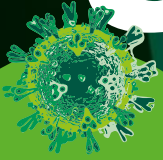


Spektrum

der Wissenschaft



**Covid-19-
PANDEMIE**

Eine neue Ordnung der Zeit

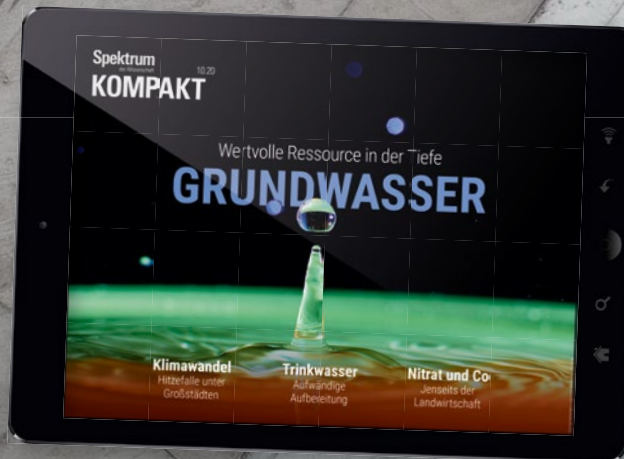
Quantenmaterie
mit exotischer Symmetrie
erobert die Labore

MEDIZIN Innovative Medikamente dank künstlicher Intelligenz
ASTROPHYSIK Warum finden wir keine außerirdischen Zivilisationen?
WALDBRÄNDE Den Giftstoffen im Rauch auf der Spur

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ! Ausgewählte **Spektrum KOMPAKT** gibt es auch im Printformat!

€ 4,99
je digitale
Ausgabe



Bestellmöglichkeit und über 250 weitere Ausgaben:

www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL DIE UNSICHTBARE MACHT

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

► Zurzeit wird uns allen die ungeheure Macht der Viren besonders eindrücklich vor Augen geführt. Dabei bestehen diese winzigen Partikel nur aus ein paar Molekülen: DNA oder RNA sowie – als Virionen außerhalb befallener Zellen – einigen Proteinen und vielleicht noch einer Membranhülle, fertig. Sie sind zudem auf Wirtszellen angewiesen, um sich zu vermehren. Deshalb sprechen viele ihnen gar den Status eines Lebewesens ab. Und trotzdem haben es die unsichtbaren Molekülaggregate geschafft, unser Leben in den letzten Wochen massiv zu beeinträchtigen. Wieder einmal, muss man sagen, nach all den Virusepidemien der Menschheitsgeschichte, von den inzwischen glücklicherweise ausgerotteten Pocken über die Spanische Grippe bis hin zur aktuellen Covid-19-Pandemie.

Deren Erreger namens Sars-CoV-2 stellt die Forschung vor große Herausforderungen. Ein zentraler Punkt ist die möglichst zügige Einführung eines wirksamen Impfstoffs. Ab S. 25 beschreibt der Biochemiker Stefan Müller seine Arbeit an einem der Kandidaten dafür, die derzeit weltweit entwickelt und geprüft werden. Im Juni sollen erste Tests an Menschen beginnen; wenn alles klappt, könnte der Impfstoff in einem Jahr in die Massenproduktion gehen.

Bis dahin ist die Politik gefordert. Um Wirksamkeit wie Notwendigkeit der verschiedenen sozialen und gesellschaftlichen Eingriffe zur Eindämmung der Krankheitsausbreitung besser einzuschätzen, greifen die Entscheider zunehmend auf Computersimulationen zurück, die den Verlauf der Epidemie abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren nachstellen. Wie die Forscher beim Entwickeln solcher Modelle vorgehen, können Sie ab S. 22 lesen.

Während uns die Covid-19-Pandemie im Griff hält, sollte man aber nicht vergessen, dass Viren nicht nur eine Gesundheitsbedrohung darstellen. Sie spielen auch eine sehr nützliche, vermutlich sogar lebensnotwendige Rolle. In den letzten Jahren geriet das Mikrobiom in den Fokus der Forscher: die Gesamtheit aller Mikroorganismen – etwa Bakterien – in unserem Körper. Dieser beherbergt allerdings mindestens genauso viele Viren wie Mikroben. Die meisten von ihnen infizieren gezielt bestimmte Bakterien und regulieren so das Mikrobiom. Damit erweisen sich die in uns lebenden Viren als unsere Verbündete, die uns helfen, gesund zu bleiben. Und wie der Artikel ab S. 40 aufzeigt, lassen sich mit ihrer Hilfe sogar antibiotikaresistente Bakterien effektiv bekämpfen.

Eine erhellende Lektüre wünscht

Hartwig Hanser



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 2.20 entführt Sie in eine geheimnisvolle, verborgene Welt: die Ozeane.

IN DIESER AUSGABE



CHARLIE LEIGHTY / ARIZONA STATE UNIVERSITY

FRANK WILCZEK

2004 erhielt der US-Theoretiker den Nobelpreis für Physik. 2011 stieß er auf das Konzept eines seltsamen, scheinbar unmöglichen Materiezustands (S. 12).



STEVE GREEN

KENNETH C. CATANIA

Der Neurobiologe erforscht die Sinnessysteme von Tieren. Ab S. 32 beschreibt er, wie eine Begegnung mit Zitteraalen seine Neugier weckte, mehr über die Fische herauszufinden.



NERISSA ESCANLAR

CALEB A. SCHARF

Seit Jahren fragt sich der Brite, ob es außerirdische Zivilisationen im Weltall gibt. Warum wir diese schlicht noch nicht entdeckt haben könnten, erklärt der Leiter des multidisziplinären Astrobiology Center an der Columbia University in New York ab S. 74.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

20 FORSCHUNG AKTUELL

Tropenwälder verlieren ihre Senkenfunktion

Noch binden sie mehr CO₂, als sie abgeben.

Simulationen für die Politik

Mathematische Modelle zur Entscheidungsfindung.



Impfstoff gegen Covid-19

Die weltweite Suche nach einem Vakzin.

Abelpreis 2020

Zwei Mathematiker suchen Ordnung im Chaos.

Symmetrisches Neutron

Der Kernbaustein schweigt zu einem kosmischen Rätsel.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Experimentelles Risiko

Moderne Biolabore erfordern neue Sicherheitskonzepte.

59 FREISTETTERS FORMELWELT

Geheimnisvolles Kernöl

Das Farbspiel des Öls fasziniert viele Menschen.

81 ZEITREISE

82 SCHLICHTING!

Ein Geysir mitten in Deutschland

Am Rhein entweicht Gas auf spektakuläre Weise.

90 REZENSIONEN

93 IMPRESSUM

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 QUANTENSYSTEME **ZEITKRISTALLE**

In exotischen Materiezuständen offenbart sich eine ganz neue Art von Regelmäßigkeit: wiederkehrende Muster in der Zeit.

Von Frank Wilczek

32 BIOLOGIE **DER LEBENDE TASER**

Ausgeklügelte Messungen und schmerzhaftes Selbstversuche liefern erstaunliche Einsichten in das Verhalten der Zitteraale.

Von Kenneth C. Catania

40 PHYSIOLOGIE **NÜTZLICHE BAKTERIENKILLER**

In unserem Körper siedeln zahllose Viren. Die meisten von ihnen sind Phagen – und tragen unter anderem dazu bei, unsere bakteriellen Untermieter unter Kontrolle zu halten.

Von Daniel Bojar

46 MEDIZIN **BLICK IN DEN KÖRPER**

Serie: Die Röntgen-Revolution (Teil 2) Die Entdeckung der Röntgenstrahlen läutete die klinische Bildgebung ein und ermöglichte das äußerst leistungsfähige Verfahren der Computertomografie.

Von Stefan Wesarg und Emmanuelle Vaniet

52 INFORMATIK **AUF DER JAGD NACH NEUEN MEDIKAMENTEN**

Es wird zunehmend schwerer, neue, effektive Wirkstoffe zu finden. Viele Pharmakonzerne setzen ihre Hoffnungen deshalb in künstliche Intelligenz.

Von David H. Freedman

60 LUFTVERSCHMUTZUNG **GROSSFEUER MIT NEBENWIRKUNGEN**

Weltweit wüten immer wieder Waldbrände. Welche Stoffe dabei in die Luft gelangen und wie gefährlich diese sind, beginnen Forscher erst zu verstehen.

Von Kyle Dickman

70 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
ENERGIE SPEICHERN AUF DIE SCHNELLE

Experimentieranleitung für einen selbst gebauten Superkondensator.

Von Dennis Lüke, Matthias Ducci und Marco Oetken

74 ASTRONOMIE **DER GALAKTISCHE ARCHIPEL**

Wenn es außerirdische Zivilisationen gibt, warum haben wir dann noch nichts von ihnen mitbekommen? Ein neues Modell für die Kolonisierung der Milchstraße könnte unsere kosmische Einsamkeit schlüssig erklären.

Von Caleb Scharf

84 MATHEMATIK **WELCHER KNOTEN HÄLT AM BESTEN?**

Forscher haben eine simple Methode gefunden, um die Stabilität der gängigsten Knoten zu überprüfen – ganz ohne aufwändige Berechnungen.

Von Manon Bischoff

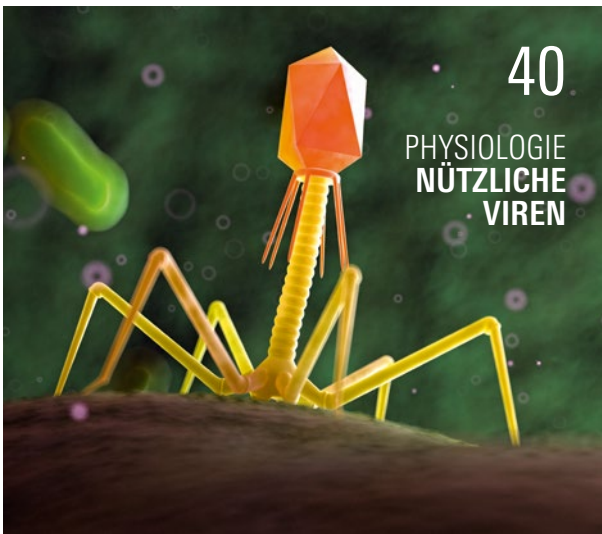
TITELBILD:
MARK ROSS STUDIO / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019; BEARBEITUNG:
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; VIRUS: KOTO_FEJA / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA
EINE NEUE ORDNUNG DER ZEIT

MARK FOSS STUDIO / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019



40

PHYSIOLOGIE
NÜTZLICHE
VIREN

SCIEPRO / STOCK.ADOBE.COM

NASA EARTH OBSERVATORY, JOSHUA STEVENS
(EARTH OBSERVATORY/NASA GOV/IMAGES/14225/)



60

GROSSBRÄNDE
GIFTIGER
RAUCH



74

ASTRONOMIE
GALAKTISCHER
ARCHIPEL

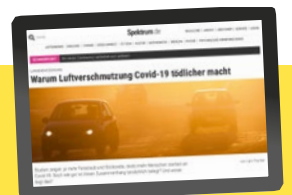
FRIEDER / GETTY IMAGES / ISTOCK



84

MATHEMATIK
WELCHER KNOTEN HÄLT AM
BESTEN?

PETERSCHREIBER, MEDIA / STOCK.ADOBE.COM



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

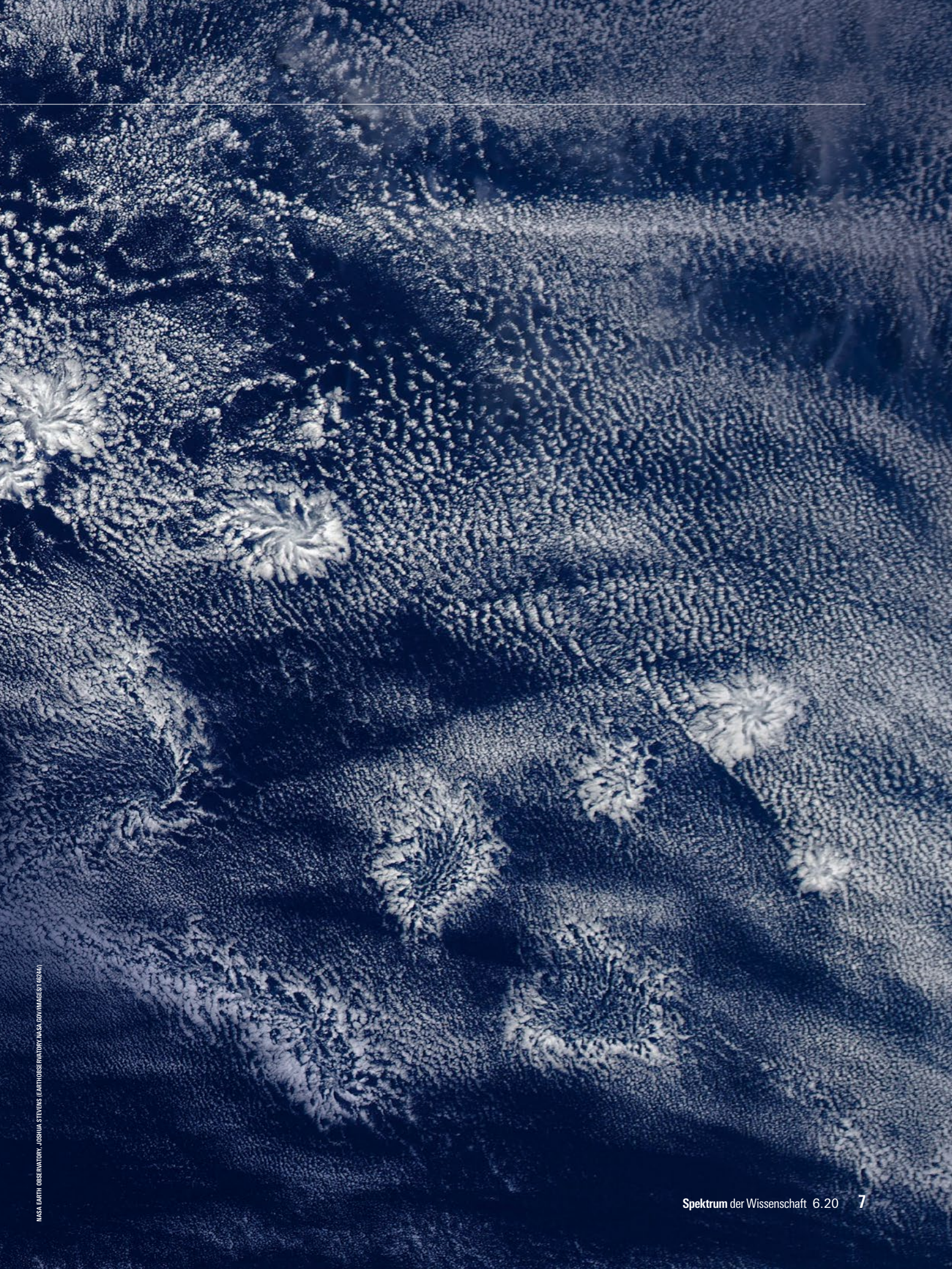
Auf **Spektrum.de** berichten
unsere Redakteure täglich
aus der Wissenschaft: fundiert,
aktuell, exklusiv.

WEISSE BLÜTEN ÜBER DEM MEER

► Wolken können sehr verschiedene Formen annehmen. Einen besonderen Typ zeigt diese Aufnahme des auf Wolkenbeobachtungen spezialisierten NASA-Satelliten Aqua. Zu sehen sind mehrere »actinoforme« Wolken, die im Westen der australischen Küste übers Meer treiben. Für gewöhnlich entstehen sie, wenn sich mehrere flache Wolken in einer blütenförmigen Anordnung sammeln.

Vom Erdboden aus kann man die Formationen aus mehreren Gründen fast nie beobachten: Zum einen ist die Ausdehnung der Strukturen riesig; sie erreichen viele Dutzend, manchmal auch hunderte Kilometer. Zum anderen entstehen die Gebilde meist über dem offenen Ozean. Dort können sie sich bis zu drei Tage halten – und sorgen auf der Erde oft für unangenehmen Nieselregen. Wie genau sich die rosettenförmigen Wolken bilden, ist noch unklar. Forscher vermuten, dass Schwebeteilchen vom Festland eine Rolle dabei spielen.

Pressemitteilung des NASA Earth Observatory, Januar 2020



ASTRONOMIE SCHWARZES LOCH DER MITTELKLASSE

► Im Reich der Extreme liegt das Außergewöhnliche manchmal im Mittelmaß. Die vermutlich extremsten Objekte des Universums, die Schwarzen Löcher, kennen wir bislang in zwei Varianten: Als Millionen Sonnenmassen schwere Giganten im Zentrum von Galaxien und als wenige Sonnenmassen wiegende Überreste eines Sterns. Umstritten ist hingegen die Existenz von Exemplaren mit mittlerer Masse (siehe »Spektrum« April 2018, S. 18).

Ein Team um Dacheng Lin von der University of New Hampshire hat nun auf Umwegen solch einen außergewöhnlichen Durchschnittskandidaten

aufgespürt. Er ist in einer rund 750 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie zu Hause und soll gut 50000 Sonnenmassen auf die Waage bringen. Normalerweise wäre das Schwarze Loch so gut wie unsichtbar. Doch scheint es unlängst einen Stern zerrissen zu haben, was große Mengen von Röntgenstrahlung freigesetzt hat.

Als Kandidat für ein mittelschweres Schwarzes Loch ist das System 3XMM J215022.4-055108 schon länger bekannt: Die Teleskope Chandra und XMM-Newton hatten es bereits vor Jahren als kräftige Quelle von Röntgenstrahlung entdeckt. Doch erst jetzt

konnten Dacheng Lin und seine Kollegen ausschließen, dass die Strahlung auf eine andere Ursache zurückgeht.

Neue Beobachtungsdaten von XMM-Newton und des Weltraumteleskops Hubble passen am besten zu dem Szenario, dass sich das Schwarze Loch im Zentrum einer dichten Ansammlung von Sternen befindet. Möglicherweise handelt es sich um das einstige Herz einer Zwerggalaxie, die von der Gravitation ihrer neuen Galaxie auseinandergerissen wurde.

The Astrophysical Journal Letters
10.3847/2041-8213/ab745b, 2020

Kommt ein Stern einem Schwarzen Loch zu nahe, saugt es in hohem Tempo Materie ab – und setzt dabei große Mengen an Röntgenstrahlung frei (Illustration).



ES/HUBBLE, M. KORNMESSER (SPACE/TELES/COPE/ING/IMAGES/HEIC/OS/SA) / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS. ORG/UC/ER/SES/8/VIA/01/EGAL/CO/DE)

KULTUR ESELPOLO IM ALTEN CHINA

► Im Grab einer chinesischen Adligen des 9. Jahrhunderts haben Archäologen die Knochen dreier Esel gefunden. Vermutlich dienten sie einer Frau mit dem Namen Cui Shi einst als Reittiere bei einer Variante des Polos. Anders jedenfalls können sich die Forscher um Songmei Hu von der Archäologischen Akademie Shaanxi die Skelette nicht erklären.

Esel dienten im alten China vor allem als Lasttiere, etwa auf Handelsstraßen. Bei den Exemplaren aus dem Grab scheint es sich jedoch um besondere Vertreter der Spezies gehandelt zu haben: Sie waren verhältnismäßig klein und scheinen nicht, wie für Karawanenesel üblich, ihr Leben lang geradeaus gelaufen zu sein. Beides passe zu einer Verwendung im Reitsport, argumentieren die Forscher.

Aus Schriftstücken der Tang Dynastie (618–907) ist schon länger bekannt, dass Polo damals ein populärer Zeitvertreib war. Einst im Iran erfunden, kamen bei dem Reitsport eigentlich Pferde zum Einsatz. Da es jedoch



Ein Eselschädel aus dem Grab einer chinesischen Adligen legt nahe, dass die Tiere einst beim Polo zum Einsatz kamen.

FOTO: SONGMEI HU / ANTIQUITY PUBLICATIONS LTD, HU, S. ET AL., FROM PACK ANIMALS TO POLO: DONKEYS FROM THE NINTH-CENTURY TANG TOMB OF AN ELITE LADY IN XI'AN, CHINA, ANTIQUITY, 10.15184/ANQ.2020.6.2020.FIG.5

immer wieder zu tödlichen Unfällen kam, etablierte sich in China eine harmlosere Variante mit Eseln. Sie soll auch in ärmeren Schichten populär gewesen sein – und bei älteren und weiblichen Adligen.

Bisher gab es jedoch keine archäologischen Überbleibsel, die dies zweifelsfrei belegt hätten. Der Fund aus dem Grab in der Metropole Xi'an ändert dies aus Sicht der Forscher.

Überlieferungen zufolge bekleidete die im Grab bestattete Adlige eine herausgehobene Stellung in der damaligen Gesellschaft: Ihr Gatte Bao Gao wurde vom polobegeisterten Kaiser Xizong wegen seiner Fähigkeiten im Spiel zum General befördert. Die Auszeichnung war jedoch teuer bezahlt: Bao Gao verlor beim Polospiel ein Auge.

Antiquity 10.15184/aqy.2020.6, 2020

PALÄONTOLOGIE AFFEN ÜBERQUERTEN DEN ATLANTIK

► Vor vielen Millionen Jahren sind Tiere von Afrika aus über den Atlantik bis nach Südamerika gelangt. Neue Belege dafür liefert nun ein Team um Erik Seiffert von der University of Southern California. Tief im peruianischen Regenwald haben die Forscher Überreste von Affen gefunden, die offensichtlich von afrikanischen Primaten abstammten.

Vor rund 130 Millionen Jahren begannen sich die Landmassen des heutigen Afrikas und Südamerikas voneinander zu trennen. Zwischen ihnen öffnete sich der Atlantik, über den aber noch viele Millionen Jahre lang Tiere und Pflanzen gelangten. Das zeigen Abstammungsanalysen, laut denen sich Organismengruppen auf

beiden Kontinenten erst im Eozän (56 bis 34 Millionen Jahre vor heute) voneinander abspalteten.

Seiffert und seine Kollegen sind in Peru auf fossile Zähne von Primaten gestoßen, die zur heute ausgestorbenen Familie der Parapithecidae gehörten, einer ursprünglich in Nordafrika verbreiteten Affenlinie. *Ucayalipithecus perditus*, so der Name der neu entdeckten fossilen Art, lebte wahrscheinlich während des Oligozäns von vor 34 bis vor 23 Millionen Jahren und war ungefähr so groß wie heutige südamerikanische Krallenäffchen.

Da die Zähne der Tiere große Ähnlichkeiten mit denen ihrer Überseeverwandten aufweisen, vermuten die Wissenschaftler, dass die Tiere vor

etwa 34 Millionen Jahren über das Meer gekommen sind.

Zu jener Zeit war der Atlantik zirka 1500 Kilometer breit. Der antarktische Eisschild war im Entstehen begriffen, so dass der Meeresspiegel fiel, was die Reise erleichtert haben dürfte. Dennoch mussten die Tiere wohl wochenlang auf dem Wasser überleben. Wahrscheinlich trieben sie auf großen Pflanzenteppichen, so genannten schwimmenden Inseln, über den Ozean. Starke Stürme oder Hochwasser können solche Gebilde von Mangroven ablösen, oder sie entwurzeln große Bäume, die dann andere Pflanzen mitreißen und so natürliche Flöße schaffen.

Science 10.1126/science.aba1135, 2020

PHYSIK SPINWOLKE SCHIRMT ELEKTRONEN AB

► Wenn sich Elektronen durch ein Metall bewegen, stoßen sie dabei immer wieder auf Hindernisse. Oft sind dies fremde, von außen in den Festkörper gelangte Atome, von denen ein winziges Magnetfeld ausgeht. Es lenkt Elektronen um und erhöht daher den elektrischen Widerstand des Materials.

Doch unter bestimmten Umständen können Elektronen darauf reagieren: Bei niedrigen Temperaturen und in manchen Materialien schließen sich etliche von ihnen zu einem Kollektiv zusammen, die sich wie eine schützende Wolke um die Verunreinigung legen. Die Spins der einzelnen Elektro-

nen – die jeden der Ladungsträger zu einem Minimagneten machen – sind darin gerade so orientiert, dass sie die Störstelle abschirmen. Andere Elektronen können dann ohne Probleme um das Hindernis herumfliegen.

Als theoretische Vorhersage kennen Physiker das Phänomen schon lange, sie sprechen vom »Kondo-Effekt«. Doch bisher ist es Forschern nicht zweifelsfrei gelungen, die abschirmende Spin-Wolke in einem Laborexperiment zu beobachten, trotz vieler Versuche in den vergangenen 50 Jahren.

Einem Team um Ivan V. Borzenets von der City University of Hong Kong will das Kunststück nun gelungen sein.

Die Wissenschaftler machten sich dazu Fortschritte in der Nanoelektronik zu Nutze, dank derer man mittlerweile eine Art künstliches Atom herstellen kann, einen so genannten Quantenpunkt. Verbindet man ihn mit einer Verunreinigung in einem Halbleiter, lässt sich die Ausdehnung der Kondo-Wolke ermitteln. Den Messungen zufolge erstreckt sich das abschirmende Elektronenkollektiv über mehrere Mikrometer, was der Vorhersage aus theoretischen Arbeiten entspricht.

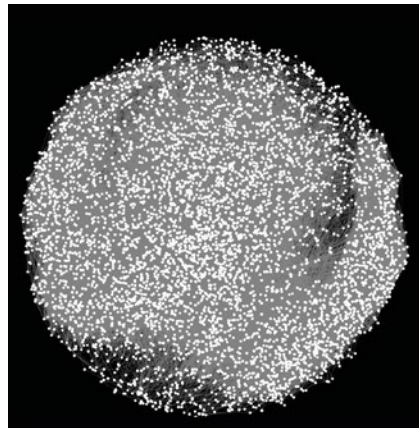
Nature 10.1038/s41586-020-2058-6, 2020

MOLEKULARBIOLOGIE DAS SOZIALE NETZWERK UNSERER PROTEINE

► Forscher um Michael Calderwood von der Harvard University haben für etwa 8000 menschliche Eiweiße geklärt, welche Wechselwirkungen diese untereinander haben. Ihre Ergebnisse haben sie im bislang größten »Interaktom« präsentiert – einem Kartenwerk, das angibt, welche Proteine paarweise miteinander interagieren. Das soll beispielsweise beim Verständnis von Krankheiten helfen.

Das menschliche Erbgut enthält 20000 bis 25000 Gene. Sie liefern die Bauanleitungen für 80000 bis 400000 Proteine. Welche Aufgaben diese jeweils in unserem Organismus erfüllen, zeigt sich oft erst dann, wenn sie nicht mehr richtig funktionieren. Das neue Interaktom soll bei der Vorhersage helfen, welche Rolle ein bestimmtes Protein spielt – denn wenn sich zwei Proteine Interaktionspartner teilen, sind sie wahrscheinlich auch an ähnlichen biologischen Prozessen beteiligt.

Um herauszufinden, ob zwei Eiweiße miteinander interagieren, nutzten die Forscher Hefezellen, die genetisch so verändert waren, dass sie jeweils



Eine neue Karte zeigt, welche Proteine in Zellen jeweils paarweise zusammenarbeiten (links). Die Eiweiße gruppieren sich dabei in separaten Clustern mit verschiedenen Funktionen, die hier unterschiedlich eingefärbt sind (rechts).

zwei Sorten menschlicher Proteine herstellten. In den Zellen traten diese Moleküle nun miteinander in Kontakt – oder auch nicht. Dies erkannten die Forscher, indem sie zusätzliche Substanzen an die Proteine koppelten, die sich im Fall eines Kontakts gegenseitig aktivierten und einen Wachstumschub der Hefezelle auslösten. Dieser ließ sich per Mikroskopie leicht feststellen. Insgesamt wiesen die Forscher etwa 53000 Protein-Protein-Wechselwirkungen nach. Das seien schätzungsweise zwei bis elf Prozent aller

Interaktionen, die es zwischen den Proteinen unseres Organismus gebe.

Trotz dieses eher geringen Anteils könne ihr Interaktom wertvolle Informationen liefern, betonen die Wissenschaftler, denn es habe die Anzahl der bekannten Protein-Interaktionen vervierfacht. So half es bei manchen Eiweißen bereits, Eigenschaften zu erkennen, die bisher unbekannt waren, etwa eine Beteiligung am programmierten Zelltod oder an Transportprozessen.

Nature 10.1038/s41586-020-2188-x, 2020

KALIA LUCK, DANA-FARBBER CANCER INSTITUTE, ET AL.

KLIMAWANDEL MEHR NÄHRSTOFFE AM NORDPOL

► Die Arktis erwärmt sich viel schneller als viele andere Gebiete der Erde. Weil der Permafrostboden im hohen Norden taut, könnten künftig vermehrt Spurenelemente und Kohlenstoff in den Arktischen Ozean gelangen. Das zeigen Wasserproben, die ein internationales Forscherteam 2015 mit den Eisbrechern USCGC Healy und

Polarstern gesammelt hat. Die Wissenschaftler querten dazu wiederholt eine dominante Oberflächenströmung des arktischen Ozeans, den Transpolar-drift. Er befördert Wasser aus Sibirien am Nordpol vorbei in den Nordatlantik. Die Forscher stießen dabei auf einen Überschuss an Spurenelementen wie Eisen, Kobalt, Nickel und Kupfer. Sie stammen vermutlich aus Flüssen und Schelfsedimenten vom Festland und sind von dort gemeinsam mit organischem Material ins Polar-meer getrieben.

Dort bilden sie seit Langem eine wichtige Basis für die Entstehung von Leben und fördern beispielsweise das Wachstum von Phytoplankton: mikroskopisch kleinen Algen, der Basis des marinen Nahrungsnetzes. Mit dem Klimawandel scheint sich der Zustrom der Nährstoffe zu vergrößern, was das Algenwachstum ankurbeln und die Ökosysteme im Polarmeer und Nordatlantik deutlich verändern könnte.

Journal of Geophysical Research: Oceans 10.1029/2019JC015920, 2020

KOSMOLOGIE SCHLEIMPIEZ VERRÄT STRUKTUR DES ALLS

► Das Weltall gleicht einem weit verzweigten Netz, das von etlichen dünnen Fäden zusammengehalten wird. Gruppen von Galaxien bilden darin die Knotenpunkte, die Filamente bestehen aus dünn verteiltem Gas. Eingebettet ist das Ganze in große Mengen Dunkler Materie, die nicht auf Teleskopbildern auftaucht.

So legen es zumindest Computersimulationen nahe, welche die Entwicklung des Kosmos auf Basis der bekannten Naturgesetze nachstellen. Ob das Weltall tatsächlich so aussieht, können Astronomen bisher jedoch nur punktuell überprüfen, indem sie die Verteilung hell leuchtender Galaxien ermitteln. Diese passt insgesamt gut zur Theorie des kosmischen Netzes.

Schwieriger ist der Nachweis der Filamente zwischen den Massenzentren. Zum einen tauchen die Fäden des Netzes kaum auf Teleskopaufnahmen auf. Zum anderen ist ihre genaue Form schwer zu simulieren, da sehr viele Parameter und Prozesse auf unterschiedlichen Größenordnungen zu beachten sind.

Eine Arbeitsgruppe um Joseph Burchett von der University of California in Santa Cruz hat daher nun einen ungewöhnlichen Weg gewählt, um eine Vorhersage für die kosmische Struktur zu erhalten: Die Forscher nutzten einen Algorithmus, der auf der Ausbreitung der Schleimpilzart

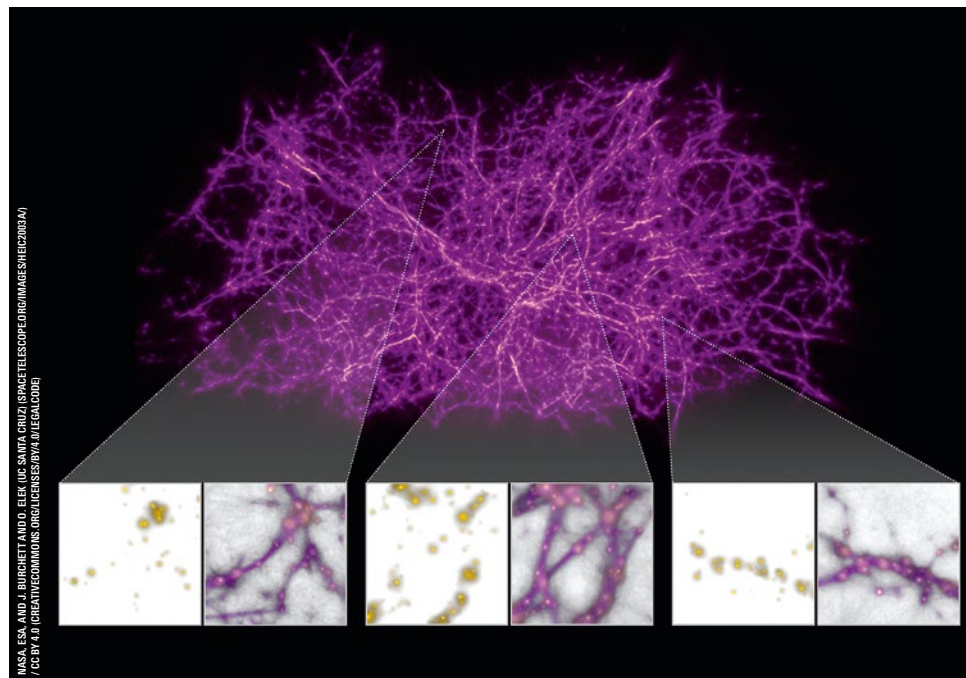
Physarum polycephalum basiert. Dieser bildet beim Wachstum ebenfalls ein weit verzweigtes Netz.

Die Forscher fütterten das Computerprogramm mit Beobachtungsdaten von 37000 Galaxien. Der Algorithmus lieferte daraufhin eine Prognose für das Aussehen der Fäden zwischen den

Galaxien – das gut zu den wenigen bekannten Filamenten passt. Das All scheint also ähnlichen Ausbreitungsregeln zu folgen wie ein Schleimpilz auf der Suche nach Nahrung.

The Astrophysical Journal Letters 10.3847/2041-8213/ab700c, 2020

Mit einem besonderen Computerprogramm haben Forscher simuliert, wie die aus Gas bestehenden Verbindungen (lila) zwischen 37000 bekannten Galaxien (gelb) aussehen müssten. Basis der Vorhersage bildete das Verhalten eines Schleimpilzes, der beim Wachstum ähnliche Strukturen ausbildet.



NASA, ESA, AND J. BURCHETT AND E. ELEK (UC SANTA CRUZ) / SPACETELESCOPE/IMAGES/RELEASE/2004A / CC BY 4.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SBY/4.0/LEGALCODE

QUANTENSYSTEME ZEITKRISTALLE

In herkömmlichen Kristallen wiederholen sich räumliche Strukturen regelmäßig. Nun haben Physiker bei exotischen Materiezuständen eine ganz andere Art von Symmetrie entdeckt: in der Zeit!



CHARLE LIGHT / ARIZONA STATE UNIVERSITY

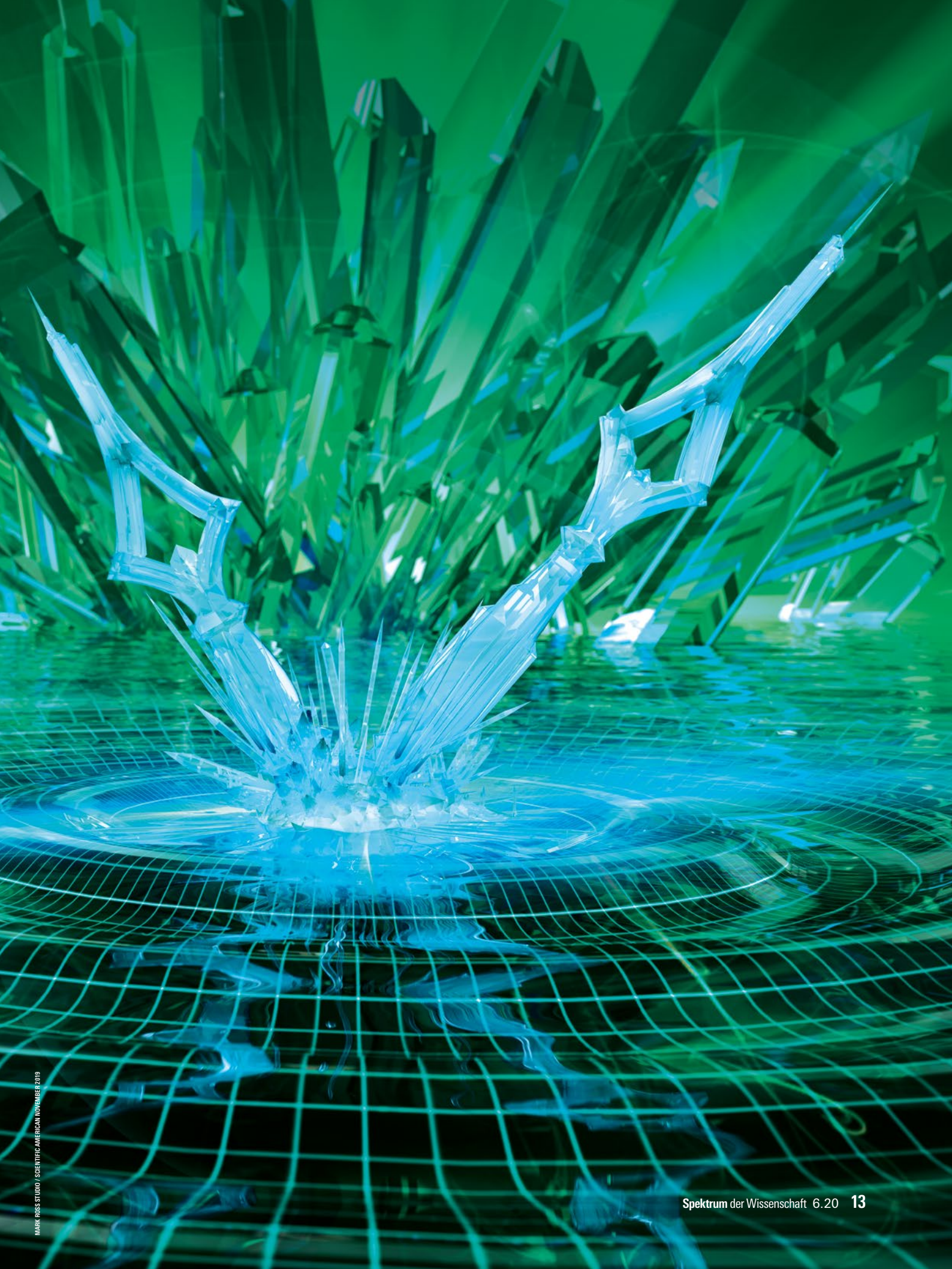
Frank Wilczek ist theoretischer Physiker am Massachusetts Institute of Technology im US-amerikanischen Cambridge. Für seine Beiträge zur Theorie der starken Wechselwirkung erhielt er 2004 den Nobelpreis für Physik.

» spektrum.de/artikel/1725062

Das Konzept der Zeitkristalle erweitert die etablierten Vorstellungen von Strukturen in Raum und Zeit.

AUF EINEN BLICK EINE NEUE ORDNUNG DER ZEIT

- 1** Bei Kristallen ordnen sich die Atome in wiederkehrenden Mustern an. Physiker sprechen von einer spontan gebrochenen räumlichen Symmetrie.
- 2** Theoretische Überlegungen enthüllten eine hypothetische, völlig neue Art der Regelmäßigkeit: Zeitkristalle. Sie verhalten sich nicht im Raum periodisch, sondern in der Zeit.
- 3** Daraufhin suchten Wissenschaftler Materialien, in denen das Phänomen real vorkommt. Sie spürten den Effekt erstmals 2017 auf und entdeckten seither diverse weitere der exotischen Systeme.



