modelle vielleicht, wichtige Fragen zu klären – etwa, ob es auf dem Mars zu Beginn seiner Geschichte Plattentektonik gegeben hat. Wir hoffen, dass Computer uns eines Tages verstehen helfen, warum sich die ersten vier Planeten unseres Sonnensystems so stark voneinander unterscheiden, obwohl sie aus ähnlicher Materie bestehen. Eines Tages begreifen wir dadurch womöglich nicht nur, wie die Gesetze der Physik unseren Planeten über die Zeit beeinflusst haben, sondern auch, wie sie andere Welten formen. ◀

### QUELLEN

**Arnould, M. et al.:** On the scales of dynamic topography in whole-mantle convection models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19, 2018

**Arnould, M. et al.:** Plate tectonics and mantle controls on plume dynamics. *Earth and Planetary Science Letters* 547, 2020

**Coltice, N. et al.:** A mantle convection perspective on global tectonics. *Earth-Science Reviews* 165, 2017

**Coltice, N. et al.:** What drives tectonic plates? *Science Advances* 5, 2019

**Mallard, C. et al.:** Subduction controls the distribution and fragmentation of Earth's tectonic plates. *Nature* 535, 2016

AMERICAN  
**Scientist**

© American Scientist  
[www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org)

# PLATTENTEKTONIK EIN SPURT, DER KEINER WAR

**Vor etwa 60 Millionen Jahren stieß Indien gegen Eurasien und schob wie ein Pflug den Himalaja auf. Doch als Lucía Pérez-Díaz sich im Detail mit dem Ereignis befasste, stellte sie fest, dass das, was am verblüffendsten daran schien, durch eine falsch kalibrierte geologische Uhr nur vorgetäuscht wurde.**



**Robin George Andrews** ist promovierter Vulkanologe und freier Journalist in London.

» [spektrum.de/artikel/1959643](https://spektrum.de/artikel/1959643)

Die Erde scheint in vielerlei Hinsicht einzigartig zu sein. Aber für Lucía Pérez-Díaz, Geologin an der University of Oxford, zählt zu den erstaunlichsten Eigenschaften unseres Planeten, dass er ständig sein Gesicht verändert.

Die Erdhülle besteht aus riesigen Gesteinsblöcken, die auf dem oberen Erdmantel schwimmen: den tektonischen Platten. Sie treiben ungefähr so schnell umher, wie Fingernägel wachsen, krachen dabei wie in Zeitlupe ineinander, gleiten aneinander vorbei, überrollen sich, tauchen untereinander ab und spalten sich auf.

Wir wissen weder genau, was die Plattenbewegung einst in Gang gesetzt hat, noch haben wir ein klares Bild davon, welche Kräfte oder Strukturen unter der Oberfläche es sind, die die Platten auch heute noch stetig umherschieben. Aber ein knappes halbes Jahrhundert, nachdem die moderne Theorie der Plattentektonik entstanden ist, steht zumindest fest, dass dieser beharrliche Vorgang allgegenwärtig ist. Er bildet so etwas wie den Leitfaden, der sich durch die geologischen Epochen der Erdgeschichte zieht.

Dank der magnetischen Fingerabdrücke in altem Vulkangestein lässt sich über Jahrmillionen hinweg rekonstruieren, wo sich jedes tektonische Puzzleteil zu einer bestimmten Zeit befunden hat. So gelingt es, die Wanderungen der Platten präzise nachzuzeichnen und damit das Werden und Vergehen der vielen Gesichter unseres Planeten zu verfolgen und faszinierend lebendig zu machen.

Aber für den indischen Mikrokontinent ergaben diese tektonischen Zeitreisen etwas Seltsames. Demnach drück-

te er vor etwa 67 Millionen Jahren, als er sich von Afrika löste und nach Norden driftete, regelrecht auf das Gaspedal, während andere tektonische Platten weiter vor sich hindümpelten.

Pérez-Díaz fand das merkwürdig. Während einige aus ihrer Zunft mit einer scheinbar einleuchtenden Erklärung aufwarteten, blieb sie skeptisch und schürfte tiefer. Bei ihren Untersuchungen, über die sie letztes Jahr in der Zeitschrift »Geology« berichtete, kam sie zu dem Schluss, dass Indiens dramatische Beschleunigung, eine der auffallendsten Besonderheiten der Plattentektonik in den letzten 100 Millionen Jahren, in Wahrheit eine Illusion ist, vorgetäuscht durch eine falsch kalibrierte geologische Uhr.

## **Frau Pérez-Díaz, warum interessieren Sie sich für die Bewegung tektonischer Platten auf der Erdoberfläche?**

Die Plattentektonik ist letztlich verantwortlich dafür, dass Leben in der heutigen Form auf der Erde existiert. Indem sie die Entstehung und Entwicklung der Ozeane steuert, beeinflusst sie die Verteilung und Bewegung des Wassers auf unserem Planeten und damit die Bildung und Vernichtung von Lebensräumen. Und gewaltige Vulkanausbrüche, die mit einem Mantelplume, also einem fontänenartigen Aufstrom zähflüssigen, überhitzten Gesteins im Erdmantel, in Verbindung stehen, könnten verheerende Massenextinktionen in der Erdgeschichte verursacht haben, bei denen zahllose Tierarten ausstarben.

Viele unterschätzen die Bedeutung der Plattentektonik. Denn in unserem Alltag spielt sie praktisch keine Rolle – es sei denn, Sie leben in der Nähe einer Plattengrenze; dann haben Sie Erdbeben oder Vulkane oder beides.

## **Wie bewegen sich tektonische Platten?**

Als ich in der Schule war, dachte man, dass für das Driften der Platten die Schicht zwischen Erdkruste und Erdkern verantwortlich sei, also der Erdmantel. Er ist zähplastisch und



## Lucía Pérez-Díaz

Die Geologin befasst sich an der University of Oxford vor allem mit plattentektonischen Fragestellungen.

wird durch Ausgleichsströmungen, die Wärme aus dem Erdinneren nach außen transportieren, ständig umgewälzt. Diese Konvektion sollte die darauf sitzenden Platten mitziehen. Aber später hieß es: Vielleicht lösen Platten, die bei der Kollision mit einer anderen in den Mantel sinken oder – fachsprachlich – subduziert werden, überhaupt erst die Konvektion aus.

Das eine Modell nennt man bottom-up – der Mantel bewegt die Platten – und das andere top-down – die Platten bewegen den Mantel. In Wirklichkeit halten sich beide Vorgänge über eine Rückkopplungsschleife wahrscheinlich gegenseitig in Gang. Aber es gibt bestimmte Ereignisse und Plattenbewegungen, die sich nicht so einfach erklären lassen. Manchmal steht die Bewegung einer Platte nicht in Einklang mit der Art, wie ihre Ränder abtauchen.

### Und das galt für die Indische Platte vor ihrer Kollision mit der Eurasischen?

Wenn eine der Haupttriebkraft der Plattentektonik die Subduktion ist, bei der sich eine Platte unter eine andere

schiebt, wobei ihr Rand in den Erdmantel absinkt, dann sollte sie sich nicht schneller bewegen, als ihr Rand abtaucht. Wir wissen, wie schnell Platten subduziert werden. Und in diesem Fall hat sich Indien anscheinend viel schneller bewegt. Der Grund dafür kann also nicht die Subduktion gewesen sein. Aber was war es dann?

In der Geologie versuchen wir, Ereignisse zu finden, die zur selben Zeit an derselben Stelle stattfinden. Und als Indien seine Wanderung begann, gab es dort den aufsteigenden Réunion-Plume.

### Was versteht man darunter?

Einen Aufstrom heißen Materials im Erdmantel, der unterhalb der heutigen Insel La Réunion im Indischen Ozean stattfand. Er verursachte gewaltige Vulkaneruptionen, bei denen riesige Mengen an Lava austraten und das Dekkan-Trapp-Plateau in Indien bildeten. Manchen gilt er als Ursache für das Aussterben der Dinosaurier. Bei den Eruptionen wurden große Mengen an vulkanischen Gasen freigesetzt, welche die Atmosphäre verschmutzten und so den Dinosauriern das Leben schwer machten.

### Und dieser Plume beeinflusste die Bewegung der Indischen Platte?

Es wird vermutet, dass Plumes, die aus dem Erdmantel an die Oberfläche kommen, die Erdkruste an dieser





FRANKMANNPOTT / GETTY IMAGES / ISTOCK

**PLATTENDRIFT** Indien löste sich von Afrika und kollidierte nach seiner Wanderung quer durch den Indischen Ozean mit Eurasien, was es den Himalaja empordrückte.

zwischen Indien und der Antarktis sowie zwischen Afrika und der Antarktis.

Damit stellte sich auf einmal eine ganz andere Frage – nicht ob der Réunion-Plume Indien dazu bringen konnte, sich schneller zu bewegen, sondern welches Ereignis im Stande war, an jedem einzelnen Mittelozeanischen Rücken auf dem Planeten gleichzeitig eine plötzliche Beschleunigung hervorzurufen.

Die Antwort darauf lautet: keines. Die einzige mögliche Erklärung ist, dass die geologische Zeitskala nicht stimmt. Und wenn die Zeitskala falsch ist, dann waren natürlich auch die daraus ermittelten Plattengeschwindigkeiten inkorrekt.

Also machten wir uns daran, die Zeitskala neu zu kalibrieren. Und nach dieser Rekalibrierung waren alle Beschleunigungen auf einmal verschwunden – auch die Indiens. Es handelte sich schlicht um Illusionen. Es gab keine Plattenspurts. Alle Krustenblöcke hatten sich so gemächlich bewegt wie eh und je.

### Was bedeutet das nun für die angebliche Schubkraft von Plumes?

Als die Plume-push-Hypothese aufkam, war das eine aufregende Idee. Aber fortan hieß es fast automatisch bei allen anderen Studien zu unerklärlichen tektonischen Ereignissen, wenn ein Plume in der Nähe war: Das muss der Plume sein. Wir haben gezeigt, dass der Indische Ozean kein Beweis für diese Art von Ereignissen ist. Ob Plumes einen Einfluss auf die Bewegung von Platten haben, ist unklar. Jedenfalls dürfte er gering sein. Künftig können wir, wenn sich ein Befund mit unserem derzeitigen geologi-

schen Verständnis nicht erklären lässt, das also nicht mehr einfach auf einen Plume schieben.

### Was schätzen Sie, wie lange es noch dauern wird, bis alle Rätsel der Plattentektonik gelöst sind?

Wir wissen heute mehr als noch vor 50 Jahren. Wir haben viel mehr Daten und bessere Computer. Aber nehmen Sie den Atlantik, wo die Verhältnisse recht einfach sind, weil Südamerika gut zu Afrika passt. Selbst da könnten Sie vermutlich 15 oder 20 verschiedene Rekonstruktionen für die Trennung der beiden Kontinente finden, die alle ein bisschen anders aussehen. Das zeigt, wie komplex das Geschehen war und wie schwierig es ist, Plattenbewegungen genau zu rekonstruieren (siehe Artikel ab S. 50).

Es liegt also definitiv noch ein weiter Weg vor uns, was ich sehr spannend finde. Wer will schon in einem Bereich arbeiten, in dem man fast alle Antworten hat?

### Es scheint Ihnen Spaß zu machen, diese Rätsel im planetarischen Maßstab zu lösen.

Es ist ein bisschen wie Detektivarbeit. Man sammelt all diese kleinen Puzzleteile und versucht, die Platten durch die Zeit zurück an ihre früheren Positionen zu bewegen. Und dann denkt man darüber nach, was das für die Erdgeschichte oder die Evolution des Lebens bedeutet.

### Wollten Sie schon immer Geologin werden?

Zwischen meinem 4. und 21. Lebensjahr habe ich eine Ausbildung zur Konzertpianistin gemacht. Bei Kunst ist aber immer das Problem – zumindest in Spanien war das so –, dass man davon nicht leben kann. Also habe ich angefangen, Geologie zu studieren. Da hatte ich eine handfeste berufliche Perspektive, aber es war auch etwas, das mich interessierte.

Manche Menschen können sich an einen Moment aus ihrer Kindheit erinnern, an dem ihnen klar wurde, dass sie ein naturwissenschaftliches Fach studieren wollen. Ich wusste, dass ich Rätsel mag, gerne verborgene Dinge ergründe und all das. Davon findet sich viel in der Wissenschaft, also denke ich, meine Neigung dazu war schon immer da. Aber was mich und meinen Werdegang wirklich mehr als alles andere geprägt hat, waren Menschen, die in mir Interesse für ihre Arbeit geweckt haben und damit den Wunsch, dasselbe zu tun. Du gehst deinen eigenen Weg, aber du wirst von anderen beeinflusst.

### Bei Wissenschaft denken die meisten Leute an Mathematik, Physik, Chemie und Biologie. Warum nicht an Geologie?

Als Kind erfährt man einiges über Dinosaurier und Vulkane. Dann folgt eine Lücke, in der man in der Schule nichts weiter über die Geschichte und die inneren Mechanismen unseres Planeten lernt. Als Erwachsener macht man sich dann Sorgen über die Öl- und Gasindustrie, die die Welt verschmutzt.

Aber was ist mit allem anderen? Man muss schon Glück haben, wenn man auf jemanden trifft, der diese Lücke füllt und einem zeigt, wie der Planet funktioniert; sonst bleibt das für immer ein blinder Fleck. ◀

# QUANTENGRAVITATION EIN LABOR FÜR DIE RAUMZEIT

Möglicherweise entsteht das Gefüge von Raum und Zeit aus einer Art Quantenverschränkung. Einige solcher theoretischen Konstrukte sollen sich jetzt in die Realität übersetzen lassen – mit kalten Atomen und deren Wechselwirkungen.



Adam Becker ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist im kalifornischen Berkeley.

» [spektrum.de/artikel/1959649](https://www.spektrum.de/artikel/1959649)

## AUF EINEN BLICK MIT VERSCHRÄNKUNGEN ZUM KOSMOS

- 1** Beim Versuch, Quantenphysik und Gravitation zu vereinen, helfen Erkenntnisse aus einem Modelluniversum. Zwischen Bereichen mit und ohne Schwerkraft gibt es Beziehungen, die sich untersuchen lassen.
- 2** Stellt man die mathematischen Zusammenhänge in einem alternativen Zahlensystem dar, ergibt sich eine baumartige Struktur, die auch in realen Quantenexperimenten auftaucht.
- 3** In Zukunft könnten solche Laborversuche lohnenswerte und unerwartete theoretische Ansätze aufzeigen. Doch bis dahin ist der Weg noch weit.



## UNIVERSELLE VERKNÜPFUNGEN

Die Raumzeit könnte auf fundamentaler Ebene aus Verbindungen zwischen einzelnen Objekten hervorgehen. Ob dem so ist und wie das aussähe, ist aber noch völlig unklar.

Die Aussichten, eine Theorie der Quantengravitation auf direkte Weise zu überprüfen, stehen schlecht – vorsichtig formuliert. Man bräuchte etwa einen Teilchenbeschleuniger mit galaktischen Ausmaßen, um zu jenen Energieskalen vorzudringen, auf denen sich eine quantisierte Schwerkraft bemerkbar machen würde. Oder nehmen wir Schwarze Löcher: Bei den Singularitäten in ihrem Inneren bricht die klassische Physik zusammen, aber wir können in kein Exemplar hineinschauen und untersuchen, was dort passiert. Ein drittes Beispiel für das Wirken der Quantengravitation sind die extremen Bedingungen in den ersten Momenten des Urknalls. Doch auf sie lässt sich heute nur noch mittels subtiler Signale zurückschließen, die sich dem All erst viel später aufgeprägt haben.

In einem Labor in der Nähe des kalifornischen Palo Alto verfolgt Monika Schleier-Smith, Professorin an der Stanford University, einen anderen Ansatz. Seit mehr als einem Jahrzehnt gibt es Ideen, denen zufolge die Schwerkraft – und sogar die Raumzeit selbst – aus der seltsamen quantenmechanischen Eigenschaft der Verschränkung hervorgehen könnte (siehe »Spektrum« Februar 2017, S. 20). Schleier-Smith will das überprüfen und mit hochgradig verschränkten Quantensystemen etwas erzeugen, das sich so verhält wie die verzerrte Raumzeit aus Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie.

In einer Veröffentlichung vom Juni 2021 skizzierte ihr Team den ersten experimentellen Schritt auf dem Weg dorthin. Dabei werden Atome von Lasern sowie durch Magnetfelder festgehalten, präzise positioniert und miteinander verknüpft. Wenn alles richtig eingestellt ist, ähneln

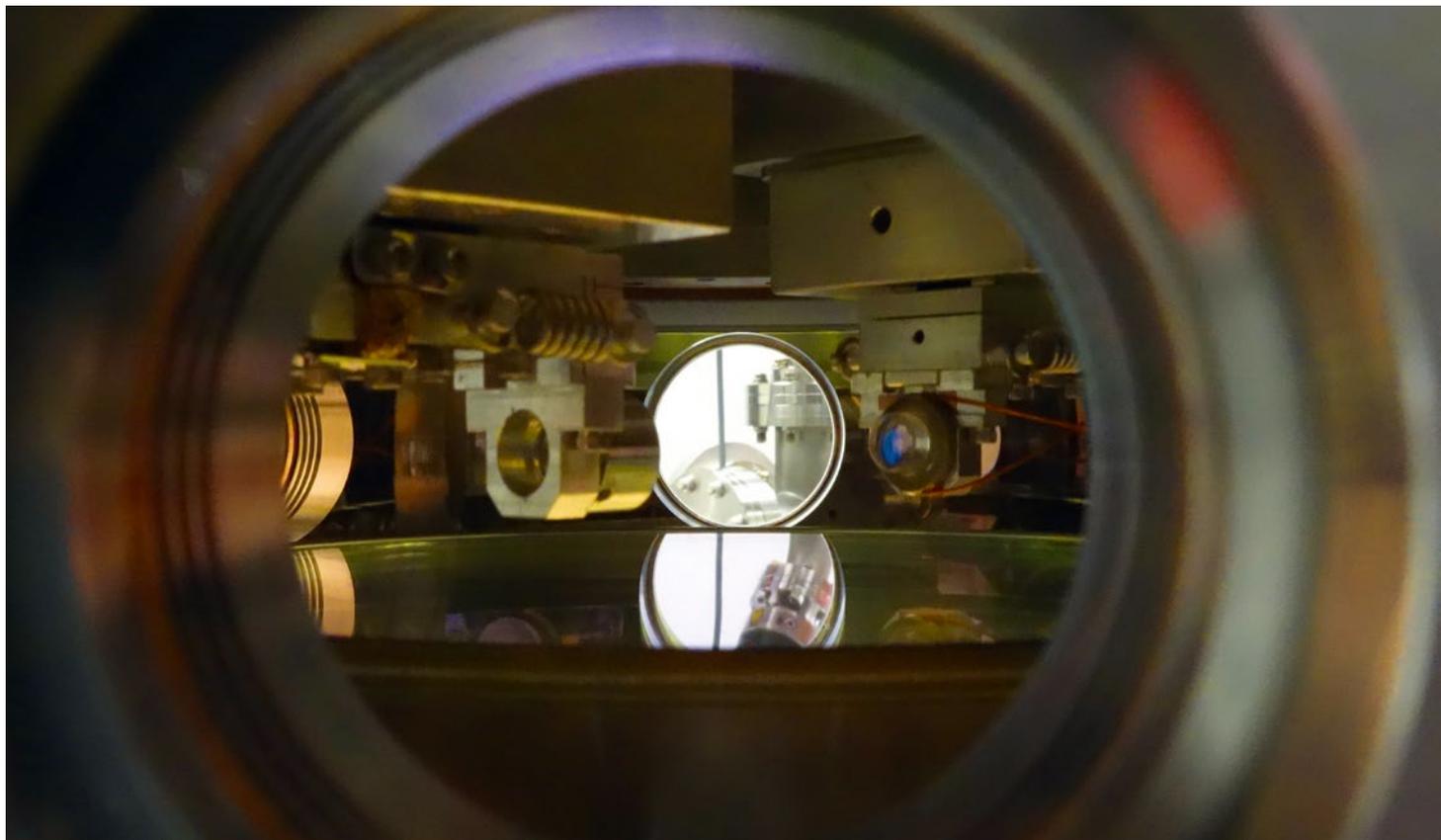
**HERZSTÜCK Spiegel und Laserstrahlen in einer Vakuumkammer im Stanford-Experiment (hier noch nicht in Betrieb) halten die Atome fest.**

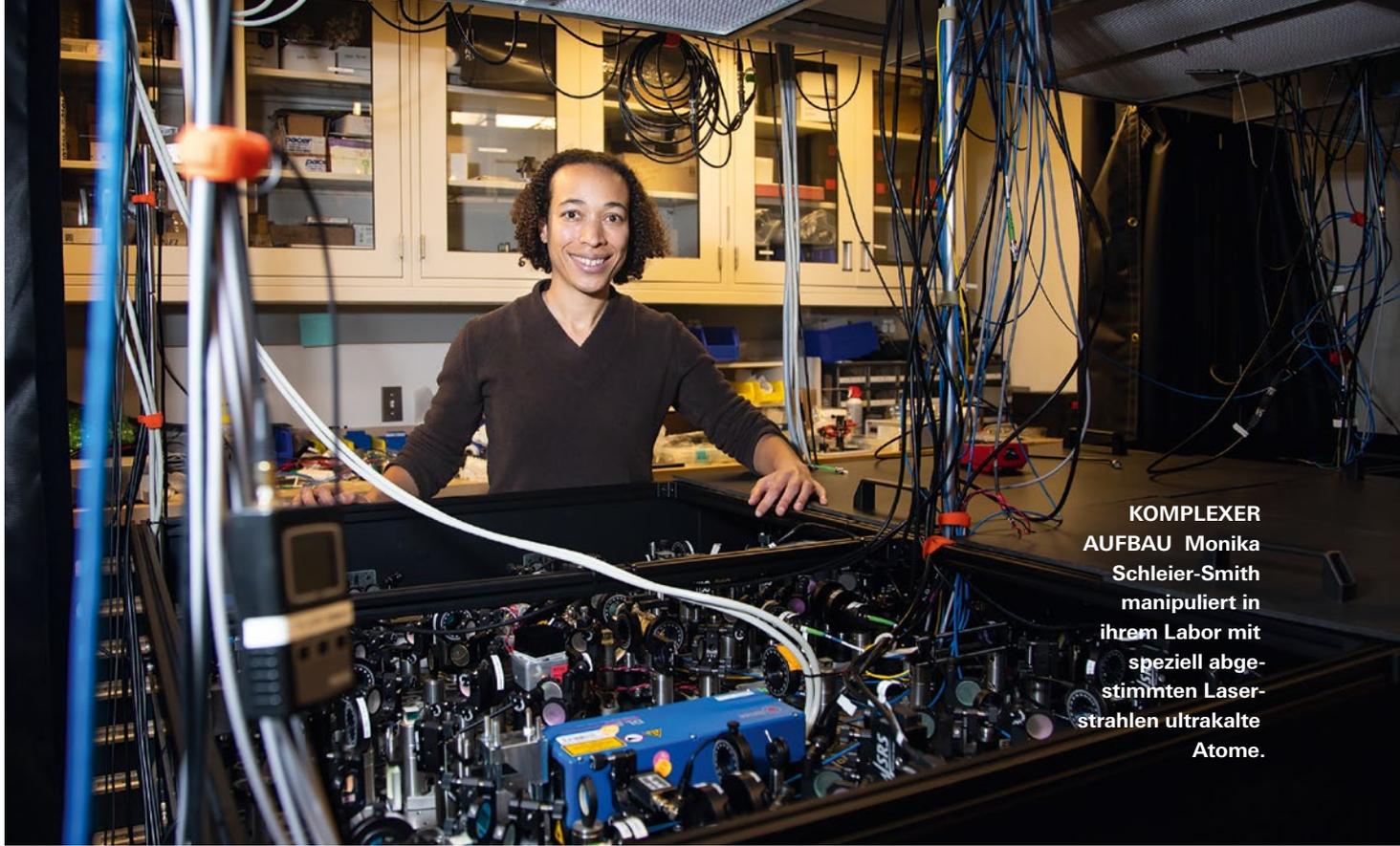
die Korrelationen in dem System einfachen Modellen für die Raumzeit. Darauf aufbauend möchte Schleier-Smith Analogien zu komplexeren Geometrien wie denen von Schwarzen Löchern konstruieren.

Das fünf Jahrzehnte alte Standardmodell der Teilchenphysik hat trotz aller Erfolge Schwächen. Es schließt die Schwerkraft nicht ein, ebenso kann es weder die Dunkle Materie noch die Dunkle Energie erklären, und es sagt außerdem nicht die Masse von Neutrinos voraus. Ohnehin wird das Standardmodell jenseits einer bestimmten Schwelle extrem hoher Energie unbrauchbar. Lange galt die Stringtheorie als viel versprechender möglicher Nachfolger, doch ihr wird vorgeworfen, sie liefere keine überprüfbaren Vorhersagen. Eine ihrer seltsamsten Eigenschaften könnte aber eine Chance bieten, manche Ideen einem Test zu unterziehen.

Die Stringtheorie ist voll von Dualitäten. Das sind mathematische Beziehungen, die verschiedene physikalische Systeme ineinander übersetzen. Die vielleicht überraschendste und folgenreichste darunter ist eine Verbindung von einer vierdimensionalen Quantentheorie ohne Schwerkraft, die als konforme Feldtheorie (CFT) bezeichnet wird, und einer besonderen Art fünfdimensionaler Raumzeit mit Schwerkraft, genannt Anti-de-Sitter-Raum (AdS). Diese so genannte AdS/CFT-Korrespondenz hat 1997 der Physiker Juan Maldacena entdeckt, der heute am Institute for Advanced Study in Princeton arbeitet.

Da die CFT eine Dimension weniger hat als der AdS-Raum, kann man sich vorstellen, sie liege auf dessen Oberfläche wie die Schale um einen Apfel. Trotzdem erfasst die Quantentheorie auf der Oberfläche alle Eigenschaften des Volumens im Inneren – als ob man alles über das Innere des Apfels sagen könnte, wenn man nur seine Schale betrachtet. Das ist ein Beispiel für das physikalische Phänomen der Holografie, das wir von zweidimensionalen Mustern kennen, die ein dreidimensionales Bild erzeugen.





**KOMPLEXER  
AUFBAU** Monika  
Schleier-Smith  
manipuliert in  
ihrem Labor mit  
speziell abge-  
stimmten Laser-  
strahlen ultrakalte  
Atome.

In der AdS/CFT-Korrespondenz entsteht der höherdimensionale innere Raum aus den Beziehungen zwischen den Quantenkomponenten auf der Oberfläche. Die Geometrie des eingeschlossenen Volumens ergibt sich insbesondere aus der Verschränkung: Benachbarte Regionen des Volumens entsprechen quantenmechanisch stark miteinander verbundenen Abschnitten auf dem Rand; weiter voneinander entfernte Areale gehören zu weniger intensiven Verschränkungen. Wenn die Oberfläche einen einfachen und geordneten Satz von Beziehungen aufweist, ist der zugehörige Innenraum leer. Ist die Oberfläche chaotisch strukturiert und sind alle Teile mit allen anderen eng verzahnt, bildet das Innere ein Schwarzes Loch.

### **Der Haken: Das Modell entspricht nicht unserem All**

Im Prinzip ist die AdS/CFT-Korrespondenz ein tiefer und fruchtbarer Einblick in die Verbindungen zwischen Quantenphysik und allgemeiner Relativitätstheorie. Bloß beschreibt sie nicht die Welt, in der wir leben. Unser Universum ist kein fünfdimensionaler, in sich gekrümmter Anti-de-Sitter-Raum, sondern ein expandierender vierdimensionaler Raum mit einer flachen Geometrie.

Vielleicht hilft eine andere Strategie. Bisher sind Fachleute vom inneren Volumen – unserem eigenen Universum – ausgegangen und haben nach Mustern von Quantenverschränkungen gesucht, die ihm entsprechen könnten. Womöglich funktioniert der umgekehrte Weg besser, und es lassen sich Systeme mit interessanten Verschränkungen finden, aus denen sich wiederum Analogien zur Raumzeitgeometrie ergeben.

Das ist leichter gesagt als getan. Es ist noch nicht möglich, eines der stark wechselwirkenden Quantensysteme nachzubauen, von denen bekannt ist, dass bei ihnen eine

Dualität zur Gravitation existiert. Es ist bislang jedoch nur ein kleiner Teil solcher Quantensysteme erfasst. Viele andere sind zu komplex, um sie mit den vorhandenen mathematischen Werkzeugen theoretisch zu untersuchen. Will man herausfinden, ob eines der Systeme davon tatsächlich zu einer Art von Raumzeitgeometrie gehört, besteht die einzige Möglichkeit darin, sie im Labor physikalisch zu erzeugen. »Solche experimentellen Konstruktionen könnten uns helfen«, meint Maldacena. »Vielleicht gibt es einfachere Systeme als die, die wir kennen.« Daher blicken Theoretiker wie er hoffnungsvoll auf Schleier-Smith und andere, die sich auf die Manipulation von Quantensystemen spezialisiert haben.

»An der Theorie der Quantenmechanik hat mir schon immer ihre Eleganz gefallen«, erzählt Schleier-Smith. »Im Labor sieht man zwar zunächst überall Kabel und ein großes Durcheinander von Hardwarekomponenten. Aber damit kann man letztendlich etwas bauen und kontrollieren, das perfekt zu dem passt, was man zuvor sauber auf Papier berechnet hat.« Diese chaotische Eleganz begleitet Schleier-Smiths Arbeit seit ihrer Studienzeit am Massachusetts Institute of Technology, wo sie demonstrierte, wie man bestimmte verschränkte Atomzustände zum Bau präziserer Atomuhren nutzen kann. Anschließend verbrachte sie zwei Jahre in Deutschland am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, bevor sie 2013 nach Stanford ging. Dort kam der Theoretiker Brian Swingle mit einer ungewöhnlichen Frage auf sie zu. »Ich wollte im Wesentlichen von ihr wissen, ob sie in ihrem Labor die Zeit umkehren könne«, so Swingle. »Sie bejahte das. Und so kamen wir ins Gespräch.«

Swingle wollte die Zeit experimentell zurückspulen, um ein Phänomen zu untersuchen, das in der Datenverarbei-



**KONTROLLRAUM** Zahlreiche Messinstrumente und Steuerprogramme dienen zur Justierung der Atomfalle und zur Auswertung der Daten.

tion als Scrambling (englisch: Vertauschen) bezeichnet wird. Dabei werden die Informationen über einen Zustand umgestellt, was es erschwert, die ursprünglichen Daten wiederherzustellen. Bei Schwarzen Löchern gibt es ein Quantenscrambling: Wenn ein Objekt hineinfällt, verteilt sich dessen quantenmechanischer Informationsgehalt über das Schwarze Loch und wird so vor dem Rest des Universums verborgen. »Schwarze Löcher verschmieren alles sehr gut«, bekräftigt Swingle. Zu verstehen, was dabei passiert – und ob die Informationen lediglich versteckt oder tatsächlich zerstört werden, ist seit den 1970er Jahren eines der wichtigsten offenen Probleme der theoretischen Physik.

Bei der AdS/CFT-Korrespondenz entspricht ein Schwarzes Loch im Inneren einem dichten Netz von Verschränkungen an der Oberfläche. Es verwischt hinzukommende Informationen schnell. Swingle wollte wissen, wie so ein rasches Scrambling im Labor aussehen würde. Das betreffende Quantensystem müsste genau kontrollierbar sein, denn um den Vorgang zu überwachen und seine hohe Geschwindigkeit zu verifizieren, wäre es nötig, alle Wechselwirkungen perfekt umzukehren. »Das erfordert im Wesentlichen, das System vor- und zurückzuspulen. Und das kann man bei normalen Experimenten nicht machen.« Aber Swingle hoffte, im Labor von Schleier-Smith könnte sich die Verschränkung zwischen den Atomen sorgfältig genug steuern lassen, um alle ihre Interaktionen umzudrehen, so als würde die Zeit rückwärtslaufen.

Swingle erklärte seiner Kollegin, was er vorhatte. »Er erläuterte mir die Vermutung, es gebe eine obere Grenze der Geschwindigkeit, mit der das Quantenscrambling ablaufen kann«, so Schleier-Smith. »Und wenn man im Labor ein Quantensystem bauen könnte, das diese fundamentale Geschwindigkeitsgrenze erreicht, dann wäre das vielleicht eine Art Analogie zu einem Schwarzen Loch.« 2016 skizzierten die beiden gemeinsam mit Patrick Hayden, einem weiteren Theoretiker in Stanford, und Gregory Bentsen, einem damaligen Doktoranden von Schleier-Smith, eine praktikable Methode zur Erzeugung und Untersuchung so eines schnellen Quantenscramblings im Labor.

**Nach Belieben verschränkte Strukturen**

Die Arbeit an der Veröffentlichung ließ Schleier-Smith über weitere Fragen zur Quantengravitation nachdenken, die ihr Labor untersuchen könnte. »Wir hatten hier vielleicht eine gute Plattform aufgebaut, auf der wir einige einfache Modelle der Quantengravitation durchspielen könnten, die sich mit anderen Mitteln kaum umsetzen lassen.« Sie betrachtete eine Anordnung miteinander verschränkter Atompaaire, bei der jedes mit einem anderen so verbunden wäre, dass letztlich eine baumartige Verzweigung entsteht. »Die tatsächliche Umsetzbarkeit schien mir ziemlich weit hergeholt, aber zumindest konnte ich auf dem Papier ein System entwerfen, bei dem das möglich wäre«, sagte sie. Sie war sich jedoch nicht sicher, ob das letztlich zu einem bekannten Modell der Quantengravitation passt.

Monika Schleier-Smiths Student Bentsen ließ sich von dem Enthusiasmus anstecken. Eigentlich hatte er seine Doktorarbeit im Bereich der theoretischen Physik begonnen. Schleier-Smith schaffte es trotzdem, ihn in ihre Gruppe

KHOI HUYNH/ MIT FRIEDL GEN/ MONIKA SCHLEIER-SMITH

zu holen. »Ich habe ihn irgendwie davon überzeugt, sich an Experimente zu wagen«, erinnert sie sich, »doch er blieb auch an der Theorie interessiert und unterhielt sich gern mit anderen aus diesem Bereich.« Sie besprach ihre neuen Ideen mit Bentsen, der sie mit Sean Hartnoll diskutierte, einem anderen Theoretiker in Stanford. Hartnoll wiederum brachte Schleier-Smith und Bentsen mit dem inzwischen verstorbenen Steven Gubser von der Princeton University in Kontakt.

Zu jener Zeit arbeitete Gubser an einer Variation der AdS/CFT-Korrespondenz. Statt der normalerweise verwendeten reellen Zahlen benutzte er das alternative System der so genannten  $p$ -adischen Zahlen. Sie unterscheiden sich durch die Art und Weise, wie ihre Größe definiert wird. Bei den  $p$ -adischen Zahlen geschieht das durch ihre Primfaktoren. Für jede Primzahl gibt es ein  $p$ -adisches System – die 2-adischen Zahlen, die 3-adischen, die 5-adischen und so weiter. In jedem gilt: Je mehr Faktoren von  $p$  eine Zahl hat, desto kleiner ist sie. Im 2-adischen Zahlensystem ist 44 zum Beispiel viel näher an 0 als an 45, weil 44 zwei Faktoren von 2 hat, während 45 keine hat. Bei den 3-adischen Zahlen ist es umgekehrt: 45 ist näher an 0 als an 44, weil 45 zwei Faktoren von 3 hat. Jedes  $p$ -adische System kann auch als eine Art Baum dargestellt werden, wobei jeder Zweig Zahlen enthält, die alle die gleiche Anzahl von Faktoren von  $p$  haben.

Mit Hilfe der  $p$ -adischen Zahlen hatte Gubser zusammen mit einigen Kollegen einen bemerkenswerten Fund zur AdS/CFT-Korrespondenz gemacht. Wenn man die Formeln zur Oberfläche unter Verwendung der  $p$ -adischen Zahlen an Stelle der reellen Zahlen umschreibt, erscheint der innere Raum als eine Art immens stark verzweigter Baum. Genauer gesagt handelt es sich um unendlich viele Äste, die in einen endlichen Raum gepackt sind, was insgesamt der Struktur der  $p$ -adischen Zahlen selbst ähnelt.

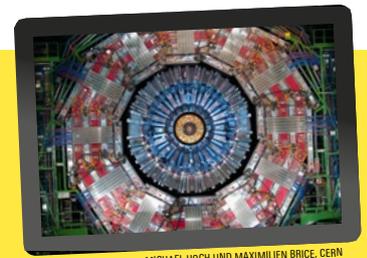
»Die Struktur der  $p$ -adischen Zahlen hatte die gleiche Anmutung wie die Verknüpfungen zwischen Monikas Atomen«, erinnert sich Hartnoll, »also habe ich die beiden miteinander bekannt gemacht.« 2019 veröffentlichte Gubser schließlich gemeinsam mit Schleier-Smith und Bentsen eine Anleitung, wie man aus verschränkten Atomen im Labor so etwas wie den  $p$ -adischen Baum entstehen lassen könnte. Mit diesem Plan gerüstet gingen Schleier-Smith und ihr Team ans Werk.

Schleier-Smiths Experiment in Stanford besteht aus einem Dschungel aus Spiegeln, Linsen und Glasfaserkabeln. Inmitten all dessen befindet sich eine Vakuumkammer mit 18 winzigen Ansammlungen von Rubidiumatomen, pro Gruppe etwa 10000 Stück. Sie sind in einer Reihe angeordnet und auf extrem niedrige Temperaturen gekühlt, auf einen Bruchteil eines Grads über dem absoluten Nullpunkt. Dank einem speziell abgestimmten Laser und einem Magnetfeld, das innerhalb der Kammer ansteigt, kann Schleier-Smith einzelne Atomgruppen gezielt quantenmechanisch verknüpfen.

Mit diesem Aufbau gelang es Schleier-Smith, die beiden Atomgruppen an den Enden der Reihe genauso stark zu korrelieren wie die Nachbarn in der Mitte. In dem Sinn waren die Enden verbunden, und die Linie schloss sich zu

einem Kreis aus Wechselwirkungen. Auch eine baumartige Struktur rief sie so hervor. All dies, ohne die Atome selbst zu bewegen, die Korrelationen waren völlig unabhängig von der tatsächlichen räumlichen Geometrie.

Zwar ist die Baumstruktur der Atome bei Schleier-Smiths Experiment noch keine echte Umsetzung der  $p$ -adischen AdS/CFT-Korrespondenz. Doch Maldacena, der geistige Vater der AdS/CFT-Dualität, hofft auf neue Impulse: »Das Gebiet war bisher auf die Theorie beschränkt, und solche experimentellen Berührungspunkte dürften weitere Fragen aufwerfen.«



MICHAEL HOCH UND MAXIMILIEN BRICE. CERN

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Hayden bezeichnet die Versuche als einen ersten Schritt in Richtung Holografie im Labor. Er sieht darin einen Weg für die Zukunft. »Anstatt die Entstehung der Raumzeit abstrakt nachzuvollziehen, sollten wir Spielzeuguniversen im Labor herstellen und das Phänomen dort direkt überprüfen. Das mag sich verrückt anhören, aber es dürfte wirklich einfacher sein, als die Quantengravitation auf direktem Weg zu untersuchen.«

Schleier-Smith gibt sich jedenfalls optimistisch. Ihre Arbeitsgruppe befände sich noch in einer Phase, in der es zunächst darum ginge, die Quantenzustände besser zu kontrollieren und genauer zu charakterisieren. »Ich würde gern an den Punkt gelangen, von dem an wir nicht wissen, was passieren wird. Vielleicht messen wir Korrelationen im System und finden nachträglich heraus, dass es eine holografische Beschreibung gibt, von deren Existenz wir zuvor nicht wussten. Das wäre cool.« ◀

### QUELLEN

**Bentsen, G. et al.:** Treelike interactions and fast scrambling with cold atoms. *Physical Review Letters* 123, 2019

**Gubser, S. S. et al.:**  $p$ -adic AdS/CFT. *Communications in Mathematical Physics* 352, 2017

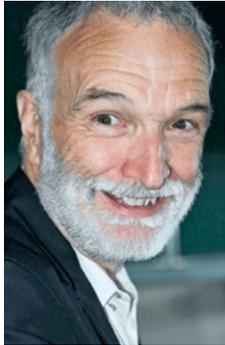
**Periwal, A. et al.:** Programmable interactions and emergent geometry in an atomic array. *Arxiv* 2106.04070, 2021

**Swingle, B. et al.:** Measuring the scrambling of quantum information. *Physical Review A* 94, 2016

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »One Lab's Quest to Build Space-Time Out of Quantum Particles« 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.



# SCHLICHTING! EISSTRUKTUREN ZWISCHEN MANGEL UND ÜBERFLUSS



**In kalten Nächten wachsen oft weit verzweigte Eiskristalle heran. Wo und wie sie genau entstehen, hängt vor allem von den lokalen Gegebenheiten ab.**

**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/1959652](https://www.spektrum.de/artikel/1959652)

## Es waren Myriaden im Erstarren zu ebenmäßiger Vielfalt kristallisch zusammengeschossener Wasserteilchen

Thomas Mann (1875–1955)

► Zwar verlieren Pflanzen im Winter ihre Blütenpracht, doch dafür sprießen an ihnen filigrane, dendritische Eiskristalle und bieten einen schönen und physikalisch interessanten Ersatz. Damit solche Strukturen entstehen können, ist neben tiefen Temperaturen aber auch Wasser nötig.

In einer trockenen und wolkenfreien Nacht kann reichlich davon anfallen. Das ist uns bereits aus den

wärmeren Jahreszeiten vertraut: Nicht selten sind am frühen Morgen Blätter und andere Gegenstände mit zahlreichen bei Sonnenschein glitzernden Tautropfchen benetzt. Durch Abstrahlung von Energie zum dunklen Himmel fällt die Temperatur der Objekte; Luft in deren Nähe kühlt ebenfalls ab. Damit sinkt die maximal mögliche Konzentration des darin enthaltenen Wasserdampfs (maximale Feuchte). Unterschreitet sie die aktuell vorhandene absolute Feuchte, kondensiert das überschüssige Wasser. Die Temperatur, bei der das passiert, heißt Taupunkt.

Kleinere und flachere Gebilde wie Grashalme und Blätter kühlen stärker ab. Denn einerseits ist die pro Zeiteinheit abgestrahlte Energie in etwa proportional zur



**SPRIESSENDE SPITZEN** Vor allem an den dünnen, unterkühlten Blattseiten wachsen Eiskristalle, indem sie vorbeidriftende Wasserdampfmoleküle einsammeln.