► Kristalle sind die ordentlichsten Orte der Welt. Die Atome und Moleküle in ihrem Inneren sortieren sich von selbst zu überaus regelmäßigen, sich wiederholenden Strukturen. Auf die Weise wachsen oft auch größere feste Gebilde heran, die obendrein hübsch anzuschauen sind.

Seit jeher haben Menschen sich von Kristallen faszinieren lassen und sie als Juwelen geschätzt. Als Forscher sie im 19. Jahrhundert hinsichtlich ihrer Formen und ihrer Wirkungen auf Licht klassifizierten, brachte das die Mathematik und die Physik entscheidend voran. Im 20. Jahrhundert entwickelten sich dann zahlreiche technische Revolutionen, etwa die moderne Halbleiterelektronik, auf der Basis der quantenmechanischen Eigenschaften der Elektronen in Kristallen.

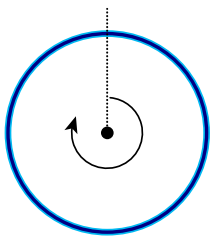
Im Lauf des letzten Jahrzehnts sind Physiker beim Verständnis der regelmäßigen Körper nun erneut einen wichtigen Schritt weitergekommen und dabei in eine ganz neue Dimension vorgestoßen. Der Weg dorthin begann bei einem grundlegenden Aspekt von Albert Einsteins Relativitätstheorie: Raum und Zeit sind eng miteinander verwoben. Daher liegt es nahe, zu fragen, ob es nicht nur im Raum Kristalle gibt, sondern auch Objekte vergleichbare Eigenschaften in der Zeit aufweisen können.

Manche Dinge bleiben gleich, obwohl sie sich verändern

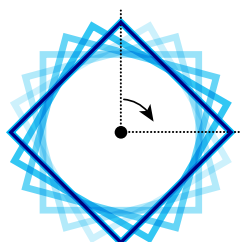
Aber was genau ist überhaupt ein Kristall? Die aus wissenschaftlicher Sicht fruchtbarste Antwort baut auf zwei überaus wichtigen Konzepten auf: Symmetrie und deren spontaner Bruch.

In der Physik und Mathematik gilt ein Objekt als symmetrisch, wenn es Transformationen gibt, die es im Prinzip verändern könnten – es aber tatsächlich nicht tun. Die Definition mag auf den ersten Blick seltsam und abstrakt erscheinen. Zur Veranschaulichung hilft als einfaches Beispiel ein Kreis. Egal, um welchen Winkel wir ihn um seine Mitte drehen, stets erscheint er gleich, obwohl sich jeder Punkt auf ihm bewegt hat. Der Kreis hat eine perfekte Rotationssymmetrie. Ein Quadrat hat ebenfalls eine gewisse Symmetrie, aber weniger als ein Kreis. Denn es erlangt erst nach einer Drehung um genau 90 Grad sein ursprüngliches Aussehen wieder (siehe Bild unten).

Eine Drehung um jeden beliebigen Winkel bildet einen Kreis auf sich selbst ab. Bei einem Quadrat funktioniert das nur mit Vielfachen von 90 Grad.

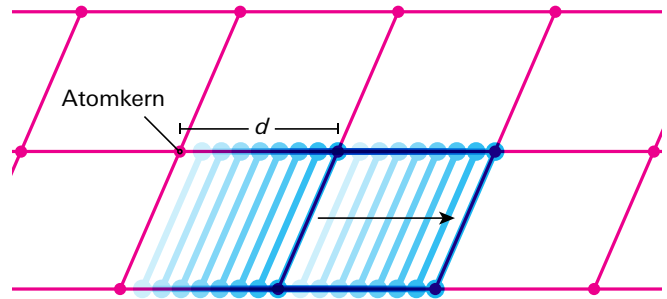


perfekt symmetrisch



teilweise symmetrisch

JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019

Ein Kristall mit Atomabstand d sieht nur nach einer Verschiebung um Vielfache von d aus wie vorher.

Der mathematische Blick auf die Symmetrie erlaubt zudem Verallgemeinerungen: Wir können die Idee so anpassen, dass sie nicht nur für Formen, sondern auch für physikalische Gesetze gilt. Regeln sind symmetrisch, wenn sie gültig bleiben, während wir den Kontext ändern, in dem sie angewendet werden. Zum Beispiel ist eine Grundannahme der speziellen Relativitätstheorie: Die physikalischen Gesetze sind gleich, egal von welcher bewegten Position aus wir die Welt sehen, sofern die Beobachter relativ zueinander konstante Geschwindigkeiten haben. Die Relativitätstheorie verlangt also Symmetrie bezüglich besonderen Transformationen zwischen unterschiedlichen Bezugssystemen.

Für Kristalle ist eine andere Klasse von Transformationen wichtig. Die dafür nötigen Schritte heißen Translationen. Während bei der Relativitätstheorie die Gesetze für unterschiedlich bewegte Beobachter gleich bleiben, bedeutet Translationssymmetrie, dass die gleichen Zusammenhänge an verschiedenen Orten gelten. Wer sein Labor an eine andere Stelle verlegt, wird dort auf dieselben Regeln stoßen. Mit anderen Worten: Wo auch immer wir Gesetze entdecken, sie gelten überall. Translationssymmetrie gibt es nicht nur bezüglich des Raums, sondern zudem in der Zeit, also für Beobachter in der Vergangenheit oder in der Zukunft. Das heißt entsprechend: Wann auch immer wir Gesetze entdecken, sie gelten jederzeit.

Ohne räumliche und zeitliche Translationssymmetrie wären Experimente, die an verschiedenen Orten und Zeitpunkten durchgeführt werden, nicht reproduzierbar. In ihrer täglichen Arbeit nehmen Wissenschaftler die beiden Symmetrien als selbstverständlich hin. In der Tat wäre Forschung, wie wir sie kennen, sonst unmöglich. Dennoch ist wichtig zu betonen, dass wir die Translationssymmetrie in Raum und Zeit empirisch testen können. Etwa beim Verhalten weit entfernter astronomischer Objekte: Sie befinden sich offensichtlich an anderen Orten, und auf Grund der endlichen Lichtgeschwindigkeit beobachten wir in der irdischen Gegenwart, wie sie sich in der kosmischen Vergangenheit verhalten haben. So überprüfen Astronomen die universelle Gültigkeit der Naturgesetze mit hoher Genauigkeit.

Zurück zu den Kristallen. So ästhetisch sie üblicherweise sind, ist ihr bestimmendes Merkmal in der Physik gerade ein Fehlen an Symmetrie. Gehen wir zur Veranschaulichung

einmal von einem extrem idealisierten Kristall aus, der lediglich eine Dimension besitzt. Das heißt, seine Atomkerne befinden sich in regelmäßigen Abständen d entlang einer Linie und haben daher die Koordinaten nd mit der ganzen Zahl n . Wenn wir den Kristall um Vielfache der Distanz d verschieben, sieht er wieder genau so aus wie vorher und lässt sich auf die gleiche Weise beschreiben – aber nur dann! Der idealisierte Kristall hat daher einen reduzierten Grad an räumlicher Translationssymmetrie, ähnlich wie ein Quadrat weniger Rotationssymmetrie hat.

Physiker sagen, in einem Kristall sei die kontinuierliche Translationssymmetrie gebrochen. Die verringerte verbleibende Symmetrie ist gewissermaßen das, was den Kristall eigentlich ausmacht. Wenn wir nämlich wissen, dass die Symmetrie eines Kristalls aus Translationen durch Vielfache des Abstands d besteht, können wir sofort alle Atome relativ zueinander richtig platzieren (siehe Bild links oben).

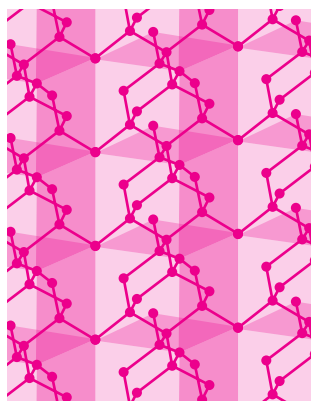
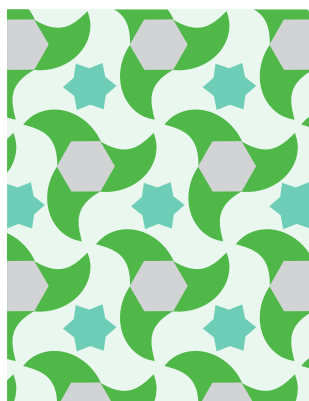
In zwei und drei Dimensionen sind die Muster mitunter bedeutend komplizierter. Es gibt Kristalle mit partiellen Rotations- und Translationssymmetrien in vielen Varianten. Schon beispielsweise die Künstler, die im 14. Jahrhundert den Palast der Alhambra im spanischen Granada ausgeschmückt haben, haben zahlreiche solcher zweidimensionalen Formen entdeckt. Im 19. Jahrhundert erfassten Mathematiker schließlich die dreidimensionalen Kristalle systematisch (siehe Bild unten).

Vom Vorlesungsstoff zur neuartigen Materie

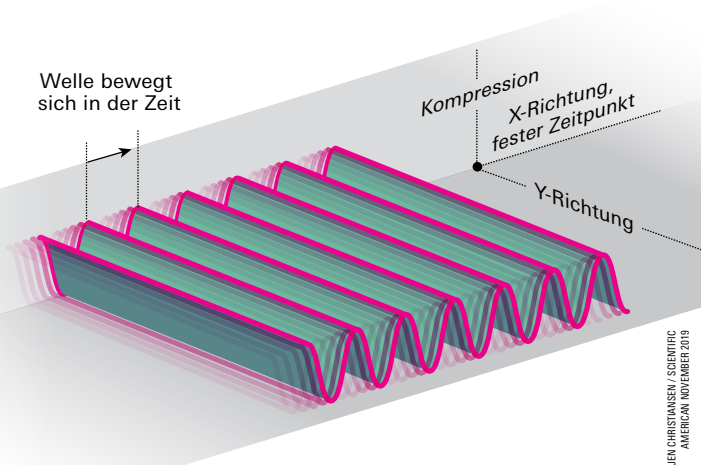
Im Sommer 2011 hatte ich vor, alle diese Zusammenhänge im Rahmen einer Vorlesung über die physikalische Bedeutung von Symmetrie zu unterrichten. Wenn es sich anbietet, versuche ich immer, meinem Lehrmaterial etwas Neues hinzuzufügen. Da kam mir in den Sinn, die Klassifizierungen kristalliner Muster im dreidimensionalen Raum auf solche in der vierdimensionalen Raumzeit auszudehnen.

Ich erwähnte die Idee im Gespräch mit meinem ehemaligen Studenten und nunmehr geschätzten Kollegen Alfred Shapere von der University of Kentucky. Er legte mir nahe, zwei grundlegende physikalische Fragen zu prüfen. Erstens: Welche real vorhandenen Systeme lassen sich durch Raum-

Kristalle können komplexe Regelmäßigkeiten aufweisen, sowohl in zwei Dimensionen (Muster in der Alhambra, links) als auch in drei (Diamant, rechts).



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019

Bei einer ebenen Schallwelle wiederholt sich die Kompression an einem Punkt im Raum periodisch.

zeitkristalle beschreiben? Und zweitens: Weisen diese Regelmäßigkeiten auf bestimmte Materiezustände hin? Das war für mich der Beginn eines wissenschaftlichen Abenteuers voller Überraschungen.

Die Antwort auf die erste Frage ist recht einfach. Während bei gewöhnlichen Kristallen Objekte regelmäßig im Raum angeordnet sind, sind es bei Raumzeitkristallen Ereignisse in der Raumzeit. Das können wir uns wie bei den konventionellen Kristallen anhand eines eindimensionalen Beispiels besser vorstellen. Dieses macht aus einem Raumzeitkristall einen reinen Zeitkristall. Gesucht sind also Systeme, deren Gesamtzustand sich in regelmäßigen Abständen wiederholt. So etwas ist uns gut vertraut. Beispielsweise wendet sich die Erde im Weltraum täglich in fast gleicher Weise der Sonne zu, und das Erde-Sonne-System wiederholt seine Konfiguration in jährlichen Abständen. Uhren sind im Lauf vieler Jahrzehnte immer besser darin geworden, nach sehr präzisen Intervallen wieder die gleiche Anordnung zu zeigen, von Pendel- und Federuhren bis zu modernen Exemplaren. Die Genauigkeit heutiger Zeitmesser ist bereits enorm; trotzdem gibt es gute Gründe, sie weiter zu verbessern – und Zeitkristalle könnten sogar dabei helfen.

In der höherdimensionalen Raumzeit finden sich in einigen bekannten Systemen der realen Welt ebenfalls Kristallmuster. Das ist etwa bei einer ebenen Schallwelle der Fall. Die Höhe der schwingenden Oberfläche zeigt die Auslenkung in Raum und Zeit an (siehe Bild oben).

Solche Arten von Raumzeitkristallen etikettieren existierende Phänomene jedoch einfach um. Wir betreten erst physikalisches Neuland, wenn wir uns mit Shaperes zweiter Frage nach charakteristischen Materiezuständen beschäftigen. Dazu brauchen wir zusätzlich zu den bisher vorgestellten Konzepten noch das der spontanen Symmetriebrechung.

Wenn eine Flüssigkeit oder ein Gas abkühlt und zu einem Kristall wird, geschieht etwas Bemerkenswertes: Das, was aus den fundamentalen physikalischen Wechselwirkungen schließlich hervorgeht – der Kristall – weist weniger Symmetrie auf, als die Gesetze prinzipiell zuließen. Da sich die Symmetrie allein wegen der Temperatur und ohne beson-

Zeitkristalle konstruieren

So ähnlich wie sich in einem üblichen Kristall die räumliche Anordnung der Atome wiederholt, kehrt der Zustand der Bestandteile eines Zeitkristalls in bestimmten Perioden regelmäßig wieder. 2017 haben zwei Forscherteams, eines um Mikhail Lukin von der Harvard University und eines um Christopher Monroe von der University of Maryland, erstmals solche Materialien erzeugt.

normaler Kristall: sich wiederholende räumliche Ordnung

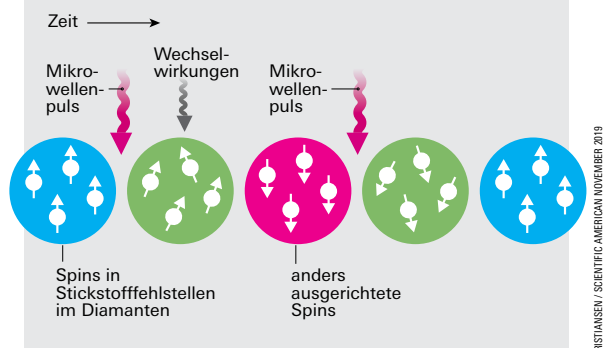


Zeitkristall: sich wiederholende Abfolge von Ereignissen



Das Lukin-Experiment

Die Wissenschaftler haben mit Hilfe der Spins in Stickstofffehlstellen in einem Diamanten einen Zeitkristall erzeugt. Regelmäßige Strahlungspulse beeinflussten die Ausrichtung der Spins. Schließlich wiederholte sich deren Konfiguration regelmäßig, allerdings mit einer anderen Periode als derjenigen der Anregung.



dere äußere Einwirkung verringert, heißt die Brechung der Translationssymmetrie spontan.

Ein wichtiges Merkmal der Kristallisation ist, dass sich das ganze System abrupt anders verhält. Wir haben es mit einem so genannten Phasenübergang zu tun. Oberhalb einer bestimmten kritischen Temperatur (die von der chemischen Zusammensetzung und dem Umgebungsdruck abhängt) haben wir eine Flüssigkeit, darunter einen Kristall mit völlig anderen Eigenschaften. Der Übergang erfolgt nach genauen Regeln und setzt Energie in Form von Wärme frei. Solche Prozesse sind uns gut vertraut, etwa wenn Wasser zu Eis gefriert. Das macht den Umstand aber nicht weniger erstaunlich, dass eine kleine Änderung der Umgebungsbedingungen eine Substanz in ein qualitativ ganz neues Material verwandelt.

Die Festigkeit der Kristalle unterscheidet sie deutlich von Flüssigkeiten und Gasen. Aus mikroskopischer Sicht sind

sie so starr, weil das regelmäßige Muster der Atome in ihrem Inneren über große Entfernungen bestehen bleibt und sich Störungen widersetzt.

Die drei Merkmale der Kristallisation – reduzierte Symmetrie, Phasenübergang und Rigidität – sind eng miteinander verbunden. Das Grundprinzip aller drei ist die Tendenz der Atome, energetisch günstige Muster zu bilden. Die verschiedenen Phasen zeigen sich je nach den äußeren Bedingungen wie Druck und Temperatur. Unter veränderten Umständen sortieren sich die Atome neu. Das erfordert ein kollektives Verhalten, und entsprechend setzt sich die Ordnung durch das gesamte Material fort. Um wieder in einen anderen Zustand zu wechseln, bedarf es dann erneut einer hinreichend starken Störung.

Scheinbar unvereinbare Konzepte

Als ich meine Überlegungen aufschrieb, erzählte ich meiner Frau Betsy Devine davon: »Es ist wie bei einem Kristall, aber bezüglich der Zeit.« Sie fragte mich, wie ich das Phänomen nennen wollte. »Spontaner Bruch der Zeittranslationssymmetrie«, antwortete ich. »Auf keinen Fall!«, erwiderte sie. »Nenn sie Zeitkristalle.« Selbstverständlich hörte ich auf sie. 2012 stellte ich das Konzept im Rahmen zweier Veröffentlichungen vor, eine davon gemeinsam mit Shapere. Im Folgenden bezeichne ich die Zeittranslationssymmetrie mit dem griechischen Buchstaben τ (tau).

Entsprechend der beschriebenen Situation in normalen Kristallen ist ein Zeitkristall ein System, in dem τ spontan gebrochen wird. Man könnte sich fragen, warum die Vereinigung der Konzepte von Zeittranslationssymmetrie und des spontanen Symmetriebruchs so lange auf sich warten ließ. Schließlich existieren sie in der Wissenschaft seit vielen Jahren nebeneinander. Doch τ unterscheidet sich von anderen Symmetrien in entscheidender Weise. Darum ist die Möglichkeit ihres spontanen Bruchs viel weniger offensichtlich.

Die Wurzeln der Verschiedenheit liegen in einer tiefgründigen Erkenntnis, welche die deutsche Mathematikerin Emmy Noether in den 1910er Jahren bewiesen und veröffentlicht hat. Das Noether-Theorem verbindet Symmetrien und Erhaltungssätze miteinander: Für jede Symmetrie gibt es eine andere Größe, die unverändert bleibt. Der Zeittranslationssymmetrie entspricht die Energieerhaltung. Anders gesagt, wenn in irgendeinem System τ gebrochen wird, ist die Energieerhaltung hier kein nützliches Charakteristikum mehr. Etwas technischer ausgedrückt bekommt man ohne τ , wenn man die einzelnen Beiträge aus dem System aufsummiert, nicht mehr eine energieähnliche, zeitunabhängige Größe.

Das passt allerdings nicht mehr zur üblichen Erklärung dafür, warum es überhaupt zu einem spontanen Symmetriebruch kommt. Die lautet nämlich: Er ist energetisch günstig. So begründen Wissenschaftler beispielsweise die gewöhnliche Kristallisation. Wenn der Zustand der niedrigstmöglichen Energie die räumliche Symmetrie bricht und die Situation einmal herbeigeführt wurde, dann dauert sie an, sofern die Energie des Systems erhalten bleibt. Darum ist ein Kristall stabil. Aber die Erklärung funktioniert nicht für den Bruch von τ , denn mit dem Vorgang verlieren

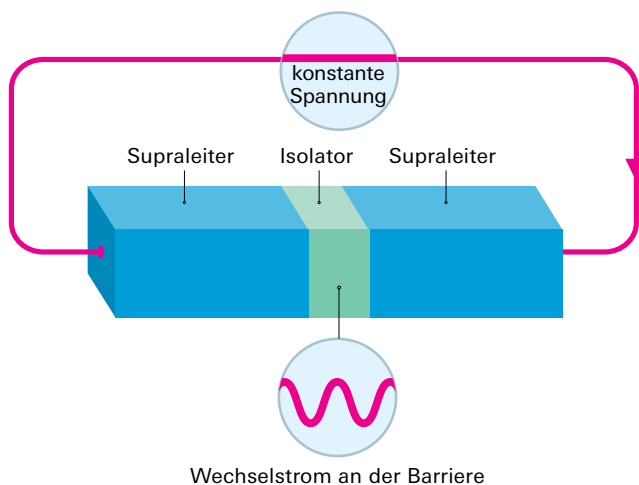
wir gleichzeitig das Maß für die Energie. Darum haben sich die meisten Physiker nie näher Gedanken darüber gemacht und das damit verbundene Konzept der Zeitkristalle untersucht.

Es gibt jedoch einen allgemeineren Weg zum spontanen Symmetriebruch, der sich auch auf τ anwenden lässt. Ein Material könnte in einem bestimmten Zustand aus anderen als energetischen Gründen stabiler sein und sich deshalb umwandeln. Beispielsweise lassen sich Strukturen aus vielen Teilchen nicht so leicht umsortieren, da die meisten störenden Kräfte lokal begrenzt wirken. Wenn man ein Material in eine neue Ordnung überführt, die sich über eine größere Skala erstreckt als zuvor, könnte es darum bereits allein deswegen stabiler sein.

Letztendlich kann sich kein gewöhnlicher Zustand der Materie auf Dauer gegen alle denkbaren Einflüsse behaupten. Diamanten etwa sind laut einer bekannten Werbekampagne »unvergänglich«. Aber unter dem richtigen Gasgemisch und bei genügend hohen Temperaturen verbrennt jeder Brillant. Im Grunde genommen sind Diamanten unter Normalbedingungen keine stabile Form des Kohlenstoffs. Sie entstehen bei viel höherem Druck und behalten ihre Gestalt dauerhaft, sobald sie einmal gebildet sind. Doch theoretisch werden sie irgendwann alle zu Graphit. Daher verstehen wir unter einem Materiezustand normalerweise lediglich eine Substanz, die sich für alle praktischen Zwecke lange genug gegenüber einer gewissen Bandbreite äußerer Einflüsse behauptet.

Ein typisches Beispiel für einen Zeitkristall entspringt dem so genannten Josephson-Effekt (nach dem britischen Physiker Brian Josephson, der für die Entdeckung 1973 den Nobelpreis erhielt). Er tritt auf, wenn eine dünne, isolierende Barriere zwei supraleitende Materialien voneinander trennt und eine konstante Spannung U (also ein Potenzialunterschied) anliegt (siehe Bild unten). Dann fließt ein Wechselstrom mit der Frequenz $2eU/h$ durch den Übergang, wobei

Trennt eine dünne Barriere zwei unter Spannung stehende Supraleiter, misst man einen Wechselstrom, dessen Frequenz zur Spannung proportional ist.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2019

Das neue Material geht in einen stabilen Zustand über, in dem es mit dem Antrieb keine Energie mehr austauscht – ein subtiler, aber entscheidender Unterschied

e die Ladung eines Elektrons und h die plancksche Konstante ist. Hier variiert zwar der Aufbau des Experiments an sich nicht mit der Zeit (mit anderen Worten: τ bleibt erhalten), aber das daraus resultierende Verhalten verändert sich. Die volle Zeittranslationssymmetrie reduziert sich auf eine Symmetrie unter der Verschiebung um ein Vielfaches der Periode $h/2eU$.

Der Josephson-Effekt verkörpert somit das grundlegende Konzept eines Zeitkristalls. In mancher Hinsicht ist er jedoch nicht ideal. Um die Spannung aufrechtzuerhalten, muss man eine Stromquelle anschließen. Aber der Wechselstromkreis erzeugt Wärme, strahlt elektromagnetische Wellen ab, und die Batterie entleert sich. Das alles geht auf Kosten der Stabilität.

Endlose Schwingungen in Diamanten

Geeignete Bauteile reduzieren den Einfluss solcher Effekte. Andere Systeme etwa mit Suprafluiden (Flüssigkeiten ohne innere Reibung) oder Magneten zeigen ähnliche Phänomene und minimieren die Probleme. 2017 haben Nikolai Prokof'ev und Boris Svistunov von der University of Massachusetts in Amherst einen Aufbau mit sich gegenseitig durchdringenden Suprafluiden vorgeschlagen. Die zentrale physikalische Idee hinter diesen und weiteren ähnlichen Experimenten ist bereits in Josephsons Veröffentlichung von 1962 implizit enthalten. Darum handelt es sich hierbei sozusagen um eine alte Form der Zeitkristalle.

Wirklich neuartige Zeitkristalle betraten am 9. März 2017 die Bühne. Das war das Erscheinungsdatum einer Ausgabe des Fachmagazins »Nature«, in der zwei Forscherteams unabhängig voneinander entsprechende Entdeckungen beschrieben haben (siehe »Spektrum« Juni 2017, S. 25). In einem Experiment schuf ein Team unter der Leitung von Christopher Monroe von der University of Maryland in College Park einen Zeitkristall aus einer Kette von Ytterbium-Ionen. In einem anderen Versuch konstruierte Mikhail Lukins Gruppe an der Harvard University einen Zeitkristall in einem Diamanten mittels tausender Kristalldefekte, so genannter Stickstofffehlstellen.

In beiden Systemen ändert sich regelmäßig die Richtung der Spins der Bestandteile (entweder der Ytterbium-Ionen oder der Diamantdefekte), und die Atome kehren periodisch in ihre ursprüngliche Konfiguration zurück. In Monroes Experiment verwendeten die Forscher Laser, um die Spins der Ionen umzudrehen und in verschränkte, also quanten-

mechanisch zusammenhängende Zustände zu bringen. Daraufhin oszillierten die Spins mit der halben Rate der Laserpulse. In Lukins Projekt verwendeten die Wissenschaftler zum Umklappen der Spins Mikrowellenstrahlung. Sie beobachteten Zeitkristalle mit Schwingungen im doppelten und dreifachen Abstand der Pulse. In beiden Fällen gab es eine äußere Anregung, woraufhin die Materialien eine andere Periode aufwiesen als die Stimuli (siehe »Zeitkristalle konstruieren«, S 16). Mit anderen Worten, sie brachen die Zeitsymmetrie spontan.

Solche Experimente sind Teil einer zunehmend aktiven Forschungsrichtung. Seither sind auf Grundlage derselben allgemeinen Prinzipien weitere Systeme aufgetaucht. Die gesamte Klasse dieser Materialien, welche die diskrete Zeittranslationssymmetrie einer regelmäßigen Anregung brechen, heißt inzwischen Floquet-Zeitkristalle.

Sie unterscheiden sich in wichtigen Punkten von verwandten, viel früher entdeckten Phänomenen. Bereits 1831 hat der englische Physiker Michael Faraday festgestellt: Wenn er eine Schüssel mit Quecksilber mit der Periode T

schüttelte, floss das Metall an der Oberfläche oft in Wellen mit der Periode $2T$. Doch dieser Symmetriebruch erlaubt – ähnlich wie bei vielen anderen vor 2017 untersuchten Systemen – keine saubere Trennung zwischen dem Material und der treibenden Kraft (in Faradays Fall das Rütteln), und er zeigt nicht die typischen Merkmale eines spontanen Symmetriebruchs. Der Antrieb pumpt ständig Energie (genauer gesagt: Entropie) hinein, die in Form von Wärme abgegeben wird. Letztlich hat das gesamte Objekt schlicht weniger Symmetrie als die Anregung an sich.

Im Gegensatz dazu geht das Material in den 2017 entdeckten Systemen nach einer kurzen Abklingzeit in einen stabilen Zustand über, in dem es mit dem Antrieb keine Energie oder Entropie mehr austauscht. Der Unterschied ist subtil, aber physikalisch entscheidend. Anders als bei den (für sich genommen interessanten) früheren Beispielen sind die neuen Floquet-Zeitkristalle eine eigene Phase der Materie mit allen Merkmalen eines spontanen Symmetriebruchs.

Neue Zeitkristalle – ohne Antrieb, ohne Quanten

Ob Laserpulse oder Mikrowellen, beim Konzept der Zeitkristalle braucht es immer irgendeinen Taktgeber. Nur dann können die Systeme dessen Symmetrie brechen. Im Gleichgewicht und isoliert von der Umgebung – also ohne äußere Anregung – wird kein Material aus sich heraus zu einem Zeitkristall. Das haben Haruki Watanabe und Masaki Oshikawa von der Universität Tokio 2015 auf Grund thermodynamischer Überlegungen bewiesen.

Allerdings haben Valerii Kozin und Oleksandr Kyriienko von der Staatlichen Universität für Informationstechnologien, Mechanik und Optik in Sankt Petersburg im November 2019 ein Schlupfloch gefunden. Ihr Trick: Die eiserne Regel »kein Antrieb, kein Zeitkristall« gilt nur, wenn die maßgeblichen Wechselwirkungen eine kurze Reichweite besitzen, so wie unter geladenen oder magnetischen Teilchen im Mikrokosmos üblich. Die beiden russischen Physiker hingegen betrachteten quantenmechanisch beschränkte Objekte, die über große Distanzen miteinander verknüpft sind. Unter gewissen

Umständen verhalten sich die Bestandteile des geschlossenen Systems dann ganz von selbst wie ein Zeitkristall, der periodisch zwischen Zuständen hin und her wechselt und robust gegenüber Störungen ist – zumindest theoretisch. Praktisch erscheint eine experimentelle Umsetzung wegen der schwierig handhabbaren Quantenzustände vorerst aussichtslos.

Gibt es Zeitkristalle auch bei größeren, nichtquantenmechanischen Phänomenen? Bereits aus dem 19. und 20. Jahrhundert sind Effekte bekannt, die Zeitkristallen verdächtig nahekommen. Wissenschaftler um Toni L. Heugel von der ETH Zürich haben im März 2019 gezeigt, wie sich solche Beobachtungen mit dem quantenmechanischen Konzept verbinden lassen. Sie demonstrierten außerdem experimentell einen Symmetriebruch für den Fall gekoppelter Federn.

Ob mechanische oder quantisierte Welt, es braucht in jedem Fall zugeführte Energie, die sich auf die schwingenden Komponenten übertragen kann, so dass sich kein dauerhafter Zeitkristall bildet. Auf Quantenebene verhindern das

besondere Vielteilcheneffekte, die es jedoch klassisch nicht gibt. Hier lässt sich der Austausch zwischen Antrieb und System aber beispielsweise durch Reibungseffekte und kleine Störungen steuern und auf das für lange Haltbarkeit nötige Maß reduzieren.

Im Februar 2020 hat ein Team um Norman Yao von der University of California in Berkeley berechnet, wie ein solcher Versuchsaufbau sehr stabil bleiben könnte: Die einzelnen verbundenen Oszillatoren sind ein wenig nichtlinear, schwingen also nicht perfekt gleichmäßig. Sie zeigen einen Phasenübergang, und ein Zeitkristall entsteht. Zwar ist der nicht ewig stabil, doch die Forscher um Yao argumentieren: Praktisch macht das keinen Unterschied. Wenn man die schwingenden Elemente untereinander immer komplexer verknüpft, kann man die Lebensdauer des Zeitkristalls beliebig steigern.

Der Ansatz des Teams für diese Verbindungen ähnelt der Konstruktion so genannter zellulärer Automaten, die etwa beim Wachstum biologischer Strukturen eine große Rolle spielen.

Bricht die Raumzeit unter den extremen Bedingungen beim Urknall und in Schwarzen Löchern die Zeittranslationssymmetrie?

In diesem Sinn sind die Rotation der Erde oder ihre Drehung um die Sonne keine Zeitkristalle. Hier stammt die Stabilität aus der näherungsweise Erhaltung von Energie und Drehimpuls, und beide haben nicht die niedrigstmöglichen Werte. Zudem gibt es anders als in einem Kristall keine langreichweitige Ordnung über viele Objekte. Tatsächlich verändern Gezeiteffekte, der gravitative Einfluss anderer Planeten und sogar die Entwicklung der Sonne die Erdbewegung geringfügig. Bekanntlich sind für die damit verbundenen Zeitmaße wie Tag und Jahr gelegentliche Korrekturen erforderlich.

Von Quantensystemen zum zyklischen Universum

Die Muster der neuen Zeitkristalle hingegen sind äußerst stabil gegenüber Störungen. Darum könnten sie der Schlüssel zu noch genaueren, weniger störungsanfälligen Messgeräten für Entfernungen und Zeiten sein. Typische Anwendungen hochpräziser Uhren reichen von der Positionsbestimmung über das Erkennen unterirdischer Materieverteilungen mit Hilfe der Schwerkraft bis zur Detektion von Gravitationswellen. Mit Blick darauf finanziert inzwischen die Forschungsbehörde des US-Verteidigungsministeriums DARPA die Entwicklung von Zeitkristallen.

Die Ideen und Experimente rund um Zeitkristalle und den spontanen Bruch von τ stecken noch in den Kinderschuhen. Es gibt viele offene Fragen und zu bewältigende Aufgaben. Dazu gehört etwa, Zeitkristalle in größeren und besser handhabbaren Systemen zu erzeugen und eine größere Vielfalt von Mustern in der Raumzeit abzubilden. Spannend ist ebenso die Natur der Phasenübergänge, die Materie in diese Zustände bringen – und wieder heraus.

Zudem gibt es noch viele ungeklärte physikalische Eigenschaften von Zeitkristallen (und Raumzeitkristallen, bei denen sowohl Raumsymmetrie als auch τ spontan gebrochen werden). Bei Halbleitern etwa dürften viele Effekte bezüglich des Wechselspiels von Elektronen und Licht auf ihre Entdeckung warten.

Darüber hinaus könnte es sich lohnen, das Konzept auf Zeitquasikristalle (eine besondere Ordnung ohne sich wiederholende Muster), Zeitflüssigkeiten (bei denen die Dichte der Ereignisse im Lauf der Zeit konstant ist, die Periode aber nicht) und Zeitgläser (deren Muster starr aussieht, aber kleine Abweichungen aufweist) auszudehnen. Es gibt sogar eine Verbindung von Zeittranslationssymmetrie mit dem All und Schwarzen Löchern. Mitte des 20. Jahrhunderts war das Modell eines stationären Universums populär. Es war letztlich ein weltanschaulich

motivierter Versuch, τ in der Kosmologie aufrechtzuerhalten. Hierbei sollte der Zustand oder das Aussehen des Universums in großen Maßstäben unabhängig von der Zeit sein. Mit anderen Worten, die Zeitsymmetrie bleibt erhalten.

Aber das stationäre Modell ist inzwischen überholt, denn Astronomen haben Beweise dafür gesammelt, dass das Universum vor 13,7 Milliarden Jahren, unmittelbar nach dem Urknall, ganz anders aussah, obwohl die gleichen physikalischen Gesetze galten. In dem Sinn wird τ (möglicherweise spontan) durch das Universum als Ganzes gebrochen. Einige Kosmologen vermuten, das All könne zyklisch sein oder eine Phase schneller Schwingungen durchlaufen haben. Solche Spekulationen – bis heute sind sie nicht mehr als das – berühren den Ideenkreis der Zeitkristalle.

Derzeit basiert unser bestes Verständnis der Struktur der Raumzeit auf den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie, welche in mindestens zwei Extremsituationen zusammenbricht: wenn man versucht, das Modell der Urknallkosmologie auf den Anfangsmoment zurückzuführen, sowie im Mittelpunkt von Schwarzen Löchern. Anderswo in der Physik ist das Versagen von Gleichungen für das Verhalten der Materie oft ein Signal dafür, dass das System einen Phasenübergang durchläuft. Könnte die Raumzeit unter solch extremen Bedingungen die Zeittranslationssymmetrie brechen?

Vielleicht bietet das Konzept der Zeitkristalle eine neue theoretische Perspektive auf solche Fragen. Oder die Laborversuche zu dem Phänomen offenbaren technisch nützliche Eigenschaften. In jedem Fall sind Zeitkristalle höchst interessante Objekte. So oder so werden sie unsere Vorstellungen über die Strukturen der Materie grundlegend erweitern. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



PETER JURIK / STOCK.ADOBE.COM

QUELLEN

Choi, S.: Observation of discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system. *Nature* 543, 2017

Shapere, A., Wilczek, F.: Classical time crystals. *Physical Review Letters* 109, 2012

Wilczek, F.: Quantum time crystals. *Physical Review Letters* 109, 2012

Yao, N.Y., Nayak, C.: Time crystals in periodically driven systems. *Reports on Progress in Physics* 81, 2018

Zhang, J. et al.: Observation of a discrete time crystal. *Nature* 543, 2017

KLIMAFORSCHUNG TROPENWÄLDER VERLIEREN IHRE SENKENFUNKTION

Regenwälder in Südamerika und Afrika entziehen bislang der Atmosphäre mehr CO₂, als sie abgeben. Doch das könnte sich ändern – vor allem in Amazonien.

▶ Weltweit nimmt die Gesamtfläche des tropischen Regenwalds durch Abholzung, Straßenbau und Brände ab – ein Trend, der sich in den letzten Jahren noch verschärft hat. Gleichzeitig beeinflusst der vom Menschen verursachte Klimawandel die Funktionsweise dieser Ökosysteme. Bislang können intakte Wälder der Atmosphäre Kohlenstoff in Form von CO₂ durch Fotosynthese aktiv entziehen und als Biomasse speichern. Etwa die Hälfte der terrestrischen Kohlenstoffbindung beruht auf dieser Leistung. Wie ein internationales Team um den Biologen Wannes Hubau von der belgischen Universität Gent nun berichtet, könnte diese global entscheidende Funktion als Kohlenstoffsenke sowohl in Amazonien als auch in den afrikanischen Regenwäldern schwinden – allerdings in unterschiedlichem Maß.

Wälder fungieren als Nettokohlenstoffsenke, wenn die durch das Wachstum der Bäume gebundene Kohlenstoffmenge größer ist als die durch abgestorbene Pflanzen frei gegebene. Dann nimmt der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff mit der Zeit zu. Aus dem Zusammenspiel zwischen Aufnahme und Abgabe ergibt sich die Kohlenstoffverweilzeit, die bestimmt, wie lange der Kohlenstoff im Wald gespeichert wird.

Die Wissenschaftler um Hubau werteten zwischen 1968 und 2015 gewonnene Wachstums- und Mortalitätsdaten von 244 ungestörten Waldstücken in elf afrikanischen Ländern aus und verglichen diese mit ähnlichen Messungen von 321 Parzellen in Amazonien (siehe Foto rechts). Wie sie dabei herausfanden, blieb die Kohlenstoffsenke in den afrikanischen Regenwäldern weitgehend stabil, wohingegen in Südamerika die jährliche Nettokohlenstofffixierung seit etwa 1990 abnimmt (siehe »Nettokohlenstoffauf-

nahme tropischer Regenwälder«, unten). Woher rühren diese unterschiedlichen Entwicklungen?