**KRISTALLBAUM** Die Strukturen treten an manchen Stellen lamellenartig gestaffelt auf.



**HEXAGONALE BLÄTTCHEN** Über Buschwerk, das tagsüber von der Sonne aufgeheizt wurde, wachsen nachts flächige Eiskristalle mit einem typischen Durchmesser von einem Zentimeter.

H. JOACHIM SCHLICHTING

Größe der Oberfläche, andererseits ist die gespeicherte innere Energie proportional zum Volumen. Wenn  $r$  für eine typische lineare Größe eines Gegenstands steht, etwa seinen Radius, dann schrumpft seine Oberfläche proportional mit  $r^2$ , sein Volumen aber mit  $r^3$ . Wird das Objekt beispielsweise um den Faktor 10 verkleinert, so verringert sich seine Oberfläche um das 100- und sein Volumen um das 1000-Fache. Also nimmt die zu Letzterem proportionale innere Energie stärker ab als die Oberfläche – und mit der inneren Energie ist wiederum die Temperatur verbunden.

Im Winter sind die Verhältnisse nicht grundlegend anders, nur liegt der Taupunkt gegebenenfalls unterhalb des Gefrierpunkts. Dann wird der überschüssige Wasserdampf gar nicht erst flüssig, sondern gefriert an den eiskalten, kleinen Strukturen direkt zu Kristallen (Resublimation). Um vom gasförmigen in den festen Zustand überzugehen, benötigen die Wassermoleküle Unterstützung in Form von so genannten Keimen. Das sind meist winzige Partikel, an denen die Kristallisation leichter gelingt als beispielsweise im freien Raum. Der ideale Keim ist ein bereits existierender Eiskristall, und daher wachsen eher vorhandene Exemplare, als dass neue entstehen.

Auf einem Blatt entwickeln sich die ersten Eisstrukturen bevorzugt an dünnen Härchen und anderen winzigen Auswüchsen (siehe »Sprießende Spitzen«). Sie sind nicht nur besonders kalt, sondern ragen oft außerdem ein Stück weit in die Umgebung hinein, die von Wasserdampfmolekülen wimmelt. Deren Verfügbarkeit ist zudem einer der Gründe dafür, dass die entstehenden Eisnadeln meist nicht in beliebige Richtungen wachsen, sondern von ihrer Basis weg ins Freie. Dabei spielt ein weiterer Aspekt eine wichtige Rolle: Bei der Resublimation fällt Energie aus Kondensationswärme und Kristallisationswärme an. Nur wenn sie genügend schnell weggeschafft wird, kann Dampf tatsächlich erstarren.

Haben die Spitzen eine bestimmte Länge erreicht, können Seitenzweige schräg nach oben austreiben, weil ihre Flanken jetzt genügend weit von der Basis entfernt sind. So ergeben sich die dendritischen Strukturen gewissermaßen zwangsläufig.

In der Natur sind vielfältige Eiskristallmuster zu beobachten. Das spiegelt die zahlreichen Möglichkeiten wider,

die sich durch die Geometrie der Objekte, die jeweils herrschenden Temperaturverhältnisse, den Nachschub an Wasserdampfmolekülen sowie die Entsorgung der Abwärme ergeben.

Die bislang erläuterten Strukturen entsprechen Verhältnissen mit eingeschränkter Versorgung mit Material und begrenztem Abführen der Kristallisationswärme. In Situationen, in denen reichlich Wasserdampf vorhanden ist und die Wärme optimal abtransportiert wird, gibt es eine ganze Klasse weiterer Eisstrukturen. Sie sind großflächig und dicht. Bei ihnen schlägt sich der Einfluss der hexagonalen Symmetrie der mikroskopischen Wassermoleküle auf die makroskopischen Muster besonders deutlich nieder.

In einem Fall (siehe »Hexagonale Blättchen«) war der Ausgangspunkt der Strukturbildung eine Schneedecke, die sich großflächig über niedriges Buschwerk gelegt hatte. Tagsüber heizte die intensiv strahlende Sonne den dunklen Raum darunter auf – eine feuchtigkeitsgesättigte Atmosphäre entstand. In der anschließenden sternklaren Nacht kühlte sich die obere Schneeschicht stark ab. Von unten stiegen verhältnismäßig warme Luft und Wasserdampf auf. Letzterer schlug sich im Bereich des Schnees nieder und erstarrte.

Bei so einer Konstellation wird die Kristallisationswärme leicht in den kalten Nachthimmel abgestrahlt. So füllen sich beim Emporwachsen selbst die Zwischenräume problemlos. In nur einer Nacht können auf diese Weise lamellenartige Strukturen entstehen, die teilweise wie nach oben offene Gefäße aussehen und an manchen Stellen wie Kühlrippen gestaffelt sind. Letztere Ähnlichkeit ist mehr als rein äußerlich, schließlich kommt es gerade bei üppiger und effektiver Produktion von Kristallstrukturen weiterhin darauf an, die Wärme optimal abzugeben. So sind auch die typischen weihnachtsbaumartigen Muster (siehe »Kristallbaum«) weniger eine ästhetisch ansprechende Laune der Natur als vielmehr eine physikalische Notwendigkeit.

H. JOACHIM SCHLICHTING

# PERKOLATIONSTHEORIE MATHEMATIK VERBINDET

WINHOLSE / GETTY IMAGES / STOCK

Ursprünglich in der Chemie angesiedelt, beleuchtet die Perkolationstheorie inzwischen das Verhalten verschiedenster Netzwerke: von Mobilfunkverbindungen bis zur Übertragung von Krankheiten.



**Kelsey Houston-Edwards** ist Mathematikerin und Journalistin in San Diego.

► [spektrum.de/artikel/1959655](https://spektrum.de/artikel/1959655)

## DEZENTRALE VERBINDUNG

Auf solche Kommunikationsstrukturen setzten die Demonstranten während der Proteste in Hongkong, um sich zu organisieren.



## AUF EINEN BLICK PHASENÜBERGÄNGE IN NETZWERKEN

- 1** Fügt man zufällige Punkte und Verbindungen zu einem Netz hinzu, findet irgendwann schlagartig ein Übergang statt: Plötzlich hängt das System großflächig zusammen.
- 2** Modelle zu derartigem Verhalten können zahlreiche reale Phänomene beschreiben, etwa Internetinhalte, die massenhaft geteilt werden, oder Krankheiten, die sich zur Pandemie entwickeln.
- 3** Die Perkolationstheorie untersucht solche Prozesse. Angesichts unserer zunehmend verknüpften Welt nimmt der Forschungsbereich eine immer wichtigere Rolle ein.



► Viele Menschen gehen wahrscheinlich davon aus, das Klicken auf »Senden« befördere eine Textnachricht direkt an das Smartphone des Empfängers. In Wirklichkeit begibt sie sich aber auf eine lange Reise durch ein Mobilfunknetz oder das Internet, bis sie bei ihrem Ziel ankommt. Das funktioniert zwar recht zuverlässig, doch die Übertragung benötigt eine zentrale Infrastruktur. Naturkatastrophen können sie beschädigen oder repressive Regierungen abschalten beziehungsweise überwachen. Weil Demonstranten in Hongkong Letzteres fürchteten, verzichteten sie darauf, über das Internet zu kommunizieren. Stattdessen nutzten sie Anwendungen wie FireChat und Bridgefy, die Nachrichten direkt zwischen nahegelegenen Geräten übertragen.

Die Apps lassen Daten unbemerkt von einem Nutzer zum nächsten hüpfen, wobei nur der Absender und der Empfänger den Text lesen können. Die verbundenen Handys bilden ein so genanntes vermaschtes Netzwerk (siehe »Vermaschtes Netzwerk«), das eine flexible und dezentrale Art des Kontakts ermöglicht. Doch damit sich zwei Personen austauschen können, müssen sie über eine Kette anderer benachbarter Geräte zusammenhängen.

Wie viele Nutzer braucht ein vermaschtes Netz, um quer durch Hongkong kommunizieren zu können? Die Perkolationstheorie, ein Teilgebiet der Mathematik, liefert eine überraschende Antwort: Schon wenige Menschen machen den Unterschied aus. Während Personen einem Netz beitreten, bilden sich langsam isolierte Bereiche verbundener Geräte aus. Eine vollständige Kommunikation von Ost nach West oder Nord nach Süd entsteht jedoch ganz plötzlich, sobald die Nutzerdichte eine kritische Schwelle überschreitet. Fachleute bezeichnen ein solches Phänomen als Phasenübergang – dasselbe Konzept, mit dem sich abrupte Änderungen im Zustand eines Materials wie das Schmelzen von Eis oder das Sieden von Wasser erklären lassen.

### **Eine vollkommene Verkettung von Objekten**

Die Perkolationstheorie untersucht das Verhalten von Netzwerken, denen man zufällig Punkte hinzufügt oder entfernt. Jeder Knoten steht für ein Objekt, etwa ein Telefon oder eine Person; die Kanten stellen eine bestimmte Beziehung zwischen ihnen dar. Mit wachsenden Verbindungen kommt irgendwann schlagartig ein flächendeckender Cluster auf, innerhalb dessen man jeden Punkt erreichen kann.

Die dringendste Frage des Gebiets lautet: Wann? Was ist die kritische Dichte eines Netzwerks – das Analogon zu einer Temperatur von 100 Grad Celsius, bei der Wasser kocht? Der Forschungsbereich eröffnet nicht nur zahlreiche Anwendungen, sondern ist zudem hochaktuell. Denn damit lässt sich beurteilen, wann ein Meme viral geht, ein Produkt den Markt dominiert, ein Erdbeben beginnt oder sich eine Krankheit zur Pandemie entwickelt.

Bevor sich Mathematikerinnen und Mathematiker aber realen Phänomenen zuwenden, die in der Regel extrem kompliziert ausfallen, konzentrieren sie sich zunächst auf einfachere Fälle: idealisierte Netzwerke, die symmetrisch aufgebaut und unendlich ausgedehnt sind. Tatsächlich

können nur in unbegrenzten Graphen richtige Phasenübergänge stattfinden, die einen abrupten Wechsel von einem Zustand in den nächsten aufweisen.

Reale Systeme sind hingegen meist endlich und unübersichtlich. Auch in ihnen finden Übergänge statt, allerdings weniger scharf ausgeprägt. Trotz solcher Schwierigkeiten wird die Perkolationstheorie praktisch immer relevanter angesichts der komplexen Strukturen, die unser Leben prägen, wie das Nahverkehrsnetz, das Stromnetz oder soziale Medien.

Die Grundlagen des Forschungsbereichs schufen die britischen Mathematiker Simon Ralph Broadbent und John Michael Hammersley, als sie 1957 die so genannte chemische Perkolation untersuchten. Diese beschreibt das Filtern eines Fluids durch ein Material, etwa wenn Öl durch poröses Gestein sickert oder Wasser durch gemahlene Kaffee fließt. Die Struktur eines Stoffs lässt sich dabei als Netzwerk modellieren, dessen Knoten die Löcher und dessen Kanten die Risse darstellen, durch die sich die Flüssigkeit bewegt.

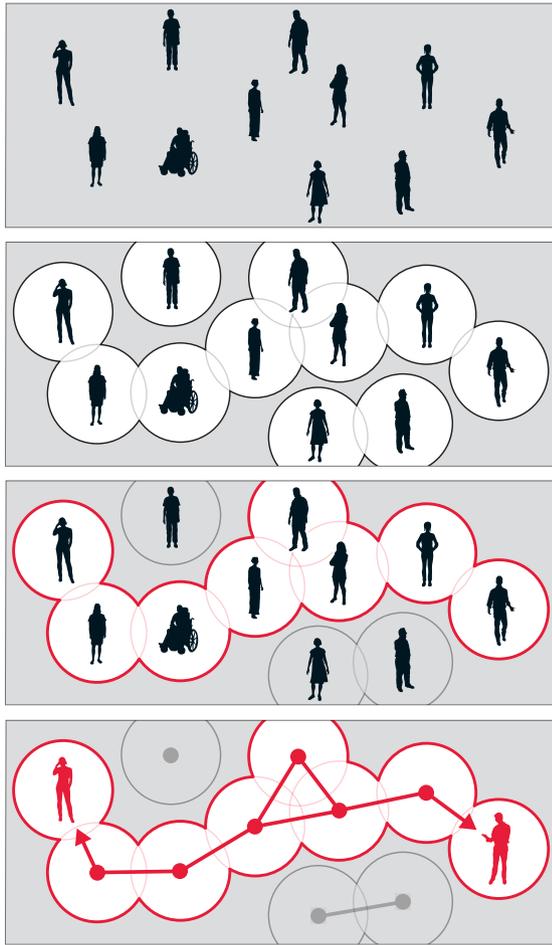
Wie sich herausstellt, kann sich Öl beispielsweise besser den Weg durch Gestein bahnen, je stärker dieses zerklüftet ist – was nicht wirklich überrascht. Mit Hilfe der von ihnen entwickelten Theorie konnten Broadbent und Hammersley allerdings auch eine unerwartete Voraussage treffen. Wenn die Anzahl der Risse in einem idealisierten Stoff einen gewissen Schwellenwert überschreitet, durchdringt das Öl nicht mehr nur noch vereinzelte Bereiche, sondern fast das gesamte Material.

Schnell fand die Perkolationstheorie Einzug in andere wissenschaftliche Disziplinen. In der Geologie untersucht man damit die Größe von Clustern in zerklüftetem Gestein, was insbesondere für die Ölförderung durch Fracking wichtig ist. Seismologinnen und Seismologen greifen hingegen auf die mathematische Theorie zurück, um Erdbeben zu modellieren. Die Netzwerke entsprechen dabei den beobachteten Rissen einer Gesteinsschicht. Um ebenso die Spannungen der einzelnen Schichten zu berücksichtigen, passt man die Wahrscheinlichkeiten dafür an, dass sich gewisse Kanten miteinander verbinden. Nehmen die Spannungen zu, wachsen die Cluster, bis plötzlich ein Beben ausbricht. Innerhalb der Modelle können sich die Risse zudem wieder schließen und neu aufbrechen, wodurch sich Nachbeben und langfristige Veränderungen beschreiben lassen.

Darüber hinaus beleuchtet die Perkolationstheorie physikalische und chemische Prozesse auf mikroskopischer Ebene: Etwa die Verbindung einfacher Moleküle, so genannte Monomere, zu größeren Strukturen, den Polymeren. Jedes Monomer entspricht dann einem Knoten in einem Netzwerk, wobei benachbarte Punkte spontan eine Bindung eingehen können. Nimmt die Wahrscheinlichkeit dafür zu, erreicht das System irgendwann einen Schwellenwert und es entsteht ein riesiges Polymer. Das passiert unter anderem, wenn man gelöstes Gelatinepulver in Wasser gibt und sich eine feste Masse bildet.

Um zerklüftetes Gestein oder Polymere darzustellen, muss man allerdings auf äußerst komplizierte Netzwerke zurückgreifen. Es ist nahezu unmöglich, sie genau zu beschreiben – geschweige denn zu analysieren. Wie Broadbent

## Vermaschtes Netzwerk



JEN CHRISTIANSEN / WIE PEOPLE FLOW BY ALBERTO CAIRO & SCOTT KLEIN / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2021; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

und Hammersley aber herausgefunden haben, lassen sich die komplexen Strukturen durch periodische Systeme annähern.

Das einfachste Beispiel für ein geordnetes Netzwerk ist ein quadratisches Gitter, das wie ein unendlich ausgedehntes Blatt Millimeterpapier aussieht: Die Knoten sind in einem rechteckigen Muster angeordnet und durch jeweils vier Kanten mit ihren Nachbarn verbunden. Zur Untersuchung der Bewegung einer Flüssigkeit durch ein solches Gebilde kann man sich die Linien als Rohre vorstellen, die entweder geöffnet oder geschlossen sind. Der Zustand wird durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt, das heißt, man lässt für jede Kante eine Münze entscheiden, ob sie offen oder zu ist. Damit entsteht ein zufälliges Netzwerk mit offenen Clustern, deren Knoten also ausschließlich mittels durchlässiger Rohre verbunden sind.

Die Perkolations-theorie befasst sich mit der Konnektivität des Systems, das heißt der Größe solcher Cluster. Weil es jedoch sehr kompliziert ist, diese Eigenschaft in zufälligen Strukturen zu bemessen, wandeln Fachleute die Frage um, indem sie sie auf die Spitze treiben: Existiert ein unend-

lich ausgedehnter Cluster? »Für uns ist es viel einfacher, das mit Ja oder Nein zu beantworten als anzugeben, wie viele Cluster es von einer bestimmten Größe gibt«, so der Mathematiker Benedikt Jahnel vom Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik in Berlin.

Überraschenderweise haben zufällige Netzwerke entweder ganz sicher einen unendlich ausgedehnten Cluster oder nicht: Die Wahrscheinlichkeit beträgt 100 oder 0 Prozent, aber nichts dazwischen – unabhängig von den Details des Modells. Der Grund dafür ist ein erstaunliches Prinzip aus der Wahrscheinlichkeitstheorie, dem so genannten Null-Eins-Gesetz, das der russische Mathematiker Andrej Kolmogorow in den 1930er Jahren formulierte. Dieses betrifft alle Fragen, die nicht von einer endlichen Anzahl von Ereignissen abhängen. Angenommen, man wirft unendlich oft eine Münze und möchte herausfinden, ob unendlich häufig die Kopfseite oben lag. Die Antwort darauf bleibt gleich, selbst wenn man zahlreiche – aber eben nur endlich viele – Wurfergebnisse ändert. Anders verhält es sich hingegen, falls man am Ausgang des dritten Wurfs interessiert ist. Dieser Überlegung folgend hängt die Wahrscheinlichkeit, einen unendlichen Cluster zu finden, nicht davon ab, ob nun dieses oder jenes Rohr offen ist.

### Ein Rohrsystem als Analogie

Aber was ist für die Konnektivität entscheidend? Die Antwort liegt in der Wahrscheinlichkeitsverteilung, also der Münze, die den Zustand der Kanten bestimmt. Stellen Sie sich dazu einen Regler vor, der das Geldstück in die eine oder andere Richtung zinkt. Ist er ganz nach links gedreht, landet es stets auf »zu«, und alle Rohre sind geschlossen – es kann keinen unendlichen Cluster geben. Dreht man den Regler allmählich auf, zeigt die Münze immer häufiger »offen« an. Am Ende ist jede Verbindung geöffnet und das Wasser kann überall hinfließen. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit für einen unendlichen Cluster muss an irgendeinem Punkt, während man den Regler gedreht hat, von null auf eins gesprungen sein. Für ein quadratisches Gitter lässt sich die so genannte Perkolations-schwelle exakt berechnen: Die abrupte Änderung findet statt, sobald sich der Drehknopf in der Mitte befindet, also bei einer fairen Münze.

Ziel der Perkolations-theorie ist es, den Schwellenwert für verschiedenste Arten von Netzwerken zu bestimmen. Doch das ist alles andere als leicht. Selbst für ein quadratisches Gitter – das einfachste System – stellte die Aufgabe eine gewaltige Herausforderung dar, die der Mathematiker Harry Kesten erst 1980 gelöst hat. Trotz jahrzehntelanger Bemühungen sind die Perkolations-schwellen nur für wenige äußerst simple Beispiele bekannt.

»Es ist erstaunlich, wie viele verschiedene Systeme man bereits untersucht hat«, so der statistische Physiker Robert M. Ziff von der University of Michigan. Er hat eine Wikipedia-Seite zusammengestellt, in der die Werte für hunderte unterschiedliche Netzwerke verzeichnet sind. Für das Dreiecksgitter konnten Fachleute beispielsweise das Ergebnis 0,347 exakt berechnen. Die meisten Perkolations-schwellen (darunter für ein dreidimensionales quadratisches Gitter) sind hingegen bloß Näherungen, die man mit Hilfe von Computersimulationen gefunden hat.

Derartig regelmäßige Modelle eignen sich gut, um die Perkolation in relativ statischen physikalischen Systemen zu simulieren, etwa in zerklüftetem Gestein, wo die Löcher an festen Stellen sitzen und bloß die Risse zufällig auftreten. Andere Netzwerke sind jedoch weitaus komplizierter. In den eingangs erwähnten FireChat- und Bridgefy-Netzen ändern sich etwa die Standorte der Knoten, sobald sich die Personen bewegen (siehe »Phasenübergang«). Dabei entstehen und verschwinden die Verbindungen zwischen den Geräten immer wieder, denn die Apps basieren auf Bluetooth und haben eine Reichweite von lediglich zirka zehn Metern.

Für solche Netzwerke verwendet man die so genannte kontinuierliche Perkolationstheorie, bei der die Knoten jeden Platz im Raum einnehmen können. Wie alle mathematischen Modelle basiert auch diese Version auf Vereinfachungen: Man nimmt an, die Smartphones seien zufällig verteilt und ihre Verbindung hänge nur von der Entfernung ab, ohne Wände oder andere Störungen zu berücksichtigen.

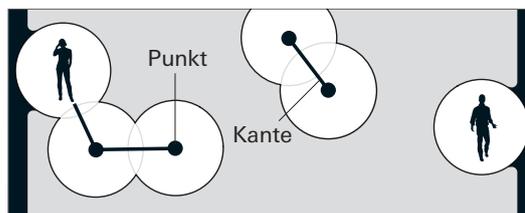
### Verbindungen stärken

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Konnektivität derartiger Netzwerke zu steigern. Entweder man erhöht die Reichweite der Geräte oder man vergrößert die Nutzerdichte. Diese Parameter entsprechen den Drehknöpfen der Theorie, ähnlich wie das Zinken der Münze im Rohrnetz. Entwickler von entsprechender Software müssen sich mit solchen Überlegungen beschäftigen, um ein möglichst zusammenhängendes Netzwerk zu kreieren. Die zentrale Frage lautet: »Wie hoch muss die Sendeleistung sein, damit ein verbundenes Netzwerk entsteht?«, so der leitende Wissenschaftler Ram Ramanathan des Unternehmens goTenna. Die Antwort wäre recht einfach, wenn Leistung proportional mit der Konnektivität zunehmen würde. Da es jedoch eine Perkolationsschwelle gibt, kann das Netz plötzlich zusammenbrechen, sobald sich einzelne Personen bewegen. Die optimale Sendeleistung stellt sicher, dass das System immer verbunden ist, ohne dabei Energie zu verschwenden.

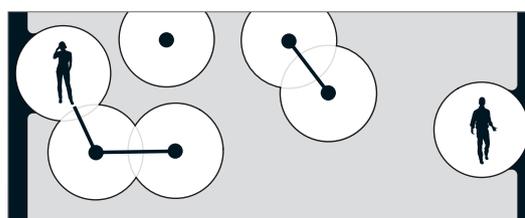
Auch der andere Regler kann entscheidend sein. Vermaschte Netzwerke brauchen eine Mindestanzahl an Nutzern, damit sie funktionieren. Daher eignen sie sich besonders gut für Massenveranstaltungen wie Musikfestivals, Fußballspiele oder Demonstrationen. Wie Jorge Rios, CEO und Mitbegründer von Bridgefy, berichtet, verzeichnete das Unternehmen in Zeiten ziviler Unruhen in Kaschmir, Nigeria, Hongkong und im Iran einen enormen Zuwachs an neuen Nutzern. Die Menschen wandten sich solchen Apps zu, um die Kommunikation aufrechtzuerhalten, falls die Regierung das Internet abschalten würde oder große Menschenmengen die Mobilfunkverbindungen überlasten. Einige Stadtteile wie Red Hook in Brooklyn, New York, nutzen vermaschte Netzwerke, um den Internetzugang zu erweitern, indem sie permanente Knotenpunkte auf den Dächern von Gebäuden anbringen. Zwar befindet sich ein Großteil der erforderlichen Hardware und Routing-Technologie noch in der Entwicklung, aber es fällt leicht, sich künftige Anwendungen vorzustellen: Autonome Fahrzeuge könnten beispielsweise direkt miteinander kommunizieren und Informationen über die Verkehrslage oder Gefahren austauschen, ohne auf eine zusätzliche Infrastruktur angewiesen zu sein.

## Phasenübergang

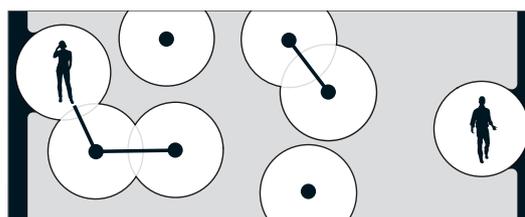
Punkte = 6



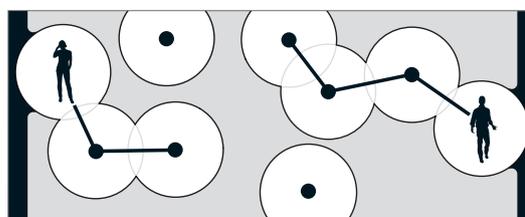
Punkte = 7



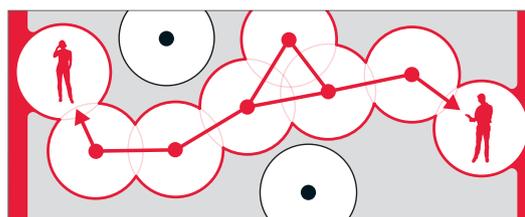
Punkte = 8



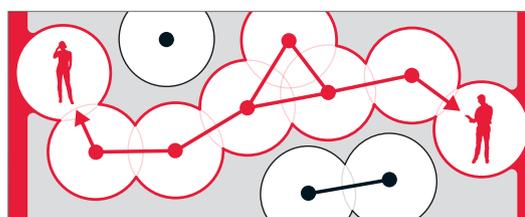
Punkte = 9



Punkte = 10



Punkte = 11



JEN CHRISTENSEN / WEE PEOPLE FONT BY ALBERTO CAIRO & SCOTT KLEIN / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2011; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Obwohl sich die bisher besprochenen Systeme – von porösen Felsen über Polymere bis zu Kommunikation – teilweise stark voneinander unterscheiden, haben sie doch eine Gemeinsamkeit. Die Distanz der Knoten entspricht tatsächlich der räumlichen Entfernung. Bei Netzwerken, die etwa die Ausbreitung von Krankheiten beschreiben, hängt eine Verbindung hingegen vom Übertragungsweg des Keims ab. Dadurch sind die Modelle besonders verworren. Eine infizierte Person, die eine Stunde in einem Nachtclub in einer Großstadt verbringt, kann ein Virus an jemanden übertragen, der es in den folgenden Tagen durch das ganze Land oder sogar über Kontinente hinwegträgt.

Epidemiologen beschreiben solche Vorgänge meist durch simple Modelle, die Menschen in drei Gruppen einteilen: Anfällige, Genesene und Infizierte, wobei Letztere die Krankheit an zufällig ausgewählte Personen der ersten Kategorie weitergeben. Dabei wird angenommen, dass sich jeder Anfällige mit gleicher Wahrscheinlichkeit ansteckt, unabhängig vom Alter oder Gesundheitszustand. Die Ansteckungsrate hängt von der Basisreproduktionszahl  $R_0$  ab, der durchschnittlichen Zahl der Neuinfektionen, die eine erkrankte Person verursacht. Ist  $R_0$  größer als eins, breitet sich das Virus aus.

In der Praxis beeinflusst jedoch die Art und Weise, wie Menschen miteinander umgehen, die Ausbreitung einer Krankheit. Bei einem Ausbruch des schweren akuten respiratorischen Syndroms (Sars) im Jahr 2003 lagen die berechneten  $R_0$ -Werte beispielsweise zunächst zwischen 2,2 und 3,6. Die Zahl der Fälle war aber viel niedriger als erwartet. Lauren Ancel Meyers, heute Leiterin des Covid-19-Expertenteams der University of Texas, erklärte 2006, die Diskrepanz ergebe sich aus der falschen Annahme, dass sich »alle empfänglichen Personen mit gleicher Wahrscheinlichkeit infizieren« – was jedoch die komplexe Form menschlicher Kontakte außer Acht lasse. Insbesondere basierten die angegebenen  $R_0$ -Werte für Sars auf der raschen Ausbreitung innerhalb von Wohn- und Krankenhäusern, in denen Einzelpersonen außergewöhnlich eng zusammenleben. Da Angesteckte sehr schnell erkrankten, landeten sie in isolierten Krankenstationen, bevor sie viele Menschen außerhalb dieser Einrichtungen infizieren konnten.

### Netzwerke für Virenausbreitungen

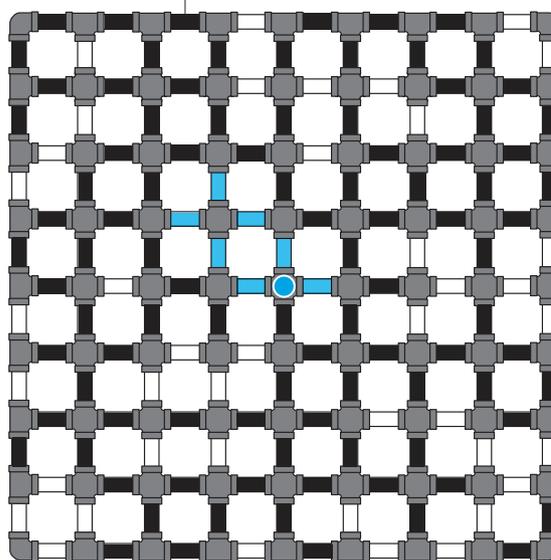
Je nach Krankheit stehen die Kanten eines Netzwerks für unterschiedliche Beziehungen. Bei HIV sind zwei Personen zum Beispiel miteinander verbunden, wenn sie Körperflüssigkeiten ausgetauscht haben. Bei Covid-19 entsprechen sie hingegen einem engen Kontakt ohne Atemschutz. Maßnahmen wie das Schließen von Geschäften und das Einschränken von Reisen verändern die Struktur des Systems, ebenso wie Maskenpflicht und körperlicher Abstand. Eine Herausforderung für Epidemiologen besteht darin, Wege zu finden, die Netzwerke zu entkoppeln, um die Übertragung einzudämmen.

Phänomene der realen Welt, wie die Ausbreitung von Covid-19, sind äußerst kompliziert zu beschreiben. Selbst wenn man die genaue Struktur eines Systems kennen würde, ließe es sich kaum mathematisch analysieren. Indem Fachleute Computersimulationen mit intensiver Datenana-

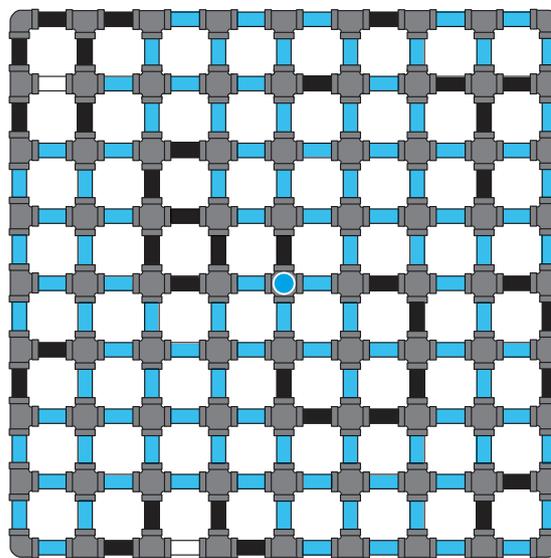
## Quadratisches Gitter

Wenn die Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{3}$  beträgt, hat jedes Rohr die Chance von einem Drittel, geöffnet zu sein. In diesem Beispiel aus neun mal neun Knoten kann in die Mitte gegossenes Wasser nur sechs weitere Knoten erreichen.

geschlossenes Rohr (schwarz)



Beträgt die Wahrscheinlichkeit hingegen  $\frac{3}{4}$ , dann hat jedes Rohr eine Chance von drei Vierteln, geöffnet zu sein. In diesem Beispiel fließt in die Mitte eingegossenes Wasser zu allen Seiten bis an den Rand.

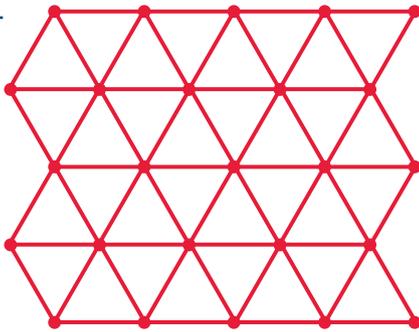


JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2021. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

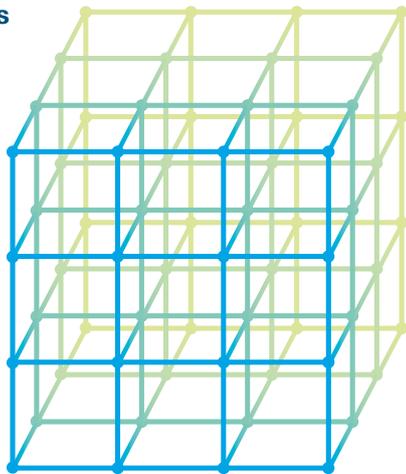
## Gittermodelle

Um Netzwerke zu untersuchen, vergleichen Fachleute die Systeme oft, indem sie diese durch gitterförmige Anordnungen annähern. Man kann etwa annehmen, die betrachteten Objekte würden sich in einem Dreiecks- oder kubischen Gitter im Raum verteilen.

Dreiecks-  
gitter



kubisches  
Gitter



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2021, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

lyse auswerten, können sie Fallzahlen vorhersagen, die Auswirkungen von Sicherheitsabständen bewerten und die Rolle von Schulen und Restaurants bei der Verbreitung des Virus quantifizieren.

Alessandro Vespignani, ein Theoretiker für komplexe Netzwerke an der Northeastern University in Boston, bezeichnet die Arbeit als »gelegentlich chaotisch«. Doch Politikerinnen und Politiker sowie Mitarbeiter des Gesundheitswesens benötigen die Ergebnisse, um fundierte Entscheidungen zu treffen.

Außerhalb von Krisenzeiten entwickeln Forscherinnen und Forscher die Modelle weiter, passen verschiedene Versionen an und entwerfen maßgeschneiderte Ansätze, um die Resultate zu verbessern. Die Perkolations-theorie hilft zu verstehen, wie die Eigenschaften eines Netzwerks die Ausbreitung einer Krankheit beeinflussen.

Um das herauszufinden, reduzieren Epidemiologen die Systeme auf das Wesentliche, etwa auf die »Gradverteilung«. Der Grad entspricht der Anzahl an Kanten, die auf einen Punkt treffen. Im quadratischen Gitter haben alle Knoten den Grad vier. Bei Infektionsmodellen variiert dieser jedoch stark: Manche Personen haben zahlreiche Kontakte und können die Krankheit an viele Menschen weitergeben, während andere ziemlich isoliert sind.

Für Infektionen entspricht die Gradverteilung der Wahrscheinlichkeit, dass eine Person eine bestimmte Anzahl Menschen infiziert. Um nachzuvollziehen, wie sich das auf die Perkolationschwelle auswirkt, erzeugen Fachleute wie Meyers tausende zufällige Netzwerke mit gleicher Gradverteilung und vergleichen deren Eigenschaften mit denen realer Systeme. Wie sich herausstellt, sinkt der Schwellenwert, wenn das Netzwerk eine breitere Verteilung aufweist. Das heißt, eine Krankheit breitet sich schneller aus, wenn es sowohl stark vernetzte als auch isolierte Personen enthält, als wenn jeder ungefähr gleich viele Kontakte hat.

Die Perkolations-theorie wird darüber hinaus in völlig anderen Bereichen eingesetzt: etwa zur Untersuchung, wann ein Meme in einem sozialen Netzwerk viral wird, oder wie ein Produkt einen Markt dominieren könnte. Wählermodelle, bei denen Menschen ihre Gemeinschaft beeinflussen, zeigen ebenfalls die charakteristischen Schwelleneffekte.

Im Gegensatz zu idealisierten Netzwerken sind die aus realen Beispielen abgeleiteten Systeme endlich und unübersichtlich. Um sie zu untersuchen, pendeln Fachleute zwischen reiner Mathematik und Computersimulationen hin und her. Die idealisierten Netze ermöglichen es, detaillierte Computermodelle für realistische Fälle zu erstellen, während die Ergebnisse der Simulationen dabei helfen, die theoretischen Parameter anzupassen.

Viele wichtige Modelle zur Ausbreitung von Covid-19 enthalten Informationen anderer Systeme. Schulische Strukturen, Zugrouten und Dienstpläne von Krankenhausmitarbeitern bilden allesamt Graphen – und jedes beeinflusst den Verlauf der Pandemie. »Wir leben in einer Welt gekoppelter Netzwerke. Man kann nicht nur über eines nachdenken, ohne die Konsequenzen abzusehen, welche die anderen mit sich bringen«, so Raissa D'Souza von der University of California in Davis. Jedes Exemplar sei ein einzigartiges System mit eigenem Verhalten.

Allerdings gibt es noch keinen theoretischen Rahmen, um solche Netze aus Netzen zu untersuchen. Künftig möchten Fachleute herausfinden, wie die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile das Gesamtsystem beeinflussen. »Wir leben weder in einer Blase noch in einem völlig durchmischten Universum. Die Welt besteht aus Kontakten, wir folgen Twitter-Accounts. Das sind Fälle, an denen Perkolations- und andere Modelle Einzug halten«, so Vespignani. ◀

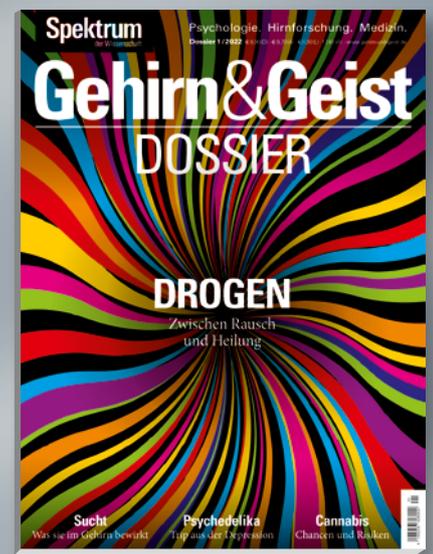
### QUELLEN

**Broadbent, S. R., Hammersley, J. M.:** Percolation processes. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 53, 2008

**Vespignani, A. et al.:** Modelling COVID-19. *Nature Reviews Physics* 2, 2020

# Unsere Neuerscheinungen

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



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

# PHYSIK TOPOLOGISCHE QUANTENCOMPUTER

Eine neue Art von Qubit könnte den Weg zu einem universellen Quantencomputer ebnen. Doch noch ist nicht klar, ob eine solche Informationseinheit überhaupt existiert.



Philip Ball ist Physiker und arbeitet als Autor in London.

» [spektrum.de/artikel/1959658](https://www.spektrum.de/artikel/1959658)

## AUF EINEN BLICK VERWOBENE TEILCHEN

- 1** Aktuelle Quantencomputer basieren auf Informationseinheiten, die sehr empfindlich sind. Deshalb produzieren die Berechnungen Fehler, die nur schwer zu beheben sind.
- 2** Einige Physiker setzen ihre Hoffnungen daher auf topologische Qubits, die besonders stabil sind. Mit ihnen könnte man die künftigen Rechner extrem effizient gestalten.
- 3** Doch bisher ist es noch niemandem gelungen, ein solches Qubit im Labor nachzuweisen. Einige Fachleute bezweifeln sogar, dass es jemals gelingen wird.

**PHYSIKALISCHES STRICKEN**  
Indem man bestimmte Teilchen miteinander verwebt, könnte man extrem robuste Quantencomputer schaffen.

In vielen Bereichen versprechen Quantencomputer, die Geräte der Zukunft zu sein: Sie könnten einige Probleme wesentlich schneller lösen als ihre klassischen Varianten – etwa, wenn es um Routenplanung, künstliche Intelligenz oder die Entwicklung von Medikamenten geht. Doch der Fortschritt auf dem Gebiet verläuft schleppend, bisher basieren die verfügbaren Geräte auf wenigen Quanten-Bits (kurz Qubits), wodurch komplizierte Berechnungen, die man zum Lösen interessanter Probleme braucht, noch in weiter Ferne liegen. Eine der Hauptschwierigkeiten ist, dass die Qubits extrem empfindlich sind, weshalb man sie so gut wie möglich von ihrer Umgebung abschotten muss. Und je größer das Quantensystem, desto schwerer fällt es, diese Aufgabe zu erfüllen.

Aber es gibt Hoffnung: Exotische Qubits in so genannten topologischen Quantencomputern sind theoretischen Berechnungen zufolge wesentlich robuster – und erweisen

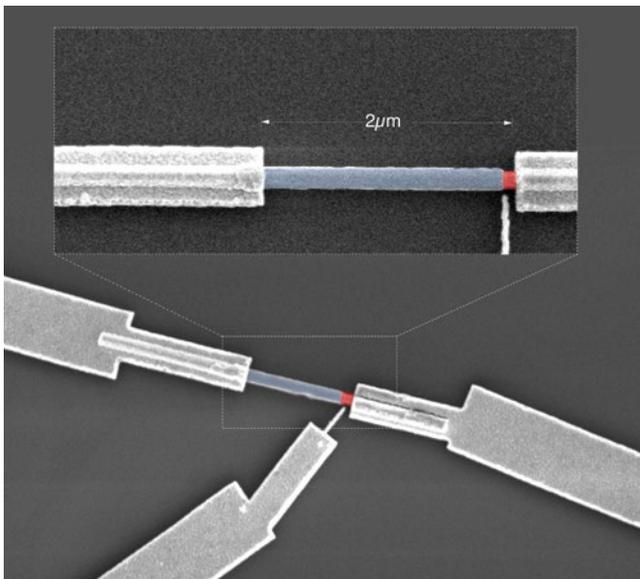
sich somit als viel versprechender Ansatz, um auf quantenmechanischen Prinzipien basierende Rechner zu konstruieren. Bereits 2018 behauptete ein Forscherteam um den Physiker Leo Kouwenhoven von der Technischen Universität Delft in den Niederlanden im Fachmagazin »Nature«, den dazu passenden Meilenstein gefunden zu haben: Sie haben die lang ersehnten topologischen Qubits, so genannte Majorana-Nullmoden, erstmals nachgewiesen.

Obwohl die Theorie hinter den exotischen Teilchen gut verstanden ist, hat es sich als extrem schwierig herausgestellt, sie experimentell zu erzeugen. Trotz der technischen Herausforderungen sind einige Forscherinnen und Forscher dennoch davon überzeugt, dass Majorana-Nullmoden die einzige Möglichkeit darstellen, universelle Quantencomputer mit hunderten bis tausenden Qubits herzustellen. Auch das erfolgreiche US-Unternehmen Microsoft setzt größtenteils auf diesen ehrgeizigen Ansatz.