Auf Grund des wachsenden Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre und des damit einhergehenden Düngungseffekts nehmen die Wälder beider Kontinente langfristig mehr Kohlenstoff auf. Auf der anderen Seite verringerte sich seit der Jahrtausendwende das Pflanzenwachstum durch ansteigende Jahresmitteltemperaturen sowie zunehmende Trockenheit. In Afrika hielt sich die Kohlenstoffaufnahme länger auf einem hohen Niveau, denn hier schritt die Klimaerwärmung langsamer fort, und es traten weniger

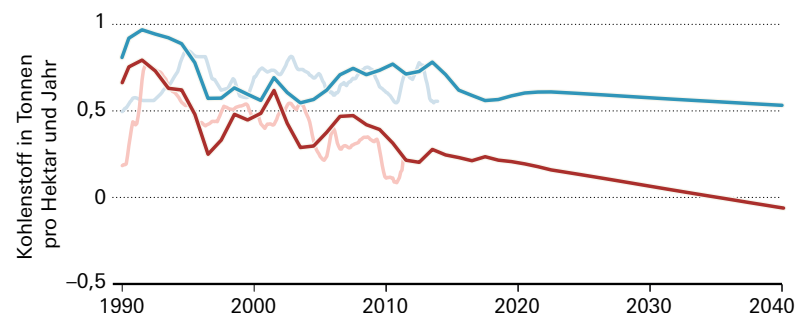
Dürren auf als in Amazonien. Außerdem herrschen in den meist höher liegenden Wäldern in Afrika generell niedrigere Lufttemperaturen. Dagegen konnten die Forscher durch statistische Analysen belegen, dass der Rückgang der Kohlenstofffixierung in Amazonien eindeutig auf Hitze und wiederholten extremen Dürreereignissen beruht.

Die Wissenschaftler führen somit den Rückgang der Kohlenstoffaufnahme auf klimatische Veränderungen zurück. Unberücksichtigt blieben andere Faktoren wie die Konkurrenz der Bäume um Licht oder Nährstoffe. Dass Einflüsse wie begrenzte Nähr-

Nettokohlenstoffaufnahme tropischer Regenwälder

Wissenschaftler um Wannes Hubau schätzten mit Wachstums- und Mortalitätsdaten ab, wie viel Kohlenstoff tropische Wälder in Afrika und Amazonien netto aus der Atmosphäre aufnehmen. Diese Funktion als Kohlenstoffsenke nahm in Südamerika seit den 1990er Jahren ab, während sie in Afrika bis 2015 stabil blieb. Mit Hilfe statistischer Modelle prognostizierten die Wissenschaftler die weitere Entwicklung. Demnach wird sich die Nettokohlenstoffaufnahme auf beiden Kontinenten vermindern, in Amazonien um 2035 sogar die Nulllinie unterschreiten – die dortigen Wälder verwandeln sich dann von einer Senke zu einer Kohlenstoffquelle.

Messdaten: — Afrika — Amazonien
Prognose: — Afrika — Amazonien





Im Amazonasregenwald klettert ein Wissenschaftler zwei Meter hoch, um den Umfang eines Baumstamms zu messen. Mit solchen langfristig erhobenen Daten lässt sich die Menge des im Wald gespeicherten Kohlenstoffs abschätzen.

stoffverfügbarkeit mit zunehmender Kohlendioxidkonzentration das Pflanzenwachstum beeinträchtigen können, wissen wir aus Freilandexperimenten, bei denen der CO₂-Gehalt der Luft künstlich angereichert wurde. Allerdings fehlen bislang solche Daten aus alten Tropenwäldern Afrikas und Südamerikas.

Während in Amazonien die Nettokohlenstoffaufnahme bereits in den 1990er Jahren einbrach, blieb die Bilanz in Afrika noch bis vor einem Jahrzehnt ausgeglichen. Dieser Unterschied beruht nach Ansicht der Forscher auf dem schnelleren Pflanzenwachstum und der damit kürzeren Verweildauer des Kohlenstoffs in Südamerika. Die Düngung durch Kohlendioxid sollte die Wachstumsrate

und die Kohlenstofffixierung erhöhen, doch sie steigert auch die CO₂-Abgabe, da rascher wachsende Bäume jünger absterben und damit langfristig wenig zur Kohlenstoffsенке beitragen. Eine erhöhte Baumsterblichkeit in Verbindung mit chronischen Hitze- und Trockenperioden führt zu mehr Kohlenstoffverlusten, wobei dieser Effekt im Amazonasgebiet stärker ausgeprägt ist als in den afrikanischen Wäldern. Messdaten von afrikanischen Flächen weisen darauf hin, dass sich hier solche Kohlenstoffverluste erst seit etwa 2010 andeuten.

Die Wissenschaftler um Hubau wagen mit ihren statistischen Modellen auch einen Blick in die Zukunft bis zum Jahr 2040. Demnach werden in beiden Erdteilen die tropischen Regenwälder ihre Rolle als Kohlenstoffsенке immer mehr einbüßen. Den Prognosen zufolge wird in Afrika die Kohlenstoffbilanz 2030 um 14 Prozent niedriger liegen als im Zeitraum zwischen 2010 und 2015. Im Amazonasgebiet könnte sie um das Jahr 2035 sogar auf null zurückgehen – es wird dann also keine Nettokohlenstoffaufnahme aus der Atmosphäre mehr stattfinden.

Solche Extrapolationen sind allerdings mit Vorsicht zu genießen, da globale Modelle anderer Forscher eine Verstärkung der Kohlenstoffsенке durch CO₂-Düngung in intakten Tropenwäldern vorhersagen. Wie meine Arbeitsgruppe in München 2019 feststellte, kann andererseits mangelnde Nährstoffverfügbarkeit, insbesondere von Phosphor, im Boden der Amazonaswälder deren Funktion als Kohlenstoffsенке maßgeblich einschränken. Die aktuellen Ergebnisse von Hubau und seinen Kollegen unterstreichen somit die Dringlichkeit, verschiedene ökologische Faktoren umfassend zu untersuchen, um diese in globale Modelle zur Dynamik tropischer Regenwälder zu integrieren.

Was folgt aus den weltweit beobachtbaren Veränderungen in der Kohlenstoffbilanz intakter Tropenwälder? Bisherige Klimamodelle, mit denen die maximal vertretbare Menge an anthropogenen CO₂-Emissionen berechnet werden, um die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius zu begrenzen – das Ziel des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 –, gehen davon aus, dass die Tropen weiterhin als bedeutende Kohlenstoffsенке fungieren. Auf Basis der Ergebnisse der Forscher um Hubau, wonach sich die Tropen sehr bald von einer Senke zur Kohlenstoffquelle verwandeln könnten, müssten neben dem Schutz intakter Regenwälder die anthropogenen Treibhausgasemissionen noch stärker als im Abkommen festgelegt gesenkt werden, um katastrophale Klimaveränderungen zu verhindern.

Anja Rammig ist Biologin und Assistenzprofessorin für »Land Surface-Atmosphäre Interactions« an der Technischen Universität München.

QUELLE

Hubau, W. et al.: Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, 2020

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 579, S. 38–39, 2020

COVID-19 SIMULATIONEN FÜR DIE POLITIK



Ganze Staaten richten ihre Entscheidungen nach Computermodellen, die den Verlauf der Covid-19-Pandemie simulieren. Die Verlässlichkeit der Vorhersagen ist aber noch unklar.

Als der mathematische Epidemiologe Neil Ferguson vom Imperial College London Mitte März die britische Regierung in der Downing Street besuchte, war er der Covid-19-Pandemie näher, als ihm bewusst war. Er informierte die Beamten über die neuesten Ergebnisse seiner Computermodelle, mit denen er die Verbreitung des Coronavirus Sars-CoV-2 simuliert. Weniger als 36 Stunden später wurde Ferguson positiv auf das Virus getestet – und wurde damit zu einem Datenpunkt in seinem eigenen Projekt. Covid-19 verursachte bei ihm relativ milde Symptome, er arbeitete weiter.

Die Computersimulationen berechnen, welche Maßnahmen den Verlauf der Pandemie verändern. Nie war Forschung für die Politik wichtiger als jetzt. Die Ergebnisse des Teams um Ferguson wiesen darauf hin, dass die schweren Fälle von Covid-19 das britische Gesundheitswesen bald überfordern würden. Demnach könnte es mehr als 500 000 Todesfälle geben, sofern die Regierung nicht handele. Premierminister Boris Johnson verhängte daraufhin fast augenblicklich strenge Einschränkungen für die Bevölkerung. Das gleiche Modell besagt, dass in den Vereinigten Staaten ohne Gegenmaßnahmen bis zu 2,2 Millionen Menschen am Coronavirus sterben könnten. Als diese Nachricht das Weiße Haus erreichte, folgten rasch neue Leitlinien zur sozialen Distanzierung (siehe Grafik rechts).

Auf der ganzen Welt verlassen sich Regierungen momentan auf mathematische Berechnungen. Computersimulationen machen dabei nur einen Bruchteil der Analysen aus, doch sie werden immer wichtiger. Viele Eigenschaften von Sars-CoV-2 sind allerdings noch unbekannt, was die Genauigkeit der Prognosen einschränkt. Wie gut die Simulationen den Verlauf der

Pandemie tatsächlich abbilden, wird sich wahrscheinlich erst in einigen Monaten oder Jahren zeigen.

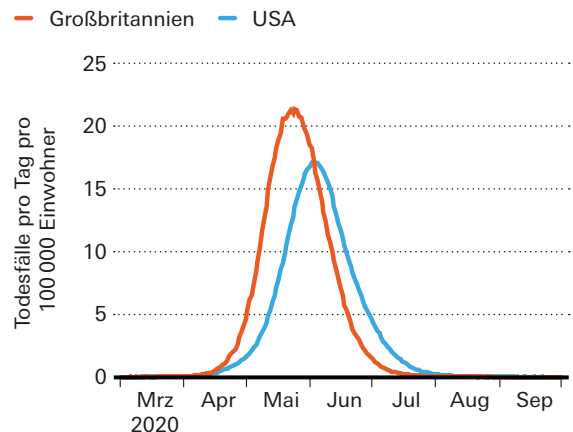
Die Modelle verschiedener Forschungsgruppen unterscheiden sich teilweise stark, doch die zu Grunde liegenden mathematischen Prinzipien sind ähnlich. Man geht davon aus, dass Menschen zwischen drei Hauptzuständen wechseln: Sie sind entweder anfällig (englisch: susceptible, S) für das Virus, haben sich damit infiziert (I) oder sind es wieder los (removed, R), das heißt, sie erholen sich oder sterben. Es wird angenommen, dass die R-Gruppe gegen das Virus immun ist und es nicht mehr weitergeben kann. Auch Personen mit natürlicher Immunität gehören zu dieser Gruppe.

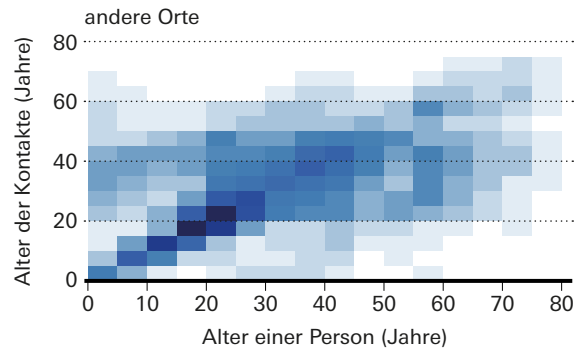
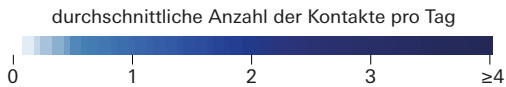
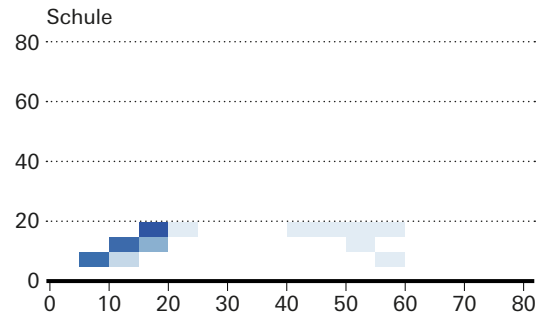
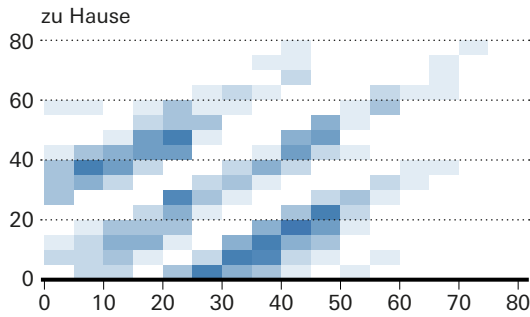
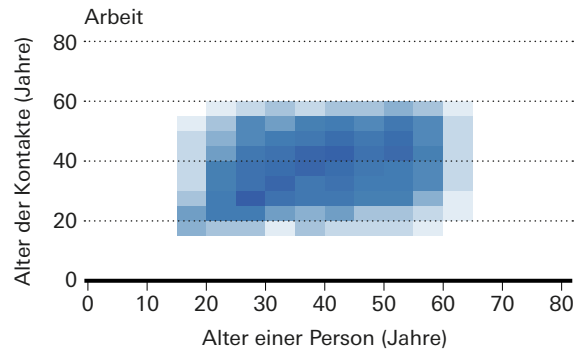
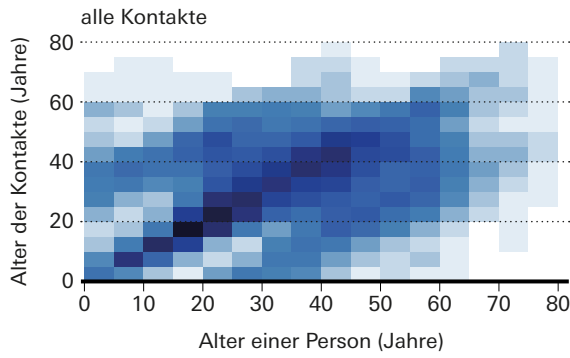
Die simpelsten SIR-Modelle enthalten darüber hinaus einige Vereinfachungen: Jede Person hat die gleiche Chance, sich bei einem Infizierten anzustecken, zudem sind alle Erkrankten bis zu ihrem Tod oder ihrer Genesung gleichermaßen infektiös. Fortschrittlichere Modelle unterteilen Menschen dagegen in kleinere Gruppen: Sie unterscheiden unter anderem nach Alter, Geschlecht, Gesundheitszustand und Beschäftigung (siehe Grafik rechts oben).

Ein Modell, das das Imperial College in London Mitte März veröffentlicht hat, sagt für Großbritannien mehr als 500 000 Tote voraus, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden, um das Virus zu stoppen. In den USA sollen dann sogar mehr als 2,2 Millionen Menschen an Covid-19 sterben.

Mit Hilfe detaillierter Informationen über die Bevölkerungsgröße und -dichte, Altersstruktur, die Verkehrsverbindungen, den Umfang der sozialen Netzwerke und die Gesundheitsversorgung erstellen Modellierer die virtuelle Kopie einer Stadt, einer Region oder eines ganzen Lands und simulieren die Interaktionen der Personengruppen durch Differenzialgleichungen. Dann setzen sie eine Infektion in diese Welt – und beobachten, wie sich die Dinge entwickeln.

Man kann die dafür benötigten Kenngrößen am Anfang einer Epidemie jedoch nur grob abschätzen, etwa wie viele der Infizierten sterben und an wie viele Menschen eine infizierte Person das Virus durchschnittlich weitergibt (R_0). In ihrem Bericht vom 16. März schätzten die Modellierer vom Imperial College beispielsweise, dass 0,9 Prozent der an Covid-19 erkrankten Menschen in Großbritannien sterben, R_0 zwischen 2 und 2,6 liegt und dass es 5,1 Tage dauert, bis sich die Infektion bei einer Person manifestiert. Diese Zahlen basieren auf Angaben von Epidemiologen, die im Frühstadium der Pandemie versucht haben, die grundlegenden Eigenschaften des Virus zu bestimmen.





Ein Modell der London School of Hygiene and Tropical Medicine stellt die durchschnittliche Anzahl der Sozialkontakte pro Tag in China dar. Es geht davon aus, dass keine Gegenmaßnahmen getroffen werden, um das Virus zu kontrollieren. Die Kontakte werden nach Orten und Altersgruppen eingeteilt. Das liefert Daten, um die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Virus zu simulieren.

Eine gewöhnliche SIR-Simulation liefert immer die gleiche Prognose. So genannte stochastische Modelle enthalten hingegen ein Zufallselement. Es ist, als ob ein virtueller Würfel entscheidet, ob jemand aus der I-Gruppe eine S-Person infiziert, wenn sie sich treffen. Führt man ein derartiges Modell mehrfach aus, ergeben sich daraus unterschiedliche mögliche Szenarien.

Auch menschliche Interaktionen bilden Mathematiker auf verschiedene Weise nach. In gleichungsbasierten Modellen teilen sie Personen in viele kleine soziale Untergruppen ein. Alternativ kann man einen agentenbasierten Ansatz verfolgen, bei dem jedes Individuum sich nach eigenen Regeln bewegt und handelt, ähnlich

wie die Charaktere im Videospiel »Die Sims«. Agentenbasierte Modelle bauen die gleiche Art virtuelle Welt auf wie gleichungsbasierte, wobei sich jede Person in einer bestimmten Situation anders verhalten kann.

Die verschiedenen Ansätze haben jeweils ihre Stärken und Schwächen. Menschengruppen innerhalb eines gleichungsbasierten Modells zu bündeln, macht die Dinge einfacher und schneller. »Die hochspezifischen Modelle sind dagegen extrem datenhungrig«, sagt Kathleen O'Reilly, Epidemiologin an der London School of Hygiene and Tropical Medicine (LSHTM). »Man muss wissen, wie Personen zur Arbeit kommen oder was sie am Wochenende tun.« Im

Rahmen eines Citizen-Science-Projekts der BBC sammelten Forscher der LSHTM, des University College London und der University of Cambridge Sozialkontaktdaten von mehr als 36000 Freiwilligen – und konnten dadurch ihre Modelle verbessern.

Das Team vom Imperial College hat sowohl agenten- als auch gleichungsbasierte Ansätze genutzt. Bei den Simulationen vom 16. März, die das Team durchführte, um die britische Regierung zu einer Reaktion zu bewegen, setzte es ein agentenbasiertes Modell ein. Dieses wurde im Jahr 2005 entwickelt, um vorherzusagen, was passieren würde, falls das Vogelgrippevirus H5N1 zu einer Version mutiert, die sich leicht von Mensch zu Mensch verbreitet.

Am 26. März 2020 veröffentlichten Ferguson und sein Team dann globale Vorhersagen über die Auswirkungen von Covid-19. Dabei nutzten sie einen einfacheren, gleichungsbasierten Ansatz, der Menschen in vier Gruppen einteilt: S, E, I und R. »E« (für exposed) enthält Personen, die Kontakt zu Infizierten hatten, aber noch nicht ansteckend sind. Die Hochrechnungen ergaben für die Vereinigten Staaten 2,18 Millionen Tote, sofern die Regierung nichts gegen das Virus unternehmen würde. Zum Vergleich: Die frühere agentenbasierte Simulation schätzte die Zahl der Toten auf 2,2 Millionen.

Auch wenn sich die Vorhersagen beider Ansätze kaum unterscheiden, sagt das nichts darüber aus, wie zuverlässig sie sind. Das lässt sich während einer laufenden Pandemie generell nur schwer beurteilen. »Natürlich kann man die Zahlen hochrechnen und dem gegenüberstellen, was man sieht«, sagt der Modellierer John Edmunds von der LSHTM. »Aber ist die Zahl der gemeldeten Fälle korrekt? Nein. Sind die Angaben genau? Nein.«

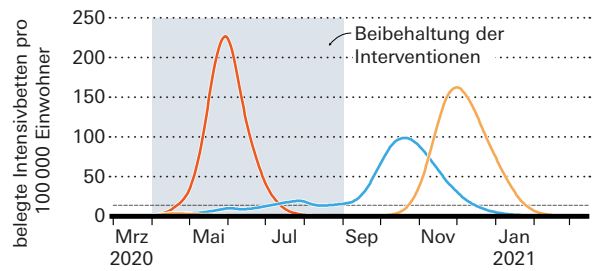
Erst vor Kurzem haben Forscher begonnen, ihre Modelle für retrospektive Analysen bereitzustellen. 2019 untersuchte das Team um Edmunds die während des Ebola-Ausbruchs in Sierra Leone 2014/15 getroffenen Prognosen. Die Wissenschaftler stellten fest, dass sich der Verlauf der Epidemie für ein oder zwei Wochen zuverlässig vorhersagen ließ – doch mehr war wegen der großen Unsicherheiten nicht möglich.

Laut einem Modell des Imperial College of London haben die Maßnahmen Großbritanniens die Reproduktionszahl des Virus von fast vier auf etwa eins abgesenkt. Dabei handelt es sich um die Anzahl der Personen, die ein Infizierter im Durchschnitt ansteckt.

Eine konsequente Umsetzung der Maßnahmen, um das Virus einzudämmen, könnte verhindern, dass Covid-19-Patienten das knappe Kontingent an Krankenhaus-Intensivbetten in den USA überlasten, so eine Simulation des Imperial College in London. Aus den Ergebnissen folgt aber auch, dass im späteren Verlauf des Jahres eine zweite Pandemiewelle ausbricht.

Um die unvollständigen Daten zumindest teilweise auszugleichen, lassen Modellierer ihre Simulationen meist hunderte Male laufen. Dabei passen sie die Eingaben immer wieder ein wenig an. Das soll verhindern, dass die Ergebnisse zu stark schwanken, wenn man einen einzelnen Parameter verändert. Zudem holte die britische Regierung den Rat unterschiedlicher Forschungsgruppen ein, um sich nicht bloß auf ein Modell zu verlassen. »Wir kamen alle zu ähnlichen Ergebnissen«, sagt Ferguson.

Als die Wissenschaftler vom Imperial College ihr Modell Anfang März auf den neuesten Stand brachten, veranlasste das die britische Regierung, ihre Politik bezüglich der Pandemie zu ändern. Experten hatten zuvor damit gerechnet, dass 15 Prozent der Krankenhausfälle auf einer Intensivstation behandelt werden müssten.



- geschätzte Zahl an Krankenhaus-Intensivbetten
- Fallisolierung, Haushaltsquarantäne und generelle soziale Distanzierung
- keine Maßnahmen
- Schul- und Universitätsschließungen, Fallisolierung und generelle soziale Distanzierung

NATURE. NACH FERGUSON, N. ET AL. REPORT 9: IMPACT OF NON-PHARMACEUTICAL INTERVENTIONS (NPIs) TO REDUCE COVID-19 MORTALITY AND HEALTHCARE DEMAND. IMPERIAL COLLEGE LONDON, 16. MÄRZ 2020. FIG. 3A [DOI: 10.1038/s41586-020-17748-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-17748-2); ADAM, D.: MODELLING THE PANDEMIC. NATURE 580, 2020

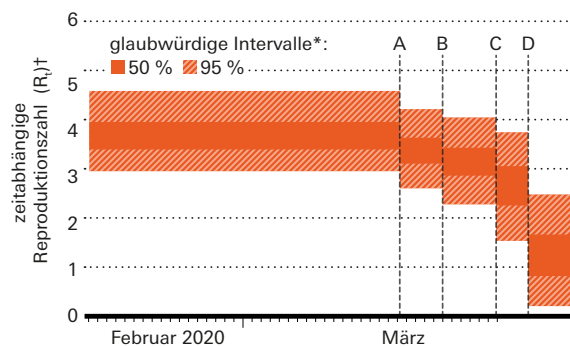
Doch dann erhöhten sie ihre Schätzung auf 30 Prozent – was das britische Gesundheitssystem mit nicht viel mehr als 4000 Intensivbetten gänzlich überfordern würde.

Bis dahin hatten Regierungsbeamte die Strategie verfolgt, man solle die Krankheit ausbrechen lassen und lediglich die Ältesten der Gesellschaft schützen. Die meisten Infizierten würden sich erholen und anschließend immun sein. Aber als die Politiker die neuen Zahlen sahen, änderten sie ihren Kurs und schwenkten daraufhin rasch auf Social-Distancing-Maßnahmen um (siehe Grafik unten).

Während Epidemiologen mehr über das Virus herausfinden, aktualisieren die Modellierer fortlaufend ihre Simulationen. Zum Beispiel korrigierte das Imperial-Team in einem Bericht vom 26. März die bisherigen Schätzungen des R_0 -Werts auf eine Zahl zwischen 2,4 und 3,3. Als Wissenschaftler vier Tage später Daten aus elf europäischen Ländern vorstellten, kamen sie dagegen auf einen Wert zwischen 3 und 4,7.

Außerdem könnte ein zuverlässiger Test, der bestimmt, wer infiziert war, ohne Symptome zu zeigen, und inzwischen genesen ist, die Vorhersagen erheblich verändern. Denn die registrierten Todesfälle im Vereinigten Königreich passen zu verschiedenen SIR-Modellen, wie ein Team der University of Oxford um die theoretische Epidemiologin Sunetra Gupta anmerk-

A: Selbstisolierung B: soziale Distanzierung C: Schulschließungen D: Verbot öffentlicher Veranstaltungen und kompletter Lockdown



* Bayesianische Statistik: Zeitabschnitt, in dem ein nicht beobachteter Parameter mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit abfällt.
 R_t : Durchschnittliche Anzahl von Infektionen (zum Zeitpunkt t), die ein Infizierter während seiner Krankheit verursacht hat. Wenn $R_t < 1$ gehalten wird, nehmen die Neuinfektionen ab, was zur Kontrolle der Epidemie führt.

NATURE. NACH FLAXMAN, S. ET AL. REPORT 13: ESTIMATING THE NUMBER OF INFECTIONS AND THE IMPACT OF INTERVENTIONS ON THE COURSE OF THE COVID-19 PANDEMIC. IMPERIAL COLLEGE LONDON, 30. MÄRZ 2020. FIG. 2K [DOI: 10.1038/s41586-020-17731-3](https://doi.org/10.1038/s41586-020-17731-3); ADAM, D.: THE SIMULATIONS DRIVING THE WORLD'S RESPONSE TO COVID-19. NATURE 580, 2020

te – auch zu einem, das davon ausgeht, dass Millionen von Menschen bereits infiziert sind, aber keine Symptome zeigen.

Eine offene Frage ist weiterhin, wie gut die Social-Distancing-Maßnahmen wirken. Laut Umfragen aus China hatten die Bürger von Wuhan und Schanghai während der Ausgangssperre sieben- bis neunmal weniger tägliche Kontakte zu anderen Menschen. Von dieser Größenordnung gehen die britischen Modellierer in ihren Simulationen ebenfalls aus.

Die Ergebnisse des Imperial-Teams legen nahe, dass die weltweiten Todesfälle durch Covid-19 bis zum Jahresende weniger als 1,9 Millionen betragen könnten, wenn die Länder Strategien zur sozialen Distanzierung, Testung und Isolierung von Infizierten anwenden.

Durch landesweite Lockdowns arbeitet nun ganz Europa daran, die

Übertragung von Sars-CoV-2 zu verringern. Wie lange man die Maßnahmen aufrechterhalten muss, ist eine wichtige Frage für die Länder, die sich um ihre Wirtschaft und die geistige und körperliche Gesundheit ihrer Bürger sorgen. Die soziale Distanzierung dämmt die Ausbreitung des Virus zwar vorerst ein, Lockerungen könnte jedoch eine zweite Welle der Pandemie einläuten, wie ein Modell des Imperial College prognostiziert (siehe Grafik links oben).

Ferguson empfiehlt, man solle dem praktischen Beispiel Südkoreas folgen. Das Land hat es geschafft, eine weniger strenge Version der sozialen Distanzierung durchzusetzen, indem es extrem viel testete und die Kontakte von Infizierten zurückverfolgte. Werden die Sperrmaßnahmen gelockert, muss man die betroffenen Regionen genau überwachen, wie es momentan in der chinesischen Provinz Hubei der

Fall ist. Nur solche Daten liefern Modellierern die nötigen Informationen, die sie für langfristige Prognosen der Pandemie benötigen.

David Adam ist Wissenschaftsjournalist in London.

QUELLEN

Ferguson, N. et al.: Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. doi 10.25561/77482, 2020

Flexman, S. et al.: Report 13: Estimating the number of infections and the impact of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in 11 European countries. PDF unter: <http://hdl.handle.net/10044/1/77731>, 2020

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 580, S. 316–318, 2020

MEDIZIN

»AM ENDE WIRD ES MEHR ALS EINEN IMPFSTOFF GEBEN«

Die Coronakrise hält die Welt im Atem. Auch in Deutschland suchen Biochemiker nach Impfstoffen gegen Sars-CoV-2, den Erreger der Krankheit Covid-19. Stefan Müller, der die präklinische Entwicklung an der biopharmazeutischen Firma »CureVac« leitet, ist einer davon.

► Diverse Forschergruppen entwickeln Impfstoffe gegen das neue Coronavirus Sars-CoV-2. Auch die deutsche Firma CureVac ist dabei. Das Unternehmen mit Sitz in Tübingen geriet zwischenzeitlich in die Schlagzeilen, weil US-Präsident Donald Trump laut Medienberichten versucht haben soll, sich die Rechte am Impfstoff zu sichern – was Firmenvertreter bestreiten. Finden erste Tests an Menschen noch diesen Sommer statt? Und was für ein Impfstoff ist das genau? Ein Gespräch mit Stefan Müller, Vice President Preclinical bei CureVac.

Sie arbeiten an einem Impfstoff gegen das neue Coronavirus. Wie weit sind Sie?

Wir testen unseren Impfstoffkandidaten gegenwärtig in den vom Gesetzgeber geforderten präklinischen Modellen – an Zellkulturen wie auch an Nagetieren. Kontakt mit den Zulassungsbehörden für erste Tests am Menschen haben wir aber schon aufgenommen.

Wann sollen die ersten Tests am Menschen starten?

Wir sind in engem Austausch mit den zuständigen Behörden und planen, im Juni erstmals Probanden den Impfstoff zu spritzen. Die Behörden prüfen unsere bisherigen Daten, um sicherzustellen, dass die Substanz die erforderlichen Qualitätskriterien erfüllt, also sicher und wirksam ist. Details zu den klinischen Studien kann ich nicht

verraten. Fest steht aber, dass sie in deutschen und belgischen Zentren stattfinden sollen. Dort testen wir bereits einen Tollwutimpfstoff. Die Zusammenarbeit ist gut, die Abläufe sind erprobt.

Im Januar haben Sie mit der Forschung begonnen, im Juni erste Tests – das ist schneller als üblich. Ist es deshalb riskanter?

Riskanter ist es nicht unbedingt, weil wir eine bekannte Technologie nutzen. Wir kennen grundlegende Daten zum Beispiel von unserem Tollwutimpfstoff und wissen, dass das System funktioniert. Die Entscheidung fällt letztlich die Behörde, basierend auf unseren Ergebnissen, die wir seit Januar gesammelt haben. Wären die nicht



Covid-19-PANDEMIE

gut, würden keine Tests am Menschen stattfinden. Das ist klar.

Manche kritisieren die Eile. Ein Argument: Beschleunigte Testverfahren könnten zu unsicheren Mitteln führen, das wiederum würde die Gesundheit vieler gefährden und die Forschung komplett zurückwerfen. Schritt für Schritt sei der bessere Weg. Was sagen Sie dazu?

Das ist prinzipiell ein valider Punkt. Schließlich bekommen Gesunde das Mittel, und es soll sie schützen, nicht krank machen. Doch wir machen ja dieselben Tests wie bei einer normalen Entwicklung auch – bloß in kürzerer Zeit. Das macht die Versuche selbst nicht schlechter oder weniger aussagekräftig.

Sie arbeiten mit so genannten messenger-RNA-Molekülen,

kurz mRNA. Was bedeutet das genau?

mRNA oder Boten-RNA ist die Vorlage, die der Zellapparat in Peptide oder Proteine übersetzt. Die DNA – unser Erbgut – enthält die Bauanleitungen für die mRNAs der diversen Proteine und Peptide, die am Funktionieren unseres Organismus beteiligt sind.

Wenn Viren uns infizieren, reagiert unser Immunsystem auf körperfremde Bestandteile des Virus, auf dessen so genannte Antigene. Genau diese enthält Ihr Impfstoffkandidat aber nicht, sondern die Bauanleitung dafür in Form von mRNAs. Was ist der Vorteil davon?

Sie können sich RNA-Vakzine wie eine Druckerpatrone vorstellen. Das Außengehäuse ist stets ähnlich – es handelt sich um Lipid-Nanopartikel –, und man

tauscht gewissermaßen nur die Farbe aus, je nach interessierendem Antigen. Die Farbe ist in diesem Fall eine von uns gewählte Nukleotidsequenz des Virus, die mRNA. Sie codiert das jeweilige Protein, das als Antigen wirkt, und sorgt somit dafür, dass unser Organismus dieses Protein selbst herstellt. Unser Immunsystem produziert dann die passenden Antikörper dagegen und ist anschließend in der Lage, die echten Viren zu attackieren, sobald sie den Körper angreifen.

Für Ihre Arbeit war also entscheidend, dass Forscher im Januar das Erbgut von Sars-CoV-2 entschlüsselt und veröffentlicht haben?

Genau. Sobald wir wussten, wie das Virus aussieht, das heißt seine Nukleotidsequenz kannten, konnten wir unser Vakzin entsprechend zielgerichtet designen.

Ähnliche Feinde, ähnliche Abwehrwaffen

Mehrere Forschergruppen, die schon seit Jahren an Impfstoffen gegen Coronaviren arbeiten, haben ihre dabei gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um innerhalb weniger Wochen einen Ansatz gegen das neue Virus Sars-CoV-2 zu entwickeln. Ein Team um Andrea Gambotto von der University of Pittsburgh nutzte hierfür Erfahrungen mit einem Impfstoff gegen Mers-CoV, den Erreger der Mers-Erkrankung, der ebenfalls zu den Coronaviren gehört. Die Forscher wandelten ein selbst entwickeltes und erprobtes Verfahren gegen das Mers-Virus ab und wendeten es gegen den verwandten Erreger Sars-CoV-2 an. In Zellkulturen stellten sie einen Bestandteil des Virus, ein so genanntes Spike-Protein, massenhaft her. Mit dessen Hilfe koppelt der Erreger an seine Zielzellen. Wenn die Wissenschaftler dieses Protein in die Haut von Labormäusen einbringen, produzie-

ren die Tiere binnen zweier Wochen zahlreiche Antikörper dagegen. Auf Grund ihrer Erfahrungen mit dem Mers-Erreger vermuten die Forscher, dass dies den Tieren eine anhaltende Immunität gegen Sars-CoV-2 vermittelt. Als Nächstes planen sie klinische Studien mit Menschen und haben hierfür eine Zulassung bei der Arzneimittelbehörde FDA beantragt.

Ein weiteres Team um Paul McCray von der University of Iowa hat einen Impfstoff gegen den Mers-Erreger vorgestellt, der sich wohl ebenfalls so modifizieren lässt, dass er gegen Sars-CoV-2 wirkt. Das Vakzin basiert auf dem relativ harmlosen Parainfluenza-Virus PIV5, welches so verändert wurde, dass es das Spike-Protein des Mers-Virus trägt. Bekamen Labormäuse diesen Impfstoff verabreicht, entwickelten sie sowohl Antikörper gegen den Mers-Erreger als auch eine verstärkte Aktivität von T-Zel-

len, die zum Immunsystem gehören. Dies half den Tieren anschließend, eine Infektion mit Mers-Viren zu überstehen, welche bei unbehandelten Mäusen tödlich wirkt. Basierend auf diesen Arbeiten haben die Forscher auch Impfstoffkandidaten gegen Sars-CoV-2 entwickelt, die sie nun an Versuchstieren testen wollen.

Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Kim, E. et al.: Microneedle array delivered recombinant coronavirus vaccines: Immunogenicity and rapid translational development. *EBioMedicine*, 102743, 2020

Li, K. et al.: Single-dose, intranasal immunization with recombinant Parainfluenza Virus 5 expressing Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus (MERS-CoV) spike protein protects mice from fatal MERS-CoV infection. *mBio* 11, e00554-20, 2020

Mit wie vielen verschiedenen mRNA-Molekülen testen Sie?

Am Menschen dann nur noch mit einem. In unseren präklinischen Modellen haben wir uns verschiedene mRNA-Konstrukte angeschaut, die unterschiedliche Virus-Sequenzen enthalten. Genommen haben wir das Konstrukt, das die stärkste Immunantwort auslöst und die beste Qualität aufweist. Das sorgt bestenfalls für ausreichend viele Antikörper, die das Virus unschädlich machen können.

80 Impfstoffe sollen derzeit schon weltweit in diversen Testphasen sein. In Seattle beispielsweise testen Forscher bereits einen Impfstoff in einer von der US-Regierung geförderten Phase-1-Sicherheitsstudie. Wie beurteilen Sie das?

Auch das ist ein mRNA-Impfstoff, und es ist gut, dass es verschiedene Ansätze gibt. Die ersten Daten gilt es nun auszuwerten. Fest steht aber schon jetzt: Es wird am Ende nicht nur einen Impfstoff geben.

Wieso? Letztlich benötigen wir doch nur ein wirksames Vakzin?

Es braucht mehrere Lösungsansätze. Schon allein, weil es unterschiedliche Bevölkerungsgruppen gibt. Je nachdem, wer den Impfstoff wofür nutzt, kann es von Vorteil sein, ein ganzes Arsenal von Vakzinen zu haben. Und auch die Dosis wird unterschiedlich ausfallen, abhängig davon, ob es sich um einen DNA-, RNA- oder peptidbasierten Wirkstoff handelt. Und wie könnten Sie bei nur einem Impfstoff sicherstellen, dass sich genug davon für alle Menschen weltweit produzieren lässt? Es geht letztlich auch darum, die zuverlässige Herstellung zu gewährleisten.

US-Präsident Donald Trump soll laut Medienberichten versucht haben, exklusiv die Rechte an Ihrem Impfstoff zu erwerben. Was haben Sie gedacht, als Sie das hörten?

Es hat solch ein Angebot nicht gegeben. Wir haben das klar dementiert.



MIT FOT. GEB. VON STEFAN MÜLLER

Der Biochemiker und Fachttoxikologe Stefan Müller leitet die präklinische Entwicklung des Impfstoffherstellers CureVac und CureVacs Coronavirus-Projekt.

Hat die mediale Aufregung darum Ihre Arbeit beeinflusst?

Nur indirekt. Wir hatten deshalb weder Probleme mit Behörden in Europa oder den USA noch hat sich an der Förderung etwas geändert. Es gab allerdings deutlich mehr Presseanfragen als üblich.

ABELPREIS 2020 ORDNUNG IM CHAOS

Durch einen statistischen Ansatz gelang es Hillel Fürstenberg und Grigori Margulis, in unerwartete Bereiche der Mathematik vorzudringen.

Den diesjährigen Abelpreis, der das Lebenswerk von Mathematikern ehrt, teilen sich Hillel Fürstenberg und Grigori Margulis. Sie erhalten ihn für die Entwicklung statistischer Methoden, die zu zahlreichen Durchbrüchen in verschiedensten mathematischen Bereichen geführt haben.

Etwas überraschend mag dabei erscheinen, dass die beiden Forscher – obwohl sie sich ähnlichen Themen widmeten – niemals direkt zusammen-

Erwarten Sie, dass die Infektionen im Herbst wieder zunehmen, ähnlich wie bei der Grippe?

Das weiß ich nicht. Viele gehen davon aus, dass das Virus saisonal auftreten wird und im Herbst eine neue Welle anrollt. Wir treiben den Prozess aber schon jetzt so schnell voran wie möglich, weil täglich Menschen an den Folgen sterben. Jede Woche, die wir früher impfen, kann Menschen vor Covid-19 bewahren und damit Leben retten.