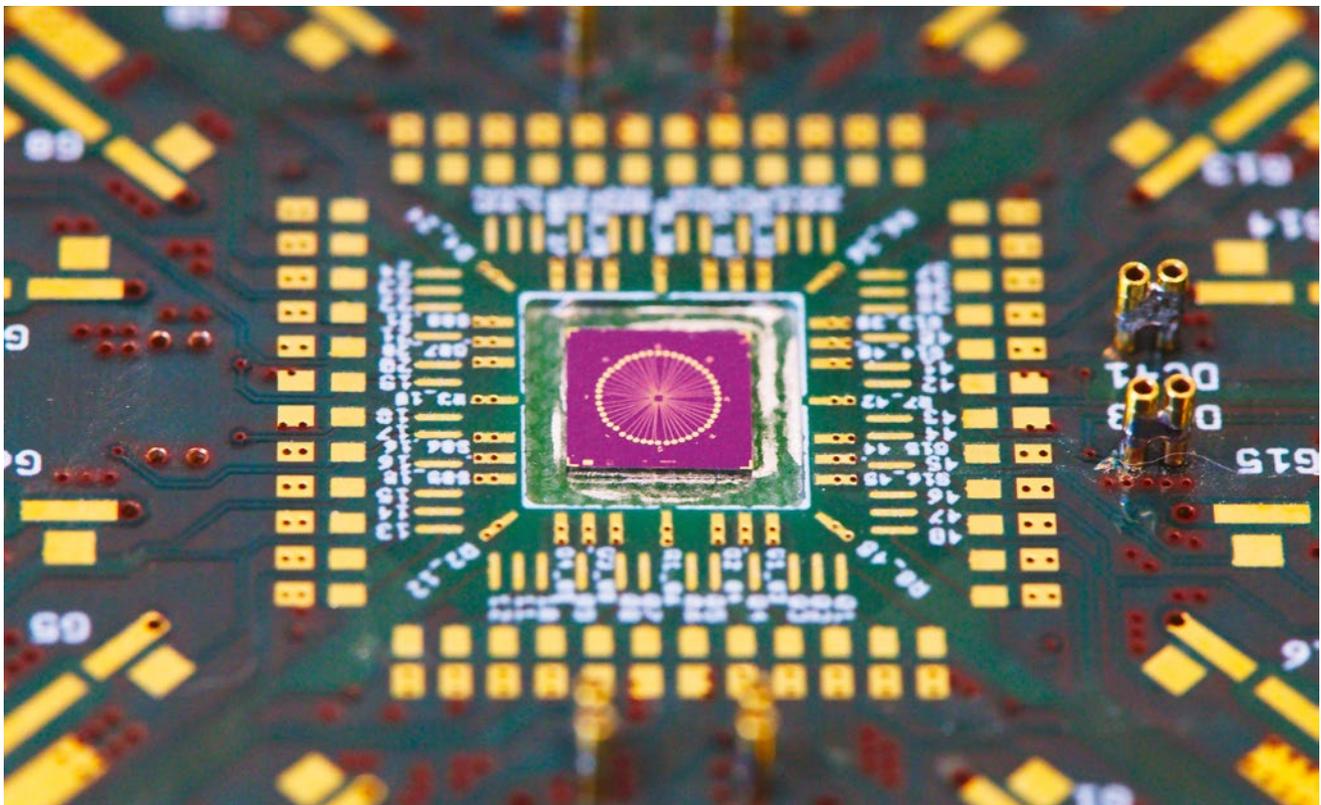
Deshalb erregte der Fachartikel von Kouwenhoven und seinem Team sehr viel Aufmerksamkeit. Die Presse feierte das Ergebnis als den Beginn der Ära topologischer Quantencomputer. Ein Jahr später eröffnete Microsoft ein eigenes Forschungszentrum für Quantentechnologie auf dem Campus der TU Delft, mit Kouwenhoven als Leiter.

Doch dann ging es bergab. Der Physiker Sergey Frolov von der Pittsburgh University und sein Kollege Vincent Mourik von der University New South Wales in Australien, die beide bereits mit Kouwenhoven zusammengearbeitet hatten und sich damals mit ähnlichen Fragestellungen befassten, konnten die Ergebnisse der Gruppe aus Delft nicht reproduzieren. Daher ließen sie sich im Oktober 2019

**NANODRAHT** Diese Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme zeigt einen Nanodraht, der für Majorana-Experimente verwendet wird. Der Draht ist etwa zwei Mikrometer lang (links). Ein speziell angefertigter Chip trägt das Nanodrahtsystem (unten).

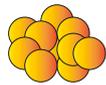


MARIO VALENTINI, IST AUSTRIA

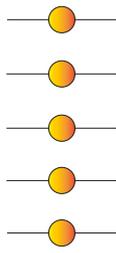


IST AUSTRIA

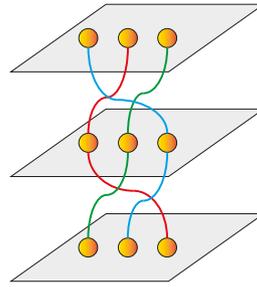
## Teilchenfamilien



Bosonen



Fermionen



Anyonen

Zeit

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANION BISCHOFF

In der Natur kommen Elementarteilchen in zwei verschiedenen Klassen vor, die sich in ihren grundsätzlichen Eigenschaften voneinander unterscheiden. Zum einen gibt es so genannte Bosonen, zu ihnen gehören etwa Photonen und Gluonen. Betrachtet man ein System mit vielen Teilchen dieser Art, können sie alle zusammen gleichzeitig die niedrigste Energie annehmen. Zum anderen gibt es Partikel namens Fermionen, zu denen etwa Elektronen, Quarks und Neutrinos zählen,

die das nicht können. Es ist ihnen verboten, gleiche Zustände zu besetzen. Dieser Eigenschaft verdanken wir den Aufbau der Materie. Die Elektronen eines Atoms sind gezwungen, sich in Orbitalen anzuordnen, die sich energetisch unterscheiden.

In Festkörpern, die aus Abermilliarden Teilchen bestehen, die miteinander wechselwirken, können sich Elektronen unter bestimmten Umständen zu Paaren zusammenfinden, die Bosonen bilden. Das

geschieht beispielsweise in Supraleitern, die Cooper-Paare können alle gemeinsam den Grundzustand annehmen.

1988 stellte Jürg Fröhlich von der ETH Zürich fest, dass in einer oder zwei Dimensionen eine dritte Teilchenart existieren kann, die weder zu den Fermionen noch zu den Bosonen gehört. So genannte Anyonen zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine Art Gedächtnis besitzen: Wenn man identische Teilchen untereinander vertauscht, lässt sich der Ortswechsel in der Wellenfunktion des Systems ablesen. Auf diese Weise kann man Berechnungen codieren und ausführen, was Anyonen zu idealen Kandidaten für Qubits macht.

Physikerinnen und Physiker hoffen, in zweidimensionalen Festkörpern Majorana-Nullmoden zu erzeugen, die theoretischen Überlegungen zufolge zu der ungewöhnlichen Teilchenklasse zählen.

die Rohdaten des Experiments geben. Zwei Monate später verkündeten sie, auf Unstimmigkeiten gestoßen zu sein: Es schien, als habe man einige der Resultate manipuliert. Zog man alle Messungen in Betracht, ließen sich die Behauptungen des Fachartikels nicht bestätigen.

Angesichts der Anschuldigungen überprüfte die Forschungsgruppe aus Delft ihre Daten und kam ebenfalls zu dem Schluss, dass die ursprünglichen Aussagen nicht länger haltbar waren. »Nature« zog den Artikel im März 2021 auf Kouwenhovens Bitte zurück. Die Physikerinnen und Physiker entschuldigten sich für die ungenügende wissenschaftliche Genauigkeit im ursprünglichen Manuskript.

### Sorglosigkeit statt bewusster Fälschung

Der Zwischenfall führte zu einer externen Untersuchung durch ein unabhängiges Komitee. Diese fand keine Hinweise auf betrügerisches Vorgehen oder beabsichtigte Manipulation der Daten. Stattdessen hätten sich die Forscherinnen und Forscher etwas vorgemacht, indem sie sich lediglich auf die Ergebnisse konzentrierten, die das bestätigten, was sie sehen wollten. »Der Forschungsansatz, den die Autoren verfolgt haben, ist besonders anfällig für Selbsttäuschung, und davor haben sie sich nicht abgesichert«, so das Komitee. »Das war ein unglücklicher Vorfall, bei dem Übereifer mit Sorglosigkeit zusammengekommen sind«, urteilt der Physiker Patrick Lee vom Massachusetts Institute of Technology, der Teil der unabhängigen Kommission war.

Der Vorfall verdeutlicht, mit welchen Herausforderungen Forscherteams zu kämpfen haben, die sich mit topologischen Quantencomputern beschäftigen. Denn es ist extrem schwierig, ein System zu erzeugen, das ein topologisches Qubit beherbergen könnte. Und selbst wenn das gelingen sollte, weiß niemand so recht, wie man dieses zweifelsfrei nachweist. Gemäß der zu Grunde liegenden Quantentheorie können in den Systemen nämlich auch ganz andere Teilchenzustände entstehen, die den begehrten Majorana-Nullmoden zwar ähneln, aber als Basis für einen Quantencomputer unbrauchbar sind.

Und das ist nur eines von vielen Hindernissen. Man könnte sagen, das Gebiet topologischer Quantencomputer befindet sich in einer Krise. »Angesichts der vielen widerrufenen Inhalte befürchte ich, dass sich ein erheblicher Teil der Forschergemeinde etwas vormacht«, so Sergey Frolov in einem Kommentar für »Nature«. Damit spielt er auf die vielen Majorana-Experimente an, die zuerst als Durchbruch gefeiert wurden, sich aber letztlich nicht bestätigen ließen.

Trotzdem halten sogar Kritiker das Vorhaben für zu viel versprechend, um es links liegen zu lassen. »Die Physik hinter der Erzeugung von Majorana-Teilchen ist gut verstanden«, sagte Frolov in einem Youtube-Video zu dem Thema. »Normalerweise lässt eine experimentelle Umsetzung in der Festkörperphysik dann nicht lange auf sich warten. Ich bin ziemlich zuversichtlich, dass eine oder mehrere Gruppen in den nächsten Jahren deutliche Hinweise für ihre Existenz finden wird.«

Majorana-Nullmoden verdeutlichen, wie seltsam sich Elektronen in Festkörpern verhalten können. Da in solchen Stoffen Abermilliarden von Teilchen miteinander wechselwirken, lassen sie sich oftmals besser durch übergeordnete Strukturen beschreiben. Ein anschauliches Beispiel ist die Beobachtung einer La-Ola-Welle in einem Stadion: Man könnte die Bewegung jedes einzelnen Menschen verfolgen oder sich stattdessen auf die Wellenbewegung konzentrieren. Ebenso erscheinen Elektronen in Festkörpern oftmals als so genannte Quasiteilchen, die sich in ihrer Ladung, Masse, Beweglichkeit und kollektivem Verhalten von ihren eigentlichen Eigenschaften unterscheiden.

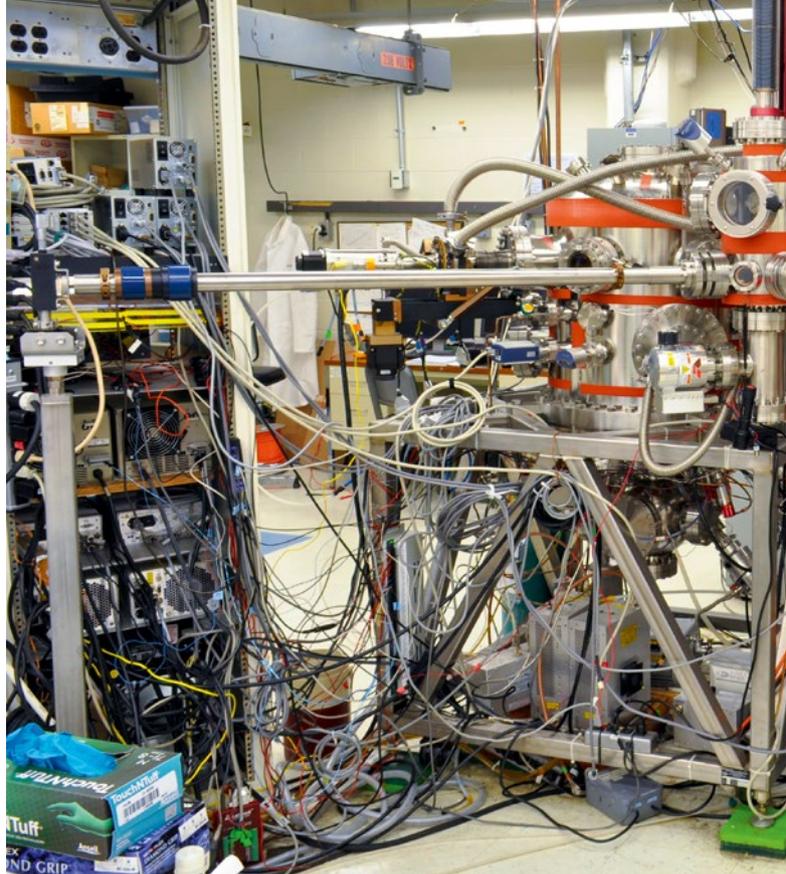
Eines der bekanntesten Beispiele für ein Quasiteilchen aus Elektronen findet sich in Supraleitern. Solche Materialien leiten Strom bei extrem niedrigen Temperaturen ohne jeglichen elektrischen Widerstand. Im einfachsten supraleitenden Zustand finden sich Elektronen zu so genannten Cooper-Paaren zusammen. Obwohl die Partner räumlich meist weit voneinander entfernt sind, verhält sich das Paar wie ein einzelnes Teilchen, wenn es sich durch das Material bewegt.

Anders als herkömmliche Elektronen können sich alle Cooper-Paare im gleichen Quantenzustand mit der niedrigsten Energie befinden. Vom nächstmöglichen angeregten Zustand sind sie durch einen energetisch verbotenen Bereich getrennt. Deshalb können sie nicht so einfach mit anderen Atomen der Kristallstruktur des Materials kollidieren, denn durch die Streuung würde sich ihre Energie leicht ändern – was der verbotene Bereich verhindert. Dadurch bewegen sie sich ohne jeglichen Widerstand durch das Material.

Auch Majorana-Nullmoden sind Quasiteilchen, die aus Elektronen bestehen. Theoretischen Vorhersagen zufolge sollen sie unter anderem in Halbleitern auftreten. Solche Stoffe zeichnen sich dadurch aus, dass deren Elektronen – ähnlich wie Supraleiter – eine Energielücke überwinden müssen, um vom niedrigsten in einen angeregten Zustand überzugehen. In bestimmten Fällen können sich die Teilchen dann ebenfalls zu Paaren verbinden. Der theoretische Physiker Alexei Kitaev beschrieb in den frühen 2000er Jahren eines der einfachsten Systeme, in denen Majorana-Nullmoden auftreten könnten: eine eindimensionale Kette aus Elektronen.

Bei extrem niedrigen Temperaturen fügen sich die Teilchen mit ihren jeweiligen Nachbarn zusammen und werden supraleitend. Aber den Elektronen an den Enden der Kette fehlen die benötigten Partner. Deshalb gibt es zwei »halb« Quasiteilchen, die räumlich voneinander getrennt sind. Durch diese Eigenart liegt die Energie des entzweiten Partikels mitten in der Energielücke – ein Bereich, der für alle anderen Paare verboten ist. Damit unterscheiden sich die Teilchen am Rand erheblich von denen im Inneren: Ihre Anregungsenergie beträgt null (deshalb die Bezeichnung »Nullmode«), das heißt sie benehmen sich wie Teilchen in einem Leiter.

Die Nullmoden zeichnen sich jedoch hauptsächlich dadurch aus, dass sie aus zwei Zuständen an den Enden der eindimensionalen Kette bestehen. Es lässt sich also nichts über sie herausfinden, indem man nur ein Ende des

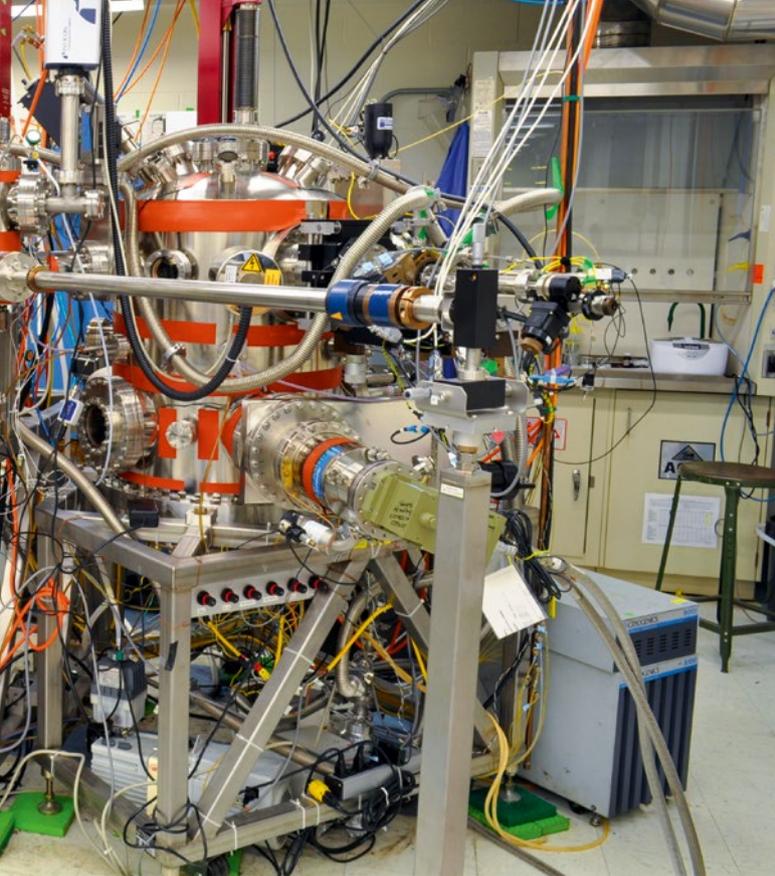


**PRODUKTION Um die extrem kleinen Nanodrähte herzustellen, entwickelten die Forscher ein maßgeschneidertes Molekularstrahlpitaxie-System.**

Systems untersucht: Man muss stets das Gesamtbild im Blick haben. Könnte man die beiden Zustände an den Enden der Kette zu einem Ring miteinander verbinden, würden sie miteinander verschmelzen, wodurch entweder ein Elektron oder ein Vakuumzustand herauskäme. Aber solange die beiden Hälften voneinander getrennt sind, befindet sich die Nullmode in einer Überlagerung dieser beiden Zustände. Deshalb eignet sich ein solches System hervorragend als Qubit.

Weil sich die beiden Hälften einer Nullmode gegenseitig auslöschen können, erinnern sie an ein Teilchen und Antiteilchen – nur sind hier beide Partikel identisch. Dass die Quantenmechanik hypothetische Elementarteilchen erlaubt, die ihre eigenen Antiteilchen sind, fand der Physiker Ettore Majorana 1937 erstmals heraus. Damals arbeitete er in der Forschungsgruppe von Enrico Fermi – und verschwand ein Jahr später unter mysteriösen Umständen. Lange vermuteten Fachleute, Neutrinos könnten zu dieser Teilchenklasse zählen, doch inzwischen ist man von der Vorstellung abgerückt. Bis heute ließ sich kein Elementarteilchen beobachten, das sein eigenes Antiteilchen ist.

Anders könnte sich das in der Welt der Festkörper darstellen. Denn durch die komplizierten Wechselwirkungen der zahlreichen darin befindlichen Objekte nehmen Quasiteilchen die verrücktesten Eigenschaften an. Dennoch konnten Physikerinnen und Physiker bisher noch nicht die vorhergesagten Majorana-Nullmoden nachweisen. Damit bleibt zudem unklar, ob solche Quasiteilchen überhaupt existieren.



PAULI RIVERBERG, PLASMA SCIENCE AND FUSION CENTER (PSFC)

Das Forschungsteam um Kouwenhoven war bereits 2012 davon überzeugt, derartige Nullmoden in Nanodrähten beobachtet zu haben. Doch inzwischen zeichnet sich immer deutlicher ab, wie schwierig es ist, einen eindeutigen Nachweis zu liefern.

Für diesen legt man üblicherweise eine Spannung an einen Nanodraht an, der aus einer halbleitenden und supra-leitenden Schicht besteht. Berechnungen zufolge könnten an den Enden des Drahts wie im vereinfachten Kitaev-Modell Majorana-Nullmoden entstehen. Um sie nachzuweisen, zeichnet man die Leitfähigkeit des Drahts auf. Enthält das Material die exotischen Quasiteilchen, müsste sich die Leitfähigkeit abhängig von der angelegten Spannung in sprunghaften Schritten verändern – und ganz ohne Spannung ihr Maximum erreichen.

### Ein Teilchen wie viele andere?

Die Forschergruppe aus Delft fand 2012 einen solchen Peak. Andere Fachleute stellten allerdings kurz darauf fest, dass die Messung auch zu anderen Phänomenen passt. Dazu gehörten unter anderem Eduardo Lee, der inzwischen an der Autonomen Universität Madrid ist und 2013 mit seinen Kollegen zeigte, dass ein derartiges Signal von einem anderen Quasiteilchen (einem »gebundenen Andreev-Zustand«) stammen kann. Dieser läge ebenfalls in der sonst verbotenen Energielücke, in der sich die Majorana-Nullmoden befinden.