RKI-Chef Lothar Wieler sagte jüngst erneut, er rechne nicht vor Frühjahr 2021 mit dem Impfstoff wegen der Zulassung. Teilen Sie die Auffassung?

Die präklinische Entwicklung dauert, da man Menschen nur mit einem sicheren Vakzin impfen darf, auch wenn wir hier wirklich Gas geben. Versuche am Menschen brauchen ebenfalls ihre Zeit. Und Zulassungen ebenso. Sollte nächstes Jahr ein Impfstoff zugelassen sein, wäre das noch immer schnell. Zusätzlich beschleunigen ließe es sich mit einer Notzulassung. Aber auch ich gehe vom Frühjahr 2021 aus.

Die Fragen stellte Alina Schadwinkel, Redaktionsleiterin von »Spektrum.de«.

gearbeitet haben. Das hat verschiedene Gründe: So ist der 1935 in Berlin geborene Fürstenberg mehr als zehn Jahre älter als Margulis, der 1946 in Moskau zur Welt kam. Zudem verhinderten der Kalte Krieg und systematische Diskriminierung jahrelang, dass Margulis die Sowjetunion verlassen durfte.

Der begabte Mathematiker fiel schon früh auf: Mit nur 32 Jahren erhielt er für seine Beiträge zur Gruppentheorie die Fields-Medaille, eine

der wichtigsten Auszeichnungen der Mathematik. Allerdings konnte er den angesehenen Preis nicht entgegennehmen, da die sowjetische Regierung ihm die Ausreise nach Finnland zur Verleihung verweigerte.

In den darauf folgenden Jahren erlebte Margulis weitere Rückschläge. Obwohl er zu den begabtesten Vertretern seines Fachs gehörte, erhielt er keine Anstellung an der renommierten Moskauer Universität, weil er jüdischer Abstammung war. Daher arbeitete er am Institut für Informationsübertragung, dessen leitender Wissenschaftler er 1986 wurde. Als die UdSSR fünf Jahre später zusammenbrach, wanderte er schließlich in die USA aus und nahm dort eine Stelle an der Yale University in New Haven, Connecticut, an. Diese hat er bis heute inne.

Auch das Leben von Fürstenberg ist von Schicksalsschlägen geprägt. Als er vier Jahre alt war, floh seine Familie, ebenfalls jüdischer Abstammung, in die Vereinigten Staaten. Auf der Reise verstarb sein Vater, so dass Fürstenberg von seiner Schwester und Mutter in New York aufgezogen wurde.

Als er seine ersten wissenschaftlichen Arbeiten Mitte der 1950er Jahre veröffentlichte, glaubten einige seiner Kollegen, der Name Fürstenberg sei ein Pseudonym, den sich eine Gruppe von Mathematikern zugelegt habe – so vielseitig erschienen ihnen die darin entwickelten Ideen. 1965 wanderte Fürstenberg nach Israel aus, wo er die Hebräische Universität Jerusalem zu einem der anerkanntesten Zentren der mathematischen Forschung verwandelte. Seit 2003 ist er im Ruhestand.

Selbst wenn die zwei Wissenschaftler nicht direkt zusammenarbeiteten, beeinflussten sie sich aus der Ferne durch ihre Arbeiten. Beide nutzten statistische Methoden, um Probleme anderer mathematischer Gebiete zu untersuchen (siehe »Spektrum« März 2003, S. 70).

Unter anderem fragten sie sich, inwiefern zufällig gewählte Stichproben etwas über ein gesamtes System aussagen können. Ihre Ergebnisse prägten das gesamte Fach nachhaltig, denn Mitte des 20. Jahrhunderts betrachtete man die Wahrscheinlich-

keitstheorie als einen Zweig der angewandten Mathematik. Kaum einer hätte sich damals ausgemalt, dass sie zu Fortschritten in Bereichen der reinen Mathematik wie der Zahlentheorie oder Algebra führen würde, wie der Mathematiker François Labourie von der Université Côte d'Azur in Nizza betont, der Teil des Abel-Komitees ist.

Unter anderem arbeiteten Fürstenberg und Margulis mit einer weit verbreiteten statistischen Methode, dem so genannten »Random Walk«. Diesen verwenden unterschiedlichste Wissenschaftler schon lange, um dynamische Systeme wie Börsenkurse, das Jagdverhalten von Tieren oder die Bewegung von Molekülen zu beschreiben.

In einer Dimension kann man sich einen Random Walk durch einen Menschen vorstellen, der auf einem Zahlenstrahl auf der Null steht. Die Person kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entweder einen Schritt vor auf die Eins oder einen zurück auf die minus Eins gehen. Indem man die jeweiligen Chancen für einen Sprung nach vorn oder hinten verändert, lassen sich verschiedene zufällige Ereignisse modellieren.

Random Walks eignen sich dazu, große unübersichtliche Strukturen zu erforschen. In den 1960er und 70er Jahren zeigte Fürstenberg mittels solcher statistischer Methoden, dass unendlich große Mengen ganzer Zahlen eine gewisse Ordnung besitzen – unabhängig davon, wie man die darin enthaltenen Elemente auswählt. Diese Erkenntnis führte zu mehreren Durchbrüchen in der Zahlentheorie, unter anderem im Bereich der Primzahlen.

Margulis wandte sich in jungen Jahren dagegen der Gruppentheorie zu, die zum Bereich der Algebra zählt. Eine Gruppe ist eine Sammlung von Objekten (etwa ganze Zahlen), die man zu einem weiteren Element der Gruppe verknüpfen kann (beispielsweise durch Addition). Dabei besitzt jedes Objekt ein Inverses (eine Zahl mit umgekehrten Vorzeichen), und es muss ein neutrales Element geben, das ein Objekt nicht verändert, wenn man es damit verknüpft (in diesem Zusam-

menhang die Null). Die ganzen Zahlen mit der Addition sind ein unproblematisches Beispiel für eine Gruppe. Im Prinzip können diese Strukturen aber extrem kompliziert werden, wodurch sich ihre Eigenschaften nur schwer untersuchen lassen. Wie Margulis herausfand, ermöglichen es statistische Methoden wie der Random Walk, in unerforschte Bereiche solcher Gruppen vorzudringen (die ganzen Zahlen mit der Addition lassen sich bereits mit dem zuvor erwähnten eindimensionalen Random Walk studieren).

Einen weiteren Fortschritt erzielte Margulis in der Graphentheorie. Graphen bestehen aus einer Sammlung von Knoten, die durch Verbindungen zusammenhängen. Seine Arbeit beim Institut für Informationsübertragung veranlasste Margulis, sich solchen Gebieten zuzuwenden.

Um zum Beispiel Informationen in einem Netzwerk wie dem Internet effizient übertragen zu können, sollte jeder Knoten schnell erreichbar sein. Das lässt sich verwirklichen, indem man möglichst viele Verbindungen zwischen ihnen aufbaut.

Andererseits möchte man aber Kabel sparen. Daher versuchen Wissenschaftler Netzwerke zu entwerfen, in denen man jeden Punkt schnell anlaufen kann, die gleichzeitig aber möglichst wenige Verbindungen aufweisen. In den 1980er Jahren kannte man Strukturen mit solchen Eigenschaften, so genannte Expander-Graphen, wusste allerdings nicht, wie man sie konstruiert. Durch statistische Methoden gelang es Margulis erstmals, einen Bauplan für Expander-Graphen zu entwerfen, was zu etlichen weiteren Durchbrüchen in der Graphentheorie führte.

Insgesamt haben die Arbeiten der beiden Mathematiker statistische Ansätze in den Bereich der reinen Mathematik katapultiert und damit zu neuen Anwendungsgebieten geführt. Ihre Ergebnisse haben mehrere Kollegen inspiriert, unter anderem den renommierten Fields-Medaillen-Gewinner Terence Tao sowie die Abelpreis-Laureaten Yakov Sinai und Endre Szemerédi (siehe »Spektrum« Mai 2012, S. 22).

Den Abelpreis, der mit einem Preisgeld von etwa 760 000 Euro dotiert ist, vergibt die Norwegische Akademie der Wissenschaften seit 2003. Eigentlich sollte die offizielle Preisverleihung im Mai 2020 stattfinden, doch angesichts der Covid19-Pandemie wird das Ereignis auf nächstes Jahr verschoben.

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

WEBLINKS

Norwegische Akademie der Wissenschaften: Abelpreis, 2020
<https://www.abelprize.no>

Chang, K.: Abel Prize in mathematics shared by 2 trailblazers of probability and dynamics. New York Times, 2020
<https://www.nytimes.com/2020/03/18/science/abel-prize-mathematics.html>

Castelvecchi, D.: Mathematics pioneers who found order in chaos win Abel prize. Nature News, 2020
<https://www.nature.com/articles/d41586-020-00799-7>

TEILCHENPHYSIK DAS NEUTRON BLEIBT SYMMETRISCH

Sind die Ladungen innerhalb der elektrisch neutralen Kernbausteine ungleichmäßig verteilt? Die Entdeckung hätte tief greifende Folgen für das physikalische Weltbild. Jetzt bringen neue Präzisionsmessungen bessere Daten – und vorläufige Ernüchterung.

Das Neutron – unverzichtbares Bauteil aller Atomkerne mit mehr als einem Proton – ist nach außen hin zwar elektrisch neutral. Aber es setzt sich aus geladenen Bestandteilen zusammen. Diese wiederum könnten in seinem Inneren unsymmetrisch angeordnet sein. Dann würden sie das ganze Teilchen in einem elektrischen Feld ausrichten wie eine Kompassnadel im Magnetfeld. Das Neutron besäße ein so genanntes elektrisches Dipolmoment.

Ein solches ist Bestandteil verschiedener Theorien, die das Standardmodell der Teilchenphysik erweitern und

grundlegende Fragen zu den Vorgängen in den ersten Augenblicken nach dem Urknall beantworten sollen.

Darum suchen Physiker schon seit Jahrzehnten nach einem elektrischen Dipolmoment des Neutrons. Das Problem: Sofern es überhaupt eines gibt, müsste es winzig sein – und die Experimente entsprechend empfindlich. Die bisher genauesten Grenzen hatten Wissenschaftler in einem Versuch von 2006 gezogen. Nun hat ein internationales Team um Philipp Schmidt-Wellenburg am Paul Scherrer Institut im schweizerischen Villingen den Wert mit sorgfältigen Messungen

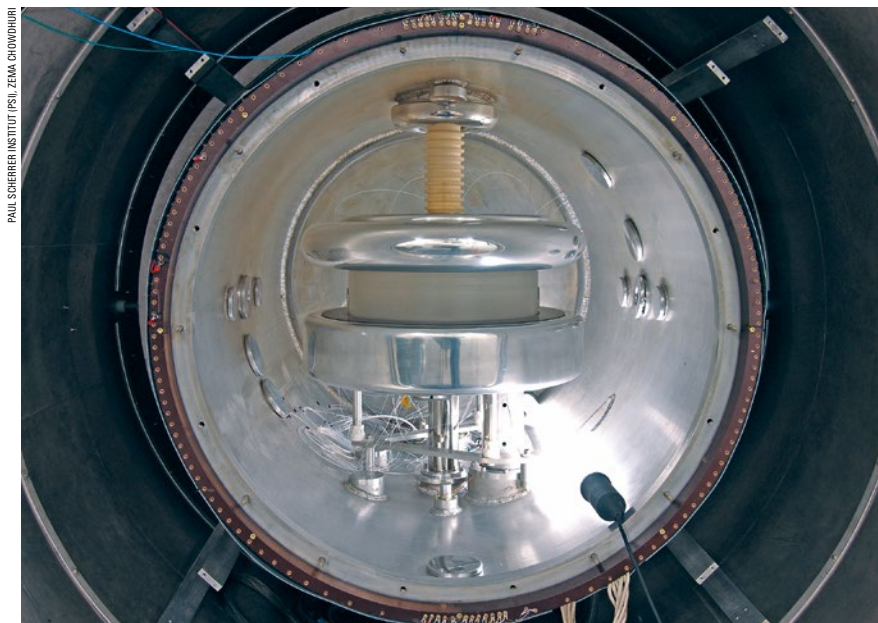
noch einmal deutlich verbessert und festgestellt: Er ist höchstens halb so klein wie bisher bekannt.

Hätte das Neutron ein elektrisches Dipolmoment, würde das auf die Spur jener Vorgänge führen, die im frühen Kosmos die Materie von der Antimaterie getrennt haben. Denn dass es seit dem Urknall nicht bloß reine Energie, sondern Galaxien und letztlich uns gibt, verdanken wir einer fundamentalen Asymmetrie.

Eigentlich sollten sich die Naturgesetze nicht unterscheiden, wenn man alle Ladungen umkehrt, die Welt im Spiegel betrachtet oder die Zeit rückwärtslaufen lässt. Es ändert sich höchstens ein Vorzeichen. Bei Vorgängen, an denen nur die Gravitation oder die elektromagnetische Kraft beteiligt sind, ist das auch so. Doch seit Jahrzehnten enthüllen immer mehr Versuche kleine Unregelmäßigkeiten bei Wechselwirkungen in der subatomaren Welt.

Lediglich eine dreifach gespiegelte Realität folgt wieder vollends den bekannten Regeln. Dazu muss man alle drei Operationen vereinen und sowohl Teilchen gegen Antiteilchen (englisch: charge, C) als auch die Raumkoordinaten (Parität, P) sowie die Zeitrichtung (time, T) wechseln. Das wird als CPT-Invarianz der physikalischen Gesetze bezeichnet. Bei weniger umfassenden Kombinationen von C-, P- oder T-Vertauschungen können sich die Zusammenhänge ändern. Besonders

Während der Messung befinden sich die Neutronen in einem etwa einen halben Meter breiten Bereich zwischen Metallelektroden, umgeben von einem Magnetfeld und durch eine Vakuumkammer von der Außenwelt getrennt.



PAUL SCHERRER INSTITUT (PSI), ZEMA, GIOVANNINI

interessant sind für Theoretiker CP-Verletzungen, also abweichende Gesetzmäßigkeiten nach einer kombinierten Ladungs- und Raumpiegelung. Der sowjetische Physiker Andrei Sacharow zeigte in den 1960er Jahren: Die CP-Verletzung hat dafür gesorgt, dass nach dem Urknall mehr Materie als Antimaterie übrig geblieben ist.

Heute suchen Teilchenphysiker mit diversen Experimenten Systeme, in denen die CP-Symmetrie gebrochen ist. So haben sie bereits mehrere entsprechende Prozesse entdeckt und ins Standardmodell eingebaut (siehe »Spektrum« März 2018, S. 12). Aber die bisher bekannten CP-Verletzungen reichen zusammengenommen nicht aus, um den Materieüberschuss im Kosmos zu erklären.

Wissenschaftler hoffen, eine weitere Asymmetrie auch beim Neutron zu finden. Hätte es nämlich ein elektrisches Dipolmoment, würde das die T-Symmetrie verletzen. Das liegt daran, dass das Neutron einen quantenmechanischen Drehsinn besitzt, den Spin. Unter Zeitumkehr würde er sich ändern, wie beim Video eines Kreisels, das man rückwärtslaufen lässt. Ein etwaiges elektrisches Dipolmoment wäre aus quantenmechanischen Gründen in gleicher Richtung orientiert wie der Spin. Doch die dafür ursächliche innere Ladungsverteilung würde sich bei der Zeitumkehr nicht vertauschen, so wenig, wie sich ein Kreisel in einem rückwärtslaufenden Film auf den Kopf stellt. Das verletzt die T-Symmetrie. Um die unumstößliche CPT-Invarianz insgesamt wieder herzustellen, gäbe es gewissermaßen zum Ausgleich außerdem eine CP-Verletzung.

Manche Theorien, die über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen, liefern vergleichsweise große Werte für das elektrische Dipolmoment des Neutrons. Die bereits ins Standardmodell integrierten, bekannten CP-Verletzungen ergeben jedoch höchstens ein sehr kleines. Je genauer Physiker den Betrag des elektrischen Dipolmoments eingrenzen, desto besser können sie exotische Einflüsse abschätzen und unpassende Ansätze ausschließen.

Die Experimente mit Neutronen sind enorm aufwändig, weil ein etwaiges elektrisches Dipolmoment extrem klein wäre. Viele störende Einflüsse aus der Umgebung sind viel größer und müssen sehr genau bekannt sein, damit die Wissenschaftler sie herausrechnen können. Deswegen hat es mehr als ein Jahrzehnt gedauert, um im Labor vom bislang besten Wert (der auf einer 2015 vorgenommenen Neuauswertung des eingangs erwähnten Experiments von 2006 beruht) zu dem zu kommen, den die Forscher nun in der Schweiz bestimmt haben.

Um das elektrische Dipolmoment des Neutrons zu vermessen, nutzten sie dessen Spin aus. Dieser innere Drehsinn richtet sich nach einem äußeren Magnetfeld aus, so ähnlich, wie sich ein rotierender Kreisel entlang der Schwerkraft aufstellt. Wenn man den Kreisel leicht anstößt, kippt er nicht um, sondern seine Drehachse kommt ins Trudeln, was man Präzession nennt. Eine ähnliche Bewegung führt der Spin des Neutrons im Magnetfeld aus, wenn man ihn etwas aus seiner Vorzugsrichtung auslenkt.

Würde das Neutron neben dem Spin zusätzlich ein elektrisches Dipolmoment besitzen, sollte es ganz analog an dem Teilchen zerran, sobald man ein elektrisches Feld anlegt. Schaltet man dieses zusätzlich zum magnetischen Feld an, kommen also beide Effekte zusammen. Das verändert die Präzessionsfrequenz. Die wiederum lässt sich sehr genau bestimmen – in der Medizin ist das zu Grunde liegende Prinzip für die Magnetresonanztomografie wichtig.

Dafür haben die Forscher in der Schweiz »kalte« Neutronen verwendet und die damit sehr langsamen Teilchen über längere Zeit in einem Tank von der Größe einer Paellapfanne eingesperrt. Das ermöglicht präzise Messungen an ihnen. Die Wissenschaftler haben alle paar Minuten Pakete mit über 11 000 Neutronen eingeschleust, etwa eines pro Kubikzentimeter. Bevor die Teilchen durch Kollisionen mit den Wänden der Kammer wieder verloren gingen, konnten die Forscher sie untersuchen. Das haben sie im Lauf von zwei Jahren

insgesamt mehr als 54 000-mal wiederholt.

Auf dem Weg zu höchster Präzision war das Magnetfeld der entscheidende Faktor, denn von ihm hängt die Stärke der Taumelbewegung ab. Die Forscher mussten es in der gesamten Apparatur exakt kontrollieren. Dabei half neben verbesserter Technik ein Trick: Gemeinsam mit den Neutronen befanden sich als Referenz Quecksilberatome in der Kammer. Auch sie richteten sich magnetisch aus, doch ihre Elektronenhülle schirmt ein etwaiges elektrisches Dipolmoment des Kerns ab. Der Vergleich der Präzessionsfrequenzen von Neutronen und Quecksilberatomen lieferte dann genaue Werte, um verbliebene Unregelmäßigkeiten im Magnetfeld herauszurechnen.

Die Teams haben anschließend die Daten und alle möglichen Einflussfaktoren in zwei voneinander unabhängigen Gruppen eingehend untersucht und verglichen. Daraus haben die Forscher ein Gesamtergebnis errechnet. Sie konnten kein elektrisches Dipolmoment feststellen. Statistische und systematische Effekte beschränken die Genauigkeit des Resultats auf eine neue Obergrenze von $1,8 \cdot 10^{-26}$ Elektronenladungen mal Zentimeter. Das bedeutet: Wäre ein Neutron so groß wie die Erde, könnten die elementaren Ladungen darin höchstens um einen Abstand voneinander getrennt sein, welcher etwa der Länge eines Bakteriums entspricht. Der Vergleich verdeutlicht die enorme Präzision der Messung, doch selbst der neue Wert ist nur ein Zwischenstand auf dem Weg zu noch genaueren Untersuchungen. Seit dem Ende der Experimente 2017 bauen die Physiker bereits am n2EDM genannten Nachfolger. Er soll noch einmal deutlich bessere Einblicke in das Neutron liefern – und damit in das grundlegende Ungleichgewicht des Kosmos.

Mike Beckers ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLE

Abel, C. et al.: Measurement of the permanent electric dipole moment of the neutron. *Physical Review Letters* 124, 2020



SPRINGERS EINWÜRFE EXPERIMENTELLES RISIKO

Mit den rapiden Fortschritten der synthetischen Biologie wächst die Wahrscheinlichkeit riskanter Nebenwirkungen. Freiheit und Sicherheit der Forschung stehen neu in Frage.

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

» spektrum.de/artikel/1725082

Jeder technische Prozess soll sein Ergebnis möglichst unfallfrei erreichen. Diesem Ziel der Betriebssicherheit (englisch: safety) dienen in Biolabors gewisse Standards, die nicht nur die Mitarbeiter schützen, sondern auch verhindern sollen, dass beispielsweise gentechnisch veränderte Organismen in die Umwelt gelangen.

Es gibt aber noch einen zweiten Sicherheitsaspekt, der im Englischen mit »security« bezeichnet wird. Während die »safety« Vorkehrungen gegen technisches oder menschliches Versagen bezweckt, soll die »security« den jeweiligen Betriebsablauf vor gezielten Vergehen schützen, etwa vor dem Missbrauch von Daten, Patenten und Substanzen.

Ein Bruch der »security« vollzieht sich nur ausnahmsweise als Raub sensibler Papiere aus einem Laborsafe bei Nacht und Nebel. Zentrale Errungenschaften biologischer Forschung sind über Veröffentlichungen in Fachzeitschriften allgemein zugänglich. Immer öfter entzündet sich vielmehr eine Sicherheitsdebatte an dem Verdacht, bestimmte Versuche würden zum Missbrauch geradezu einladen. Das war beispielsweise der Fall, als Wissenschaftler 2011 mit dem Erreger der Vogelgrippe experimentierten und es vorübergehend so aussah, als könnte eine Laborvariante des Virus H5N1 auch den Menschen befallen. Eine lebhafte Debatte entbrannte: Darf die Methode veröffentlicht werden? Was, wenn ein Bösewicht damit eine Biowaffe entwickelt?

Medizinethiker diskutieren das so genannte »Dual-use«-Problem in der Infektionsforschung: Lässt sich ein Resultat sowohl zur Krankheitsbekämpfung nutzen als auch zu terroristischen Zwecken missbrauchen?

Ein älteres, heute schon fast vergessenes Beispiel liefern die 2001 quer durch die USA verschickten und teils tödlichen Briefe mit dem bakteriellen Milzbranderreger. Sie wurden zunächst fälschlicherweise dem

Irak zugeschrieben; tatsächlich entstammten sie einem US-Militärlabor.

Das alles mutet an wie aus einer anderen Zeit angesichts einer Viruspandemie, deren Erreger irgendwann Ende 2019 vom Tier auf den Menschen übergesprungen ist. Das ist aller Wahrscheinlichkeit nach auf einem Markt geschehen, doch Spekulationen über einen Ursprung in einem Labor, das mit seiner Arbeit just einer möglichen Pandemie vorzubeugen suchte, halten sich hartnäckig.

Kurz davor, im Juli 2019, organisierte Sam Weiss Evans, ein Spezialist für Technikfolgenabschätzung von der Harvard University, einen Workshop an der University of Cambridge zum Thema Biosicherheit. In einem daraus hervorgegangenen Artikel vertreten er und seine Koautoren die These, das Feld der synthetischen Biologie bewege sich so schnell vorwärts, dass noch so aktuelle Sicherheitsüberlegungen immer zu spät zu kommen drohen. Die einzige Chance sei ein experimenteller Ansatz, der alle möglichen Sicherheitsstrategien vergleicht und auf einer Metaebene diskutiert (*Science* 368, S. 138–140, 2020).

Der Ausgangspunkt solcher Überlegungen ist die Stiftung International Genetically Engineered Machine (iGEM), die jährlich einen weltweiten Wettbewerb von Studenten und universitärem Mittelbau – auch aus mehreren deutschen Universitäten – um besonders innovative Ideen zur synthetischen Biologie auslobt. Zunehmend geht es iGEM auch um Methoden der einschlägigen »safety« und »security«. Die Veranstalter scheuen nicht einmal den Kontakt zur US-Bundespolizei FBI, die auf diese Weise das dringende nötige Knowhow für ihre »Biological Countermeasures Unit« auf den neuesten Stand bringen möchte. Unstrittig bleibt: Die besten Sicherheitskontrolleure der Bioforschung sind die Forscher selbst.

BIOLOGIE DER LEBENDE TASER

Zitterraale jagen ihre Beute mit intensiven elektrischen Impulsen. Diese setzen sie außerdem geschickt zur Verteidigung ein. Ausgeklügelte Messungen und schmerzhafteste Selbstversuche liefern erstaunliche Einsichten in das Verhalten der Tiere.



STEVE GREEN

Kenneth C. Catania ist Professor für Biologie an der Vanderbilt University in Tennessee. Er forscht auf dem Gebiet der vergleichenden Neurobiologie und hat sich auf die Sinnessysteme von Tieren spezialisiert.

» [spektrum.de/artikel/1725064](https://www.spektrum.de/artikel/1725064)





**Zitteraale können
mehr als zwei Meter
lang werden.**

▶ Zitteraale betäuben ihre Beute – das ist weithin bekannt. Berichte dazu reichen Jahrhunderte zurück. Der Begriff »Betäuben« ist aber aus wissenschaftlicher Sicht viel zu vage. Was passiert wirklich, wenn die Fische angreifen? Bis vor Kurzem wussten Biologen überraschend wenig darüber.

Ursprünglich hatte ich gar nicht die Absicht, dieses außergewöhnliche Phänomen näher zu untersuchen, und erst recht hätte ich mir nie vorstellen können, im Namen der Forschung einmal einem Exemplar meinen Arm anzubieten. Wie kam es dazu? Als Professor für Biologie wollte ich meine Lehrveranstaltungen mit Fotos und Zeitlupenfilmen von Zitteraalen aufpeppen. Eines Tages nahm ich ein paar Exemplare mit in mein Labor. Da beobachtete ich etwas so Seltsames, dass ich alles andere stehen und liegen ließ, um mich fortan intensiv damit zu beschäftigen.

Als einer der mitgebrachten Zitteraale ein Beutetier mit einer Hochspannungssalve angriff, wurden innerhalb von drei Millisekunden alle in der Nähe befindlichen Fische im Tank völlig unbeweglich. Sie trieben wie erstarrt im Wasser. Zunächst dachte ich, sie seien tot. Aber sobald der Zitteraal die Hochspannung wieder abstellte, wachten die Fische auf und schwammen rasch von dannen. Die Auswirkungen des Angriffs waren also nur vorübergehend. Das faszinierte mich enorm, und nun wollte ich unbedingt mehr darüber herausfinden.

Mir fielen als offensichtlichste Analogie sofort die als Taser bekannten Elektroschockpistolen ein. Diese setzen die Opfer mit Hochspannungsimpulsen außer Gefecht, welche die Fähigkeit des Nervensystems beeinträchtigen, willkürliche Muskelbewegungen auszulösen. Taser schießen Kabel ab, durch die sie 19 Stromimpulse pro Sekunde schicken. Zitteraale brauchen dazu gar keine Drähte, denn das Wasser leitet gut. Sie können während einer Angriffssalve mehr als 400 Impulse pro Sekunde mit einer jeweiligen Dauer von zwei Millisekunden abgeben. Sind die Tiere quasi schwimmende Hochleistungs-Taser?

Mit dieser Frage im Hinterkopf ging ich auf eine Forschungsmission, die drei Jahre dauern sollte: Ich wollte den Angriffsmechanismus des Zitteraals und die Auswirkungen seiner Elektroschocks auf Beute und potenzielle Feinde aufklären. Mit jedem Zwischenergebnis überraschte mich aufs Neue, wie ausgeklügelt sich das Tier die Elektrizität zu Nutze macht.

Der Zitteraal ist trotz seines Namens und Aussehens gar kein echter Aal, sondern gehört zu einer Familie von Fischen, die als Gymnotidae bezeichnet werden und in Südamerika leben. Die übrigen Vertreter dieser Gruppe geben nur sehr schwache elektrische Entladungen ab, mit deren Hilfe sie kommunizieren und ihre Umgebung erkunden. Der Zitteraal hat seine Leistung im Lauf der Evolution hochgefahren. Dank des beinahe körperlangen elektrischen Organs – die Tiere können fast zweieinhalb Meter und mehr als 20 Kilogramm erreichen – generiert er eine Spannung von bis zu 600 Volt. Das Organ ist aus speziellen scheibenförmigen Zellen zusammengesetzt, den so genannten Elektrozyten. Sie speichern und liefern Elektrizität wie Batterien.

Um zu untersuchen, ob der Zitteraal wirklich wie ein Taser auf seine Opfer wirkt, musste ich das Tier im Jagdmodus beobachten. Also entwarf ich ein Experiment, bei dem ich von seinem unersättlichen Appetit auf Regenwürmer profitierte. Zuerst setzte ich einen toten Fisch, der noch funktionierende Nerven und Muskeln besaß, ins Wasser zum Zitteraal – von diesem durch eine elektrisch durchläss-

sige Barriere getrennt. Ich verband ihn mit einem Gerät zum Messen von Muskelkontraktionen. Dann fütterte ich den Aal mit Regenwürmern, die er mit Vergnügen schockte und auffraß. Der Versuchsaufbau erlaubte mir eine Reihe von Tests zu den Auswirkungen auf den Messfisch, der normalerweise auch potenzielle Beute wäre.

Bei diesem lösten die Hochspannungssalven starke Muskelkontraktionen aus. Sie begannen drei Millisekunden nach dem Angriff – genau die gleiche Zeit, die vergangen war, bevor die Fische in meinen ersten Zeitlupenaufnahmen bewegungslos wurden. Aber die Experimente zeigten noch viel mehr. Zitteraale regen die Muskelzellen nicht direkt an, sondern die zugehörigen Neurone. Jeder Impuls erzeugt dort ein Aktionspotenzial.

Das elektrische Organ des Zitteraals ist selbst ein modifizierter Muskel, der durch die motorischen Nervenzellen des Tiers aktiviert wird, und diese wiederum von Neuronen im Gehirn. Vom elektrischen Organ aus setzt sich das Signal durch das Wasser fort, zunächst zu den Motoneuronen und darüber dann zu den Muskeln von in der Nähe befindlichen Fischen. Es liegt nahe zu vermuten, dass sich die elektrischen Fähigkeiten des Zitteraals an die Reaktion der Muskeln der Beute angepasst haben.

Nach dieser Einsicht betrachtete ich die Hochspannungssalven unter einem neuen Blickwinkel. Dabei faszinierten mich besonders die Forschungsberichte des Deutschen Richard Bauer, der in den 1970er Jahren Folgendes herausfand: Zitteraale geben bei der Jagd oft Paare von Hochspannungsimpulsen ab, die um zwei Millisekunden voneinander getrennt sind; sie werden Doublets genannt. Die Aale in meinem Labor zeigten das gleiche Verhalten.

Doublets sind aus muskelphysiologischer Sicht der beste Weg, um maximale Spannung zu erzeugen. Das zeigten auch meine Experimente. Die Doppelimpulse lassen bei in der Nähe befindlicher Beute kurz den gesamten Körper zucken, ganz im Gegensatz zu den lähmenden Salven. Das Zucken wiederum verdrängt schlagartig Wasser, erzeugt also gewissermaßen ein Unterwassergeräusch. Zitteraale können noch die geringste Wasserbewegung wahrnehmen. Doublets sind darum eine Art zu fragen: »Lebst du?«

Schließlich jagen wilde Exemplare im Amazonasgebiet im Dunklen, umgeben von versteckt lebender Beute, die viel schwieriger zu finden ist als Würmer und Goldfische in einem sauberen Aquarium.

Die Zitteraale in meinem Labor gaben während der Suche oft Doublets ab. Das Zucken schien bis dahin unentdeckte Beute zu verraten und führte zum Angriff. Das waren aussagekräftige Beobachtungen, aber noch kein direkter Beweis. Darum befestigte ich einen toten Fisch an einem Stimulationsgerät, das entweder von mir oder den Doublets des Aals ausgelöst werden konnte. Daraufhin steckte ich den verkabelten Fisch in einen Plastikbeutel, der ihn vom direkten Einfluss der Doublets des Zitteraals isolierte. So konnte ich den Zeitpunkt der Muskelreaktion beim Fisch selbst bestimmen. Eindeutig erfolgte auf ein Doublet der Jäger nur dann ein Angriff, wenn der Fisch gezuckt hatte. Die Attacken waren also tatsächlich eine Reaktion auf die durch Doublets ausgelösten Bewegungen. Der Elektrokünstler kann demnach einerseits versteckte Beute aufspüren und sie andererseits daraufhin in eine Starre versetzen.

Geschickte Verrenkungen für konzentrierte Leistung

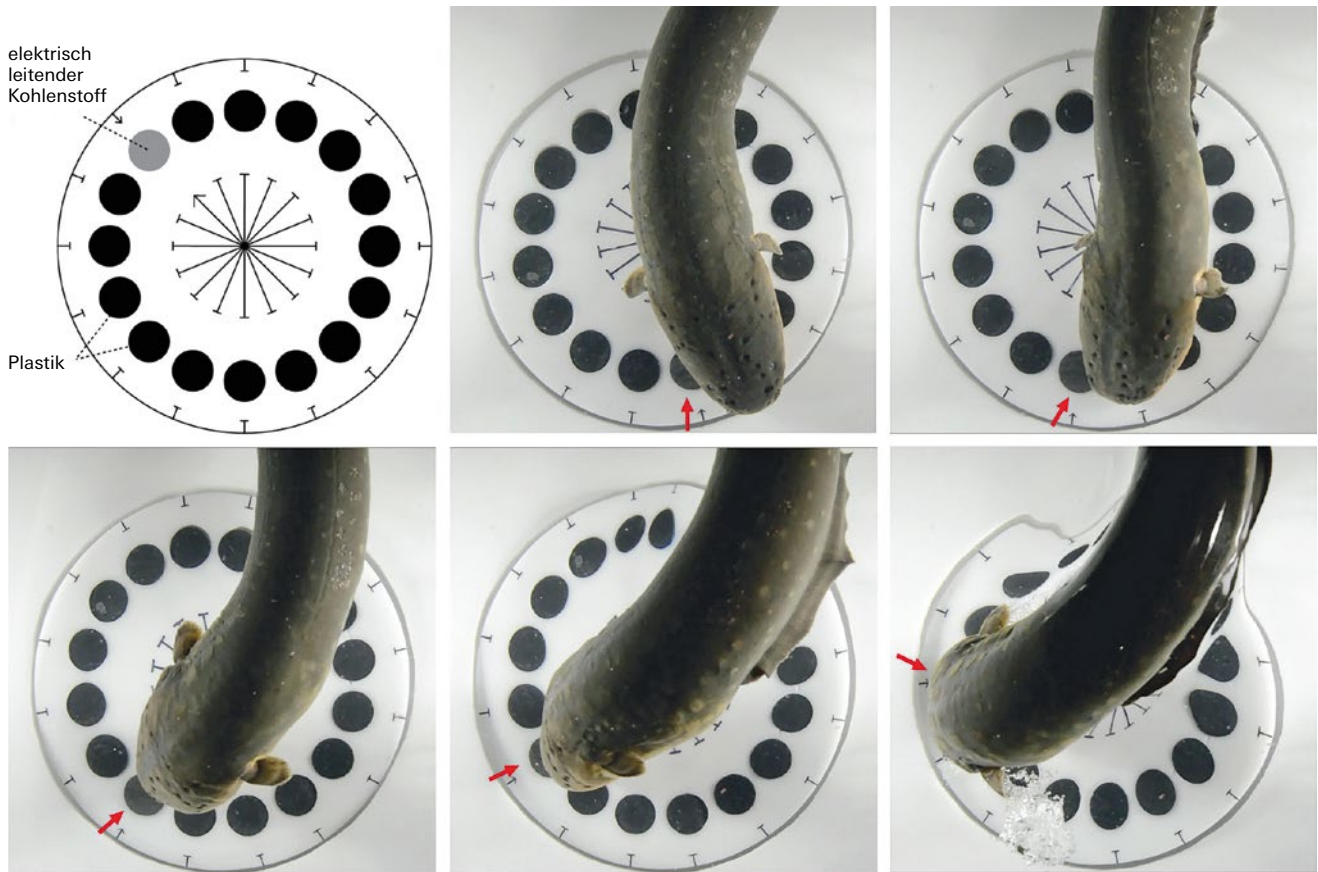
Neben diesen Tricks hat der Zitteraal eine raffinierte Lösung für ein grundlegendes Problem im Umgang mit Elektrizität entwickelt. Anders als bei Superhelden, die gezielt Blitze schleudern, verteilt sich unter Wasser die Leistung des Hochspannungsimpulses gleichmäßig auf die Umgebung. Infolgedessen trifft nur ein Bruchteil der gewaltigen Kraft die Beute. Dem englischen Physiker und Chemiker Michael Faraday, der bereits 1838 mit Zitteraalen forschte, verdanken wir eine gute Veranschaulichung des Problems: Das elektrische Feld des Aals stellt einen so genannten Dipol dar. Die Feldlinien gehen dabei vom positiv geladenen Kopf des Aals aus und enden am Schwanz. Ein elektrisches Feld ist an den Polen stets am stärksten – dort sind die Feldlinien besonders dicht – und nimmt mit dem Abstand davon rasch ab. Aus der Physik wissen wir, dass es die Feldstärke erheblich erhöht, wenn man einen negativen Pol näher an einen positiven heranführt. Offenbar haben das auch Zitteraale herausgefunden. Bei sich hartnäckig zur Wehr setzender Beute halten sie das Opfer fest im Maul und krümmen ihren negativ gepolten Schwanz darum, bevor sie eine Reihe von Hochspannungssalven abgeben.

Um die Wirkung dieses Manövers zu messen, entwarf ich eine Art Kauspielzeug: ein Paar Elektroden auf einem Kunststoffhalter, eingepackt in einen toten Fisch. Die Zitteraale packten den Apparat, woraufhin ich die daran befestigten Drähte schüttelte, um kämpfende Beute zu simulieren. Die Zitteraale spielten mit, bogen ihre Schwanzspitze und schockten die Elektroden aus der Nähe. Erwartungsgemäß stieg die Feldstärke – und zwar auf mehr als das Doppelte. Diese Strategie ermöglicht es dem Zitteraal, seine sonst festgelegte Ausgangsleistung auf ein Ziel zu konzentrieren.

Die Auswirkungen des dergestalt verstärkten Elektroschocks auf die Beute sind verheerend. Weiteren Experimenten zufolge löst er ungewöhnlich starke Muskelkontraktionen aus und erschöpft die Beute in nur wenigen Sekunden.

AUF EINEN BLICK SPANNENDE FELDFORSCHUNG

- 1** Der Zitteraal betäubt seine Opfer mit Elektroschocks. Der genaue Mechanismus und die Auswirkungen des Angriffs waren jedoch lange ein Rätsel.
- 2** Eine Reihe von Laborexperimenten zeigt nun, wie das Tier potenzielle Beute mit Hilfe von elektrischen Feldern aufspürt, verfolgt und bewegungsunfähig macht.
- 3** Der Fisch setzt seine speziellen Fähigkeiten auch ein, um Bedrohungen abzuwehren. Er springt dabei sogar aus dem Wasser, um den Stromfluss durch größere Feinde zu maximieren.