Trotz vieler Bemühungen konnte erst 2021 ein weiteres Forscherteam um Marco Valentini vom Institute of Science and Technology Austria das exakte Experiment der Gruppe aus Delft wiederholen – und bestätigte dabei Lees Verdacht: Die ursprüngliche Beobachtung lässt sich durch einen gebundenen Andreev-Zustand erklären. Dieses Quasiteilchen besitzt zwar ebenso erstaunliche Eigenschaf-

ten, man kann es allerdings nicht nutzen, um die robusten Qubits zu erzeugen.

Das ganze Forschungsfeld ist geplagt von »falsch positiven« Ergebnissen, selbst jenseits von Kouwenhovens zurückgezogenem Fachartikel. Im März 2020 berichtete ein Team um Charlie Marcus vom Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen im Fachmagazin »Science« von Beobachtungen, die zum Auftreten von Majorana-Nullmoden passen würden. Aber im Juli 2021 veröffentlichte »Science« eine Notiz, in der einer der Redakteure seinen Zweifel darüber ausdrückte, ob die in der Studie genutzten Daten wirklich repräsentativ sind. Nun hat das Niels-Bohr-Institut eine unabhängige Untersuchung angestoßen. Doch Marcus und Kolleginnen und Kollegen stehen weiterhin hinter ihrem Fachartikel.

Die Schwierigkeit besteht darin, betonen Kritiker wie Frolov, dass die Signale von Majorana-Nullmoden nicht eindeutig sind, sondern ebenso zu anderen Quasiteilchen passen. »Trotzdem erscheinen weiterhin Fachartikel, ohne alternative Erklärungen überhaupt zu erwähnen«, moniert Frolov und ruft dazu auf, die gesammelten Daten offener als bislang zu teilen. Zudem hat er fünf charakteristische Hinweise für Majorana-Nullmoden zusammengetragen. Die meisten Studien würden lediglich eine oder zwei dieser Eigenschaften prüfen, in keiner einzigen habe man bisher auf alle fünf Kriterien geachtet.

Laut Marcus ist das Verifizieren einer Majorana-Nullmode das eigentliche Problem. »Der Tag wird niemals kommen, an dem man sie zweifelsfrei beweist. Denn so funktioniert Experimentalphysik nicht. Es wird immer irgendeine Person geben, die entgegnet, man habe etwas nicht beachtet«, so Marcus. Aber wie soll man einen Quantencomputer aus etwas bauen, von dem man nicht einmal weiß, ob es überhaupt existiert?

Damit ein Quantencomputer funktioniert, darf man während einer Berechnung keinerlei Informationen über die Qubits abfangen. Denn diese befinden sich während der Rechenoperationen in einem überlagerten Zustand aus null und eins. Sobald man sich eine solche Informationseinheit genauer ansieht, kollabiert der Zustand zu einem der zwei möglichen Werte (Dekohärenz). Dadurch verwandelt sie sich in ein klassisches Bit, was bei einer noch nicht abgeschlossenen Berechnung zu Fehlern führt. Deshalb muss man Qubits so gut wie möglich von Störungen wie Temperaturschwankungen oder Stößen mit anderen Teilchen abschirmen.

Allerdings wird das mit wachsender Anzahl an Teilchen umso schwieriger. Früher oder später lässt sich der störende Einfluss nicht mehr unterbinden, so dass zwangsläufig Fehler auftreten. Die aktuellen Quantencomputer von IBM, Google und anderen Herstellern bestehen aus vergleichsweise wenigen Qubits, wodurch das Problem noch überschaubar ist. Aber künftige Geräte werden »sehr viel Fehlerkorrektur« benötigen, erklärt der Informatiker Scott Aaronson von der University of Austin in Texas. Aktuelle Vorschläge dafür sehen beispielsweise vor, zahlreiche Qubits zu einem großen System zusammenzuschalten, das die Fehler beheben soll. Einigen Schätzungen zufolge sind dafür hunderte oder gar tausende Informationseinheiten nötig – eine gigantische technische Herausforderung.

Doch wie Kitaev herausfand, sind Majorana-Nullmoden erheblich widerstandsfähiger. Vertauscht man die beiden Quasiteilchen-Hälften an den Enden der Elektronenkette, wird die Information über den Positionswechsel in dem Paar gespeichert. Denn die Wellenfunktionen der Teilchen verändern sich durch einen Austausch, sie erhalten eine Phase, die sich experimentell auslesen lässt. Dabei spielen Details wie der genaue Weg, den die Partikel beim Platzwechsel einschlagen, keine Rolle. Kleinere äußere Störungen haben somit keine Auswirkungen auf die gespeicherte Information. Weil das Durcheinanderbringen der Teilchen ihre Pfade miteinander verwebt, nennt man eine solche Operation flechten (englisch: braiding).

Das Flechten von Teilchen funktioniert so: Bringt man zwei der halben Quasiteilchen zusammen, ergeben sie ent-



## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

weder ein Elektron oder einen Vakuumzustand. Sobald das passiert, geben sie ihre Information über die Phase in ihren Wellenfunktionen preis – und bilden einen klassischen Bit. Über die Verflechtungen kann man logische Operationen codieren, die gewissen Berechnungen entsprechen.

Man kann sich das Rechnen mit Majorana-Nullmoden wie den Squaredance vorstellen, einen Gruppentanz, bei dem die Partner häufig wechseln. Solange der Tanz andauert, »kann man niemals ein einzelnes Teilchen raussuchen und es fragen, in welchem Zustand es ist – also ob es zu einem Elektron oder einem Vakuum kollabieren wird. Denn die Antwort hängt davon ab, mit wem es tanzt«, sagt Marcus. Erst das Zusammenspiel der Teilchen legt die Phase der Wellenfunktionen fest (siehe »Teilchenfamilien«).

Damit ist die Information nicht lokal in den Teilchen vorhanden. Stattdessen muss man das gesamte System berücksichtigen. »Darin liegt das Genie von Kitaevs Idee«, erklärt Marcus. »Er hat gemerkt, dass keine lokale Messung die Information entlocken kann.« Damit bleibt der Quantenzustand erhalten, unabhängig davon, ob kleinere, lokale Störungen auftreten – ganz anders als bei gewöhnlichen Quantencomputern.

In der Mathematik widmet sich das abstrakte Feld der Topologie den globalen Eigenschaften von Objekten. Zum Beispiel lässt sich damit beurteilen, ob man zwei Gebilde ineinander umformen kann, ohne sie zu zerreißen. Durch ihre Abstraktheit ist die Topologie vielfältig einsetzbar. Man verwendet sie auch, um Knoten zu beschreiben – was sich beim Flechten von Quasiteilchen als nützlich erweist. Weil der Zustand von Majorana-Qubits vom Gesamtsystem abhängt und sich nicht durch lokale Eigenschaften bestimmen lässt, bezeichnet man diese Qubits als topologisch.

Für sinnvolle Berechnungen müsste man Majorana-Nullmoden auf geeignete Weise untereinander vertauschen, was ein hohes Maß an Kontrolle erfordert. Doch wenn das gelingt, erhält man eine garantiert fehlerfreie Berechnung. Topologische Quantencomputer »sind zwar eine Herausforderung, aber nicht unmöglich«, urteilt Lee.

Weil es so schwer ist, Nullmoden nachzuweisen, plädieren einige Fachleute dafür, darunter Marcus, diesen Schritt auszulassen. Der Physiker vertritt die Meinung, man solle aufhören, jedes Schlupfloch schließen zu wollen, und stattdessen versuchen, ein Quantensystem zu flechten. Dann werde man schon sehen, ob man es mit einem Qubit zu tun hat oder nicht. Schließlich spiele es keine Rolle, ob es sich um eine Majorana-Nullmode oder um irgendein anderes Quasiteilchen handelt, solange man ein robustes Qubit hat.

Tatsächlich gibt es weitere Kandidaten für topologische Qubits. Christina Psaroudaki vom California Institute of Technology und Christos Panagopoulos von der Nanyang Technological University in Singapur haben beispielsweise vorgeschlagen, Skyrmionen zu dem Zweck zu verwenden. Bei diesen Quasiteilchen handelt es sich um Wirbel in magnetischen Materialien, die ebenfalls fehlerresistente Informationen codieren könnten.

Obwohl laut Scott Aaronson »die Schwierigkeiten, Majorana-Nullmoden nachzuweisen oder auch nur die grundlegendsten Bausteine für einen topologischen Quantencomputer im Labor zum Laufen zu bekommen, für viele Beteiligte enttäuschend sind«, besteht weiterhin Hoffnung. Der Informatiker ist sicher, man werde die Quasiteilchen früher oder später finden. Marco Valentini pflichtet ihm bei – obwohl er gezeigt hatte, dass die Hinweise auf die mysteriösen Zustände ebenso von anderen Quellen stammen können. Dennoch fügt Aaronson hinzu: »Ob das nun ein guter Ansatz für Quantencomputer ist und ob sich dieser gegenüber den anderen Möglichkeiten durchsetzt, ist derzeit völlig unklar.« ◀

## QUELLEN

**Frolov, S.:** Quantum computing's reproducibility crisis: Majorana fermions. *Nature* 592, 2021

**Lee, E. J. H. et al.:** Spin-resolved Andreev levels and parity crossings in hybrid superconductor-semiconductor nanostructures. *Nature Nanotechnology* 9, 2014

**Vaitiekėnas, S. et al.:** Flux-induced topological superconductivity in full-shell nanowires. *Science* 367, 2020

**Valentini, M. et al.:** Nontopological zero-bias peaks in full-shell nanowires induced by flux-tunable Andreev states. *Science* 373, 2021

**Zhang, H. et al.:** RETRACTED ARTICLE: Quantized Majorana conductance. *Nature* 556, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Major Quantum Computing Strategy Suffers Serious Setbacks« 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.





FRANZI SCHÄPEL / FLORIAN FREISTETTER (F. PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS ORIGINAL USES BY SA, 01.EGAL0001)

# FREISTETTERS FORMELWELT DIE TÜRME DER APOKALYPSE

Es gibt verschiedenste Theorien darüber, wie unsere Welt untergehen wird. Zum Beispiel durch indische Mönche, wenn sie endlich ein Spiel beenden.

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

» [spektrum.de/artikel/1959661](https://spektrum.de/artikel/1959661)

Die »Türme von Hanoi« findet man nicht in der Hauptstadt von Vietnam. Dort stehen zwar diverse hohe Bauwerke, diese sind jedoch aus mathematischer Sicht uninteressant. Um die Türme von Hanoi zu finden, muss man in eine wissenschaftliche Ausstellung oder einen Spielzeugladen gehen. Denn es handelt sich um ein Rätselspiel mit simplen Regeln.

Es besteht aus drei Stäben, auf die man unterschiedlich große Scheiben mit Löchern legen kann, wobei man nie eine größere auf eine kleinere Scheibe setzen darf. Ziel des Spiels ist es, einen Turm mit nach Größe geordneten Scheiben von einem Stab auf einen anderen zu versetzen.

Damit es halbwegs interessant wird, sollte man mit mindestens drei Scheiben spielen. Zuerst verschiebt man die kleinste, ganz oben befindliche auf einen neuen Stab. Als Nächstes folgt die mittelgroße, die man natürlich nicht auf die kleine legen darf, sondern auf den letzten freien Stab. Dann bewegt man die kleine auf die mittelgroße, um so einen Stab frei zu machen, auf den man die größte Scheibe setzen kann. Die kleine wird jetzt wieder von der mittelgroßen entfernt, die man danach auf die große legt. Zum Schluss bringt man die kleinste Scheibe ins Ziel, und der Turm ist fertig.

Das waren insgesamt sieben Züge. Man kann leicht zeigen, dass sich die Anzahl der Schritte  $N_0$  der optimalen Lösung für  $n$  Scheiben durch folgende Formel berechnen lässt:

$$N_0 = 2^n - 1$$

Nimmt man eine vierte Scheibe dazu, steigt die Zahl der Züge an. Man muss immer noch den Dreier-Turm aus dem vorherigen Beispiel umschichten, um die unterste Scheibe versetzen zu können, und danach

wieder auf dieser aufbauen. Es braucht also doppelt so viele Schritte plus einen Extrazug, um die unterste Scheibe zu versetzen. Die obige Formel lässt sich damit leicht beweisen. Für  $n = 1$  stimmt sie offensichtlich. Um die Annahme zu beweisen, sie gelte für alle  $n$ , muss man nur noch zeigen, dass die Gleichung auch für  $n + 1$  korrekt ist. Den Schritt von  $n$  zu  $n + 1$  kann man einfach  $(2^n - 1) + (2^n - 1) + 1$  rechnen, was die Annahme bestätigt.

Mit steigender Anzahl der Scheiben wachsen die notwendigen Züge bis zur Lösung also exponentiell. Bei fünf sind 31 Schritte nötig, bei sechs sind es 63, dann geht es mit 127, 255, 511 und 1023 weiter. Wenn man einen Zug pro Sekunde schafft, würde man bei einer optimalen Strategie mit zehn Scheiben demnach schon mehr als 17 Minuten brauchen. Bei 20 Scheiben sind es 1048575 Züge, für die man zwölf Tage durchgehend und fehlerfrei spielen müsste. Bei 30 wäre man 34 Jahre lang beschäftigt, und für 40 sollte man knapp 35000 Jahre einplanen.

Es hat folglich seine Gründe, warum die Türme von Hanoi typischerweise mit weniger als zehn Scheiben verkauft werden. Abgesehen davon, dass man selten ein perfektes Spiel schafft, wird man deutlich mehr als eine Sekunde Bedenkzeit pro Zug benötigen. In der Realität dauert es demzufolge sehr viel länger, bis man fertig gespielt hat, und irgendwann wird es nicht nur frustrierend, sondern praktisch auch unmöglich, die Türme von Hanoi zu beenden.

Trotz des asiatischen Namens erfand 1883 ein Franzose das Spiel, der Mathematiker Édouard Lucas. Von ihm stammt die fiktive Geschichte, mit der es vermarktet wurde: In einem Tempel der indischen Stadt Benares arbeiten Mönche unermüdlich daran, einen Turm zu versetzen, der aus 64 goldenen Scheiben besteht. Sobald ihnen das gelungen ist, werde die Welt untergehen. Die Apokalypse liegt demnach noch in weiter Ferne, wie Sie gerne selbst nachrechnen können.



## NEUROWISSENSCHAFT EIN POTPOURRI DER WISSENSCHAFTEN

**Die Journalistin Jen Martin erklärt in ihrem Buch viele bekannte Phänomene aus dem Alltag, etwa warum bestimmte Farben unsere Stimmung beeinflussen oder wir Horrorfilme lieben.**

Die australische Wissenschaftsjournalistin und Dozentin Jen Martin legt zusammen mit der Illustratorin Holly Jolley ein Buch über ein weites Spektrum interessanter Fragen und Antworten vor. Sie leitet das »Science Communication Teaching Program« der University of Melbourne und hat viel Erfahrung mit dem Verfassen populärwissenschaftlicher Texte. Seit mehr als 15 Jahren ist sie zudem eine bekannte Autorin für populärwissenschaftliche Sendungen in Radio und Fernsehen in Australien.

Leider führt der Untertitel »Die Wissenschaft hinter deinen seltsamsten Eigenarten« etwas in die Irre, schließlich geht es in ihrem Buch meist um völlig gewöhnliche Phänomene und Vorgänge. Das Werk zeigt, dass es für fast alle eigenartig wirkenden Angewohnheiten relativ einfache Erklärungen gibt.

Auf jeweils zwei bis vier Seiten referiert die Autorin die Befunde und fasst sie zusammen. Insgesamt gibt es 33 kurze Kapitel zu Fragen wie: Warum erinnere ich mich nicht an meine Kindheit? Wieso geben Horrorfilme mir einen Kick? Weshalb beeinflussen Farben meine Stimmung? Warum strecke ich meine Zunge heraus, wenn ich mich konzentriere? Die Antworten hierzu finden sich in den experimentellen Untersuchungen der Psychologie sowie Neuro- und Kognitionswissenschaft, deren Ergebnisse sie kurz und verständlich darstellt.

Wegen der Kürze des Buchs beschränken sich die Antworten natürlich auf das Notwendigste. Neurophysiologische Grundlagen, Untersuchungsmethoden und Statistik spielen eher eine untergeordnete Rolle, aber das Literaturverzeichnis im Anhang verweist auf die englischsprachigen

Originalarbeiten, in denen man mehr Details zum Nachlesen finden kann. Damit ist Martin ein zufrieden steller der populärwissenschaftlicher Text entstanden, der angenehm zu lesen ist und Leserinnen und Leser nicht überfordert.

Die kurzen Abschnitte sind voneinander unabhängig, so dass man sich bei Interesse auch einzelne Themen herauspicken kann und nicht an die strikte Reihenfolge der Kapitel gebunden ist. Die fröhlich bunten Illustrationen und das vertrauliche Du lassen vermuten, dass sich das Werk vor allem an einen jüngeren Leserkreis



wendet. Aber auch ältere Semester, die sich nicht an der gegenderten Schreibweise wie Wissenschaftler:innen, Forscher:innen und Expert:innen stören, finden hier viele Anregungen und lesen die 128 Seiten mit Gewinn.

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

## WISSENSCHAFTS- GESCHICHTE UNSCHÄRFE ALS PROGRAMM

**Die Physik des 20. Jahrhunderts hat die bisherige Vorstellung der Welt aus den Angeln gehoben. Dieser spannenden Epoche wendet sich der Journalist Tobias Hürter zu.**

Das 20. Jahrhundert begann in naturwissenschaftlicher Hinsicht

mit einem Paukenschlag. Am 14. Dezember 1900 hielt Max Planck vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin einen Vortrag, in dem er erklärte, Energie komme in kleinen Päckchen, also Quanten vor. Die Kontinuität natürlicher Vorgänge war bis dahin einer der Grundpfeiler der klassischen Physik gewesen. Eine weitere Stütze kippte Albert Einstein wenige Jahre später mit der Relativierung der Zeit und des Raums in der speziellen beziehungsweise allgemeinen Relativitätstheorie.

Am umstrittensten jedoch war die Quantentheorie, welche die Objektivität und Präexistenz der atomaren Welt in Frage stellte: Beobachter, Messvorgänge und Umwelt sind plötzlich untrennbar miteinander verbunden – das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Relativitätstheorie und Quantenphysik erschütterten in den folgenden Jahrzehnten die Physik in ihren Grundfesten, führten sie aber damit auch in ungeahnte Dimensionen.

Der Abwurf der ersten Atombombe über Hiroshima beendete diesen Höhenflug auf tragische Weise. So ist der 6. August 1945 ein Wendepunkt in der Geschichte der Physik. Der Atompilz begrub die (freilich nie dagewesene) »Unschuld der Wissenschaften«. Obwohl man die zeitlichen Koordinaten so präzise angeben kann, folgt der Autor Tobias Hürter dem Motto seines Buchs, dessen Titel lautet: »Das Zeitalter der Unschärfe«. Diese einprägsamen Daten kommen quasi nicht vor.

Der Untertitel verweist auf »die glänzendsten und dunklen Jahre der Physik 1895–1945«. Unter Letzterem versteht der Autor offenbar nicht die bedeutendsten wissenschaftsinternen Seiten: Das Manhattan Project, also der Bau der Atombombe in Los Alamos, und ihr Abwurf über die japanischen Städte, thematisiert er nicht. Genauso wenig behandelt Hürter die so genannte Deutsche Physik, eine politisch ausgerichtete Wissenschaft der Nationalsozialisten in Deutschland, der er sich in nicht mehr als einzelnen verstreuten Sätzen nähert.

Von diesen entscheidenden und wirklich düsteren Abschnitten in der

# REZENSIONEN

Geschichte der Physik erfährt man nahezu nichts – damit fehlt inhaltlich die Hälfte des Titels. Mit den dunklen Jahren meinte der Autor wohl, dass missliebige und jüdische Wissenschaftler vertrieben wurden und um ihr Leben fürchten mussten, denn darüber schreibt er ausführlich. Das ist jedoch nicht ein dunkles Kapitel der Wissenschaft, sondern der Geschichte Deutschlands.

Über die ersten Jahrzehnte der Entwicklung der Quantenphysik berichtet der Autor hingegen auf unterhaltsame und gut lesbare Weise. Der 1927 von Heisenberg formulierten Unschärfere-lation, wonach sich gewisse physikalische Größen nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen lassen, verdankt das Buch seinen Titel. Hürter vermischt wissenschaftliche Inhalte und Gedanken der vorgestellten Physiker



mit teilweise äußerst detaillierten Episoden aus ihrem Privatleben, wobei man in diesen Fällen wohl eine gewisse dichterische Freiheit annehmen kann. Auch das Miteinbeziehen von biografiebestimmenden Faktoren, wie Krieg oder die Flucht von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, tragen zu einem umfassenderen Eindruck bei, wenn auch immer in recht kurzen, teilweise einseitigen Spots. Das Buch lässt sich daher wie ein Episodenroman lesen, denn Nachweise und Fußnoten fehlen vollständig. Wer sich der Quantentheorie auf unterhaltsame Weise annähern möchte, ist hier gut aufgehoben.