Der Zitteraal spürt Beute anhand ihrer elektrischen Leitfähigkeit auf. Experimente mit einer sich schnell drehenden Scheibe zeigen die Präzision der Angriffe. Der Räuber attackiert das leitende Stück Kohlenstoff und ignoriert das optisch identische Plastik.

den völlig. Dieses elektrische Analogon eines Neurotoxins ermöglicht es dem Zitteraal, sogar eigentlich gefährliche Tiere wie große Krebse zu fangen und zu überwältigen.

Im Lauf meiner Untersuchungen bemerkte ich etwas, das mich fragen ließ, ob die Elektroschocks möglicherweise mehr als nur eine Waffe sind. Normalerweise spielen sich drei Dinge ab, sobald Zitteraale töten: Zuerst geben sie eine volle Salve ab, anschließend schnappen sie nach der Beute und saugen sie zu guter Letzt in ihr Maul. In meinen Experimenten mit dem toten Fisch in der isolierten Plastiktüte brach der Zitteraal den Angriff jedoch immer wieder ab. Nach der Hochspannungssalve schnellte er auf den Fisch zu, verfehlte ihn allerdings und unterließ den letzten Saugbiss.

Ich hatte bis dahin angenommen, der Angriff sei gewissermaßen ballistisch – ein geplantes Ereignis ohne sensorische Rückkopplung. Nun kam es mir so vor, als ob die Tiere die Hochspannungsimpulse zur Verfolgung nutzten. Das würde erklären, warum sie die in Plastik verpackte Beute übersahen. Zitteraale haben sich evolutionär aus Fischen entwickelt, die schwache Elektrizität dazu verwenden, ihre Umgebung zu untersuchen. Diesen Weg zur Erfassung

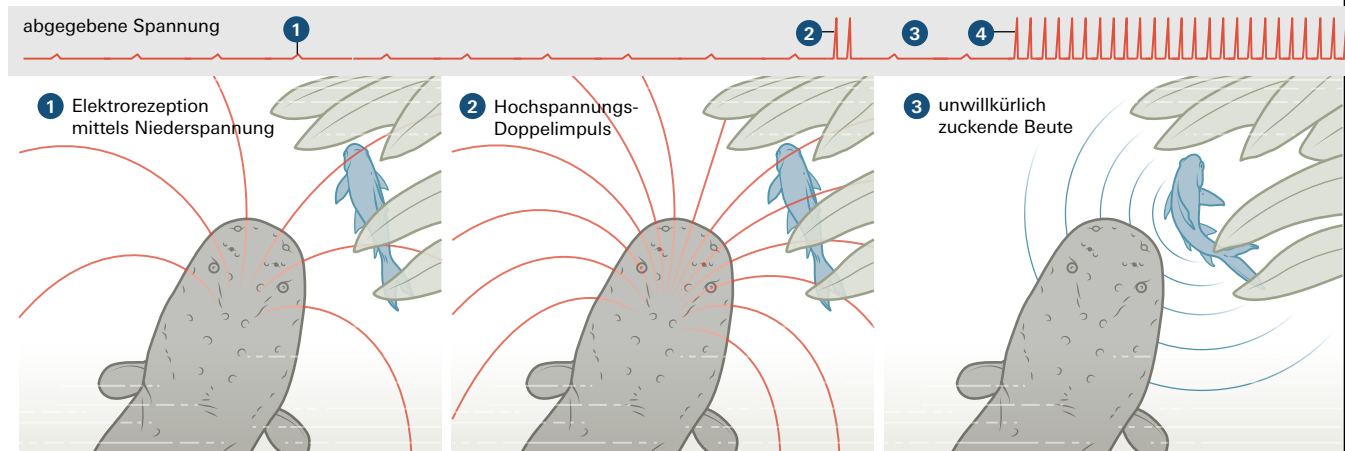
ihrer Umwelt haben die Zitteraale beibehalten, aber vielleicht nutzen sie dazu außerdem die Hochspannung. Ich beschloss, das zu überprüfen.

Tiere sind tendenziell leitfähiger als das Wasser, in dem sie sich befinden. Darum erkennt der Zitteraal andere Lebewesen grundsätzlich an ihrem geringen elektrischen Widerstand. Das tut er üblicherweise mit seinem Niederspannungssystem, das immer aktiv ist – bis er während eines Angriffs auf Hochspannung umschaltet. Kann der Zitteraal diese dann ebenfalls zur Ortung und Vermessung des Ziels nutzen? Um das zu testen, musste ich das Verhalten des Tiers während der Angriffe, also während das Niederspannungssystem ausgeschaltet und nur das Hochspannungssystem aktiv war, in Zeitlupe untersuchen.

Das erste einfache Experiment bestand darin, im Aquarium einen Stab aus Kohlenstoff zu platzieren, und zwar in der Nähe des Fisches im Plastikbeutel. Das Material ist elektrisch leitfähig, aber im Gegensatz zu Metallen chemisch träge. Das verhindert einen galvanischen Effekt, der ein elektrisches Feld hätte erzeugen und den Versuch beeinflussen können. Wieder griff der Zitteraal an, als er die vom Zucken verursachte Wasserbewegung wahrnahm. Diesmal änderte er jedoch auf halbem Weg seinen Kurs, schoss zum Kohlenstoffstab und versuchte, sich diesen mit einem Saugbiss einzuverleiben. Der Zitteraal schien den Stab für einen Fisch zu halten – wie man es erwarten würde, wenn er die Hochspannungsimpulse zur Ortung einsetzt. Das war ein guter Anfang, aber ich brauchte mehr Beweise. Dazu entwickelte ich zusätzliche Tests mit Kohlen-

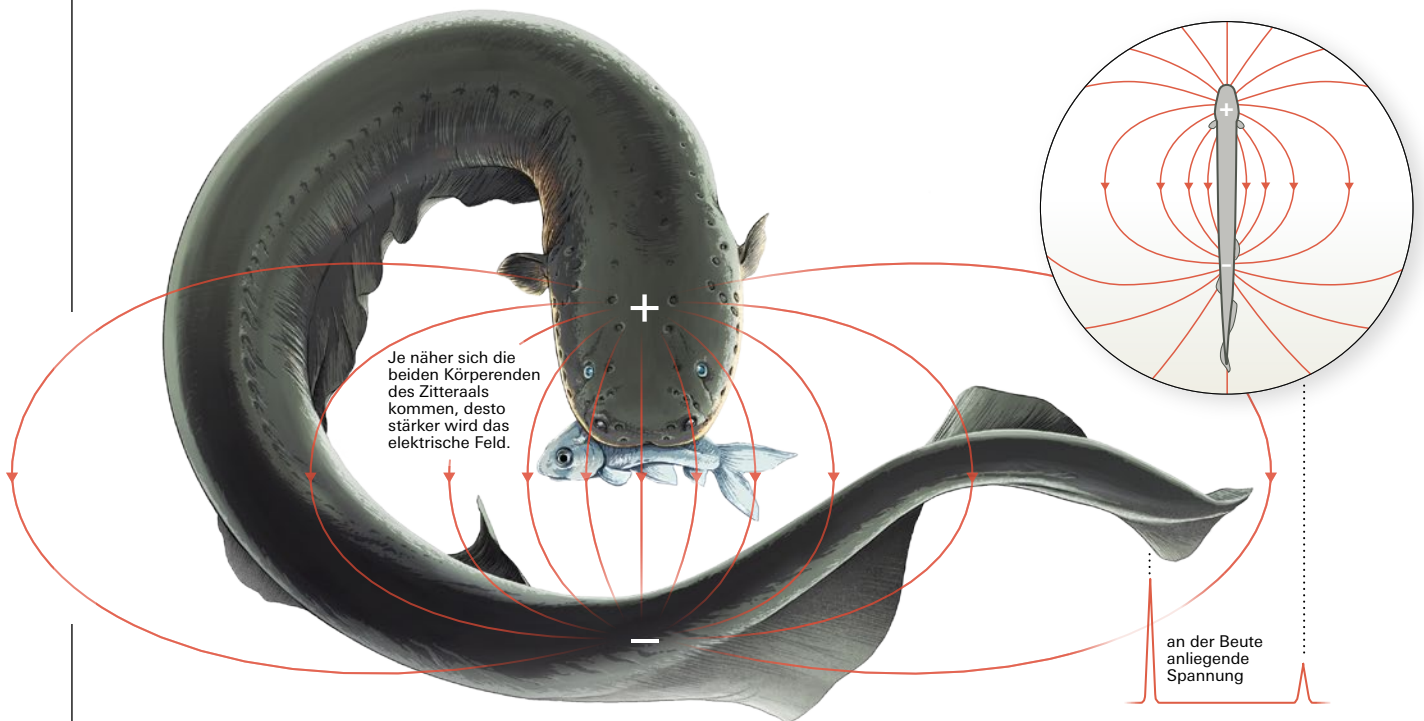
Auf Angriff gepolt

Ein Zitteraal setzt seine Beute mit einer ausgefeilten Jagdtechnik außer Gefecht. Er nutzt Elektrizität auf zweierlei Art: Versteckte Tiere spürt er auf, indem er sie mittels kurzer Ladungsstöße zum Zucken veranlasst, und einmal gefundene Opfer lässt er mit Spannungssalven regelrecht erstarren. Der räuberische Fisch kann außerdem sich noch bewegende Beute mit Hilfe seiner elektrischen Sinne verfolgen. Normalerweise geht ein Großteil der eingesetzten Energie ungerichtet im umgebenden Wasser verloren, und nur ein Teil des Stroms trifft die Beute. Im Lauf der Evolution hat sich eine ausgeklügelte Lösung entwickelt, welche die Effizienz der Attacken erhöht.



Fokussierter Stromschlag

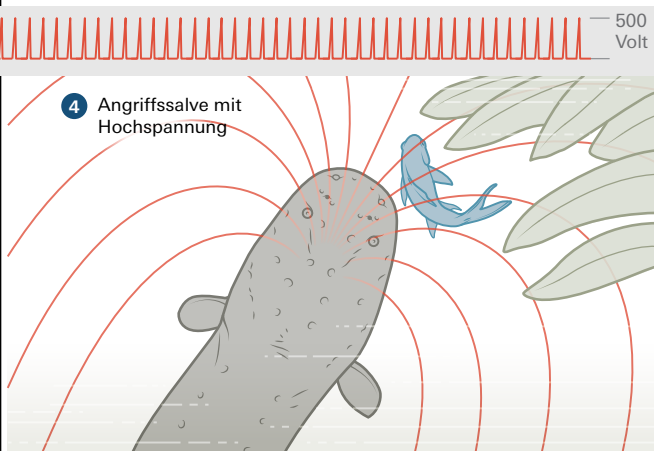
Das elektrische Feld des Zitteraals ist physikalisch betrachtet ein Dipol: Vom positiv geladenen Kopf gehen Feldlinien aus und enden am negativ gepolten Schwanz. Ihre Dichte gibt die Stärke des elektrischen Felds an jedem Punkt im Raum an. Bringt man den Pluspol näher an den Minuspol, erhöht sich die Feldstärke. Der Zitteraal zieht dazu den Schwanz an die Beute, die er im Maul hält, bevor er seine Salven abschießt.



MATTHEW THOMBLEY, NACH CATANIA, K.C.: ELECTRIC EELS CONCENTRATE THEIR ELECTRIC FIELD TO INDUCE INVOLUNTARY FATIGUE IN STRUGGLING PREY. CURRENT BIOLOGY 25, 2015. UND NACH CORANIA, K.C.: THE SHOCKING PREDATORY STRIKE OF THE ELECTRIC EEL. SCIENCE 346, 2014 / SCIENTIFIC AMERICAN, NOVEMBER 2019

Schrittweises Töten

Die Fische nutzen sowohl niedrige als auch hohe elektrische Spannung, um ihre Umgebung zu erfassen **1**. Während der Räuber zwischen Pflanzen nach versteckter Beute sucht, gibt er Paare von Hochspannungsimpulsen ab **2**. Diese Doublets lassen in der Nähe befindliche Tiere stark zucken **3**. Die plötzliche Bewegung verdrängt das umgebende Wasser und verrät die Position. Hat der Zitteraal sein Ziel ausgemacht, schießt er eine lähmende Angriffssalve mit vielen Hochspannungsimpulsen ab **4**.



MATTHEW TWOMBLY, NACH CATANIA, K.C.: ELECTRIC EELS CONCENTRATE THEIR ELECTRIC FIELD TO INDUCE INVOLUNTARY FATIGUE IN STRUGGLING PREY. CURRENT BIOLOGY 25, 2015, UND NACH CATANIA, K.C.: THE SHOCKING PREDATORY STRIKE OF THE ELECTRIC EEL. SCIENTIFIC AMERICAN, NOVEMBER 2019

stoff- und Kunststoffstäben, um Einflüsse der visuellen Wahrnehmung auszuschließen. Tatsächlich wurden stets nur die Objekte aus Kohlenstoff angegriffen. Darüber hinaus konfrontierte ich die Zitteraale mit einer sich schnell drehenden Scheibe, in deren Oberfläche ein einziger kleiner Leiter neben einer Reihe identisch aussehender Nichtleiter eingebettet war (siehe Bilder S. 35). Die Leistung der Fische war unglaublich: Sie identifizierten während der Hochspannungssalve den elektrischen Leiter mit einer Geschwindigkeit und Genauigkeit, die allem weit überlegen ist, was von anderen Tieren mit aktiver Elektrozepktion bekannt ist. Es bestand kein Zweifel mehr, dass Zitteraale Hochspannung gleichzeitig als Waffe und als Teil eines sensorischen Systems benutzen. Mein Respekt vor den Tieren wuchs von Tag zu Tag. Dies sollte sich noch als mein Glück erweisen, da ihr nächster Trick gegen mich gerichtet war.

Im März des Jahres 1800 heuerte der preußische Naturforscher Alexander von Humboldt Fischer im Amazonasgebiet an, um Zitteraale für seine Experimente zu fangen. Die Arbeiter trieben 30 Pferde und Maultiere in einen Tümpel. Daraufhin sprangen die Zitteraale aus dem Schlamm auf und attackierten die Tiere wiederholt mit Elektroschocks. Die Fischer trieben die verängstigten Pferde immer wieder zurück ins Wasser, bis die Zitteraale völlig erschöpft waren und gefahrlos eingesammelt werden konnten. In dem grausigen Durcheinander starben zwei Pferde, andere brachen noch am rettenden Ufer zusammen. Humboldt veröffentlichte 1807 einen Bericht über das Spektakel, und die Geschichte trug nicht unwesentlich zu seinem

Ruhm bei. Spätere Gelehrte waren jedoch skeptisch. Warum sollten Zitteraale gegen so große Tiere, die sie ohnehin nicht fressen konnten, in die Offensive gehen und dabei Verletzungen riskieren? 200 Jahre lang gab es keine weiteren dokumentierten Fälle eines solchen Verhaltens – bis ich eines Tages den falschen Kescher wählte, um ein Exemplar in meinem Labor zu fangen.

In der Regel springen Zitteraale nicht aus ihrem Aquarium. Nähert man sich jedoch einem in die Ecke getriebenen Tier mit einem leitfähigen Objekt, das aus dem Wasser ragt, greift der Zitteraal an. Ich entdeckte dieses Verhalten, als ich versuchte, einen der Fische in ein neues Aquarium zu überführen. Ich wollte ihn mit einem Netz herausholen, das in Metall eingefasst war. Augenblicklich schraubte sich der Jäger aus dem Wasser und sprang mit dem Kiefer an den Metallgriff, während er eine lange Salve von Hochspannungsimpulsen ausstieß. Glücklicherweise trug ich einen Schutzhandschuh aus Gummi. Dieses Verteidigungsverhalten konnte ich bei jedem daraufhin untersuchten Zitteraal feststellen.

Allmählich fügten sich die vielen Teile des Puzzles zusammen. Wenn Zitteraale kleine elektrische Leiter als Beute interpretieren, dann liegt es nahe, dass sie herannahende, teilweise eingetauchte, große Objekte als bedrohlichen Feind wahrnehmen – beispielsweise als ein Krokodil. Wegschwimmen ist nicht immer möglich: Im Amazonasgebiet werden Zitteraale in der Trockenzeit oft in kleinen Tümpeln eingeschlossen. Das ist genau die von Humboldt berichtete Situation. Da sich unter Wasser ein Stromschlag aus der Distanz nicht ausrichten oder dosieren lässt, scheint die Entwicklung einer so verblüffenden Verteidigungsstrategie wie von dem Naturforscher beobachtet nur folgerichtig.

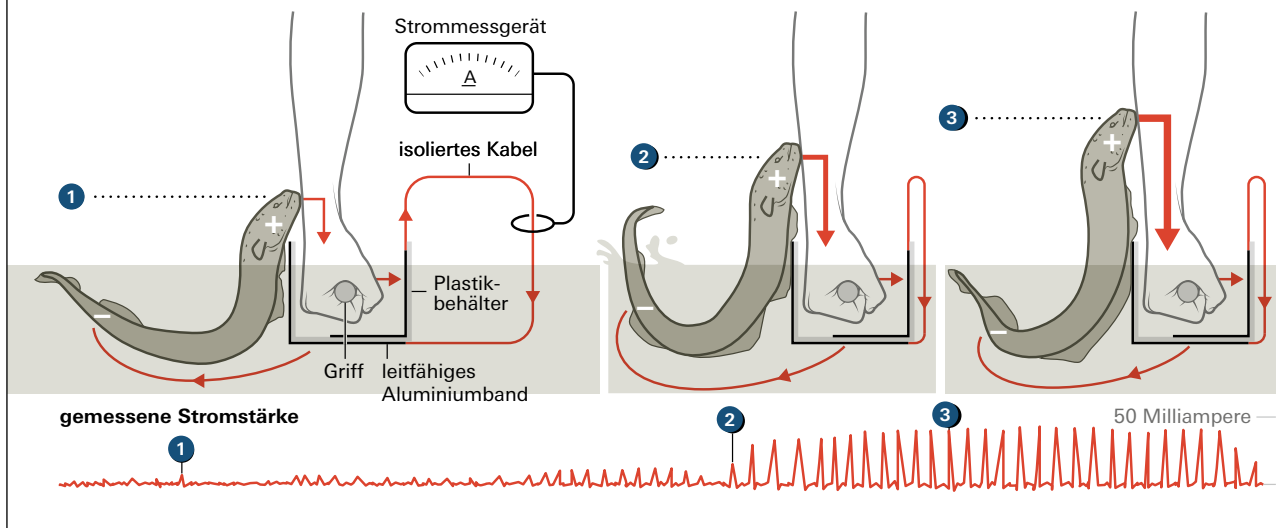
Wenn künstliche Gliedmaßen und Leuchtdioden ein lebendes Opfer nicht ersetzen können

Für eine Reihe weiterer Experimente zum Sprungverhalten der Aale brauchte ich künstliche Gliedmaßen. Es gibt Dinge, die sind der Einkaufsabteilung einer Universität nur schwer zu erklären, und abgetrennte Zombie-Arme fallen geradewegs in diese Kategorie. Daher hielt ich es für besser, im Kostümgeschäft mein eigenes Geld zu investieren. Nachdem ich das falsche Blut von den Kunststoffarmen abgeschrubbt hatte, montierte ich daran Leuchtdioden und hielt das ganze Konstrukt den Zitteraalen hin. Während die Tiere springend ihr Verteidigungsverhalten demonstrierten, leuchteten die Lämpchen – umso mehr und umso heller, je höher der Fisch aus dem Wasser seines Tanks schnellte.

Um zu untersuchen, was genau dabei elektrisch passiert, musste ich zunächst die so genannte Ersatzschaltung ermitteln, einen vereinfachten Plan der verschiedenen Komponenten. Ich wollte die Spannung beziehungsweise die elektromotorische Kraft des elektrischen Organs des Zitteraals bestimmen und berechnen, wie stark die Materialien im Stromkreis den Widerstand beeinflussen. Also entwarf ich Experimente, um jede Variable nacheinander zu messen, angefangen mit dem elektrischen Organ. Mit knapp einem Meter Länge hatte das größte Tier in meinem Labor ein elektrisches Potenzial von 382 Volt und einen

Die beste Verteidigung

Zitteraale springen aus dem Wasser, wenn sie bedroht werden. Das maximiert den Strom, der durch das Gegenüber fließt. Um das für den Fall eines Menschen zu messen, hat der Autor ein Experiment entworfen, in dessen Verlauf er einem Jungtier seinen eigenen Arm anbot. Sobald der Zitteraal aus dem Wasser aufsteigt, fließt der Strom anders als unter Wasser, und zwar vor allem direkt durch das Ziel ①. Eine größere Höhe verstärkt die Wirkung ②. Schließlich betrug der Strom durch den Arm ungefähr 43 Milliampere ③. Auf den Schlag hin wich der Autor reflexartig zurück. Ein ausgewachsenes Tier kann noch wesentlich mehr Energie aufbringen.



MATTHEW TWOMBLY: NACH CATANIA, K.C.: POWER TRANSFER TO A HUMAN DURING AN ELECTRIC EEL'S SHOCKING LEAP. CURRENT BIOLOGY 27, 2017 / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2015

Innenwiderstand von bloß 450 Ohm. Das machte Ströme von fast einem Ampere möglich, sofern keine anderen Widerstände vorhanden waren. Das ist ein ziemlich kräftiger Stromschlag – ein Taser liefert nur einen Bruchteil davon.

Luft ist ein schlechter Leiter. Wenn der Zitteraal aus dem Aquarium schießt und seinen Kopf gegen das Opfer drückt, fließt der Strom von dort bis zum Schwanz nicht mehr durch Wasser, sondern lediglich durch das Zielobjekt: zum umso größeren Teil, je höher der Fisch herausschnellt. Das System ähnelt in bemerkenswerter Weise einem Lautstärkereglern. Der Zitteraal erhöht je nach Bedarf kontinuierlich die Wirkung seiner Elektroschocks. Die Beobachtung erklärt, wie sich das Verhalten allmählich evolutionär entwickelt haben könnte, da jede weitere Steigerung der Sprunghöhe einen Vorteil bietet. Wie effizient kann der Zitteraal dabei wohl werden?

Beim Ausarbeiten der Details stieß ich auf ein grundlegendes Problem elektrischer Schaltungen: die Berechnung des Stroms, wenn zwei Widerstände nebeneinander angeordnet sind. Es ist eine beliebte Aufgabe in Physikprüfungen, und man muss zur Lösung den Wert beider Widerstände kennen. Den einen, nämlich den zwischen dem Kopf des Zitteraals und der Wasseroberfläche, konnte ich mit Hilfe von Metallplatten messen, die ich angreifen ließ. Der andere Widerstand war der des eigentlichen Zielobjekts, des eingetauchten Arms. Zwar hatte ich Daten für alle anderen Variablen gesammelt, aber diesen letzten Wert konnte ich für den Fall eines lebenden Opfers nur schätzen.

Das war unbefriedigend. Zudem kursierte 2016, gerade als meine ersten Publikationen über die Sprungattacken veröffentlicht worden waren, im Internet ein Video einer solchen Situation. Es zeigte einen großen Zitteraal, der einen Fischer in Südamerika angriff. Dieser war zeitweilig bewegungsunfähig und erholte sich wieder, ähnlich wie bei der Wirkung eines Tasers. Auf einmal sah ich die realen Auswirkungen des Stromkreises, den ich aus reiner Neugier studiert hatte.

Also entschloss ich mich, meine Vorhersagen an mir selbst zu überprüfen und die letzte Variable mit meinem eigenen Arm zu bestimmen. Dafür wählte ich einen sehr kleinen Zitteraal mit einer elektromotorischen Kraft von 198 Volt und einem Innenwiderstand von 960 Ohm aus. Ich baute außerdem ein Gerät, mit dem ich während des Vorgangs den durch meinen Arm fließenden Strom messen konnte. So klärte ich die Details des Schaltplans schließlich auf – und spürte am eigenen Leib, wie effektiv die Tiere ihre Leistung hochfahren, wenn sie beim ersten Mal noch nicht ausreicht. ◀

QUELLEN

Catania, K.C.: The shocking predatory strike of the electric eel. *Science* 346, 2014

Catania, K.C.: Electric eels use high-voltage to track fast-moving prey. *Nature Communications* 6, 2015

Catania, K.C.: Power transfer to a human during an electric eel's shocking leap. *Current Biology* 27, 2017

Bewegende Geschichte, spannende Zukunft.



Geschichte, echt spannend.



Neugierig auf morgen.

P.M. Jetzt im Handel.

VIROBIOM NÜTZLICHE BAKTERIENKILLER

In unserem Körper siedeln zahllose Viren. Die meisten von ihnen sind Phagen – und tragen unter anderem dazu bei, unsere bakteriellen Untermieter unter Kontrolle zu halten.



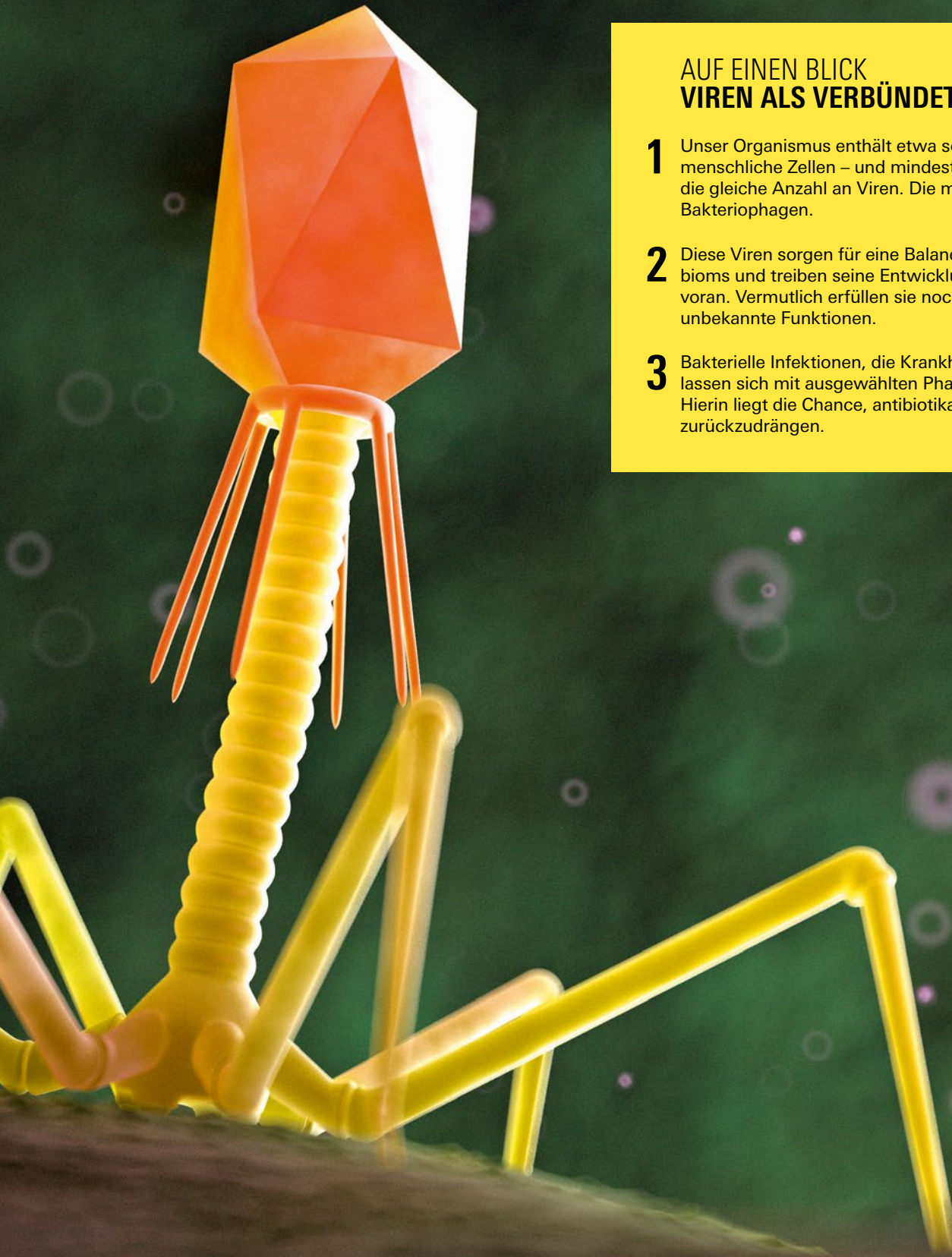
Daniel Bojar ist Biophysiker und arbeitet am Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering der Harvard University.

» spektrum.de/artikel/1725066

▶ Zäher Schleim verklebte die Lunge von Isabelle Carnell-Holdaway. Für das Mädchen, das zu den weltweit rund 70 000 Mukoviszidose-Patienten gehört, war das nichts Neues. Ein angeborener Defekt in einem Protein, das Chlorionen durch die Membranen von Deckgewebezellen schleust, sorgte für die Bildung des viskosen Schleims in ihren Atemwegen – ein typisches Symptom der Mukoviszidose. Das zähflüssige Sekret schränkte die Lungenfunktion ein und bot einen hervorragenden Nährboden für Mikroben, die sich in den Atemwegen ansiedelten. Aus diesem Grund war Isabelle schon seit vielen Jahren mit bakteriellen Keimen – *Mycobacterium abscessus* – infiziert, die ihr Atemorgan so stark schädigten, dass sie mit 16 Jahren bereits eine Lungentransplantation über sich ergehen lassen musste. Leider war die Infektion damit nicht beseitigt, im Gegenteil: Wegen der ständigen Behandlung mit Antibiotika waren die krank machenden Bakterien resistent dagegen geworden und verbreiteten sich im ganzen Körper, als Isabelle infolge der Organverpflanzung immununterdrückende Medikamente nehmen musste. Die Situation schien vollends hoffnungslos zu werden. Keine bekannte Therapie konnte dem Mädchen jetzt noch helfen.

Da kam Isabelles Mutter Jo eine Idee, die sie der behandelnden Ärztin Helen Spencer vom Great Ormond Street Hospital in London mitteilte. Diese tat sich 2018 mit führenden Virenforschern um Graham Hatfull von der University

Bakteriophagen (hier eine Illustration) infizieren Bakterien, indem sie sich an deren Hülle anheften und dann ihr Erbgutmolekül in die Zelle injizieren.



AUF EINEN BLICK VIREN ALS VERBÜNDETE

- 1** Unser Organismus enthält etwa so viele bakterielle wie menschliche Zellen – und mindestens noch einmal die gleiche Anzahl an Viren. Die meisten davon sind Bakteriophagen.
- 2** Diese Viren sorgen für eine Balance unseres Mikrobioms und treiben seine Entwicklung maßgeblich voran. Vermutlich erfüllen sie noch weitere, bislang unbekannte Funktionen.
- 3** Bakterielle Infektionen, die Krankheiten verursachen, lassen sich mit ausgewählten Phagen bekämpfen. Hierin liegt die Chance, antibiotikaresistente Keime zurückzudrängen.

of Pittsburgh in Pennsylvania zusammen, um eine unkonventionelle Therapie auszuprobieren. Sie verabreichten Isabelle so genannte Bakteriophagen – das sind Viren, die Bakterien infizieren.

Schon bald darauf erholte Isabelle sich wieder. Bereits nach drei Tagen der Behandlung mit Phagen gingen ihre Krankheitssymptome deutlich zurück; nach sechs Wochen war sie weitgehend beschwerdefrei.

Wie kommen Forscher darauf, ausgerechnet Viren, sozusagen die Inkarnation von Krankheit, als Arzneistoffe zu verwenden? Welches Potenzial steckt darin, diese infektiösen Partikel gentechnisch zu verändern, wie es in Isabelles Fall geschah? Lassen sie sich damit zu »intelligenten Medikamenten« machen?

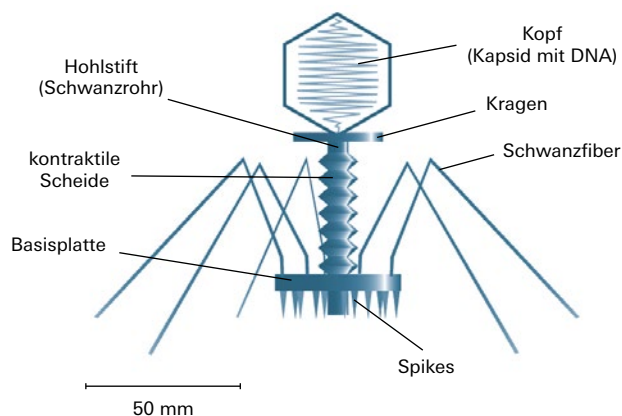
Tatsächlich gehen Viren nicht immer mit Krankheiten einher. Sie sind überall in unserem Organismus zu finden und bereiten oft überhaupt keine gesundheitlichen Probleme. Viele von ihnen wohnen dauerhaft in und auf unserem Körper, ähnlich etwa den Mikroorganismen der Darmflora. Am häufigsten sind sie im Verdauungstrakt anzutreffen – schließlich haust dort schon eine Unzahl von Bakterien, die für uns lebensnotwendige Funktionen der Verdauung und des Stoffwechsels ausüben und zudem verhindern, dass schädliche Mikroben den Darm besiedeln.

Bakterien können sich rasch vermehren; warum nimmt unsere Darmflora dann nicht schon nach kurzer Zeit überhand? Unter anderem wegen der Viren, die uns kolonisieren. Die Bakteriophagen unter ihnen sorgen dafür, dass kein einzelner Stamm unseres Mikrobioms dominieren und die anderen verdrängen kann. Sie dringen in Bakterien ein und setzen sich entweder dauerhaft in deren Erbgut fest, bis die Zeit zur Vermehrung gekommen ist (lysogener Zyklus), oder wandeln ihre Wirte in Fabriken um, die pausenlos neue Viren produzieren, bis sie aufplatzen und die infektiösen Partikel freisetzen (lytischer Zyklus).

Der Mensch als Superorganismus aus Tierzellen, Bakterien und Viren

Bakteriophagen erkennen ihr Ziel an spezifischen Proteinen auf der Bakterienoberfläche. Dies sorgt dafür, dass jede Phagensorte in der Regel nur eine bestimmte Bakterienart in unserem Darm befällt – ein großer Vorteil, wenn Phagen als Arzneistoffe eingesetzt werden. Denn sie sollen dann natürlich nur ganz gezielt krank machende Keime vernichten und nicht die Mitglieder unseres normalen körpereigenen Mikrobioms.

Forscher nahmen früher an, der menschliche Organismus enthalte etwa zehnmals so viele Bakterien wie mensch-



Aufbau eines Bakteriophagen. Mit Hilfe seiner Schwanzfibern und Spikes heftet er sich an die Wirtszelle an. Durch das Schwanzrohr injiziert er dann seine DNA in diese hinein.

liche Zellen. Dabei stützten sie sich auf frühere Untersuchungen von Mikrobiologen. Jedoch waren in diesen die Zellen des Blut bildenden Systems nicht mitgezählt worden, und die stellen das größte Zellreservoir des Körpers. Eine Studie von Wissenschaftlern um Ron Milo vom Weizmann Institute of Science (Israel) hat 2016 ergeben, dass unser Organismus etwa genauso viele bakterielle wie menschliche Zellen enthält, nämlich rund 40 Billionen. Hinzu kommt mindestens noch einmal die gleiche Zahl an Viren, die uns besiedeln, wie unter anderem Forest Rohwer und seine Kollegen von der San Diego State University im Jahr 2003 geschätzt haben. Deren Gesamtheit heißt dann, analog zum Mikrobiom, »Virobiom«.

Die weitaus meisten Viren in uns sind Bakteriophagen, wie schon Rohwer und sein Team zeigten. Sie sind überall dort zu finden, wo sich die Bakterien unseres Mikrobioms aufhalten – am zahlreichsten im Darm. Viren, die menschliche Zellen befallen, halten sich tendenziell an anderen Orten des Körpers auf, etwa im Mund, wobei selbst hier die Phagen überwiegen.

Die Zusammensetzung der viralen Mundflora variiert von Person zu Person sehr stark, aber nicht nur der genetischen Unterschiede wegen, die zwischen Menschen bestehen, sondern auch auf Grund von Umwelteinflüssen. Die Ernährung beispielsweise prägt die Virengemeinschaft in der Mundhöhle sehr stark, ebenso wie das Virobiom eines Partners darauf einen Einfluss hat. Noch ist nicht völlig geklärt, ob wegen Körperkontakt, gemeinschaftlichem Essen oder beidem, aber die viralen Mundflora von Menschen, die in einem gemeinsamen Haushalt leben, gleichen sich einander an. Das haben der Mikrobiologe David T. Pride von der University of California in San Diego und sein Team 2013 gezeigt.

Viren unterliegen der Evolution und können sich infolge rascher Vermehrung in geeigneten Wirten sehr schnell an Veränderungen in der Umwelt anpassen. Das äußert sich beispielsweise darin, dass der Grippeimpfstoff jährlich neu zusammengestellt werden muss, um zu den aktuell zirkulierenden Influenza-Erregern zu passen – denn diese mutieren



FOTOLIA / KATERYNA_KON

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

sehr schnell. Das Virobiom in unserem Darm weist zwar insgesamt über Jahre hinweg eine weitgehend gleich bleibende Zusammensetzung auf, wie der Mikrobiologe Frederic D. Bushman von der University of Pennsylvania und seine Kollegen 2013 herausfanden, doch gilt das den Forschern zufolge nicht für einzelne Arten: Einige Bakteriophagen, die uns besiedeln, können binnen drei Jahren so stark mutieren, dass sie am Ende zu einer neuen Spezies geworden sind.

Außer im Verdauungstrakt siedeln Bakteriophagen noch auf unserer Haut und in den Atemwegen. Hier sind ebenso Viren zu finden, die eukaryotische Zellen befallen – etwa Polyoma-, Papillom-, Picorna- und Coronaviren. Der bereits erwähnte Forest Rohwer und sein Team beobachteten 2009, dass bei Mukoviszidose-Patienten nicht nur die Bakteriengemeinschaft in den verschleimten Atemwegen verändert ist, sondern auch das dortige Virobiom. Und zwar bei unterschiedlichen Erkrankten in ähnlicher Weise – offenbar eine allgemeine Reaktion auf die modifizierte Bakterienbesiedlung.

Bei Gesunden wiederum hängt die Virengemeinschaft in der Lunge anscheinend stark von den Umweltbedingungen

ab. Darauf deuten unter anderem Beobachtungen hin, laut denen das Virobiom im Atemtrakt eines Mannes stark dem seiner Frau glich, die an Mukoviszidose erkrankt war, obwohl der Mann selbst keine Symptome aufwies.

Überraschender Fund im Blut

Während die bisher genannten viralen Lebensräume unseres Organismus – Verdauungstrakt, Atemwege sowie Haut – über Oberflächen in Kontakt zur Umwelt stehen, gilt das für den Blutstrom nicht. Dieser besitzt keinerlei frei zugänglichen Abschnitte und galt unter Medizinern deshalb lange als steriler Teil des Organismus. Umso überraschender war es, als Wissenschaftler um Forest Rohwer und Mya Breitbart im Jahr 2005 Viren im Blut gesunder Menschen nachwiesen – und zwar sowohl Bakteriophagen wie infektiöse Partikel, die eukaryotische Zellen befallen. Darunter waren das Torque-Teno-Virus und das SEN-Virus, denen sich bislang keine spezifische Erkrankung zuordnen lässt. Beide sind eher in der Mundhöhle ansässig, daher spekuliert das Team, dass sie über die Mundschleimhaut ins Kreislaufsystem vordringen. Sicher ist das allerdings nicht.

Abgestimmte Attacken

Viren tauschen Botschaften untereinander aus und koordinieren damit ihre Angriffe auf Zellen. Zu dieser erstaunlichen Erkenntnis kam im Jahr 2017 ein Team um Rotem Sorek vom Weizmann Institute of Science (Israel). Die Forscher beobachteten, wie Heubazillen (*Bacillus subtilis*) von verschiedenen Bakteriophagentypen infiziert werden. Dabei stellten sie fest, dass diese Viren ein winziges Protein namens Arbitrium freisetzen, sobald sie eine Wirtszelle befallen. Je häufiger das geschieht, umso mehr von dem Protein sammelt sich im Umgebungsmedium an. Darauf reagieren die Bakteriophagen: Überschreitet die Arbitrium-Konzentration einen bestimmten Wert, dann wechseln sie vom lytischen in den lysogenen Zyklus – sie hören also auf, ihre Wirte zur pausenlosen, zellzerstörenden Virenproduktion anzutreiben, und beginnen damit, sich ins Erbgut der Zellen zu integrieren und dort eine Art Ruhezustand einzunehmen.

Dieses Verhalten ist sinnvoll. Denn wenn ein Phage ein Bakteri-

um kapert und dabei Arbitrium-Moleküle in die Umgebung entlässt, signalisiert er anderen Viren damit: »Ich habe ein Opfer gefunden.« Trifft diese Botschaft sehr häufig ein, dann hat es offensichtlich viele Opfer gegeben, so dass die noch nicht befallenen Wirte selten zu werden drohen. In dieser Situation ist es für die Phagen von Vorteil, in den weniger aggressiven Reproduktionszyklus zu wechseln, um nicht ihre eigene Vermehrungsgrundlage zu zerstören.

Sorek und sein Team haben später noch viele weitere Phagentypen gefunden, die mit Hilfe kleiner Proteine untereinander kommunizieren. Jeder von ihnen scheint dabei seine eigene molekulare Sprache zu benutzen. Noch merkwürdiger ist, dass Viren mitunter selbstlos agieren, wie zwei Teams um Stineke van Houte von der University of Exeter und Joseph Bondy-Denomy von der University of California im Jahr 2018 erkannt haben. Demnach stellen manche Phagen so genannte Acr-Proteine her, mit denen sie

die Immunabwehr ihrer bakteriellen Wirtszellen überwinden. Allerdings ist ein einzelnes Virus zu schwach dafür. Es kommt deshalb zu mehreren Angriffswellen: Die zuerst attackierenden Viren fallen dem bakteriellen Immunsystem zum Opfer, erschöpfen es dabei aber – und ebnen so den Weg für die zweite Welle, die das Bakterium überwältigt. Andere Forscher haben sogar davon berichtet, Gruppen von Rotaviren würden gemeinsam kleine Bläschen (»Vesikel«) als Transportvehikel nutzen, um ihre tierischen Wirtsorganismen zu befallen.

Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Bondy-Denomy, J. et al.: Bacteriophage cooperation suppresses CRISPR-Cas3 and Cas9 immunity. *Cell* 174, 2018

Sorek, R. et al.: Communication between viruses guides lysis-lysogeny decisions. *Nature* 541, 2017

Van Houte, S. et al.: Anti-CRISPR phages cooperate to overcome CRISPR-Cas immunity. *Cell* 174, 2018

Deutlich mehr Viren im Blut finden sich bei immunsupprimierten Patienten, wie etwa Stephen R. Quake von der Stanford University und seine Kollegen 2013 festgestellt haben. Das körpereigene Abwehrsystem ist beispielsweise infolge einer HIV-Infektion oder einer Chemotherapie geschwächt; nach Organtransplantationen wird das auch absichtlich medikamentös herbeigeführt. Das Immunsystem hat es dann anscheinend deutlich schwerer, eindringende Viren zu erkennen und zu bekämpfen.

Um Viren im Körper nachzuweisen und zu untersuchen, setzen Forscher auf Methoden der Metagenomik. Das heißt, sie extrahieren aus Körperproben möglichst sämtliches genetisches Material (meist in Form von DNA) und sequenzieren es, um zu ermitteln, von welchen Organismen es stammt und wie zahlreiche diese in der Probe vertreten sind. Bei Bakterien funktioniert das sehr gut, da deren Erbmoleküle immer aus DNA bestehen. Viren dagegen enthalten mitunter RNA als Träger der Erbinformation und fallen deshalb oft durchs Raster gängiger Metagenomik-Verfahren. Zwar kann man mit existierenden Methoden durchaus RNA-Viren detektieren, dies ist aber deutlich schwerer, da man dann zwischen ihnen und der Boten-RNA von DNA-Viren unterscheiden muss. Deshalb haben bisherige Studien die Größe des menschlichen Virobioms wohl unterschätzt, indem sie zahlreiche RNA-Viren nicht erfassten.

Mittlerweile gibt es keinen Zweifel mehr daran, dass das bakterielle Mikrobiom uns in vielerlei Hinsicht beeinflusst. Höchstwahrscheinlich gilt das ebenso für unser Virobiom. Doch auf welche Weise? Laut Tierversuchen haben steril gehaltene Mäuse, die ohne Mikrobiom aufwachsen, ein stark verändertes Immunsystem. Denn die Bakterienflora wirkt daran mit, die Immunabwehr zu »erziehen«: Die

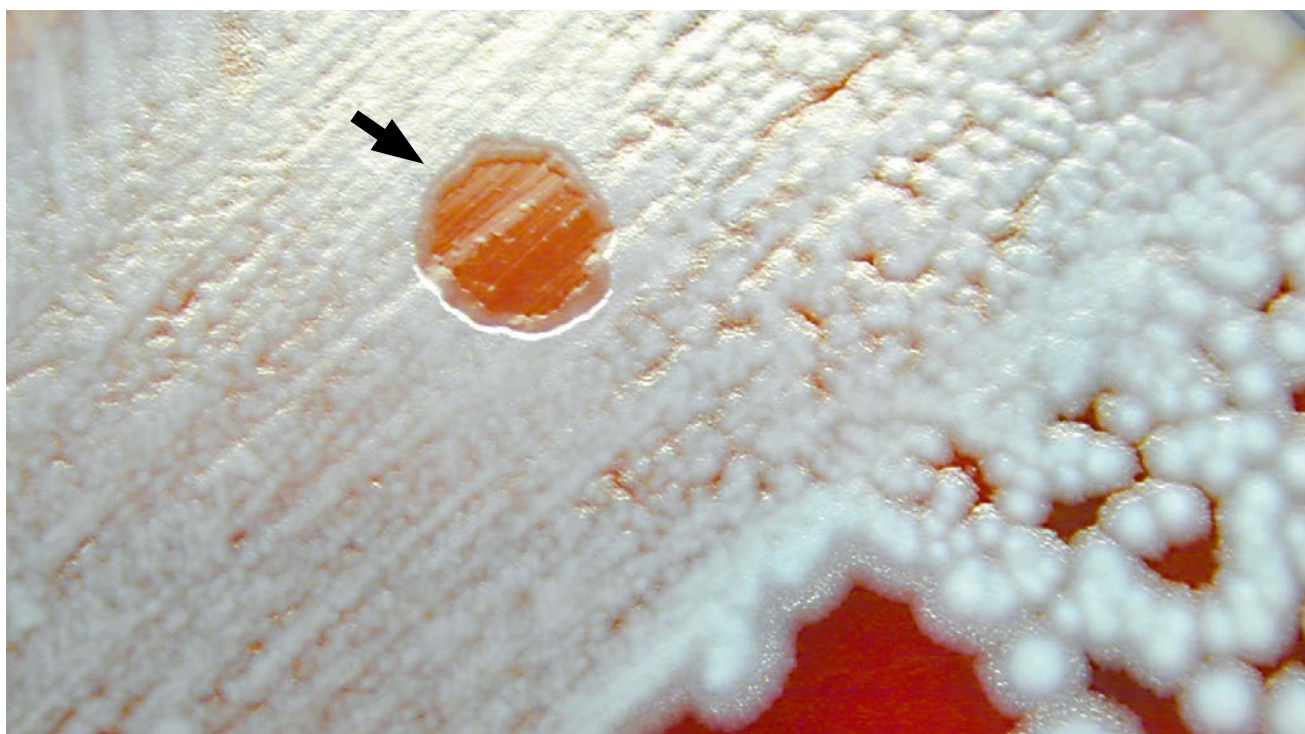
Wie Phagen ihre bakteriellen Wirte dezimieren, lässt sich in Experimenten demonstrieren. Hier haben Bakteriophagen ein Loch (einen »Lysehof«, Pfeil) in eine Kultur von *Bacillus anthracis* gefressen.

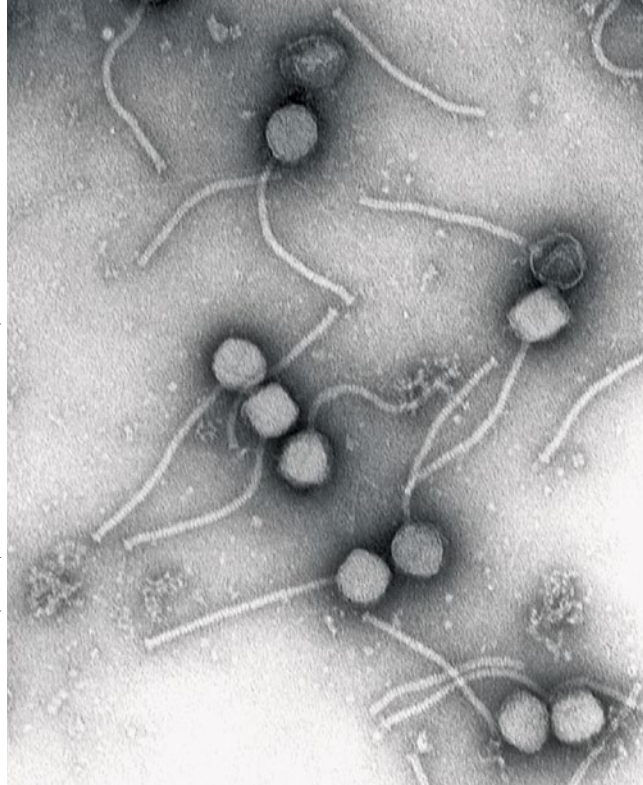
Abwehrzellen des Körpers lernen, sowohl den eigenen Organismus als auch das Mikrobiom zu verschonen. In ähnlicher Weise beeinflusst das Virobiom unsere Immunabwehr, damit es dauerhaft in und auf uns siedeln kann, ohne vernichtet zu werden.

Die Phagen in unserem Verdauungstrakt sorgen nicht nur für eine Balance des bakteriellen Mikrobioms, sondern treiben ebenso dessen Entwicklung voran. Lysogene Phagen, die sich ins Genom ihrer Wirtszellen einbauen, beschleunigen deren Evolution – denn sie sorgen einerseits für mehr Änderungen im Erbgut und zwingen die Bakterien andererseits dazu, Schutzmechanismen gegen die infektiösen Partikel zu entwickeln. Zudem transportieren sie gelegentlich Gene zwischen den Mikroben hin und her. Dabei handelt es sich unter anderem um Erbanlagen, die Stoffwechselfunktionen erfüllen oder ihren Trägern Antibiotikaresistenzen verleihen.

Gut für dich, gut für mich: Wenn Parasiten ihren Wirtsorganismen helfen

Das Virobiom erfüllt manch überraschende Funktion. So wiesen Rohwer und seine Kollegen in Bakteriophagen, die Mukoviszidose-Patienten besiedeln, bestimmte Gene nach, die für Enzyme eines sauerstofffreien (anaeroben) Stoffwechsels codieren. Da es in dem zähen Lungenschleim dieser Patienten an Sauerstoff mangelt, sind entsprechende Enzyme wichtig für die dort siedelnden Bakterien und somit auch für deren Phagen. Frederic D. Bushman und sein Team haben 2011 zudem belegt: Phagen, die dauerhaft im Darm vorkommen, vermitteln ihren bakteriellen Wirtszellen nützliche Enzyme für den Kohlenhydrat- und Aminosäurestoffwechsel. Offenbar profitieren die Viren davon, wenn es den Mikroben gut geht. Schließlich haben Forscher um Michel Favre vom Institut Pasteur in Paris 2009 berichtet, das Virobiom stehe mutmaßlich mit der Wundheilung in Verbindung: Eine besondere Art der Papillomviren namens Beta-HPV könne Keratinozyten (Horn bildende Zellen der Oberhaut) zu starker Vermehrung anregen und so am Wundverschluss mitwirken.





Viruspartikel von Bakteriophagen (*Bacillus phage Gamma isolate d'Herelle*), aufgenommen mit einem Transmissions-Elektronenmikroskop.

Wahrscheinlich werden mit fortschreitender Erforschung des Virobioms weitere Funktionen bekannt werden. Und dann gibt es natürlich noch die Möglichkeit, dem Mikro- oder Virobiom bestimmte Fähigkeiten künstlich zu verleihen – im Rahmen der synthetischen Biologie. Durch Modifizieren bestehender Erbanlagen oder das Einführen neuer Gene lassen sich Bakterien oder Viren zielgerichtet verändern, was ganz neue Therapieverfahren ermöglicht. Das war zum Beispiel der Fall bei der Phagentherapie der jungen Isabelle Carnell-Holdaway. Zu den Vorteilen hierbei zählt, dass unser Organismus dauerhaft von zahllosen Phagen besiedelt ist, weshalb sie für den Körper grundsätzlich nichts Fremdes sind. Und weil sie meist spezifisch nur eine Bakterienart infizieren, erlauben sie es, krank machende Mikroben gezielt zu vernichten, ohne das restliche Mikrobiom zu schädigen (wie es bei Antibiotika der Fall ist).

Die Mediziner um Graham Hatfull und Helen Spencer wählten für die Behandlung Isabelles nicht nur eine Phagenspezies aus, sondern drei verschiedene, um die krank machenden Keime möglichst effektiv zu bekämpfen und zugleich zu verhindern, dass diese resistent gegen die Therapie werden. Sie begannen mit einer Auswahl von 10000 Phagen, von denen bekannt ist, dass sie das Bakterium *Mycobacterium smegmatis* infizieren können – einen Verwandten von *Mycobacterium abscessus*, den Erreger von Isabelles Krankheit. Drei dieser Virenarten konnten in den Versuchen auch *M. abscessus* angreifen. Eine davon, als »Muddy« bezeichnet, setzten die Mediziner in natürlicher Form ein, die anderen beiden veränderten sie mit gentechnischen Methoden, um ihnen höhere therapeutische Wirksamkeit zu verleihen. Aus dem Genom des Bakteriophagen ZoeJ entfernten sie ein Repressorgen, das des-

sen Aktivität drosselt, und vom Phagen BP erzeugten sie eine mutierte Variante mit höherer Infektionsrate. Mit diesem Virecocktail konnten sie den *M. abscessus*-Stamm, der Isabelle infiziert hatte, besiegen. Für andere Bakterienstämme müsste man allerdings wieder eine neue Mischung von gegebenenfalls modifizierten Phagen finden, um eine ausreichende therapeutische Wirkung zu erzielen. Das ist der Nachteil eines solchen zielgerichteten, individuell zugeschnittenen Ansatzes.

Kampf gegen bakterielle Biofilme

Wissenschaftler forschen bereits an weiteren Formen der Phagentherapie. Dabei geht es beispielsweise darum, bakterielle Biofilme aufzulösen – Schleimschichten, in denen die Mikroben eingebettet und vor äußeren Einflüssen wie Antibiotika geschützt sind. James J. Collins von der Boston University und Timothy K. Lu haben das 2007 demonstriert, indem sie Bakteriophagen mit biofilmbauenden Enzymen ausstatteten und gegen solche Schleimschichten einsetzten, woraufhin diese sich fast vollständig auflösten. Ein anderes Team um den Genetiker Rob Lavigne von der Katholischen Universität Löwen in Belgien versucht, gramnegative Bakterien zu bekämpfen, die mit einer zusätzlichen Lipidschicht ausgestattet und daher sehr widerstandsfähig sind. Bakteriophagen verfügen über Enzyme, die bakterielle Zellhüllen durchdringen können. Indem Lavigne und sein Team solche Enzyme mit Hilfe von Protein-Engineering-Verfahren zielgerichtet veränderten, entwickelten sie im Jahr 2014 so genannte Artilysine: Moleküle, welche die Lipidschicht überwinden und krank machende Bakterien binnen 30 Minuten zersetzen.

Phagentherapien können vielleicht einmal zu einer mächtigen Waffe im Kampf gegen antibiotikaresistente Bakterien werden, wie das Beispiel von Isabelle zeigt. Doch bis dahin gilt es noch etliche regulatorische Hürden zu überwinden. Es muss sichergestellt sein, dass solche therapeutischen Bakteriophagen nicht zur Verbreitung von Antibiotikaresistenzgenen beitragen sowie jeweils gezielt nur den gewünschten Bakterienstamm attackieren. Die Werkzeuge, um diese Herausforderungen zu bewältigen, gibt es grundsätzlich schon heute, doch es liegt noch viel Arbeit vor den Forschern. ◀

QUELLEN

- Breitbart, M., Rohwer, F.:** Method for discovering novel DNA viruses in blood using viral particle selection and shotgun sequencing. *Biotechniques* 39, 2005
- Bushman, F.D. et al.:** Rapid evolution of the human gut virome. *PNAS*, 2013
- Hatfull, G.F. et al.:** Engineered bacteriophages for treatment of a patient with a disseminated drug-resistant *Mycobacterium abscessus*. *Nature Medicine* 25, 2019
- Lu, T.K., Collins, J.J.:** Dispersing biofilms with engineered enzymatic bacteriophage. *PNAS* 104, 2007
- Pride, D.T. et al.:** Association between living environment and human oral viral ecology. *ISME J* 7, 2013
- Quake, S.R. et al.:** Temporal response of the human virome to immunosuppression and antiviral therapy. *Cell* 155, 2013

MEDIZIN BLICK IN DEN KÖRPER

Die Entdeckung der Röntgenstrahlen läutete die klinische Bildgebung ein – und ermöglichte das äußerst leistungsfähige Verfahren der Computertomografie.



Stefan Wesarg (links) ist Physiker und promovierter Informatiker. Er leitet die Abteilung »Visual Healthcare Technologies« am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD in Darmstadt. **Emmanuelle Vaniet** ist promovierte Biologin und Journalistin in Darmstadt.

» spektrum.de/artikel/1725068

Als Wilhelm Conrad Röntgen im November des Jahres 1895 die X-Strahlen entdeckte, ahnte er noch nicht, zu welch dramatischem Sprung er der Medizin damit verhalf. Er hatte eine Kathodenstrahlröhre mit Strom versorgt, worauf daneben liegendes phosphoreszierendes Papier plötzlich zu leuchten angefangen hatte. Kurze Zeit später nutzte er die Strahlen, um die Handknochen seiner Frau Anna Bertha als Schattenriss auf einem Fluoreszenzschirm abzubilden. Anfang 1896 präsentierte Röntgen seine Entdeckung vor der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in Würzburg und durchleuchtete diesmal die Hand Albert von Koellikers, des Ehrenpräsidenten der Gesellschaft. Koelliker war vom Anblick seiner eigenen Knochen stark beeindruckt und erkannte als Anatom und Physiologe nicht nur, dass man dadurch Veränderungen am Knochengüst darstellen könne – sondern auch, dass dies einen Paradigmenwechsel in der Medizin bedeutete.

Seither haben sich die »Röntgen'schen Strahlen«, wie sie auf Koellikers Vorschlag hin im Deutschen genannt wurden

(im Englischen heißen sie weiterhin »x-rays«) weltweit als überaus wichtiges Mittel der Medizindiagnostik etabliert – nicht nur bei Untersuchungen des Knochenapparats, sondern ebenso der Lunge, der Brust, der Zähne, des Magen-Darm-Trakts, des Herzens oder der Blutgefäße. Die Röntgenbildgebung läuft meist wie folgt ab:

► In einer so genannten Röntgenröhre legt man zwischen zwei Elektroden eine Hochspannung im Bereich von 10 bis 150 Kilovolt an. Aus einer der Elektroden, der Kathode, treten Elektronen aus und bewegen sich in Richtung der anderen Elektrode, der so genannten Anode. Beim Auftreffen auf diese wandelt sich die Energie der Elektronen zu einem kleinen Teil (rund ein Prozent) in Röntgenstrahlung um, die seitlich aus der Röhre austritt.

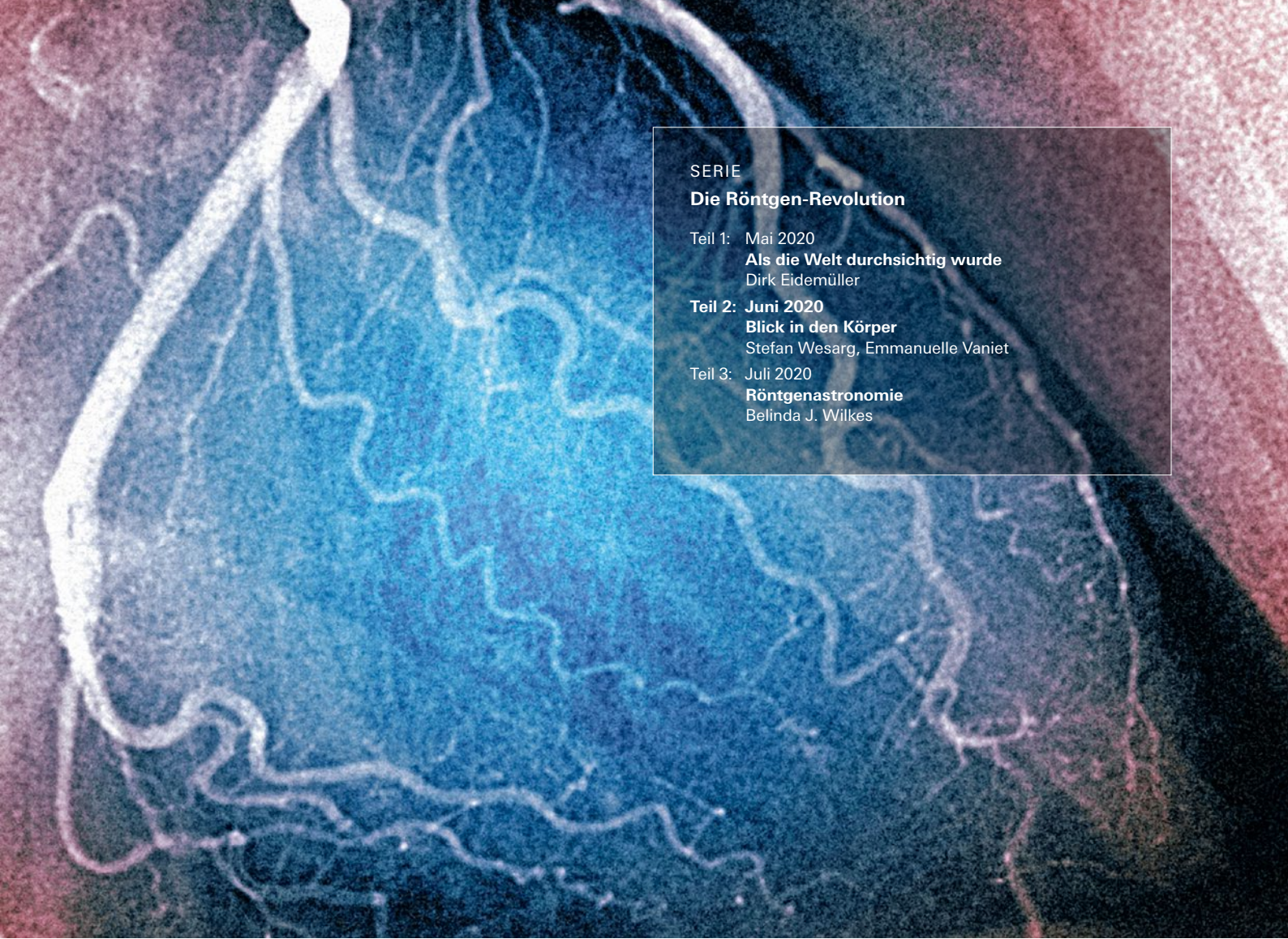
► Trifft die Röntgenstrahlung nun auf ein Medium wie menschliches Gewebe, nimmt dieses die Strahlung zum Teil auf (»Absorption«) und vermindert damit den Anteil, der das Medium durchdringt. Maßgeblich dafür ist, welche Wegstrecke die Strahlen in dem jeweiligen Objekt zurücklegen müssen und wie stark es absorbiert.

► Ein Detektor fängt die durch das Objekt hindurch getretene, abgeschwächte Röntgenstrahlung auf und erfasst die Stärke der Strahlung.

Was dabei auf dem Detektor entsteht, ist eine Projektion des aufzunehmenden Objekts. Jeder Bildpunkt entspricht der Gesamtabsorption eines Strahls, der das Objekt durchdrungen hat. Das Röntgenbild eines Körperteils stellt somit viele hintereinander liegende Strukturen dar, wodurch deren Umrisse oft nicht scharf begrenzt sind. Große Unterschiede in dem Anteil der Strahlung, die das Objekt passieren kann, finden sich vor allem dort, wo starke Dichteabweichungen bestehen – etwa zwischen Luft (kaum Absorption), Muskel- oder Fettgewebe (mittlere Absorption) sowie Knochen oder Zähnen (starke Absorption). Deshalb spielt die klassische Röntgendiagnostik vor allem dann eine Rolle, wenn Ärzte die Lunge, das Skelett oder den Zahnapparat

AUF EINEN BLICK REVOLUTION IN DER DIAGNOSTIK

- 1 Die Entdeckung der Röntgenstrahlen ermöglichte es, in den Körper zu blicken, ohne ihn zu öffnen.
- 2 In den 1960er Jahren entwickelte der Brite Godfrey Hounsfield die Technik entscheidend weiter, indem er die Grundlagen der Computertomografie (CT) legte.
- 3 Dank ständiger Verbesserung erlaubt es die CT heute, binnen weniger Sekunden hochauflösende Bilder vom Körperinneren zu liefern.



SERIE

Die Röntgen-Revolution

Teil 1: Mai 2020
Als die Welt durchsichtig wurde
Dirk Eidemüller

Teil 2: Juni 2020
Blick in den Körper
Stefan Wesarg, Emmanuelle Vaniet

Teil 3: Juli 2020
Röntgenastronomie
Belinda J. Wilkes

Bei einer Koronarangiografie der Herzkranzgefäße spritzen die Ärzte ein Kontrastmittel in den Blutkreislauf, so dass die blutgefüllten Gefäße mehr Röntgenstrahlung absorbieren. Dadurch heben diese sich stärker vom umgebenden Gewebe ab.

untersuchen. 2014 entfielen in Deutschland 40 Prozent der Röntgenuntersuchungen auf die Zahnmedizin, 29 Prozent betrafen das Skelett und 10 Prozent den Bereich des Brustkorbs. Bis heute stellt also die Analyse von Knochenstrukturen einen Schwerpunkt der Röntgendiagnostik dar.

Mehr Kontrast, mehr Erkenntnis

Eine spezielle Form der Röntgenbildgebung ist die so genannte Koronarangiografie, die seit den 1960er Jahren zur Herzkreislaufmedizin gehört. Dabei machen Mediziner die feinen Herzkranzgefäße sichtbar, indem sie deren Absorption mit Hilfe eines jodhaltigen Kontrastmittels verstärken. Hierfür schieben sie einen Katheter – meist von einer Arterie in der Leistengegend aus – in Richtung des Herzens vor, um das Kontrastmittel zielgerichtet in das darzustellende Gefäß einzubringen. Die Koronarangiografie ist somit ein invasives Bildgebungsverfahren, wobei das Eindringen in den Körper für Patienten potenzielle Gefahren

birgt. Dennoch hat sie eine große Bedeutung für die Herzdiagnostik erlangt. Mediziner nehmen dabei nicht nur ein einzelnes Bild auf, sondern eine ganze Bildserie, die darstellt, wie sich das Kontrastmittel nach seinem Einspritzen im Blutgefäß verteilt. Das hilft unter anderem, Verengungen der Gefäße zu erkennen, die unbehandelt zu einem Herzinfarkt führen können (siehe Bild oben).

Die Aussagekraft von Röntgenbildern ist allerdings begrenzt. Denn räumliche Strukturen lassen sich aus zweidimensionalen Projektionsbildern nur schwer oder gar nicht rekonstruieren. In den 1960er Jahren versuchte der britische Elektrotechniker Godfrey Hounsfield beim Unternehmen Electric and Musical Industries (EMI) deshalb, die Röntgenmethode derart abzuwandeln, dass sich damit das Körperinnere dreidimensional darstellen lässt. EMI war um diese Zeit nicht nur im Musikbusiness tätig, es war auch an der Entwicklung von Radargeräten und Computern beteiligt. Der Firmenumsatz schoss wegen der enormen Erfolge der Beatles, die damals bei EMI unter Vertrag standen, stark in die Höhe. Hounsfield wurde deshalb ein großzügiger Freiraum gewährt, um sich ein Forschungsgebiet nach Wahl auszusuchen, und er wendete sich der Röntgentechnik zu. 1968 entwarf er den ersten Prototyp eines Computertomografen (CT). In dem Gerät waren die Röntgenquelle und der Röntgendetektor miteinander gekoppelt – was

später als »Gantry« für »Portal« oder »Gerüst« bezeichnet wurde – und rotierten gemeinsam um das aufzunehmende Objekt herum (siehe Bild S. 49). So ließ sich dieses aus vielen verschiedenen Winkeln durchleuchten.

Das Wort Tomografie ist zusammengesetzt aus dem griechischen »tomé« (»Schnitt«) und »gráphein« (»schreiben«). Der Begriff beschreibt recht gut das Prinzip dieser Methode: Im Gegensatz zu einer gewöhnlichen Röntgenaufnahme durchleuchten die Mediziner hier nicht mehr den kompletten Querschnitt der interessierenden Körperregion, sondern tasten mit einem flächigen Strahlenbündel eine dünne Schicht daraus ab. Die Strahlung, die den Organismus durchdrungen hat, wird nicht mehr mit einem großflächigen Detektor aufgenommen, sondern mit linear angeordneten, kleinen Detektorelementen – einer so genannten Detektorzeile. Jedes einzelne Element erfasst idealisiert einen einzelnen Röntgenstrahl, der auf seinem Weg durch den Körper mehr oder weniger stark abgeschwächt wurde. Lässt man jetzt die Gantry ein wenig rotieren und macht eine neue Aufnahme, durchleuchtet das Strahlenbündel den Organismus aus einem anderen Winkel. Das Kombinieren mehrerer Absorptionsprofile aus verschiedenen Winkeln erlaubt es, die Dichteverteilung innerhalb der abgetasteten Schicht zu rekonstruieren, also deren innere Struktur. Bewegt man den Patienten ein

kleines Stück senkrecht zur Rotationsebene und wiederholt das ganze Verfahren, erhält man das Schnittbild der nächsten Körperschicht und so weiter.

Während sich die dreidimensionale Struktur des Körperinneren relativ einfach durch Aneinanderreihen der Schnittbilder ergibt, ist deren Gewinnung aus den jeweiligen Röntgenabsorptionsprofilen weitaus komplizierter und stützt sich teilweise auf komplexe mathematische Werkzeuge. Die theoretischen Grundlagen dazu legte der österreichische Mathematiker Johann Radon im Jahr 1917. Er führte eine mathematische Operation ein – die Radon-Transformation –, die das Linienintegral einer Funktion längs aller Geraden innerhalb einer Ebene bestimmt. Ohne von Radons Arbeiten zu wissen, wandte der südafrikanische Physiker Allan McLeod Cormack ähnliche Konzepte auf die Absorption von Röntgenstrahlen in menschlichem Gewebe an und stellte 1964 erstmals Methoden vor, die aus solchen Absorptionswerten die Rekonstruktion eines Querschnittbilds ermöglichen. Hounsfield selbst kannte weder Radons noch Cormacks Arbeiten, und er entwickelte noch einmal unabhängig davon eigene Methoden einer solchen Herleitung.

Wird ein Objekt mit Röntgenstrahlen durchleuchtet, lassen sich mit Hilfe der Radon-Transformation seine Absorptionsprofile berechnen – und zwar anhand der Dichteverteilung des Objekts in der jeweils interessierenden Schicht. Mittels einer Rücktransformation ist auch der umgekehrte Weg möglich, nämlich die Herleitung der Dichteverteilung (also des Schnittbilds) aus den Absorptionsprofilen. Bis heute dient hierfür eine inverse Radon-Transformation namens gefilterte Rückprojektion. Dabei projiziert man die Absorptionsprofile gewissermaßen auf das Objekt zurück, indem man sie entlang der jeweiligen Strahlrichtung über das ganze Bild »verschmiert«. Wiederholt man das mit allen Absorptionsprofilen, die aus verschiedenen Winkeln aufgenommen wurden, und überlagert man alle dabei gewonnenen Rückprojektionen, lässt sich die Dichteverteilung rekonstruieren, allerdings nur verschwommen. Die vorherige Anwendung eines speziellen Filterverfahrens auf die Absorptionsprofile hilft, diese Unschärfe zu korrigieren – daher der Begriff gefilterte Rückprojektion.

Schrittweise Annäherung von der vermuteten an die tatsächliche Struktur

Mittlerweile setzen die Mediziner weitere Rekonstruktionsmethoden ein, die zwar genauer, allerdings rechenintensiver sind. So genannte iterative Techniken starten beispielsweise mit einer bestimmten Annahme über das zu rekonstruierende Bild, berechnen daraus die resultierenden Absorptionsdaten, vergleichen diese mit den echten Daten und verändern das Bild daraufhin, um die Differenz zu verkleinern. Dieser Prozess läuft mehrmals durch, bis die angenommenen Projektionsdaten mit den tatsächlichen Messwerten weitestgehend übereinstimmen.

EMI brachte 1972 den ersten kommerziellen CT-Scanner auf den Markt, vor allem für Untersuchungen im Kopfbereich. Das Gerät ermöglichte es unter anderem, Hirnblutungen von Durchblutungsstörungen zu unterscheiden, entzündliche beziehungsweise altersbedingte Prozesse zu er-

Glossar

Absorption von Röntgenstrahlung: Das Ausmaß, in dem ein Medium, das von Röntgenstrahlen durchdrungen wird, diese Strahlung aufnimmt und somit »verschluckt«. Je (röntgen-)dichter das Material, umso weniger Strahlung lässt es passieren.

Absorptionsprofil: Die von einer Detektorzeile ausgelesenen Absorptionswerte einer Körperschicht, die ein Röntgenstrahlenbündel flächig durchleuchtet.

Detektorzeile: Eine Reihe mehrerer Detektorelemente in einem Computertomografen, die das Röntgenlicht registrieren, das den Patienten durchquert hat.

Gantry: Verbund aus einer Röntgenquelle und einem Detektor(-Arrangement), der in einem Computertomografen um den Patienten rotiert.

Schnittbild: Eine zweidimensionale Aufnahme, die die Dichteverteilung einer dünnen Körperschicht wiedergibt. Sie wird beim Durchleuchten des Körpers mit Röntgen-Fächerstrahlen gewonnen und aus mehreren Absorptionsprofilen berechnet, die aus verschiedenen Winkeln aufgenommen wurden.

Die Hounsfield-Skala

Die Aufnahme eines Computertomografen gibt die Absorptionswerte der Strahlung in der jeweils betrachteten Körperschicht wieder. Das sind allerdings zunächst Rohwerte, die noch normiert werden müssen. Denn sie hängen von der Energie des Röntgenstrahls ab, und diese Energie variiert nicht nur zwischen verschiedenen Geräten, sondern verändert sich auch bei ein

und demselben Gerät während eines Scanvorgangs. Daher speichert das System zu jedem aufgenommenen Schnittbild verschiedene Informationen, die das Einordnen in eine standardisierte Messskala erlauben: die Hounsfield-Skala. Diese ist nach dem Erfinder der Computertomografie Godfrey Hounsfield benannt und erstreckt sich von -1000 bis $+3000$

Hounsfield-Einheiten (HE). Der Nullpunkt dieser Skala ist als der Absorptionswert von Wasser definiert, ihr Minimum entspricht dem Absorptionswert von Luft. Auf einem normierten CT-Bild besitzen Knochen einen Absorptionswert von 1000 HE und mehr, während sich Organe, Muskeln und Fett im Bereich zwischen -220 bis $+100$ HE wiederfinden.

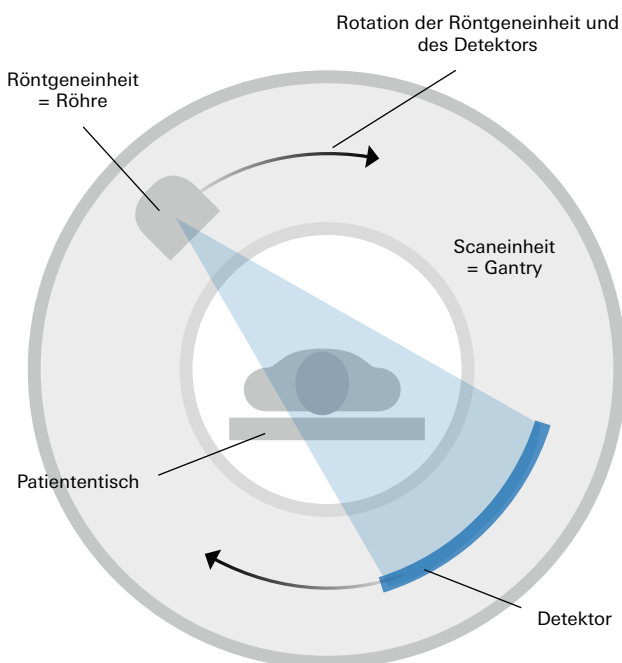
kennen, kleine Tumoren eindeutig zu diagnostizieren und Feinstrukturen zu sehen, die man bis dahin nur bei Autopsien Verstorbener zu Gesicht bekommen hatte. Die Einführung der CT entpuppte sich schon bald als enormer medizinischer Durchbruch; Hounsfield und Cormack erhielten für ihre Verdienste im Jahr 1979 gemeinsam den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Seither werden die Geräte kontinuierlich weiterentwickelt, um möglichst jede Körperregion in hoher Auflösung zu untersuchen – und um die Scanzeiten immer weiter zu verringern, bis in den Bereich weniger Sekunden hinein. Dies ist einerseits wichtig, um die Strahlenbelastung zu minimieren – andererseits aber auch, um Bildstörungen möglichst klein zu halten, die aus Körperbe-

wegungen resultieren (etwa infolge des Atmens) und dadurch Bilder besserer Qualität zu erzeugen.

Ein Meilenstein war die Einführung des Spiralscanners 1987. Bis dahin hatten CT-Geräte ihre Gantry immer einmal vollständig rotiert, bevor der auf dem Untersuchungstisch liegende Patient ein Stück weiter geschoben und das nächste Schnittbild aufgenommen wurde. Der Spiralscanner jedoch, den der Physiker Willi Kalender bei Siemens Medical Systems in Erlangen entwarf, kombiniert ein permanentes Rotieren der Gantry mit einem kontinuierlichen Tischvorschub. Dadurch bewegt sich die Quelle-Detektor-Einheit auf einer Spiralbahn um den Patienten herum, was die Untersuchungszeit erheblich verkürzt. Weil der Patiententisch aber während der Messung vorwärtsfährt, entstehen Bildartefakte, die beim Rekonstruieren der Schnittbilder mittels einer so genannten Interpolation korrigiert werden müssen. Der Computer setzt hier für fehlende Daten zwischen den Absorptionsprofilen gegeneinander versetzter Winkelstellungen auf der Spiralbahn Schätzwerte ein und korrigiert noch andere Werte, die zu Fehlern führen könnten.