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

## UMWELT AUSGERECHNET: DER FUSSABDRUCK VON ALLEM

**Von Banane, Goldfisch, Beerdigung oder Weltkrieg: Der Physiker Mike Berners-Lee rechnet nachvollziehbar aus, was wie viel Kohlenstoffdioxid verursacht.**

► Seitenzahlen haben meist keinen Bezug zum Inhalt. Doch im Buch des Physikers Mike Berners-Lee zeigen sie – wenn auch indirekt – den Ausstoß von CO<sub>2</sub> an. So beginnt er auf Seite 25 mit 0,2 Gramm für ein Pint (etwa 473 Milliliter) voll mit Leitungswasser, auf Seite 56 kommen schon über 300 Gramm für drei Minuten Duschen zusammen, und auf Seite 137 findet sich eine Tonne für ein künstliches Hüftgelenk. Bis der Autor auf Seite 177 mit der monströsen Zahl von drei Milliarden Tonnen für den »militärischen Stiefelabdruck« schließt.

Berners-Lee hat die Kapitel, in denen er für verschiedene Dinge die CO<sub>2</sub>-Emissionen beziffert, den Werten nach angeordnet. Sie starten mit »Unter 10 Gramm«, gefolgt von »10 bis 100 Gramm« und so weiter bis er bei Milliarden Tonnen für Flächenbrände, Ruß und eben Kriege landet.

Ob Getränke, Tiere, eine E-Mail, ein neues Schlafzimmer, Flüge in den Weltraum – es macht Spaß, nachzusehen, ob eine SMS oder ein Brief mehr Klimagase verursacht oder wie viel ein Goldfisch, ein Dobermann und ein Kaninchen freisetzt. War man vielleicht noch über den Beitrag von 0,2 Gramm Kohlenstoffdioxid für Leitungswasser erstaunt, so sind es für einen Liter Wasser aus der Flasche schon rund 400 Gramm. Am Anfang jedes Abschnitts listet Berners-Lee die Zahlen einer ähnlichen Kategorie auf, wie lokales Fassbier, lokales Bier in Flaschen oder importiertes Flaschenbier. Anschließend berichtet er nachvollziehbar, wie man die Werte berechnet und gibt alle dazugehörigen Quellen an.

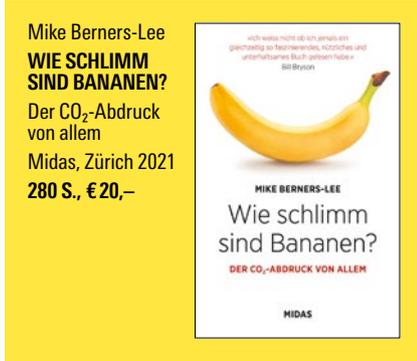
Relativ früh taucht die titelgebende Banane auf, die mit 110 Gramm pro

Stück überhaupt nicht so schlimm sei, schreibt der Autor. Sie werde unter natürlichem Licht angebaut, hält sich lange und verbraucht kaum Verpackung. Ein Apfel kann da schon mehr Klimagase verursachen und kommt locker auf die dreifache Menge, wenn er nicht vom eigenen Baum oder lokal und saisonal geerntet wird. Denn bei einem importierten Apfel außerhalb der Saison gehen neben dem Transport auch Kühlung und Lagerung mit in die Bilanz ein.

Die Apfel-Studien zeigen beispielhaft, wie genau man hinschauen sollte. Denn die Untersuchungen aus Neuseeland kommen auf andere Zahlen als die aus Großbritannien. Trotz Flugtransport sollen die nach Großbritannien eingeflogenen Früchte immer noch eine bessere Klimabilanz haben. Die Neuseeländer berücksichtigen dabei (aus eigenem Interesse), dass in der britischen Landwirtschaft mehr fossile Brennstoffe eingesetzt werden. Damit hat der lokale Apfel in Großbritannien unter Umständen eine schlechtere Bilanz, als der importierte.

An einigen Beispielen verdeutlicht Berners-Lee, wie unterschiedlich die Klimabilanz für die Produktion von einer Kilowattstunde elektrischen Strom in verschiedenen Ländern ist. Die Spanne reicht von 9 Gramm für eine Kilowattstunde in Island, 530 Gramm in Deutschland bis hin zu über einem Kilo in Australien. Dabei ist es nicht immer entscheidend, den präzisen Wert zu finden. Allein den Gedankengängen zu folgen und nachzuvollziehen, was in der jeweiligen Lieferkette wichtig ist und zur Klimabilanz eines Produkts beiträgt, ist spannend. So zählt bei Flugzeugen oder den aktuellen Weltraumflügen nicht nur das reine Kohlenstoffdioxid,

**»Das US-Verteidigungsministerium ist der größte institutionelle Verbraucher von Erdöl«**



das für den Bau und beim Flug emittiert wird. Nicht zu vernachlässigen sind auch die Orte, an denen es freigesetzt wird: Denn Treibhausgase wirken in der Höhe deutlich schlimmer – deshalb sollte die Menge an Klimagasen von Flugzeugen einen Aufschlag von 1,9 erhalten.

Trotz aller Fakten muss der Autor auch manchmal gewisse Größen schätzen. Sein Ziel ist es, grundsätzlich ein Gefühl für die Klimabelastung einzelner Dinge aufzubauen. Beson-

ders schwierig ist es, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Kriegen gegen Ende des Buchs abzumessen, hier kann er nur sehr grob überschlagen. Dabei geht er nicht wie in den anderen Kapiteln ins Detail, gibt aber wie immer eine Quelle an. So bemerkt die Studie des »Cost of War«-Projekts an der Brown University, dass alle Kriege der Welt sechs Prozent der globalen Emissionen ausmachen und auch das US-Verteidigungsministerium »der weltgrößte institutionelle Verbraucher von Erdöl und Erzeuger von Treibhausgasen weltweit ist«.

Berners-Lee listet nicht nur buchhalterisch die Zahlen auf, sondern ordnet sie ein und liefert wissenswerte Details von negativen Emissionen oder umweltfreundlichen Projekten. Damit ist ihm ein rundum lesenswertes Buch gelungen, das die Neugier anfacht, selbst zu stöbern und dabei Neues auf unterhaltsame Art zu entdecken.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

## RAUMFAHRT EROBERUNG DES ALLS

**Der Astronomiejournalist Dirk H. Lorenzen stellt aktuelle Projekte und ehrgeizige Missionen der Zukunft vor.**

► Der Weltraum beflügelt die Fantasie und den Erfindungsgeist der Menschen. Die ehrgeizigen Pläne, das Universum zu erobern, werden kühner. Sie nehmen immer weiter von der Erde entfernte Ziele ins Visier. Schon längst ist der Mars in Reichweite von ferngesteuerten Rovern gekommen. Es ist absehbar, dass sie nur eine Vorhut für den ersten Besuch des Menschen auf dem Roten Planeten darstellen. Parallel dazu arbeiten die Reichsten der Reichen wie Elon Musk oder Richard Branson nicht ganz uneitel daran, wie sie den Weltraumtourismus zu einem neuen Geschäftsfeld machen können.



# Spektrum.tv

## Dokumentationen und Reportagen zu den Tophemen der Wissenschaft

Für nur 4,99 € pro Monat  
ohne Verpflichtung – ohne Werbung

[tv.Spektrum.de/DE/](http://tv.Spektrum.de/DE/)



# REZENSIONEN

Die Eroberung der Weiten des Kosmos ist in vollem Gang.

Eine Zusammenstellung dessen, was an aktuellen Projekten geplant ist, aber auch, was an visionären Ideen durch die Köpfe der Ingenieure geistert, hat der Astronomiejournalist Dirk H. Lorenzen in seinem Buch »Der neue Wettlauf ins All« verfasst. Darin schlägt er gekonnt eine Brücke von der Geschichte der Raumfahrt zur heuti-



gen, enorm verbesserten Technologie der Projekte, welche die Tore in die Weiten des Universums aufstößt.

Längst hat man konkrete Vorstellungen davon, wie etwa eine Mondbasis aussehen soll. Klar ist: Man muss sie wohl mit viel Mondstaub bedecken, um schädliche Strahlung abzuhalten. Das Leben findet also im Mondboden statt. Ebenso weiß man mittlerweile nicht nur um die physischen, sondern auch um die psychischen Belastungen der Astronauten, die länger auf dem Erdtrabanten verweilen sollen. Man hat Konzepte entwickelt, um den Menschen das Leben auf einer Mondbasis so angenehm wie möglich zu machen, ohne dass sie sich irgendwann die Köpfe einschlagen. Lorenzen stellt in seinem Buch internationale Forschungsprojekte vor, die sich mit einer dauerhaften Besiedlung des Mondes beschäftigen.

Ein Kapitel dreht sich um die Eroberung des Mars. Der Autor erklärt, was technologisch bereits alles möglich ist auf dem Roten Planeten, der mindestens 55 Millionen Kilometer von uns entfernt ist. Höhepunkt der Hightech-Missionen ist aktuell der kleine Helikopter Ingenuity, der erst vor Kurzem vom NASA-Rover Persever-

ance aus eigenständig den Mars erkundete. In diesem Zusammenhang zeigt Lorenzen die schönsten hoch aufgelösten Bilder, die Geräte wie Perseverance oder Curiosity zur Erde geschickt haben.

Zudem spricht der Autor weniger populäre Themen an wie die Vermüllung unseres Orbits oder Gefahren, die uns aus dem Weltraum drohen, etwa Meteoriteneinschläge. Das Buch bietet ein inhaltlich breites Spektrum, die gelungene Mischung aus Textbeiträgen und Bildern ist kurzweilig und ansprechend gestaltet. Als leicht verständlicher Einstieg in die Materie eignet es sich für jeden Raumfahrtfan.

Spannend liest sich am Ende Lorenzens Ausblick auf das, was kommen wird. Klar dürfte schon jetzt sein: Sobald es technologisch möglich ist, den Mars zu erreichen, wird man sich noch ambitioniertere Ziele stecken.

Bereits heute gibt es ausgereifte Pläne, wie man mit Nanoraumschiffen zum vier Lichtjahre entfernten Sonnensystem Alpha Centauri gelangen könnte. Solche Raumgefährte bestünden fast vollständig aus kleinen Segeln, auf die der Lichtdruck eines Lasers wirkt und sie so aus unserem Sonnensystem katapultiert. Nicht in Nanodimensionen, sondern in weitaus größeren träumt währenddessen Elon Musk. Er überlegt schon heute, wie er zum Saturn kommt. Die Frage ist nur: Entschädigt der Blick auf die Ringe des zweitgrößten Planeten unseres Sonnensystems wirklich für die Eintönigkeit einer Flugreise durch die Leere von mindestens zehn Jahren Dauer?

Thorsten Naeser ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

## KULTUR WISSEN IST MACHT

**Zu allen Zeiten haben Menschen versucht, Wissen gezielt auszulöschen, indem sie Bücher verboten oder sogar vernichtet haben. Davon und von mutigen Einsätzen für deren Rettung berichtet der Leiter der berühmten Bodleian Library.**

► Papier entzündet sich ab 233 Grad Celsius. Diese in Fahrenheit umgerechnete Temperatur wählte der US-amerikanische Schriftsteller Ray Bradbury als Titel für seine Dystopie, in der er das Leben in einem Staat beschreibt, der den Besitz und das Lesen von Büchern unter Strafe stellt. »Fahrenheit 451« stammt aus dem Jahr 1953: Gerade einmal 20 Jahre zuvor, am 10. Mai 1933, verbrannten deutsche Studenten vor den Augen der Weltöffentlichkeit auf Initiative der erstarkenden nationalsozialistischen Bewegung ausgewählte Bücher. Dazu gehörten weltbekannte Werke von Schriftstellern wie Bertold Brecht, Erich Kästner, Heinrich und Klaus Mann und vielen mehr, die von den Nationalsozialisten geächtet wurden, weil sie jüdisch waren, wegen ihres Lebensstils oder ihrer politischen Einstellung.

Die Berliner Bücherverbrennung erscheint uns beispiellos. Dabei ist sie das leider nicht, wie das Werk »Bedrohte Bücher« aufzeigt. Bibliothekar Richard Ovenden steht seit 2014 der Bodleian Library in Oxford vor, einer der ältesten Bibliotheken Europas, die sich auf den Namensgeber Sir Thomas Bodley (1545–1613) zurückführen lässt. Zu allen Zeiten, so der Archivar, haben Menschen versucht, Wissen unter ihre Kontrolle zu bringen, um es gezielt für sich zu nutzen und andere davon auszuschließen. Denn schon immer galt: Wer den Zugang zu Wissen hat, kann manipulieren und unterdrücken.

Seinen Streifzug durch rund 3000 Jahre Geschichte beginnt Ovenden in Alexandria, der ägyptischen Hafenstadt, in der Anfang des 3. Jahrhunderts v. Chr. die wohl berühmteste Bibliothek der Welt gegründet wurde. 48 v. Chr. brannte sie vollständig ab. Ob sie als Kollateralschaden einer kriegerischen Handlung unterging oder das Feuer gelegt wurde, ist unklar. Doch mit ihrer Zerstörung verschwand eine unschätzbare Anzahl an Textdokumenten für immer.

Im Unterschied dazu weiß man genau, dass Bibliotheken zu späterer Zeit gezielt in Brand gesetzt wurden,



um Wissen zu vernichten. Beispiele hierfür sind die Library of Congress, die 1814 im Zuge der Eroberung von Washington durch Beschuss der britischen Armee in Flammen aufging, sowie die Zerstörung der bosnischen Nationalbibliothek 1992 in Sarajevo durch die Serben in den Balkankriegen. In Größenordnung und Konsequenz beispiellos ist sicher die strategische Vernichtung des schriftlich festgehaltenen jüdischen Wissensschatzes. So haben die Nationalsozialisten nicht nur mehr als sechs Millionen

Juden ermordet, sondern auch deren Bücher beschlagnahmt, zweckentfremdet oder vernichtet – mit dem Ziel, ihre Kultur vollständig auszurotten.

Alle Kapitel von »Bedrohte Bücher« erzählen die Geschichte eines Angriffs auf einzelne Werke oder ganze Archive, sie enthalten aber auch Anekdoten von mutigen Menschen, die für den Erhalt von Wissen gekämpft haben, oft unter Einsatz ihres Lebens. Auf diese Weise retteten sie unzählige Bücher aus brennenden Bibliotheken, Gettos oder dem Besitz feindlicher Staaten, um nach Krieg und Vernichtung den Grundstock einer neuen Identität oder eines Nationalgefühls zu bilden.

Durch die Digitalisierung habe sich die Arbeit in Bibliotheken drastisch verändert. Doch das Wissen sei noch immer – vielleicht sogar stärker – verwundbar, vermutet der Archivar. Digitale Texte, Whatsapp-Nachrichten, Twittermeldungen: All das lässt sich mit einem Klick löschen, oft mit schwer wiegenden Konsequenzen, wenn es etwa um Aussagen von Poli-

tikern, Konzernen oder Lobbyisten geht. Der Autor plädiert deshalb im Abschlusskapitel für den Erhalt und den Ausbau von Bibliotheken. Denn nur sie, davon ist er überzeugt, können Wissen über Generationen bewahren, das für jede funktionierende Gesellschaft unverzichtbar ist und verfügbar sein sollte.

Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

## DIGITALISIERUNG DAS PRIVATSPHÄRE- PARADOXON

**Der Psychologe Gerd Gigerenzer seziert in seinem neuen Buch die Macht der Datenkonzerne.**

► 2019 führte der Psychologe Gerd Gigerenzer zusammen mit dem Versicherer Ergo eine repräsentative Umfrage unter 3200 Menschen in Deutschland durch. Demnach sahen 75 Prozent der Befragten den Verlust der Privatsphäre als die größte Gefahr

## Spektrum der Wissenschaft

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

**Redaktionsleitung:** Dr. Hartwig Hanser

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

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Natalie Schäfer

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

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

**Redaktionsassistent:** Andrea Roth

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

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle

**Herstellung:** Natalie Schäfer

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

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

**Übersetzungen:** An diesem Heft wirkte mit: Dr. Katja Mellenthin

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel.: 06221 9126-723, 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. 43 vom 1.1.2022.

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

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

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

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

ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**

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



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



der Digitalisierung an. Auf die Frage, wie viel Geld sie im Monat bereit wären, auszugeben, damit Dienste wie Facebook, Whatsapp oder Instagram keine persönlichen Daten über sie sammeln oder weitergeben, gaben drei Viertel an: nichts. 18 Prozent würden bis zu fünf Euro im Monat bezahlen, nur zwei Prozent würden mehr als zehn Euro in die Hand nehmen. Man zahlt bereitwillig für Streaminganbieter oder Kabelgebühren, aber der Datenschutz ist den meisten Menschen keinen Cent wert, obwohl sie sich vor seinem Verlust sorgen. Wie passt das zusammen?



Experten sprechen vom Privatsphäre-Paradox. Das Phänomen ist unterschiedlich ausgeprägt. In den Vereinigten Arabischen Emiraten und Brasilien ist die Zahlungsbereitschaft deutlich höher als etwa in Deutschland oder Neuseeland. Dass man die vermeintlich kostenlosen Angebote mit seinen Daten bezahlt und der Deal »Daten gegen Dienste« ein fauler ist, weil man durch Risikoaufschläge am Ende doch mehr Geld für Versicherungen oder Kredite abgibt, dürfte sich inzwischen herumgesprochen haben. Trotz diverser Datenskandale geben viele Verbraucher aber immer noch arglos sensible Daten von sich preis – nach dem Motto: »Ich habe nichts zu verbergen.«

Für den Risikoforscher Gigerenzer ist diese Haltung das Einfallstor in eine neue Unmündigkeit. Wie die Schafe einer Herde ließen sich Nutzer von »paternalistischen Technologien« herumschubsen, so dass man am Ende »schlafwandelnd in die Überwachung«

taumele, so die These seines neuen Buchs »Klick«.

In seiner invasiven Art, das Privatleben der Menschen auszuforschen, erinnere der Überwachungskapitalismus an das Mittelalter, »etwa im Frankreich des 16. Jahrhunderts, als die Nachbarn alles über einen wissen wollten und auf jedes Knacken der Treppenstufen achteten«. Damals habe es wenig Raum für Privatsphäre gegeben, jeder beobachtete jeden rund um die Uhr. Die Einzigen, die nicht ständig öffentlicher Kontrolle unterzogen waren, waren die absoluten Herrscher, so Gigerenzer: »Diese legten die Bedingungen für das Leben gewöhnlicher Menschen fest und boten als Gegenleistung Schutz und andere Dienste. Heute sind die Tech-Unternehmen der neue Adel, der uns die Bedingungen diktiert, und zwar in solcher Länge und einer kaum verständlichen Sprache, dass den modernen Untertanen nichts anderes bleibt, als zu klicken und zu akzeptieren.«

Das Sinnbild dieser Unterwerfung sind für Gigerenzer Cookies – kleine Codeschnipsel, die zwischen dem Computer des Nutzers und den Servern des Websitebetreibers ausgetauscht werden und die Aktivitäten im Netz verfolgen. Entwickelt in den 1990er Jahren, verbannten US-Regierungswebsites Cookies im Jahr 2000. Doch dann kamen die Anschläge des 11. September – und die Massenüberwachung, die sich nicht zuletzt auf eine Kooperation von Google und den Geheimdiensten stützte.

Die teils irrationale Angst vor Terroranschlägen hat der Autor in früheren Büchern mit reichlich Zahlenmaterial zu entkräften versucht. Gigerenzer schreibt: »Die Bekämpfung des Terrorismus ist kein wohldefiniertes Problem, das sich mühelos mit Big Data bekämpfen ließe.« Doch wie sähe ein Ausweg aus den Überwachungsschleifen aus?

Unter dem Stichwort »Datenwürde« (data dignity) werden Modelle diskutiert, die unter anderem eine Entschädigung für Nutzer vorsehen. Aber wie hoch wäre eine solche? Der Autor beruft sich auf Experten, die den Wert der Daten auf 100 Euro taxieren.