Das Verfahren der Interpolation ließ sich mit Mehrzeilen-CTs vereinfachen, die ab Ende der 1990er Jahre zum Einsatz kamen. Statt jeweils nur eine Körperschicht zu untersuchen, durchleuchten diese Geräte mehrere benachbarte Schichten zugleich und nehmen deren Absorptionsprofile entsprechend mit mehreren Detektorzeilen auf. Eine einzelne Rotation der Gantry deckt somit einen breiteren Bereich des Körpers ab, was die Untersuchungszeit deutlich reduziert und zudem bessere Interpolationsmöglichkeiten beim Rekonstruieren der Schnittbilder bietet. Mehrzeilige Spiralscanner erlauben es in vielen Fällen, eine Röntgenuntersuchung in wenigen Sekunden durchzuführen, was somit innerhalb einer Atempause erfolgen kann. Das verbessert die Lungen diagnostik erheblich, hat aber ebenso bei der Herzbildgebung neue Möglichkeiten eröffnet. Findet eine Mehrzeilen-spiral-CT gleichzeitig mit einem Elektrokardiogramm (EKG, der Aufzeichnung der elektrischen Aktivitäten des Herzmuskels) statt, dann lassen sich daraus räumliche Bilder erzeugen, die die unterschiedlichen Phasen des schlagenden Herzens präzise darstellen.

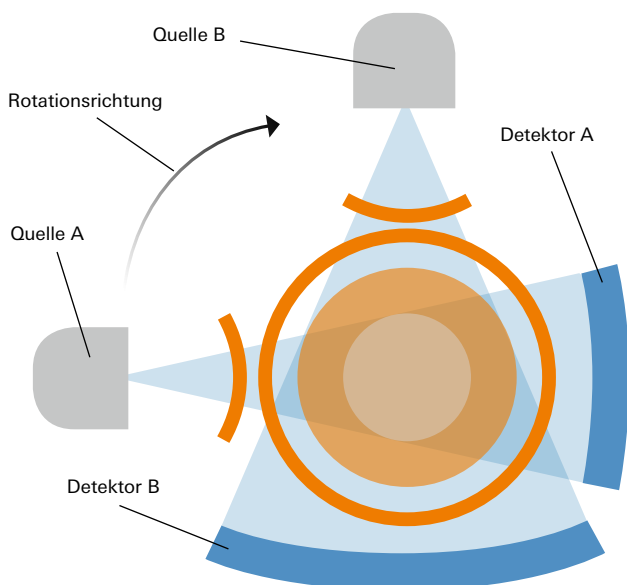
Bei einer Computertomografie rotiert die Gantry um den Patienten und erfasst mit einem Fächerstrahl eine dünne Körperschicht aus vielen verschiedenen Winkelstellungen.



Mehrzeilige Spiral-CT-Geräte erfuhren kurz nach der Jahrtausendwende eine zusätzliche Erweiterung in Form der so genannten Dual-Source-CT. Hier besteht die Gantry nicht mehr nur aus einem Röntgenquelle-Detektor-Paar, sondern aus zwei solchen Paaren, die gegeneinander um 90 Grad verdreht sind (siehe Bild unten). Dies hat zwei Vorteile für die Bildgebung. Zum einen misst das Gerät die Absorptionswerte gleichzeitig aus zwei verschiedenen Winkeln, was die erforderliche Scanzeit weiter reduziert. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die beiden Röntgenquellen mit unterschiedlichen Energien zu betreiben – Fachleute nennen dieses Verfahren Dual-Energy-CT (DECT). Sein großer Pluspunkt: Verschiedene Körpergewebe zeigen bei veränderter Röntgenenergie eine leicht unterschiedliche Abweichung ihres Absorptionsverhaltens. Deshalb lassen sich Gewebe, die auf einem normalen CT-Bild die gleichen Absorptionswerte zeigen und daher schlecht voneinander zu separieren sind, mit DECT durchaus abgrenzen.

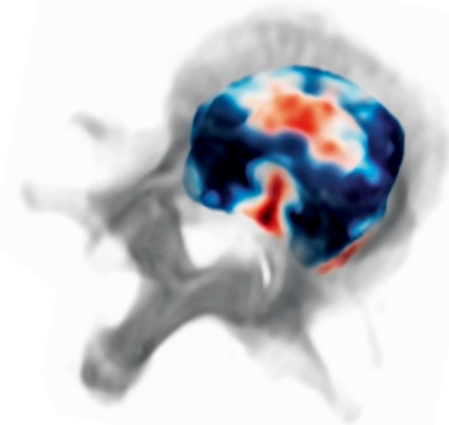
Direkte Anwendung findet das beim Einsatz von Röntgenkontrastmitteln. Denn diese Substanzen sind auf Röntgenbildern oft schwer von dichten Strukturen wie Knochen zu unterscheiden. Allerdings absorbieren viele Kontrastmittel stärker bei niedrigen Röntgenenergien als im hochenergetischen Bereich – und unterscheiden sich darin von Knochen. Es wird damit möglich, nichtknöcherne Objekte niedriger Dichte, die dank des Kontrastmittels stärker sichtbar sind, als solche zu identifizieren. Mit DECT lassen sich unter anderem innere Blutungen besser untersuchen sowie die Zusammensetzung von Nierensteinen oder Knochen präziser bestimmen. Die Arbeitsgruppe von einem von uns (Wesarg) am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt hat Algorithmen zur Drei-D-Bildgebung entwickelt, die unter anderem auf DECT-Daten

Bei der Dual-Source-CT rotieren zwei um 90 Grad versetzte Quelle-Detektor-Paare simultan um den Patienten. Die beiden Röntgenquellen lassen sich dabei mit unterschiedlichen Energien betreiben.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT. NACH: STEFAN WESARG, MINERS.COM / BECOMPUTERTOMOGRAPHYNEWS.INSOBACKTOTHEFUTURE.HTM

Mittels DECT gemessene und rekonstruierte Verteilung der Knochendichte in einem Wirbelkörper. Rote Regionen signalisieren niedrige Dichte und sind ein Hinweis auf Osteoporose.



STEFAN WESARG

basieren. Sie ermöglichen es beispielsweise, die Knochendichte von Wirbelkörpern räumlich und farbcodiert darzustellen, was es Ärzten erlaubt, Bereiche niedriger Dichte zu erkennen – wichtig für Osteoporose-Untersuchungen.

Dass die Patienten bei der Dual-Source-CT die doppelte Strahlendosis erhalten, wie es auf den ersten Blick scheint, stimmt dabei nur teilweise. Zwar bekommen sie pro Rotation der Gantry die doppelte Dosis, verglichen mit der klassischen Computertomografie, da sie gleichzeitig von zwei Quellen bestrahlt werden statt nur von einer. Jedoch ist mit Dual-Source-CT die Zeitersparnis beim Scannen so hoch, dass die insgesamt während der Untersuchung anfallende Dosis kleiner ausfällt als bei der Single-Source-CT.

Nur so gut wie absolut nötig

Ohnehin gehört das Minimieren der Strahlendosis zur Grundregel jeder CT-Untersuchung: Die Ärzte machen nur Aufnahmen, die qualitativ gerade ausreichen, um die jeweilige medizinische Frage zu klären – aber keine besseren Bilder, die eine intensivere Bestrahlung erfordern würden. Die effektive Strahlenbelastung einer CT-Untersuchung liegt derzeit zwischen 1 und 10 Millisievert, das entspricht dem 0,5- bis 5-fachen der Dosis, die eine in Deutschland lebende Person im Mittel pro Jahr auf Grund natürlicher Exposition erhält. Strahlenmediziner schätzen das als ein vertretbares Risiko ein – und die Ärzte arbeiten daran, bei jeder CT-Aufnahme die Strahlintensität an die Anatomie des Patienten anzupassen, um die Dosis weiter zu reduzieren. Dies gelingt ihnen mit verschiedenen Maßnahmen:

- ▶ Da der Querschnitt des menschlichen Körpers eher oval als kreisförmig ist, reduzieren sie die Strahlenintensität beim Durchleuchten des Körpers von vorn oder hinten, verglichen mit dem Durchleuchten von der Seite.
- ▶ Körperbereiche wie den Bauch oder die Lunge, die weniger stark absorbieren, untersuchen sie mit schwächeren Strahlen.
- ▶ Sie achten darauf, außen liegende und empfindliche Organe wie die weibliche Brust zu schonen.
- ▶ Bei Kindern und schlanken Patienten setzen sie von vornherein eine niedrigere Intensität ein als bei beleibten Menschen.

Auch mit Hilfe besserer Rekonstruktionsverfahren lässt sich die verabreichte Dosis verkleinern. Die bereits erwähnten iterativen Techniken nutzen beispielsweise statistische Modelle, die nicht nur die Daten jeweils eines einzelnen

Detektorelemente, sondern auch mehrerer Nachbar-elemente einbeziehen. Dadurch kommen sie mit weniger präzisen Daten aus, was eine geringere Strahlenintensität erlaubt. Durch zusätzliche Modellierung des Rauschverhaltens lässt sich die Dosis insgesamt um bis zu 60 Prozent reduzieren.

Die Herausforderung beim Entwickeln neuer Systeme besteht darin, bei gleich bleibender oder sinkender Dosis die Qualität der aufgenommenen Bilder zu erhöhen. Ingenieure entwickeln hierzu unter anderem neue Detektoren, deren Sensorelemente nur noch ein Viertel der gängigen Größe besitzen und damit die Aufnahme feinerer anatomischer Details ermöglichen. Zudem führen sie künstliche Intelligenz und Deep Learning in die Rekonstruktionsverfahren ein. Dabei lernen Algorithmen anhand tausender qualitativ hochwertiger Aufnahmen, Bildrauschen und -artefakte zu identifizieren und aus den Daten herauszufiltern. Dies hat zu Bildern von noch nie dagewesener Auflösung geführt und die Ära der »ultrahochauflösenden CT« eingeleitet.

Die Entdeckung der X-Strahlen vor 125 Jahren markierte die Geburtsstunde der klinischen Bildgebung – eine Revolution in der Medizin. Sie machte es möglich, ins Innere des Körpers zu blicken, ohne ihn zu öffnen. Und die Einführung der Computertomografie in den 1970er Jahren erschloss eine ganz neue Dimension anatomischer Detailuntersuchungen. Seither verläuft die technische Weiterentwicklung kontinuierlich zu stets besseren Bildqualitäten und geringeren Strahlendosen hin. Heute konkurriert die CT vor allem

mit der Magnetresonanztomografie (MRT), die ohne ionisierende Strahlen auskommt und somit weniger schädlich ist. Bei der Darstellung weicher Gewebe wie Muskeln oder Gehirn kann die MRT bessere Bilder liefern. Allerdings ist sie wegen ihrer langen Aufnahmezeiten, die zwischen 15 und 30 Minuten betragen, vielfach im Nachteil – etwa bei Notfällen oder wenn es um die Untersuchung medizinisch intensiv zu betreuender Patienten geht. Hier bleibt die Computertomografie, deren Scanzeiten im Sekundenbereich liegen, das Mittel der Wahl, zumal sie räumlich hochauflösende Analysen des schlagenden Herzens, der Leber oder der Lunge erlaubt. Bis heute erwecken solche Bilder dieselbe Faszination, die Albert von Koelliker vor 125 Jahren empfand, als er das Skelett seiner Hand erblickte. ◀

QUELLEN

Boedeker, K.: AiCE deep learning reconstruction: Bringing the power of ultra-high resolution CT to routine imaging. Canon Medical Systems Corporation, 2019

Hounsfield, G.N.: Computerized transverse axial scanning (tomography). British Journal of Radiology 46, 1973

Kalender, W.A. et al.: Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. Radiology 176, 1990

Röntgen, W.C.: Über eine neue Art von Strahlen. Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft zu Würzburg. Springer, Berlin, Göttingen und Heidelberg, Jg. 1895 und Jg. 1896



JAHRGANGS CD-ROM 2019

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Tel. 06221 9126-743
service@spektrum.de
Spektrum.de/sammeln

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ AUF DER JAGD NACH NEUEN MEDIKAMENTEN

Seit Jahren steckt die Arzneimittelforschung in der Krise: Es wird immer schwerer, effektive Wirkstoffe zu finden. Viele Pharmakonzerne setzen ihre Hoffnungen deshalb auf künstliche Intelligenz. Aber können die selbstlernenden Algorithmen den Erwartungen standhalten?



David H. Freedman ist ein Wissenschaftsjournalist aus Boston in den Vereinigten Staaten.

► [spektrum.de/artikel/1725072](https://www.spektrum.de/artikel/1725072)

▶ Bevor ein Wirkstoff für den Einsatz beim Menschen zugelassen wird, muss er zahlreiche Tests durchlaufen. Häufig kommt es dabei vor, dass viel versprechende Kandidaten unerwarteterweise doch noch ausscheiden. Einer der Gründe dafür sind die Cytochrome P450 (CYP450): eine Reihe von Enzymen, die hauptsächlich die Leber produziert. Sie zersetzen verschiedene Chemikalien und verhindern dadurch, dass sich diese im Blutkreislauf zu gefährlichen Mengen aufschaukeln. Wie sich herausstellt, hemmen viele Wirkstoffe die Produktion von CYP450, was sie für den Menschen toxisch macht.

Pharmafirmen versuchen daher vorab herauszufinden, welche Kandidaten eine solche Nebenwirkung haben könnten. Unter anderem analysieren sie das potenzielle Medikament im Reagenzglas, vergleichen, wie ähnliche, bereits bekannte Wirkstoffe mit CYP450 reagieren oder

Selbstlernende Algorithmen durchsuchen riesige Datenbanken nach chemischen Verbindungen, die sich als Medikament eignen könnten.



AUF EINEN BLICK KI FÜR PHARMAFORSCHUNG

- 1** Firmen müssen immer mehr Zeit und Geld investieren, um neue Arzneimittel hervorzubringen.
- 2** KI könnte verschiedene Bereiche der Medikamentenentwicklung unterstützen, von der Identifizierung eines schädlichen Proteins bis hin zu einem Molekül, das es blockiert.
- 3** Doch Wissenschaftler warnen vor einem Hype. Noch steckt die Forschung in den Kinderschuhen; kaum eines der Medikamente hat es bisher in das Stadium von Tierversuchen geschafft.

führen Tierversuche durch. Allerdings erweisen sich etwa ein Drittel der so gewonnenen Vorhersagen als falsch. In diesen Fällen zeigen erst Versuche an Menschen, dass sich der Wirkstoff nicht eignet – was hohe Geldsummen und jahrelange Arbeit verschwendet.

Wegen solcher und anderer Schwierigkeiten steckt die Medikamentenentwicklung in der Pharmaindustrie seit mindestens zwei Jahrzehnten in einer Krise. Die Unternehmen geben zunehmend Geld aus – die zehn größten investieren inzwischen fast 80 Milliarden Euro jährlich – und bringen dabei immer weniger erfolgreiche Wirkstoffe hervor. Das hat gleich mehrere Gründe. Zum einen ist das Gebiet abgegrast: Die einfachsten Substanzen, mit denen man häufige Krankheiten behandelt, sind bereits gefunden. Die noch ungelösten Probleme sind extrem komplex. Zudem betreffen viele der anvisierten Erkrankungen nur kleine Teile der Bevölkerung, was zu deutlich niedrigeren Einnahmen führt.

Die durchschnittlichen Kosten für die Markteinführung eines Medikaments haben sich zwischen 2003 und 2013 fast verdoppelt und betragen nun rund 2,3 Milliarden Euro, berichtet das unabhängige Tufts Center for the Study of Drug Development. Auch die Dauer von den ersten Labortests bis zur Zulassung hat sich inzwischen auf zwölf Jahre verlängert. Besonders frustrierend ist dabei, dass etwa 90 Prozent der Medikamente erst in späten Phasen, während der Versuche an Menschen, ausscheiden.

Deshalb interessiert sich die Pharmaindustrie zunehmend für neue Technologien wie künstliche Intelligenz. Solche Algorithmen brauchen keinen Experten, der ihnen genaue analytische Techniken einprogrammiert. Stattdessen übergibt man ihnen zahlreiche Eingangsdaten (etwa Moleküle) und die dazugehörigen Ergebnisse (wie sich die Moleküle als Wirkstoff verhalten). Die Software entwickelt dann eigene Ansätze, um zu erklären, wie die Resultate zu Stande kommen.

90 Prozent der potenziellen Medikamente scheiden erst durch Versuche am Menschen aus

Die Forscher nutzen dabei hauptsächlich zwei verschiedene Formen künstlicher Intelligenz: maschinelles Lernen und das so genannte Deep Learning. Programme aus der ersten Kategorie benötigen geordnete und beschriftete Datensätze, während Deep-Learning-Algorithmen mit unstrukturierten Daten umgehen können – hierbei brauchen sie aber viel größere Mengen. Man kann einem maschinell lernenden Programm zehntausende Bilder beschrifteter Zellen vorsetzen, wodurch es lernt, die verschiedenen Merkmale einer Zelle zu erkennen. Eine Deep-Learning-Version identifiziert hingegen selbstständig die Eigenschaften unmarkierter Bilder, benötigt aber möglicherweise hunderttausende oder gar Millionen Beispiele.

Viele Wissenschaftler glauben, dass solche Ansätze neue Wirkstoffe hervorbringen und den Prozentsatz zugelassener Medikamente erhöhen werden. Inzwischen haben

erste Firmen begonnen, die viel versprechenden modernen Technologien zu nutzen. So haben etwa Forscher des US-amerikanischen Pharmaunternehmens Bristol-Myers Squibb aus New York kürzlich ein maschinelles Lernprogramm entwickelt, das besser vorhersagen soll, welche Arzneimittel die CYP450-Produktion hemmen könnten. Laut Saurabh Saha, dem Senior Vice President für Forschung und Entwicklung des Konzerns, seien die Ergebnisse des Algorithmus um 95 Prozent genauer als herkömmliche Methoden – wodurch sechsmal weniger Medikamente ausfallen würden. »Die KI kann frühzeitig potenziell toxische Wirkstoffe ausschließen, bevor man allzu viel in sie investiert«, sagt der Chief Data and Analytics Officer Vipin Gopal vom US-amerikanischen Pharmakonzern Eli Lilly in Indiana.

Revolution in der medizinischen Forschung oder verfrühte Euphorie?

Die Investitionen in neue Technologien haben sich in den letzten Jahren drastisch erhöht. 2018 konnten neu gegründete Unternehmen, die mit KI-basierten Methoden an Arzneimitteln forschen, bereits über mehr als eine Milliarde Euro verfügen – Tendenz stark steigend. Inzwischen hat jedes große Pharmaunternehmen angekündigt, mit einer solchen Firma zusammenzuarbeiten.

So viel versprechend das auch klingt, einige Experten warnen vor verfrühter Begeisterung. Kaum einer der durch eine KI entdeckten Wirkstoffe ist bisher für Versuche an Menschen vorgesehen – und keiner hat es in die dritte klinische Phase geschafft, den wichtigsten Test für Medikamente. Saha räumt ein, dass sich erst in einigen Jahren zeigen wird, ob sein Unternehmen dank präziser CYP450-Hemmungen wirklich mehr Zulassungen erhält.

Neben künstlicher Intelligenz haben Pharmafirmen auch in andere innovative Methoden investiert. Seit über einem Jahrzehnt entwickeln Forscher immer bessere statistische Modellierungsprogramme, mit denen sie verschiedene biophysikalische Prozesse am Computer simulieren. Zudem gab es große Fortschritte im Bereich der Bioinformatik, in dem es darum geht, biologische Erkenntnisse aus riesigen Datenmengen abzuleiten. Das ermöglicht es Wissenschaftlern, die Eigenschaften von Molekülen immer korrekter vorherzusagen.

Doch all diese Methoden haben einen Nachteil. Sie hängen vom Wissen der Forscher ab, das in der Regel unvollständig ist. Wenn unklar ist, welche Merkmale entscheidend sind, kann man einer Software nicht sagen, wie sie die Daten verarbeiten soll. KI leitet dagegen eigenständig Erkenntnisse ab, wodurch sie erkennt, welche Informationen wichtig sind und wie sie zusammenhängen.

Selbstlernende Algorithmen lassen sich auf mehrere Bereiche der Medikamentenherstellung anwenden. Einige Firmen konzentrieren sich etwa darauf, einen Wirkstoff zu finden, der ein so genanntes Target effektiv ausschaltet. Dabei handelt es sich meist um ein Protein, das mit einer bestimmten Krankheit zusammenhängt. Forscher suchen dann nach einem Molekül, das an das Target bindet und es so verändert, dass es nicht mehr zur Erkrankung oder ihren Symptomen beiträgt. Das kanadische Biotechnologieunternehmen Cyclica in Toronto arbeitet an einer Software, die

biochemische Wechselwirkungen von Millionen verschiedener Moleküle mit etwa 150 000 Proteinen abgleicht.

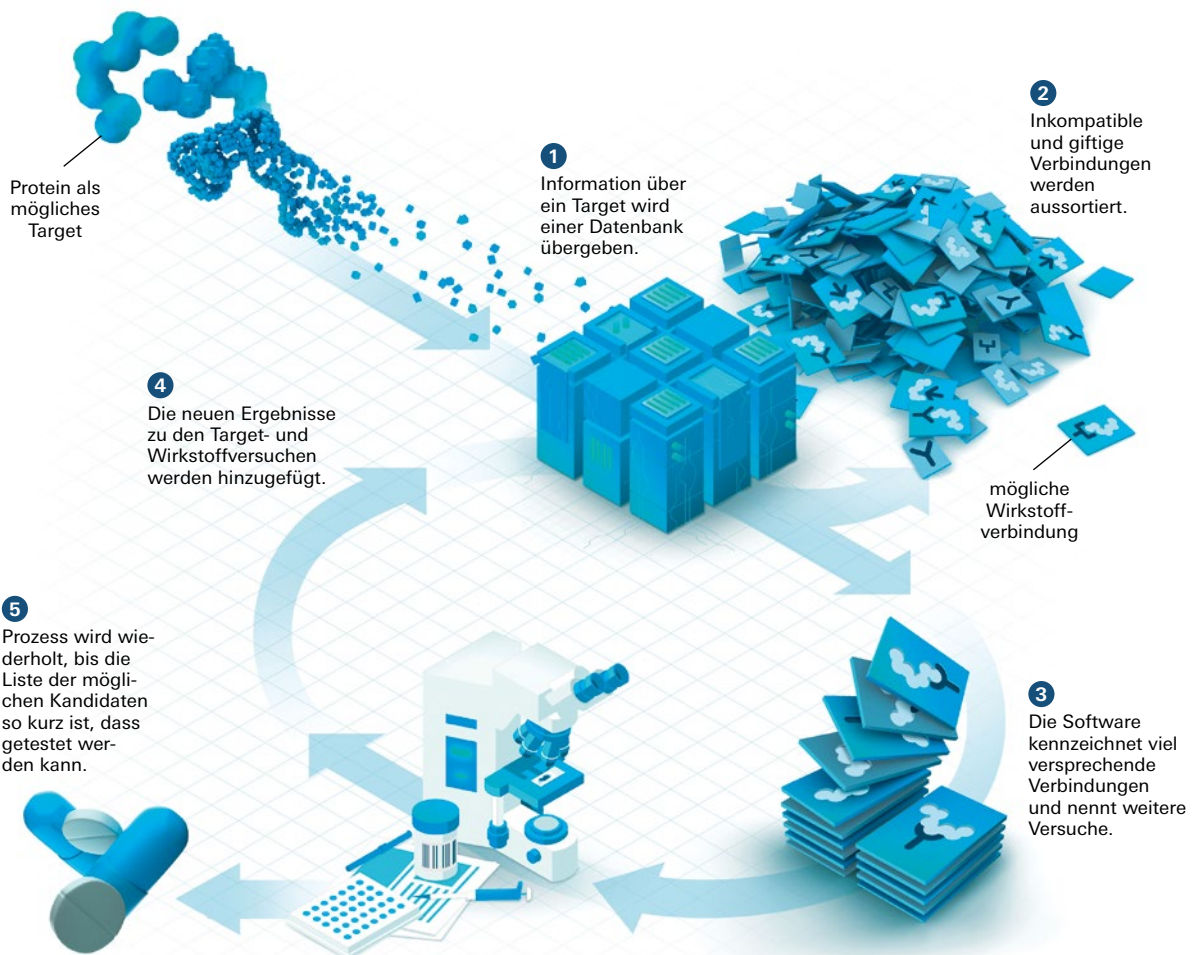
Geeignete Wirkstoffkandidaten müssen aber zusätzliche Hürden überwinden. »Ein Molekül, das mit einem Target reagiert, tut das normalerweise auch mit mehr als 300 weiteren Proteinen«, erklärt Naheed Kurji, CEO von Cyclica. »Die anderen 299 Wechselwirkungen könnten sich katastrophal auf den Menschen auswirken.« Zudem sollten die Wirkstoffe durch den Darm in den Blutkreislauf gelangen, ohne dass die Leber oder weitere Stoffwechselprozesse sie sofort abbauen. Wenn sie an einem bestimmten Ort wie der Niere wirken, dürfen sie andere Organe nicht stören. Und zuletzt müssen sie den Körper verlassen, bevor sie sich zu

einer gefährlichen Dosis anreichern. Die Software von Cyclica berücksichtigt all diese Anforderungen.

Biomediziner gehen davon aus, dass an komplexen Krankheiten wie Krebs Hunderte von Proteinen beteiligt sind. Cyclica möchte deshalb Moleküle finden, die mit dutzenden Targets wechselwirken, zugleich aber alle lebenswichtigen Proteine unberührt lassen. Gegenwärtig speisen die Forscher ihre Programme mit anonymisierten genetischen Daten, um herauszufinden, bei welchen Patienten die potenziellen Medikamente am besten wirken. Kurji geht davon aus, dass der siebenjährige Zeitraum, den ein Wirkstoff typischerweise bis zu Tests am Menschen braucht, sich um fünf Jahre verkürzen ließe.

Beschleunigte Medikamentensuche

Die Entdeckung eines neuen Wirkstoffs beginnt meist damit, ein »Target« zu identifizieren: ein Protein, das mit einer bestimmten Krankheit zusammenhängt. Ziel ist es dann, eine chemische Verbindung zu finden, die sich an das Protein heftet, um den Krankheitsverlauf zu stoppen. Übergibt man der KI der Arzneimittelfirma Exscientia ein Target, liefert sie Moleküle, die das Protein vielleicht ausschalten könnten. Zudem schlägt der Algorithmus Versuche vor, die dabei helfen, die Liste der möglichen Kandidaten zu reduzieren.



Merck und Bayer haben angekündigt, mit Cyclica zu kollaborieren. Weil solche großen Konzerne ihre Forschung vorerst meist geheim halten, ist noch nicht offiziell bekannt, an welchen Wirkstoffen sie arbeiten. Cyclica hat jedoch schon einige erfolgreiche Ergebnisse veröffentlicht. Unter anderem haben die Wissenschaftler zwei Targets identifiziert, die offenbar mit systemischer Sklerodermie – einer Autoimmunkrankheit der Haut und anderer Organe – und mit dem Ebolavirus zusammenhängen. Erfreulicherweise scheinen bereits zugelassene Medikamente, die bei HIV-Erkrankungen und Depressionen eingesetzt werden, die

Proteine anzugreifen. Dadurch könnte man die Wirkstoffe schnell für weitere Anwendungen umwidmen.

Selbst wenn man ein Target gefunden hat, weiß man – wie bei etwa 90 Prozent der Proteine im menschlichen Körper – häufig wenig über dessen Struktur und Eigenschaften. Ohne diese Informationen können die maschinellen Lernprogramme aber nicht herausfinden, wie sich ein Protein medikamentös angreifen lässt. Einige Technologieunternehmen widmen sich deshalb diesem Problem.

Die britische Firma Exscientia hat etwa eine Software entwickelt, um Moleküle aufzuspüren, die sich an ein kaum

KI in der Antibiotikaforschung

Auf der Suche nach neuen, effektiven Antibiotika haben sich Forscher unterschiedlicher Fachbereiche zusammengeschlossen, um zu diesem Zweck künstliche Intelligenz einzusetzen. Im Februar 2020 veröffentlichte das Team um den Biologen James Collins und die Computerwissenschaftlerin Regina Barzilay, beide am Massachusetts Institute of Technology, einen damit identifizierten, viel versprechenden Kandidaten, der auf ungeahnte Weise verschiedene antibiotikaresistente Bakterien bekämpft. Dabei war das Präparat bereits bekannt – allerdings als mögliches Diabetesmedikament.

Seit Alexander Fleming erstmals Penizillin aus Pilzen gewann, diente die Natur als Quelle für antibakterielle Wirkstoffe. Es ist jedoch extrem teuer und zeitaufwändig, tausende natürliche Substanzen zu isolieren und zu analysieren. Daher versuchten Forscher zu verstehen, wie Bakterien leben und sich vermehren, und suchten chemische Verbindungen, die diese Prozesse stören, etwa indem sie die Zellwände der Bakterien beschädigen oder ihre Proteinproduktion hemmen.

In den 1980er Jahren entstanden erste computergestützte Screeningmethoden, mit denen Biologen innerhalb kurzer Zeit viele Stoffe testen konnten. Doch auch das führte kaum zu Fortschritten: Gelegentlich stieß man zwar auf Wirkstoffkandidaten, aber diese ähnelten den bekannten Antibiotika meist zu stark, um bereits resistente Keime anzugreifen. Deshalb haben Pharmaunternehmen die Antibiotikaentwicklung weitgehend aufgegeben und widmen sich lukrativeren Medikamenten.

Die neue Arbeit verfolgt einen ganz anderen Ansatz, der auf den ersten Blick absurd erscheint: Man ignoriert, wie eine Substanz genau wirkt. Stattdessen entwickelten die Forscher ein neuronales Netz, dessen Knoten und Verbindungen den Nervenzellen im Gehirn nachempfunden sind. Anders als Computerprogramme, die Sammlungen von Molekülen nach einer bestimmten chemischen Struktur durchsuchen, lernen neuronale Netze, welche Eigenschaften der Stoffe nützlich sein könnten.

Die Forscher trainierten ihr Netzwerk auf Substanzen, die das Wachstum des Bakteriums *Escherichia coli* hem-

men. Dazu speisten sie es mit mehr als 2300 bekannten chemischen Verbindungen, die Wissenschaftler in Laborversuchen bezüglich dieser Fähigkeit zuvor als »Treffer« oder »Nichttreffer« klassifiziert hatten. Das zeigte dem Algorithmus, welche Atomanordnungen und Bindungsstrukturen relevant sind. Weil nur etwa zehn Prozent dieser Verbindungen bekannten Antibiotika entsprechen, enthält das neuronale Netz keine Vorurteile darüber, wie die Moleküle funktionieren oder aussehen sollen. Somit lernte es auch Substanzen zu identifizieren, die sich von aktuellen Medikamenten stark unterscheiden und daher bisher nicht auf dem Radar waren.

Das trainierte Netzwerk speisten Collins und seine Kollegen mit Daten aus dem »Drug Repurposing Hub«, einer Sammlung von mehr als 6000 Wirkstoffen gegen Krankheiten, die für Versuche am Menschen geprüft werden. Darunter befinden sich auch viele bereits zugelassene Medikamente gegen andere Leiden. Entsprechend »könnte man die Substanzen deutlich schneller klinisch testen«, erklärt der Biologe César de la Fuente von der University of Pennsylvania.

Neuartiges Antibiotikum mit innovativer Wirkungsweise

Collins, Barzilay und ihre Kollegen sortierten unter den Ergebnissen jene Verbindungen aus, die bestehenden Antibiotika ähneln, da sie befürchteten, dass diese nichts gegen multiresistente Keime ausrichten. Unter den übrigen Kandidaten stach einer deutlich heraus: der c-Jun N-terminale Kinase-Hemmer SU3327, der aktuell zur Behandlung von Diabetes getestet wird. Die Forscher nannten den Wirkstoff fortan Halicin (als Hommage an HAL, die künstliche Intelligenz aus dem Buch und Film »2001: Odyssee im Weltraum«).

Mehrere Laborversuche ergaben, dass Halicin nicht nur das Wachstum von *E. coli* stört, sondern auch andere Bakterien abtötet. Zu ihnen zählen *Mycobacterium tuberculosis* (das Tuberkulose verursacht), *Clostridioides difficile* (ein häufiger Krankenhauskeim; verantwortlich für einige Magen-Darm-Erkrankungen) und viele weitere, oft antibiotikaresistente Bakterien, die zu Sepsis, Lungenentzündung, Wundinfektionen und anderen verbreiteten, schwer zu

untersuchtes Targetprotein binden könnten. Das Programm liefert bereits ab zehn Daten über das Protein nützliche Ergebnisse, behauptet der CEO des Unternehmens Andrew Hopkins, seines Zeichens Professor für medizinische Informatik an der University of Dundee in Schottland.

Dabei geht der Algorithmus folgendermaßen vor: In einem ersten Schritt vergleicht er die verfügbaren Informationen mit einer Datenbank, die etwa eine Milliarde verschiedene Wirkungen von Proteinen enthält. Dadurch grenzt das Programm die möglichen Verbindungen ein, die das Target ausschalten könnten. Meist gibt es dann immer

behandelnden Infektionen führen. Ebenso viel versprechend erscheint, dass Halicin nach einem Monat wiederholter Anwendung keine resistenten *E. coli*-Mutanten hervorbrachte, während man bei den meisten Antibiotika bereits nach wenigen Tagen Hinweise auf Resistenzen findet.

Nachdem die Forscher die antibakteriellen Möglichkeiten von Halicin erkannt hatten, führten sie mehrere Experimente zur näheren Erforschung des Wirkstoffs durch. Wie sich herausstellte, stört Halicin die Bewegung der Protonen und das elektrochemische Potenzial der Bakterienmembranen. Reaktionen, die von diesen Protonengradienten abhängen, sind entscheidend für den Stoffwechsel und die Mobilität der Mikrobenzellen – aber Biomediziner hatten sie bisher nicht als Angriffspunkt gesehen.

Nach ihrem Erfolg ließen die Forscher das neuronale Netz auf eine noch größere Datenbank mit mehr als 107 Millionen chemischen Verbindungen los. Der Algorithmus konnte alle Moleküle in nur vier Tagen klassifizieren und identifizierte dabei 23 Kandidaten für weitere Tests.

Collins und sein Team arbeiten nun daran, das Netzwerk genauer auf bestimmte Krankheitserreger abzustimmen. Das könnte zu zielgerichteteren Antibiotika führen, die das körpereigene Mikrobiom schonen.

Katherine Harmon Courage ist Journalistin und schreibt unter anderem für die »New York Times« und das »Quanta Magazine«.

QUELLE

Stokes, J. M. et al.: A deep learning approach to antibiotic discovery. Cell 180, 2020

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Machine Learning Takes On Antibiotic Resistance« 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.

 **Quanta** magazine

noch extrem viele Kandidaten, weshalb die Software zusätzlich angibt, welche weiteren Daten sie benötigt, um die Liste zu verkürzen. Indem die Forscher beispielsweise gezielt Gewebeproben untersuchen, können sie den Algorithmus mit neuen Informationen füttern, worauf dieser nochmals eine Liste generiert und Experimente vorschlägt. Den Prozess wiederholt man so lange, bis man eine überschaubare Anzahl an Wirkstoffkandidaten erhält.

Hopkins zufolge ließe sich so die durchschnittliche Zeit für die Entdeckung eines neuen Medikaments von viereinhalb Jahren auf ein Jahr verkürzen und die Kosten dadurch um 80 Prozent senken. Zudem müsste man nur noch etwa ein Fünftel der bisher benötigten Moleküle synthetisieren, so Hopkins. Exscientia arbeitet aktuell mit dem US-amerikanischen Biotech-Riesen Celgene aus Delaware zusammen, um neue Wirkstoffe für drei Targets zu finden. Eine Kollaboration zwischen Exscientia und dem britischen Pharmaunternehmen GlaxoSmithKline aus London hat bereits zu einer – wie die Unternehmen behaupten – viel versprechenden Verbindung geführt, die chronische obstruktive Lungenerkrankungen behandeln soll.

Baldige Tests am Menschen

Wie erfolgreich Pharmatechfirmen wie Exscientia tatsächlich sind, lässt sich allerdings noch nicht beurteilen. Weil sie erst seit Kurzem existieren, haben es ihre Wirkstoffkandidaten nicht bis in die späten Phasen medizinischer Studien geschafft – was normalerweise fünf bis acht Jahre erfordert. Hopkins hat jedoch angekündigt, dass ein von Exscientia entwickeltes Medikament bereits 2020 an Menschen getestet werden könnte.

Bevor man jedoch daran arbeitet, ein Target zu bekämpfen, muss man dieses erst identifizieren. Bisherige Ansätze basieren häufig auf einem begrenzten Forschungsbereich, dem sich der entsprechende Wissenschaftler widmet. Das verzerrt die Ergebnisse und schränkt die möglichen Kandidaten ein. Zwar findet man oft Proteine, die mit einer Krank-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

heit zusammenhängen, doch sie erweisen sich häufig nicht als Ursache. Speziell dafür produzierte medikamentöse Behandlungen sind dann wirkungslos.

Das US-amerikanische Biotechnologieunternehmen Berg in Massachusetts hat sich deshalb selbstlernenden Algorithmen zugewandt, die Informationen aus riesigen Datenmengen unterschiedlichster Form ziehen sollen: von Gewebeproben über Organflüssigkeiten bis hin zu Blutproben eines Patienten. Diese stammen dabei sowohl von kranken als auch gesunden Menschen und werden in allen Stadien des Krankheitsverlaufs entnommen. Zudem setzen die

»Wir verlassen uns auf drei Dinge: Daten, Daten und noch mehr Daten«

Naheed Kurji

Forscher lebende Zellen im Labor verschiedenen Bedingungen aus, etwa indem sie den Sauerstoff- oder Glukosegehalt der Umgebung verändern.

Anschließend übergeben sie ihrem Deep-Learning-Programm all diese Informationen, wodurch es eine Liste von Proteinen erstellt, die eine Krankheit beeinflussen könnten. Hat die Software ein Target gefunden, sucht sie nach Molekülen, die es ausschalten. Durch die vielen Daten lässt sich außerdem vorhersagen, bei welchen Patienten das Target eine Krankheit verursacht. Dadurch können Wissenschaftler die relevanten Merkmale einer Erkrankung bestimmen, etwa den Einfluss gewisser Gene. Künftig könnte man daher schon vor der Einnahme eines Medikaments testen, ob es für einen Patienten wirksam ist.

Viel versprechendes Krebsmedikament

Mit dieser Methode hat Berg den wohl vielversprechendsten Wirkstoff entwickelt, der bisher aus einem KI-bezogenen Ansatz hervorging: Das Krebsmedikament BPM31510. Kürzlich ging eine Phase-2-Studie für Patienten mit fortgeschrittenem Bauchspeicheldrüsenkrebs zu Ende. Phase-1-Studien sagen meist nur aus, bei welcher Dosis etwas giftig ist. Als die Forscher ihren Wirkstoff dabei aber auf andere Krebsarten anwandten, konnten sie überraschenderweise einige Ergebnisse der Software überprüfen: Das Programm hatte zuvor etwa 20 Prozent der Patienten identifiziert, die wahrscheinlich auf den Wirkstoff ansprechen würden, sowie diejenigen vorhergesagt, die mit Nebenwirkungen rechnen müssten. Als die Forscher den Algorithmus mit Analysen von Gewebeproben speisten, kam heraus, dass das neue Medikament am wirksamsten gegen aggressive Krebsarten sei. Denn es greife Mechanismen an, die bei diesen Krankheiten eine wichtige Rolle spielen.