## »Ein Smartphone braucht smarte Menschen, die es vernünftig verwenden«

Würde Facebook die Hälfte seines Gewinns an seine Mitglieder ausschütten, käme man auf 28 Cent im Monat beziehungsweise einen Cent am Tag. Die Facebook-Nutzer wären die »am schlechtesten bezahlten Arbeiter der Welt« – ein »lausiges Geschäft«, konstatiert Gigerenzer. Für den Wissenschaftler kommt daher nur ein »radikaler Schnitt« in Frage: eine Gebühr für digitale Dienste. »Das wäre der Schlüssel, die Privatsphäre zu retten und einer Zukunft mit kommerzieller Überwachung zu entgehen, die leicht in eine staatliche Überwachung abgleiten könnte«, so der Psychologe. Sein Rat lautet daher: »Zahlen Sie für Dienstleistungen!«

Gerd Gigerenzer hat ein eindrückliches Plädoyer für mehr Privatsphäre geschrieben und dabei Lösungswege skizziert, wie man aus dem Überwachungskapitalismus ausbrechen kann. Anhand konkreter Beispiele macht er deutlich, wie Algorithmen in unseren Alltag hineinregieren. Auf einige Ausführungen etwa über die Skinner-Box oder neuronale Netze hätte man zu Gunsten einer stringenteren Argumentation verzichten können. Trotzdem versteht es der Autor, dem Leser die Ambivalenz der digitalen Technik vor Augen zu führen. »Ein Smartphone«, schreibt Gigerenzer, »ist eine tolle Technologie, aber es braucht smarte Menschen, die es vernünftig verwenden.«

Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«

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

## DRUCKERSCHWÄRZE ERSCHWERT PAPIERRECYCLING

# 1922

»Eine Wiederverwendung der bei der Papierherstellung anfallenden Abfälle liegt nahe. Schwieriger ist es, Druckpapier in neuen Papierstoff umzuwandeln, denn dann steht als Schwierigkeit die Beseitigung von Unreinigkeiten im Vordergrund. Zur Entfernung von Tinte und Schmutz genügen Bleichmittel, der Druckerschwärze stehen sie machtlos gegenüber. Wie einst Gutenberg, so stellen wir sie aus Leinölfirnis und Ruß her. Dieses Gemisch widersteht jedem chemischen Reagens, dem auch die Papierfaser zu widerstehen vermag. Altpapier wurde deswegen bisher zur Anfertigung minderwertiger, dunkelfarbiger Papiere und Pappen verwendet.« *Die Umschau 10, S. 157*

## RÖNTGENAPPARAT ZEIGT, WO DER SCHUH DRÜCKT

»Vor Jahren – ehe auch die Frau Sport trieb – zielte die Schuhmode dahin, Klumpfüßchen zu erzeugen. Heute ist darin vieles besser geworden. Aber es ist oft schwer, festzustellen, wo eigentlich der Schuh drückt. Besonders das Verpassen von Kinderschuhen ist ein Geduldsspiel, weil die Kleinen häufig nicht fähig sind, zu sagen, wo ihnen ein Schuh zu eng ist. Da holt der moderne Schuster das Rüstzeug der Wissenschaft. Er durchleuchtet den Fuß im Schuh von unten her mit Röntgenstrahlen und jede Pressung und Verbiegung ist deutlich erkennbar.« *Die Umschau 13, S. 203*



Schuhanprobe mit Röntgenapparat.

## ELEKTROLOK BEZWINGT DAMPFANTRIEB

»Bei Erie (Pennsylvanien) fanden Vergleichsversuche zwischen Dampf- und elektrischen Lokomotiven statt. Das Interesse wurde aufs höchste gespannt, als zwei moderne Dampflokomotiven mit einer elektrischen Lokomotive verknüpft wurden, um ihre Kräfte zu messen. Man ließ [sie] gegeneinander drücken. Als die Dampflokomotiven sich in Bewegung setzten, drückten sie die elektrische Lokomotive eine kurze Strecke zurück. Alsdann wurde der Strom angelassen. Allmählich kamen [die Dampflokomotiven] zum Stillstand und wurden rückwärts geschoben.«

*Technische Monatshefte 2, S. 48*

## AUF DEM WEG ZUM FUSIONSREAKTOR

# 1972

»Das Kernforschungsinstitut in Jülich hat über erfolgreiche Plasmaexperimente berichtet. Mit einem Deuterium-Plasma ist es gelungen, Temperaturen von mehr als 100 Millionen Grad [Celsius] zu erreichen. Das Plasma befand sich in einem zylindrischen Gefäß von 2 Meter Länge und 40 Zentimeter Durchmesser. Das Gefäß war von einer Spule umgeben, durch die ein Stromimpuls von einer millionstel Sekunde ( $10^{-6}$  s) und 500000 Ampere geschickt wurde. Durch diese Vorrichtung wird ein Magnetfeld erzeugt. Das Plasma erreicht Geschwindigkeiten von mehr als 3 Millionen km/h. [Es] hat die Form eines Zylinders.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 2, S. 76*

## DER ARALSEE SHRUMPT DRAMATISCH

»Von 1961 bis 1969 ist der Wasserspiegel des Aralsees im Süden der Sowjetunion um 1,5 Meter gesunken. Hält diese Entwicklung im selben Tempo an, dürfte der See im Jahre 2030 nur noch aus einem riesigen Salzumpf bestehen. Der Wasserverlust ist auf den Bau von Staudämmen und Bewässerungskanälen zurückzuführen. Zu ähnlichen Befürchtungen gibt das Kaspische Meer Anlaß. Dort sank der Wasserstand während der letzten 20 Jahre um 2,5 Meter.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 2, S. 80*

## DER UNSICHTBARE REGENBOGEN

»Da ein beträchtlicher Teil des nahen Infrarot der Sonnenstrahlung sowohl die Erdatmosphäre als auch Regentropfen passiert, liegt es nahe anzunehmen, daß es im nahen infraroten Spektralbereich einen Regenbogen geben müsse, den das menschliche Auge nicht sehen kann. [Der Physiker] Robert G. Greenler (Milwaukee) hat erstmals einen solchen Infrarot-Regenbogen photographiert. Eine Kombination von Film und Filter ließ Aufnahmen im Bereich um 865 nm entstehen, also außerhalb des sichtbaren Spektrums.« *Die Umschau 2, S. 67*

Infrarot-Regenbogen, rechts ein zweiter.



## Der Deal

### Poesie blüht im Verborgenen.

Eine Kurzgeschichte von  
Uwe Schimunek

Ich bin sieben Minuten zu spät, also genau richtig. Mit einem Fingertipp blende ich die Uhr in der Holobrille aus und schaue mich in der Kneipe um. Vom Eingang aus sieht man nur zwei Tische. Sie sind mit lumineszierenden Folien bedeckt. Die Stahlbeine der Stühle drum herum schimmern rostbraun, die Sitzpolster fusseln wie Geflügel in der Mauser. Ich sehe keine Gäste. Allerdings höre ich Gemurmel aus den Nischen, die sich an der Wand gegenüber der Bar reihen. Dort laufen die zwielichtigen Deals in der vorgeschriebenen Pause zwischen Job und dem pseudofreiwilligen Ehrenamt.

In einer dieser Nischen muss mein Dealer sitzen. Ich ziehe die Newsfolie aus der Tasche und rufe den Sportreport auf den Titel – unser Erkennungszeichen. Auf dem Weg durch die Kneipe schaue ich zu den Displays hinter der Bar. Synchron läuft die Übertragung der Feldschach-Champions-League. Seit der zweiten Gesetzeswelle zur Effizienzoptimierung sind Sportarten ohne Stimulation der kognitiven Fähigkeiten verboten. Deswegen rennen und hüpfen nun Spieler in Turm- oder Springerverkleidung über den schwarz-weiß gefärbten Schotter.

Ich bummle durch die Kneipe – ich bin zu spät, jedoch im akademischen Viertel, was selbst heutzutage als zwar ungebührlich, aber noch nicht als justiziabel betrachtet wird. In jeder Nische zeigen Screens das Feldschachspiel. Ich versuche, so beiläufig wie möglich auf die Sitzbänke zu blicken. In dieser Wirtschaft treffen sich Leute, die nicht beobachtet werden wollen. Deswegen halte ich den Kopf gerade. So sehe ich die Gäste nur am äußersten Rand meines Blickfelds: das händchenhaltende Pärchen, vielleicht eine Managerin und ihr Sekretär; die beiden Alten, die bei meinem Auftauchen sofort erstarren; die jungen Kerle mit ihren VR-Helmen – und endlich eine einzelne Person, eine Frau mit kahl geschorenem Kopf. Ich schiebe die Newsfolie unter meinen rechten Arm, so dass die Frau den Titel sehen kann. Prompt nickt sie mir zu.

»Effizienz mit Vergnügen.« Ich murmle die Grußformel des Monats und setze mich auf den Platz ihr gegenüber. »Ich bin Tim und ich glaube, wir sind verabredet.«

»Du bist spät«, entgegnet die Frau. Durch ihre entspiegelte Holobrille schimmern ihre grünen Augen. Auf dem T-Shirt fluoreszieren die Striche einer Manga-Figur im selben Farbton vor sich hin. Ihre Schultern erscheinen so grazil, dass ich lieber woanders hinschaue, ehe ich sie mit meinem Blick zermalme. Ich schweige und entspiegeln meine Holobrille ebenfalls.

»Eine kurze Erinnerung«, unterbricht eine schmeichelnde Männerstimme aus den Tiefen des Subwoofers unter den Sitzen die Stille. »Folgen Sie der obersten KI auf dem Weg zu Glück und Wohlfahrt für alle. Vermeiden Sie jeglichen Müßiggang auch bei Ihren ehrenamtlichen Tätigkeiten. Effizienz mit Vergnügen!«

»Effizienz mit Vergnügen, Tim«, wiederholt die Frau und wirft mir so einen Hab-ich's-doch-gesagt-Blick zu.

»Dann kommen wir besser zur Sache.« Ich würde am liebsten wieder aufstehen. Dabei ist mir egal, dass sie anscheinend ihren Namen nicht verraten will. In unserem verschlüsselten Chat hat sie sich lediglich als A ausgegeben. Und natürlich heiße ich nicht Tim. Das ahnt sie sicher auch.

Ohne ein weiteres Wort zieht A eine eingerollte Newsfolie aus einer Handtasche, die ich erst jetzt auf der Sitzbank neben ihr bemerke. Sie hält die Folie in der Hand und schaut aus der Nische in den Gasträum. Noch lässt sie die Folie eingerollt, da in diesem Moment der Bedienbot herbeischwebt.

»Effizienz«, plärrt die Kiste ordnungsgemäß, denn Bots dürfen den Teil mit dem Vergnügen in der Grußformel nicht verwenden. Die Stahlarme nehmen zwei Kaffeetassen von dem Tablett, das auf der Glatze des Blechkopfs ruht. Aus der Sprachöffnung tönt es: »Euer Zeitbudget zeigt noch Kapazität für jeweils eine mittlere Tasse an. Lasst es euch schmecken.« Das Ding stellt die Tassen ab und bewegt sich zur nächsten Nische.

A wartet, bis der Bot nicht mehr zu sehen ist und seine Sensoren nicht mehr wahrnehmen, was in unserer Nische geschieht. Sie zögert noch einem Moment, bevor sie die Newsfolie in die Mitte des Tisches schiebt.

Ich bin aufgeregt wie vor dem jährlichen Mitarbeitergespräch mit meiner Leitungs-KI. Doch ich versuche, mir das nicht anmerken zu lassen. Daher nippe ich zunächst an meinem Kaffee.

Sie schlägt die Folie auf. Drinnen liegen Blätter. Handbeschrieben. Das wird doch nicht ...

»Echtes Papier.« Sie schiebt die Folie mit den Blättern näher zu mir. »Fass es ruhig an.«

Vorsichtig streiche ich über das oberste Blatt. Im Vergleich zu einer Newsfolie fühlt es sich rau an, als wäre auf der Oberfläche ein mikroskopischer Flaum. Ich nehme das Blatt in die Hand. Obwohl es kaum Gewicht aufweist, kommt es mir schwerer vor als eine übliche Digifolie.

Ich lese den ersten Absatz auf dem Blatt:

*1 Stern und 7 kazamogipuffel  
macht 13 zakopaddogei  
zubtrahiere 5 franschöse Männlin  
macht 1 Libanotterbett  
nehme 3 Quentlin Klotzpulfer  
legs in himmelsdeifelsnamen  
dabei, wirst sehen wohinst  
kommst wnr bällt wnr heult  
wnr pfaucht wnre Daugen däht*

Hugo Ball

In meinem Kopf turnt etwas. Nein, es fühlt sich an wie ein Feuerwerk. Ich schließe die Augen. Denn wenn ich mir etwas anmerken lassen, treibe ich nur den Preis hoch.

Also Pokerface. Ich blättere um und betrachte das nächste Papier. Die Handschrift besteht auch hier aus nachgeformten Druckbuchstaben, beinahe ohne Schwung. Eine saubere Abschrift. Auf dem zweiten Blatt steht:

*Johannes Theodor Baargeld: Bimmelresonanz II  
Bergamotten flotten im Petroleumhimmel  
Schwademasten asten Schwanenkerzen  
Teleplastisch starrt das Cherimbien Gewimmel  
In die überöffneten Portierenherzen  
Inhastiert die Himmelbimmel*

Ich nehme mich zusammen und höre nach dem ersten Absatz auf zu lesen. Schließlich möchte ich die Momente der Wortanarchie in Ruhe genießen und dabei nicht von einer Dealerin beobachtet werden. Nach einem Moment zum Sammeln fällt mir auf, dass der Autorennamen auf diesem Blatt vor dem Text steht. Es handelt sich also vermutlich nicht um serielle Abschriften. Bestimmt wertet die Justiz-KI den Handel und Konsum solcher Abschriften lediglich als Ordnungswidrigkeit.

»Genug gesehen?«, fragt A. »Können wir zum Deal kommen?«

Ich schaue vom Papier auf und entgegne nichts.

»Zwei Kapseln pro Blatt, aber gute frische«, fordert A.

Ich überlege. Täglich gönnt die oberste KI jedem von uns eine Dosis Xtrance für die ein bis zwei Stunden zwischen Ehrenamt und Bettruhe. Damit keiner Schindluder treibt, wird das Zeug ziemlich schnell schlecht. Von fünf, sechs Tage altem Xtrance bekommt man allenfalls noch Kopfschmerzen. Mehr als zwei Abschriften kann ich also nicht aus dem Eigenbedarf erwerben. Klar, ich habe auch ein paar Kapseln aus kleineren Geschäften. Doch Schwarzmarkt-Deals mit mehr fünf Pillen ahndet die Justiz-KI als Straftat.

Bevor ich antworte, werfe ich einen Blick auf das dritte Blatt und lese:

*X und U von Hanna Hoff  
Uebelwill ...  
Xanthippe uebt xanthippisch  
ueberantwortet Xenienkampf  
ueberbackt Xylograph  
ueberlastet Xylophon  
Ueberbelichtet!*

»Das ist ganz schön teuer«, murmle ich, ohne den Blick vom Papier zu lassen. An den Zeilen verwirrt mich etwas. Ich brabbe: »Ich bin nur ein einfacher Humanoperator für einen Servicebot.«

»Tja, jeder muss wissen, was ihm Kunst wert ist«, entgegnet A.

Ich nehme die Worte kaum wahr. Mein Blick ruht auf dem Vers. Da stimmt etwas nicht mit den Substantiven; um genau zu sein mit der Reihenfolge. Ich gehe die Zeilen

durch, die Nomen sind alphabetisch angeordnet. Die Verben sehen ebenfalls aus wie vom Anfang einer Liste genommen. Ohne ihn zu durchschauen, spüre ich den Algorithmus.

»Okay, fünf für drei«, sagt sie.

»Ich weiß nicht.« Ich blicke ihr in die Augen und suche nach Floskeln. »Es ist wohl im Sinne der Effizienz besser, wenn ich auf dekadente Ablenkung verzichte. Vergnügen mit Vernunft.«

Sie reißt die Augen auf – das Pokerface scheint zu zerbröckeln.

Die denkt doch nicht, dass ich von der Behörde bin? Oder ist sie selbst eine Agentin?

»Wie hast du es gemerkt?«, fragt sie.

»Was?«

Sie tippt auf das Blatt mit dem Vers von Hanna Hoff. »Ich meine, dass dieses Gedicht kein Original ist.«

Wusste ich's doch. Ich merke, wie ich grinse und sage: »Nenn es Intuition.«

»Ich habe so viel dafür recherchiert.« Sie klingt verzweifelt, als würde sie vor der Justiz-KI sitzen. »Weißt du, wie schwer es ist, auch nur ein Digitalisat vom originalen grimmischen Wörterbuch zu bekommen?«

Was redet sie da?

»Ich habe die Substantive ausgezählt, und die, die in der Liste an der Stelle einer Primzahl standen, mit der Hand abgeschrieben, um keine digitalen Spuren zu hinterlassen. Die Verben kommen aus einer Konversationsliste, und ich habe einzelne nach meiner Intuition übernommen.«

»Du hast das geschrieben?« Ich erkenne meine Stimme kaum, so erstaunt bin ich.

»Seit Jahren studiere ich die archaischen Verfahren und benutze sie selbst. Und du erkennst den Unterschied zu den Klassikern auf einen Blick.«

Mir fehlen die Worte. Ich schaue auf die Zeilen. Da liegt ein echtes Werk von einem echten Menschen. Nicht von irgendwelchen Legenden aus längst vergangenen Jahrhunderten. Vielleicht nicht von der gleichen Qualität, aber wer bin ich, dass ich das beurteilen könnte?

Sie zieht die Folie mit den Blättern zu sich. Doch ich lege meine Hand auf das Papier und halte es fest.

Ich ziehe mein Beutelchen mit den Xtrance-Kapseln aus der Tasche, lege es auf den Tisch und sage: »Nimm dir, was du willst. Ich möchte dein Gedicht haben.«

Sie guckt ungläubig. Doch sie schiebt meinen Beutel zurück zu mir und lässt das Blatt los.

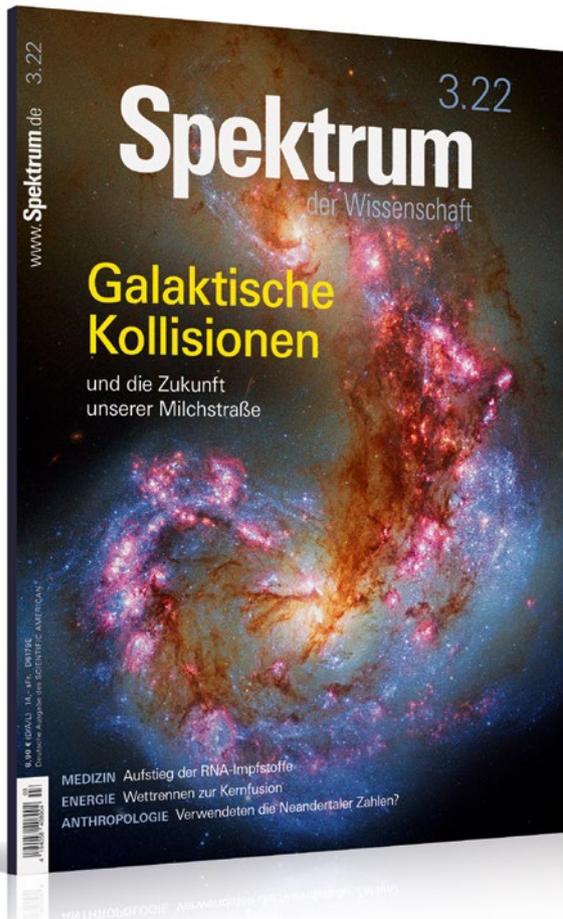
Ich nehme das Papier und verstecke es so vorsichtig in meiner Newsfolie, als wäre es aus hauchdünnem Glas. Dabei fällt mein Blick noch einmal auf die Zeilen. Soll ich ihr empfehlen, dass sie sich mehr auf ihre Intuition verlassen sollte, die Verse weniger berechnen?

Nein! Ich sage: »Ich will mehr von dir lesen, Hanna Hoff.« ◀

DER AUTOR

**Uwe Schimunek** ist Autor und Journalist in Leipzig. Er veröffentlicht Krimis, Kinderbücher sowie Kurzgeschichten und Sachtexte.

# VORSCHAU



## DAS SCHICKSAL DER MILCHSTRASSE

Im Kosmos stoßen immer wieder Galaxien zusammen – mit dramatischen Folgen: Verwirbeltes Material befeuert die Sternentstehung, Schwarze Löcher vereinigen sich. Die Vorgänge sind hinter Staub verborgen und nur mit speziellen Teleskopen zu erkennen. Neue Erkenntnisse enthüllen, was sich in Zukunft auch zwischen unserer und der benachbarten Andromedagalaxie abspielen wird.



## AUFSTIEG DER RNA-IMPfstOFFE

In der Covid-19-Pandemie sind erstmals RNA-Vakzine weltweit in großem Stil verimpft worden. Neu sind sie aber nicht: Ihre Erforschung begann vor rund 34 Jahren. Der Weg zu ihrem heutigen Erfolg war lang und steinig.



## DAS RENNEN ZUR KERNFUSION

Zuletzt konnten sich gleich mehrere Start-ups Milliardeninvestitionen mit dem Versprechen sichern, schon im kommenden Jahrzehnt die Kernfusion kommerziell nutzbar zu machen. Wie nah ist der erste Reaktor tatsächlich?



## VERWENDETEN DIE NEANDERTALER ZAHLEN?

Ein faszinierender Fund lässt vermuten: Schon die Neandertaler rechneten mit Zahlen und legten sich dafür »Merkzettel« in Form von Knochen an.

## NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:  
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren  
und keine Ausgabe mehr verpassen!



## Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:  
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder  
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem  
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten  
von **Spektrum PLUS** – wie kostenlosen Downloads,  
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



**Jetzt bestellen:**

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

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

# DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



**Spektrum**  
der Wissenschaft  
**DIE WOCHE**

NR **49** 09.12.2021

- > Wann Frauen genauso wettbewerbsfreudig wie Männer sind
- > Wetterlagen nisten sich offenbar immer länger ein
- > Frag doch mal die Waldbewohner

TITELTHEMA: CORONA-VARIANTE

## Der rätselhafte Ursprung von Omikron

Viele Fachleute sind sicher: Die neue Omikron-Variante entstand auf ungewöhnliche Weise. HIV könne eine Rolle spielen, hieß es erst – doch inzwischen gelten andere Möglichkeiten als wahrscheinlicher.

**COVID-19**  
Omikron entkommt  
Immunschutz nicht vollständig

**WUNDHEILUNG**  
Die heilende Superkraft  
der Mundschleimhaut

**AMERIKAS »GEBURTSURKUNDE«**  
Wie ein Jesuit  
America entdeckte

Mit ausgewählten Inhalten aus: **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

**Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!**

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