Inzwischen arbeitet Berg mit dem britisch-schwedischen Pharmariesen AstraZeneca zusammen, um Targetmoleküle für Parkinson und andere neurologische Erkrankungen zu finden. Zudem kollaboriert die Firma mit dem französischen Pharmakonzern Sanofi Pasteur, um verbesserte Grippeimpfstoffe zu entwickeln. Darüber hinaus forscht Berg mit dem US-Veteranenministerium und der Cleveland Clinic an Targets für Prostatakrebs. Die Software hat dabei diagnostische Tests geliefert, mit denen man eine solche Erkrankung von einer gutartigen Prostatavergrößerung unterscheiden kann, was derzeit meist eine Operation erfordert.

Mittlerweile haben große Pharmakonzerne mindestens 20 Kooperationen mit modernen Technologieunternehmen angekündigt. Pfizer, GlaxoSmithKline und Novartis bauen zudem offenbar hausinterne KI-Abteilungen auf, um ihre Medikamentenentwicklung zu verbessern.

Viele Forschungsleiter dieser Unternehmen berichten begeistert über ihre Ergebnisse. Dennoch geben sie zu, dass die neuen Methoden noch nicht sicher erprobt sind. In

den kommenden Jahren wird sich zeigen, ob künstliche Intelligenz die Branche wirklich effizienter macht, sagt Sara Kenkare-Mitra, Senior Vice President of Development Sciences bei der Roche-Tochter Genentech.

Saha betont, dass die Rate zugelassener, KI-entwickelter Medikamente in der nächsten Zeit wahrscheinlich noch niedrig bleiben wird. Sie könnte jedoch drastisch steigen, sofern man die Zulassungsverfahren auf die neuen Systeme anpassen würde. »Wenn die Regulierungsbehörden den gleichen Wert in der KI sehen wie wir, könnte man in einigen Fällen die Tierversuche überspringen und direkt zu Menschen übergehen, sobald man gezeigt hat, dass die Medikamente nicht toxisch sind«, sagt Saha. Solche Szenarien seien aber noch viele Jahre entfernt, räumt er ein.

Der ganze Hype könnte sogar schädlich sein, erklärt Narain von Berg. »Nüchtern betrachtet handelt es sich nur um Werkzeuge, die zwar helfen können – jedoch keine Lösungen liefern«, sagt er. Kurji von Cyclica verurteilt Firmen, die seiner Meinung nach übertriebene Äußerungen aufstellen, etwa die, dass sie viele Jahre der Entwicklung auf wenige Wochen drücken und enorme Geldsummen einsparen könnten. »Das ist einfach nicht wahr«, sagt er. »Und es ist unverantwortlich, so etwas zu behaupten.«

Dennoch glaubt Kurji, dass KI-basierte Methoden die Pharmaindustrie stark verändern werden. Das Hauptaugenmerk liege darauf, hochwertige Informationen für die selbstlernenden Algorithmen zu erhalten. »Wir verlassen uns auf drei Dinge: Daten, Daten und noch mehr Daten«, sagt Kurji. Diese Ansicht teilt Enoch Huang, Vizepräsident für medizinische Wissenschaften bei Pfizer, dem zufolge ein guter Algorithmus nicht der wichtigste Faktor ist.

Forscher führen inzwischen gezielte Experimente durch, um für die KI relevante Informationen zu generieren. »Es gibt nicht immer genügend klinische Daten für das maschinelle Lernen«, sagt Kenkare-Mitra. »Aber wir können sie oft in vitro erzeugen und dann in das System einspeisen.«

Das könnte zu einem neuen Kreislauf in der Arzneimittelentwicklung führen: Computer schlagen Forschern Experimente vor, mit denen diese die Datensätze erweitern, um Letztere danach wiederum den Algorithmen zu übergeben. »Es ist gar nicht so sehr die KI, an die wir glauben«, sagt Kenkare-Mitra, »sondern das Zusammenspiel zwischen Mensch und KI.« Selbstlernende Algorithmen werden die konventionelle Forschung nicht ersetzen, so Saha. Es sei immer noch Aufgabe des Menschen, biologische Erkenntnisse abzuleiten, Forschungsrichtungen festzulegen, Ergebnisse zu interpretieren und die benötigten Daten zu produzieren. Computer unterstützen uns dabei bloß. ◀

QUELLEN

DiMasi, J. A. et al.: Innovation in the pharmaceutical industry: New estimates of R&D costs. *Journal of Health Economics* 47, 2016

Kundranda, M. N. et al.: Phase II trial of BPM31510-IV plus gemcitabine in advanced pancreatic ductal adenocarcinomas (PDAC). *Journal of Clinical Oncology* 38, 2020

Zhu, H.: Big data and artificial intelligence modeling for drug discovery. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 60, 2020



FRANZISCHÄDEL, FLORIAN FREISTETTER DE PRESSE // CC BY-SA 4.0 / CREATIVE COMMONS ORG/UEBERRECHTSBY SA/4.0/LEGALCODE

FREISTETTERS FORMELWELT DAS GEHEIMNIS DES KÜRBISKERNÖLS

Ein erstaunlicher Farbentrick mit einer einfachen Erklärung: Manchmal bestimmt das Auge die Wahrnehmung, manchmal die Physik.

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

► spektrum.de/artikel/1725084

Anfang des Jahres war ich in Freiburg auf der Kulturbörse, einer Messe für die Eventszene im deutschsprachigen Raum. Dort werden keine Bücher oder Autos angepriesen, sondern Künstlerinnen und Künstler. Meine Kollegen und ich waren da, um unsere neue Wissenschaftskabarettshow zu verkaufen; wir haben uns aber auch angesehen, was es sonst noch so Neues in der Branche gibt.

Dabei habe ich zwei österreichische Künstlerinnen getroffen, die unter dem schönen Namen Kernölamazonen auftreten. Sie erzählten mir amüsiert vom Besuch eines lokalen Radiosenders, bei dem ihnen der Moderator eine chemische Formel präsentierte, die angeblich den molekularen Aufbau von Kernöl beschreibe. Das ließ mich ein wenig über die Wissenschaft hinter der Spezialität aus der Steiermark nachdenken.

Kernöl ist eine interessante Substanz. Es wird aus Kürbiskernen gepresst, und man bekommt es vor allem in Südösterreich zu vielen verschiedenen Gerichten serviert. In der Flasche sieht das Öl dunkelrotbräunlich, ja fast schon schwarz aus, auf dem Teller erscheint es dann plötzlich grünlich. Aber wieso ändert das Öl seine Farbe? Ich war mir sicher, die Antwort müsse irgendetwas mit dem Lambert-Beerschen Gesetz zu tun haben:

$$E_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d$$

Diese Formel kenne ich noch aus dem Astronomiestudium. Erstmals formulierte sie der französische Astronom Pierre Bouguer (1698–1758), doch benannt ist sie nach den Physikern Johann Lambert (1728–1777) und August Beer (1825–1863). Sie beschreibt, wie die Strahlungsintensität abnimmt, wenn Licht ein absorbierendes Medium durchquert. d bezeichnet dabei die Dicke des Mediums; c ist die Stoffmengenkonzentration der absorbierenden Substanz, und ε_{λ} ist der so genannte Extinktionskoeffizient, eine materialspezifische Konstante, bezogen auf eine bestimmte Wellenlänge λ .

In der Astronomie taucht dieser Zusammenhang beispielsweise auf, wenn man die Eigenschaften von Licht untersucht, das durch die Atmosphäre strahlt. Beim Kernöl muss jedoch noch ein anderer Effekt eine Rolle spielen, denn dabei ändert sich ja nicht nur die Intensität, sondern auch die Farbe.

Was in so einem Fall passiert, haben die slowenischen Wissenschaftler Samo und Marko Kreft 2007 untersucht. Wie sie herausfanden, tritt der Dichromatismus auf, wenn das Absorptionsspektrum einer Substanz ganz bestimmte Kriterien erfüllt. Außerdem hängt das Phänomen davon ab, wie gut die Farbrezeptoren in unseren Augen auf die Wellenlängen reagieren.

Bei einer dünnen Schicht Kernöl hat das Absorptionsspektrum im grünen Bereich ein breites Minimum – das heißt, ein Großteil der grünen Wellenlängen wird wenig abgeschwächt. Im roten Bereich gibt es ebenfalls ein Minimum, das sogar ausgeprägter ist, also noch mehr Licht durchlässt.

Folglich erreicht das Auge mehr rotes Licht als grünes. Allerdings ist unser Auge für das langwelligere rote Licht nicht so sensibel; grünes Licht registriert es dagegen sehr gut. Deswegen nehmen wir dünne Schichten als grünlich wahr. Nimmt die Dicke des Öls zu, gewinnt irgendwann das Lambert-Beersche Gesetz die Oberhand und löscht die Farben gemäß ihrer Absorption nacheinander aus: Schließlich kommt nur so verschwindend wenig grünes Licht durch, dass man lediglich das weniger stark absorbierte Rot sieht.

Tatsächlich ist der Dichromatismus bei Kürbiskernöl besonders stark ausgeprägt, wie Samo und Marko Kreft in einer weiteren Arbeit festgestellt haben. Ähnlich deutlich tritt der Farbwechsel bei Bromphenolen auf: chemischen Verbindungen aus Brom, Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, die unter anderem als Desinfektionsmittel eingesetzt werden. Bromphenole sind aber definitiv nicht so schmackhaft wie das Kernöl – und auch nicht besonders gut als Namensgeber für eine Kabarettgruppe geeignet.

LUFTVERSCHMUTZUNG GROSSFEUER MIT NEBENWIRKUNGEN

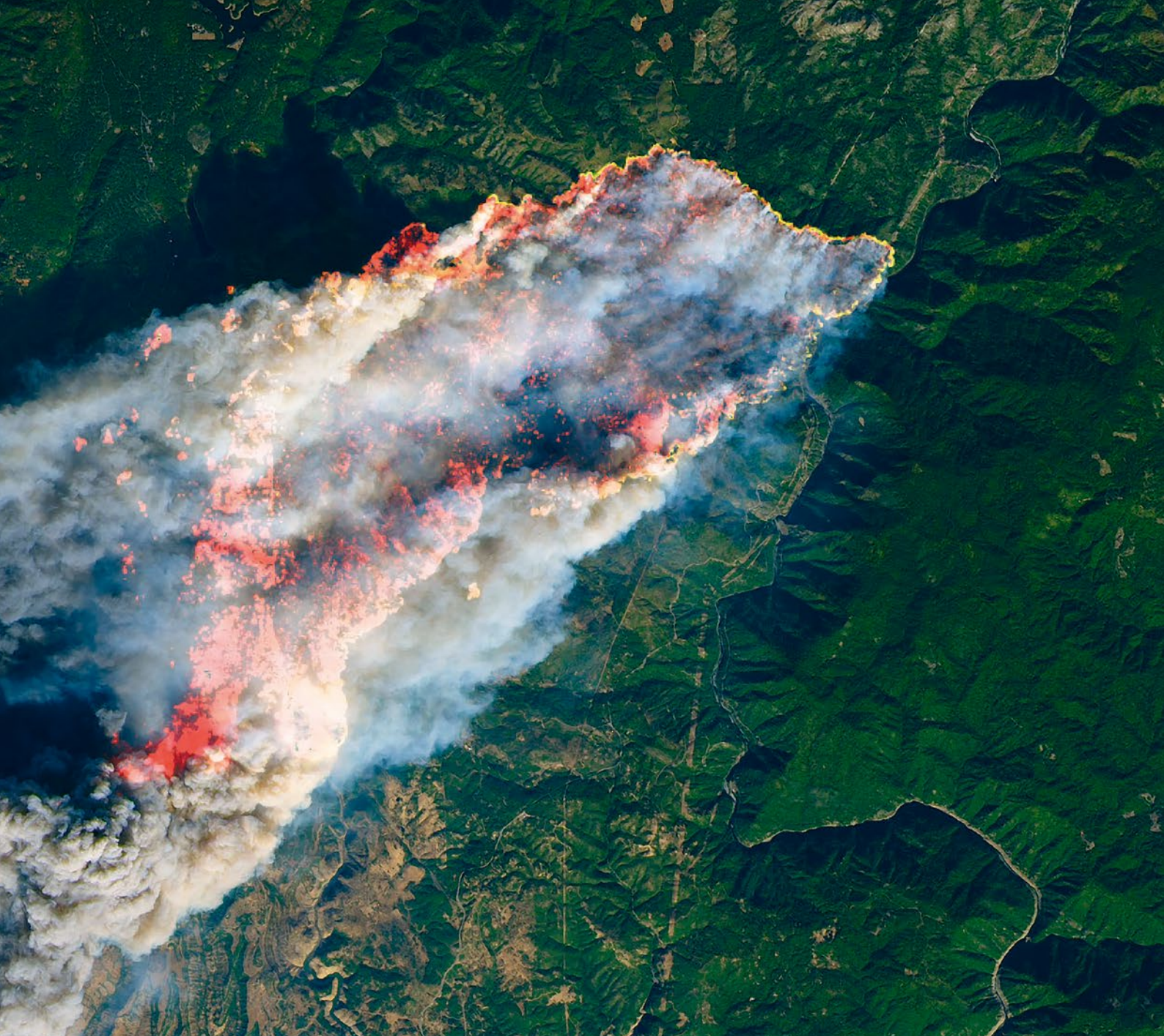
Weltweit gab es in den letzten Jahren große Waldbrände. Welche Stoffe dabei in die Luft gelangen und wie sie wirken, ist nur teilweise erforscht. Mit hochempfindlichen Instrumenten und fliegenden Laboratorien kommen Atmosphärenforscher den Gefahren des Rauchs auf die Spur.



Kyle Dickman ist Wissenschaftsjournalist in New Mexiko und hat fünf Jahre lang Waldbrände bekämpft.

» [spektrum.de/artikel/1725074](https://www.spektrum.de/artikel/1725074)

Das »Camp Fire« von 2018 gilt als einer der heftigsten Waldbrände in der Geschichte Kaliforniens. Neben der direkten Zerstörung setzen solche Wildfeuer Unmengen verschiedener Schadstoffe frei.



AUF EINEN BLICK SIGNALE AUS DEM RAUCH

- 1** Bei heftigen Waldbränden gelangen zahlreiche schädliche Stoffe in die Luft. Welche genau, ist noch teilweise unbekannt.
- 2** Forscher haben herausgefunden, dass die Zusammensetzung des Rauchs zum größten Teil von der Intensität des Feuers abhängt und nicht vom Brennmaterial.
- 3** Bei ihren Untersuchungen sind sie auf ein Molekül gestoßen, das möglicherweise als Reservoir für Stickoxide wirkt und die Luftschadstoffe so über weite Strecken transportiert.

«Diese hier sieht interessant aus. Nicht zu dicht«, sagt der Atmosphärenchemiker James Crawford. Hinter seinem Ohr klebt ein Pflaster gegen Reiseübelkeit. Er beugt sich über eine Rauchwolke, die vom Cockpit aus zu sehen ist. Es ist Ende Juli 2019, und wir befinden uns in einem ehemaligen Passagierflugzeug, das die NASA zu einem Labor umfunktioniert hat. In der Kabine kalibrieren 35 Wissenschaftler und Ingenieure ihre Instrumente. Sie sind voll gespannter Erwartung. Ihre Ausrüstung ist eigentlich dafür konzipiert, Luftschadstoffe in Städten zu messen. Jetzt sollen sie in dieser partikelgeschwängerten Umgebung Proben nehmen. Wie das 50 Jahre alte Flugzeug in einer Rauchsäule zurechtkommen wird, muss sich auch erst noch zeigen. Die Maschine ruckelt und hüpft, als sie in 4000 Meter Höhe in die dunkle Wolke eintaucht, die sich über einem Feuer außerhalb von Missoula im US-Bundesstaat Montana auftürmt. »45 Sekunden, dann drehen Sie um«, weist Crawford den Piloten an. Die Turbulenzen entpuppen sich als überraschend schwach, und so nehmen sie einen weiteren Anlauf auf die Wolke.

Es ist der dritte Flug im Rahmen von FIREX-AQ, einem ehrgeizigen Dreijahresprojekt unter Leitung der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und der NASA. Das Kürzel steht für »Fire influence on regional to global environments and air quality« (Einfluss von Bränden auf die regionale und globale Umwelt sowie die Luftqualität). Ziel ist es, den Rauch, der beim Verbrennen von Biomasse entsteht, näher zu untersuchen: Wie genau ist er chemisch zusammengesetzt, wann wird er für die menschliche Gesundheit am gefährlichsten und warum? Im Sommer 2019 flogen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in ihrer Forschungsmaschine und zwei kleineren Begleitflugzeugen, ebenfalls mit Geräten ausgestattet, sechs Wochen lang durch mehr als 100 unterschiedlichste Rauchsäulen, um Proben aus der Atmosphäre zu nehmen. Das kleinste Untersuchungsobjekt war eine Rauchschwade, die von einem Ackerbrand in Kansas aufstieg, das größte

Drei Typen von Waldbränden

Erdfeuer, auch **Schwelbrände** genannt, breiten sich unterirdisch und normalerweise sehr langsam aus.

Bodenfeuer verbrennen bodennahe Pflanzen sowie Büsche, Blätter und am Boden liegendes Brennmaterial. Feuer, die der Wind vorwärtstreibt, bezeichnet man als **Lauffeuer**.

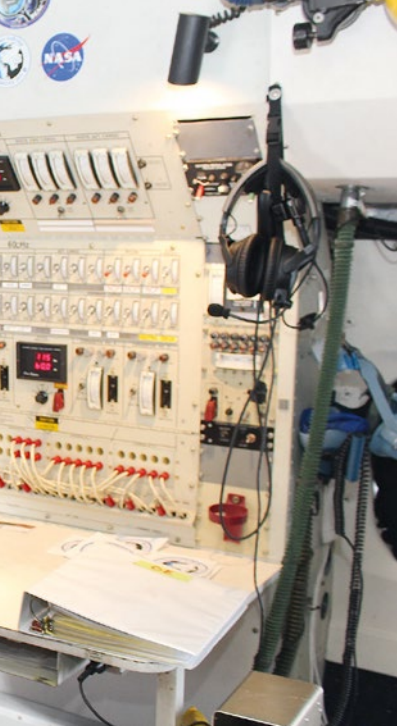
Schlagen die Flammen bis auf die Kronen der Bäume über, entstehen **Kronenfeuer**. Sie sind extrem heiß, intensiv und schwer zu bekämpfen. Normalerweise treten Kronenfeuer nicht allein, sondern in Kombination mit Bodenfeuern auf. Man spricht dann von einem **Vollbrand**.



NASA / KATE SQUIRES

ein riesiger Pilz, der sich 10000 Meter hoch aus dem »Williams Flats Fire« im Bundesstaat Washington erhob. Noch nie zuvor wurde der Rauch, der beim Verbrennen von organischem Material entsteht, so detailliert und umfassend untersucht. Bis zu ein Drittel aller Partikel in der Atmosphäre stammt aus Bränden. Trotzdem »gibt es nur sehr wenige Studien, die untersuchen, welche spezifische Rolle die verschiedenen Bestandteile des Rauchs in Bezug auf Krankheiten und deren Schwere spielen«, sagte ein Direktor der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde 2018.

Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zufolge starben 2016 weltweit 4,2 Millionen Menschen vorzeitig auf Grund von Luftverschmutzung. In einer Studie von 2020 hat ein Team vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz errechnet, dass sogar gut doppelt so viele vorzeitige Todesfälle darauf zurückzuführen sind. Damit verringert dreckige Luft die Lebenserwartung weltweit stärker als beispielsweise Rauchen, HIV oder Malaria. Schuld an der toxischen Wirkung ist laut der WHO vor allem der darin enthaltene Feinstaub – kleinste, bloß mikrometergroße Partikel, die in jeder Art von Rauch vorkommen. Feinstaub mit einem Durchmesser von weniger als 2,5 Mikrometern ist in der Lage, bis in die Lungenbläschen zu gelangen. Ist man ihm chronisch ausgesetzt, kann das unter anderem zu Herz- und Lungenerkrankungen, Herzrhythmusstörungen und verstärktem Asthma führen. Aber neben diesen Partikeln enthält Rauch noch viele andere schädliche Stoffe, beispielsweise Ozon. Eine Studie von 2017 legt nahe, dass rund eine Million Menschen vorzeitig sterben, weil sie dem Gas langfristig ausgesetzt sind. Es kann durch chemische Reaktionen entstehen, wenn beispielsweise Rauch in die Atmosphäre gelangt (siehe »So entsteht Ozon«, S. 64). Noch fehlt aber ein grundlegendes Verständnis dafür, wie und wann sich derartige giftige Bestandteile in verschiedenen Arten von Rauch bilden. Das Team von FIREX-AQ will daher mehr über die zu Grunde liegenden chemischen Abläufe herausfinden. Unter anderem wollen sie mit diesem Wissen genauer vorhersagen, wo mit welchen waldbrandbedingten Emissionen zu rechnen ist. Auf der Grundlage



NASA / KATE SQUIRES

Ein umgebautes Passagierflugzeug dient als fliegendes Labor. Zahlreiche Instrumente messen, welche Stoffe in den Rauchfahnen von Großbränden enthalten sind.

MATT TAGER (MATTAGER.COM)



solcher Prognosen wüssten beispielsweise Fußballtrainer, ob sie ihre Sportstunde absagen müssen; für Krankenhäuser wäre besser absehbar, wann mit vielen immungeschwächten Personen zu rechnen ist; und Behörden könnten Warnungen zum Arbeiten im Freien herausgeben. Darüber hinaus wäre es mit Hilfe der Daten des Forschungsteams möglich, kontrollierte Feuer zu legen, um heftigere Waldbrände mit schwerwiegenden Auswirkungen auf die Gesundheit zu verhindern.

Jedes Feuer ist anders – doch gibt es eine gemeinsame Chemie?

Crawford scrollt auf seinem Tablet durch Echtzeit-Updates hunderter Partikel und Gase, von denen gerade Proben genommen werden. Als er das letzte Mal mit dem Forschungsflugzeug unterwegs war, untersuchte er Luftschadstoffe in der südkoreanischen Hauptstadt Seoul. Aber auch in kleinen Städten, sagt er, beobachtet man oft eine viel schlimmere Luftverschmutzung als die, die er und sein Team heute aufzeichnen. »Doch wie addieren sich all diese Brände auf?«, fragt er. »Wie viel Ozon produzieren Feuer? Welche chemischen Reaktionen laufen dabei ab? Und wie reguliert man solch einen natürlichen Prozess?«

Etwas 350 Meilen weiter südlich sichten Carsten Warneke vom Earth System Research Laboratory in Boulder, Colorado, und 50 weitere Fachleute meteorologische Daten, Brennmaterial, Echtzeit-Satellitendaten und aktuelle Feuer-Updates. Sie wollen bestimmen, welcher der Waldbrände, die derzeit im Westen der USA wüten, die meisten

Kriterien für ihre Mission erfüllt. »Eine Menge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind mit im Boot, und alle sind an leicht unterschiedlichen Dingen interessiert«, sagt Amber Soja, die am National Institute of Aerospace forscht und 400 Beteiligten von FIREX-AQ einen Überblick über die an diesem Tag brennenden Feuer geben soll.

Für die heutige Mission hat sich das Team das »North Hills Fire« in Montana ausgesucht. Es hat von den neun zur Auswahl stehenden Bränden die markanteste Rauchsäule. Mit einer Fläche von nicht einmal 19 Quadratkilometern ist das Feuer ziemlich unbedeutend – und das macht es wissenschaftlich interessant. Die Feuerwehr ist zwar noch dabei, die Flammen unter Kontrolle zu bringen, hat der Maschine aber trotzdem die Erlaubnis gegeben, an verschiedenen Stellen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten Proben der Rauchfahne zu nehmen. So wollen die Forscher herausfinden, wie sich deren Zusammensetzung verändert, wenn der Wind die Partikel weiterträgt und diese unter neuen Bedingungen sowie in anderer Umgebung reagieren.

Nach einer Stunde und 16 Flügen quer durch die Rauchwolke erhält Crawford eine Nachricht von Warneke. »Fliegt sofort dorthin!«, hat der Kollege in Rot neben das Foto einer Rauchsäule gekritzelt, die hoch über die Wolken aufragt, knapp 1300 Kilometer entfernt in Kalifornien.

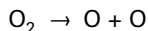
Das Projekt FIREX-AQ wurde im Missoula Fire Sciences Laboratory in Montana ins Leben gerufen. Dort interessierte sich der Chemiker James Roberts für die verschiedenen Säuren, die der bei Waldbränden entstehende Rauch enthält. Der NOAA-Wissenschaftler fand 2009 heraus, dass

So entsteht Ozon

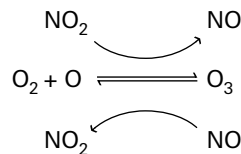
Ob Ozon für den Menschen nützlich oder schädlich ist, hängt davon ab, wo es sich befindet. Die Ozonschicht hoch oben in der Stratosphäre ist für uns lebenswichtig: Sie schützt uns vor kurzwelliger ultravioletter Strahlung, indem sie einen Teil davon absorbiert.

Der direkte Kontakt mit dem Gas ist hingegen gesundheitsgefährdend, da es die Atemwege angreift. Daher ist es problematisch, wenn sich viel »bodennahes Ozon« in der Troposphäre bildet.

Hoch oben in der Stratosphäre entsteht das Gas, indem kurzwellige UV-Strahlung Sauerstoffmoleküle in Sauerstoffatome spaltet. Diese Radikale reagieren mit molekularem Sauerstoff zu Ozon. M ist in der Reaktionsgleichung ein neutrales Molekül, das überschüssige Energie aufnimmt.



In der Troposphäre läuft der Prozess anders ab, da die zur Sauerstoffspaltung benötigte kurzwellige UV-Strahlung bereits in der Ozonschicht absorbiert wird. Aber auch am Boden wird Ozon ständig produziert und wieder verbraucht. Dabei wirkt Stickstoffdioxid (NO_2) als Katalysator:



Licht spaltet Stickstoffdioxid (NO_2) in Stickstoffmonoxid (NO) und ein einzelnes Sauerstoffradikal (O). Letzteres ist extrem reaktiv und verbindet sich mit einem Molekül Sauerstoff (O_2) zu Ozon (O_3). Dieses wiederum reagiert mit NO zurück zu NO_2 sowie O_2 und O , wodurch sich der Kreis schließt.

Das Ganze ist zunächst ein Nullsummenspiel. Doch weitere Verbindungen in der Atmosphäre kurbeln die Ozonproduktion an. Durch die Oxidation verschiedener Stoffe – flüchtiger organischer Verbindungen, Methan oder Kohlenstoffmonoxid – entstehen so genannte Peroxyradikale. Die wichtigsten sind das Hydroperoxyradikal HO_2 und das Methylhydroperoxyradikal CH_3O_2 . Sie oxidieren NO zu NO_2 , das anschließend direkt durch Sonnenlicht wieder gespalten wird und entsprechend der Reaktionsgleichung links neues Ozon bildet. Jedes NO_2 -Molekül kann dabei über rund 30 Zyklen hinweg für die Bildung von neuem Ozon sorgen. Wie viel Ozon gebildet wird, hängt folglich davon ab, wie viele Stickoxide und flüchtige organische Verbindungen in der Luft vorhanden sind und in welchem Verhältnis sie vorliegen.

beim Verbrennen von Gelbkiefernästen und anderem organischen Material, das für den Westen der USA typisch ist, Isocyanäure entsteht. Sind Menschen dieser gesundheitsschädlichen Verbindung regelmäßig ausgesetzt, beispielsweise durch Rauchen oder Kochen am offenen Feuer, kann das Grauen Star, rheumatische Arthritis und Herzerkrankungen hervorrufen.

Kurz darauf brach das verheerendste Großfeuer in der Geschichte des Bundesstaats Colorado aus, verbrannte zehntausende Hektar Land und zerstörte mehrere hundert Häuser. Roberts detektierte mit seinem Säuremessinstrument die höchste Konzentration von Isocyanäure, die je in der Atmosphäre gemessen wurde. Davor war niemand auf die Idee gekommen, danach zu suchen. »Ich habe zwei Nächte lang nicht geschlafen«, sagt er. »Die Fachleute, die sich mit der Verbrennung von Biomasse beschäftigen, wussten nicht, dass Rauch Isocyanäure enthält. Was wussten wir noch alles nicht?«

Allgemein hat sich die Luftqualität in den US-amerikanischen Städten seit der Verabschiedung des Clean Air Act durch den Kongress 1970 stark verbessert. Aber wenn Waldbrände in der Nähe städtischer Gebiete wüten, lösen sich diese Errungenschaften buchstäblich in Rauch auf. Im Jahr 2019 lagen die acht amerikanischen Städte, deren Luft am meisten Ozon aufwies, alle im Westen der USA.

Dort fanden sich auch 23 der 25 am stärksten mit Feinstaub belasteten Metropolen. Dieser Trend wird mit Sicherheit anhalten: Die US-Forstbehörde rechnet momentan damit, dass sich die Fläche, die jedes Jahr Bränden zum Opfer fällt, bis 2050 verdoppeln wird, weil der Westen Amerikas immer heißer und trockener wird. Zwischen 1972 und 2018 hat sich die pro Jahr verbrannte Fläche in Kalifornien sogar verfünffacht. Das ist mit großer Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass die Temperaturen an heißen Tagen um durchschnittlich 1,4 Grad Celsius gestiegen sind, wie der Klimamodellierer Park Williams von der Columbia University 2019 zeigte. Grund dafür ist laut dem Wissenschaftler die menschengemachte Erderwärmung.

Auch der Zustand der Wälder trägt einen großen Teil dazu bei, dass Wildfeuer schlimmer werden. 100 Jahre lang wurden natürliche Brände, die für die Ökosysteme im US-amerikanischen Westen unerlässlich sind, massiv unterdrückt. Dadurch sind viele Wälder heute weitaus dichter als früher. In einigen Teilen der kalifornischen Sierras wachsen beispielsweise 1000 Bäume pro Hektar, wo früher zwischen 50 und 70 standen. Gleichzeitig siedelt sich der Mensch zunehmend in Gegenden an, die eigentlich auf Feuer eingestellt sind. In den 1990er Jahren lebten in den USA 30,8 Millionen Menschen in Regionen, die regelmäßig brannten, oder in direkter Nachbarschaft dazu.

Als ihr Interesse geweckt war, kontaktierten Roberts und Warneke, die gemeinsam bei der NOAA arbeiteten, ihren langjährigen Kollegen Robert Yokelson von der University of Montana, der seit fast 30 Jahren den Rauch von Waldbränden untersucht. Der ehemalige Feuerwehrmann half dabei, die erste Version von FIREX-AQ zu leiten. Bis vor 20 Jahren, sagt er, betrieben er und einige Hochschulprofessoren quasi im Alleingang die Feldforschung auf dem Gebiet. Sie mieteten sich ein kleines Flugzeug, beluden es mit Instrumenten und flogen von Rauchsäule zu Rauchsäule. Zwar interessierten sie sich für die gleichen Aerosole, Partikel und Gase, die das große Projekt jetzt unter die Lupe nimmt, doch ihre Messungen waren – auch auf Grund der fehlenden Mittel – viel gröber.

Als schließlich mehrere Jahre in Folge heftige Brände auftraten, flossen auf einmal Millionen Dollar in umfangreiche Forschungskampagnen. Das umgerüstete DC-8-Flugzeug, das sehr hoch fliegen kann und eine große Reichweite hat, erhielt Unterstützung durch zwei kleinere, schnelle Maschinen, die mit Luftqualitätsmessgeräten ausgestattet wurden. Sie sollen tiefer fliegen und näher an die Rauchsäulen sowie an rauchbedeckte ländliche Gebiete herankommen. Lastwagen, die Rauch am Boden untersuchen, ergänzen die Flotte.

Der Jet verfügt über eine Reihe an Messinstrumenten: Laser verschiedener Wellenlängen erstellen in Echtzeit dreidimensionale Abbilder der Rauchsäulen; ein Instrument erfasst Acetonitril, einen Stoff, der als Indikator für die Verbrennung von Biomasse dient; wieder andere Sensoren detektieren winzige Aerosole und zahlreiche andere Komponenten. Gase und Partikel aller denkbaren Zusammensetzungen, Formen und Größen kann das Team mit seinem mobilen Labor messen.

Eines Tages wollen die Fachleute vorhersagen können, wie die Substanzen, die bei Waldbränden in die Luft geschleudert werden, die menschliche Gesundheit beeinträchtigen. Dazu müssen sie aber detaillierter über die Zusammensetzung von Rauch Bescheid wissen und die Prozesse entschlüsseln, durch die sich darin gefährliche Stoffe bilden. Kennt man die Unterschiede zwischen den verschiedenen Raucharten, könnte das auch die Brandbekämpfung erleichtern, insbesondere wenn es darum geht, gezielt Feuer zu legen. Solche kontrollierten Brände sind weniger intensiv als natürliche Waldbrände und werden absichtlich entfacht, um die Menge an Brennmaterial zu reduzieren, das für künftige Waldbrände zur Verfügung steht. Aus sozialen, ökologischen und regulatorischen Gründen ist es jedoch schwer, sie zu entzünden.

Doch was ist nun besser – jetzt den Rauch eines vorsätzlich entfachten Brands am Himmel stehen zu haben oder später die gewaltigen Qualmwolken eines Wildfeuers? Manche Arten von Rauch sind für die menschliche Gesundheit gefährlicher als andere, man weiß nur noch nicht viel darüber. »Wir müssen die Faktoren verstehen, die bei Emissionen eine Rolle spielen, damit die Menschen vor Ort bessere Entscheidungen treffen können«, sagt Soja daher.

Im Herbst 2016 begab sich das FIREX-AQ-Team in das Missoula Fire Sciences Laboratory in Montana, um die Geheimnisse des Rauchs Schicht für Schicht frei zu legen. Letztlich wollten sie herausfinden, wie sich seine Zusammensetzung auf seinem Weg mit dem Wind verändert und wie sich in ihm schädliche Aerosole und Ozon bilden. Aber dazu mussten sie erst verstehen, welche Inhaltsstoffe bei der Verbrennung selbst entstehen. Vielleicht hing es ja von der Pflanzenart ab, wie viel Ozon oder Feinstaub sich bildete?



Riesige Rauchschwaden ziehen über den Himmel bei Malibu in der Nähe von Los Angeles. Das »Woolsey Fire« wütete dort 2018.



Das Team sammelte Zweige von Gelbkiefern aus Montana, Fliederbüsche aus Kalifornien, Material von Eichen aus Arizona und von 18 weiteren Gruppen von Pflanzenarten, die regelmäßig im US-amerikanischen Westen in Flammen stehen. Dann trockneten und wogen die Forscher die Pflanzenteile und verteilten sie auf einem Maschendrahtgitter, über dem eine massive Abzugshaube angebracht war. Mit jedem Brennstoff entfachten sie zwei verschiedene Feuer: einen Schwelbrand mit zäh herumwaberndem Rauch sowie einen heißen, bei dem Rauch und Flammen kerzengerade nach oben schossen.

Überraschenderweise stellten sie fest, dass die Emissionen weitaus stärker von der Temperatur abhängen als von der Pflanzenart. Bei »kühleren« Bränden entstanden andere flüchtige organische Verbindungen (VOC, englisch für volatile organic compounds) als bei heißen. Allein durch die Temperatur des Feuers ließen sich 80 Prozent der ausgestoßenen Stoffe vorhersagen, wie das Team 2018 herausfand.

Ein kleines Molekül unterstützt im Laborversuch die Bildung von Feinstaub

Die Forscher nahmen Proben des Rauchs von einigen ihrer im Labor entfachten Brände und steckten sie in einen Behälter aus Teflon, in dem ultraviolettes Licht die Sonneneinstrahlung simulierte. So wollten sie Feinstaubpartikel untersuchen, die bei allen Bränden freigesetzt werden.

In den Teflonbehältern ging die anfängliche Bildung von Feinstaub schnell zurück, und die Partikelkonzentration nahm – wie erwartet – ab. In manchen Experimenten begannen bestimmte Stoffe jedoch nach einigen Stunden zu kondensieren. Wie Quecksilberperlen, die sich zusammenlagern, setzten sich auf den wachsenden Oberflächen weitere Teilchen ab, so dass die Feinstaubwerte, die nur wenige Stunden zuvor gesunken waren, erneut in die Höhe schossen. Warneke war sich nicht sicher, welcher Prozess die Neubildung der Partikel erklärt, aber er glaubte, einen guten Ausgangspunkt gefunden zu haben: Meist stieg der Anteil, wenn ein Stoff namens Brenzcatechin zugegen war.

Das Molekül ist ein struktureller Bestandteil von Catechinen, einer Klasse von Stoffen, die in Pflanzen enthalten

sind. Es wird bei Schwelbränden freigesetzt, also bei Feuern, die nicht besonders heiß sind. Sollte also die Feinstaubbildung auf diese Weise direkt mit der Temperatur zusammenhängen? Falls ja, dann könnte man möglicherweise die Feinstaubemissionen mit Hilfe von Satelliten vorhersagen, die die Feuerintensität messen, hofft Warneke.

Darüber hinaus fand er gemeinsam mit dem NOAA-Wissenschaftler Matthew Coggon heraus, dass Brenzcatechin auch bei der Ozonbildung im Zusammenhang mit Waldbränden eine Schlüsselrolle spielen könnte. Die langfristige Exposition mit Ozon kann die Lungenfunktion beeinträchtigen. Das Gas entsteht nicht unmittelbar bei Wildfeuern, sondern erst, wenn die richtige Mischung von Stickoxiden (NO_x), VOC und Sonnenlicht vorliegt (siehe »So entsteht Ozon«, S. 64). Flüchtige organische Verbindungen und Sonnenlicht sind bei Waldbränden immer vorhanden. In welcher Form Stickstoffverbindungen dabei in die Luft gelangen, unterscheidet sich jedoch. Bei Schwelbränden wird aus Pflanzen Ammoniak (NH_3) freigesetzt, was nicht sehr reaktiv ist. Heiße Feuer hingegen produzieren flüchtige Stickoxide (NO und NO_2). »Das Knifflige daran ist, dass die Chemie in einer Rauchfahne bei ziemlich hohen Temperaturen abläuft«, sagt Coggon. »Selbst bei großen Bränden verwandeln sich die ursprünglichen Bestandteile daher innerhalb einer Stunde in etwas komplett anderes.«

Die Gründe dafür kennt man seit fast 20 Jahren. Bei großen Waldbränden werden die von den verbrennenden Pflanzen freigesetzten Stickoxide in den Rauch gerissen und durch die Hitze des Feuers in die obere Troposphäre geweht. Beim Aufsteigen reagieren einige der Verbindungen mit Radikalen, bis nach einer Kaskade von Reaktionen aus den ursprünglichen Stickoxiden Peroxyacetylnitrat (PAN) entstehen kann (siehe Grafik auf S. 65). Bei ausreichend niedrigen Temperaturen ist dieses Molekül relativ stabil. Solange der Rauch in der recht kühlen Umgebung in der oberen Troposphäre weiterdriftet, bleiben die Stickstoffverbindungen daher auf diese Weise gebunden, wodurch der Ozonbildungsprozess im Wesentlichen eingefroren ist.

Sobald der Rauch jedoch wieder in die wärmeren, tieferen Lagen absinkt, zerfällt das PAN, und die Stickoxide melden sich zurück. Dadurch kann sich plötzlich Ozon in Mengen bilden, die für den Menschen giftig sind – hunderte oder sogar tausende Kilometer windabwärts des Feuers. Aus diesem Grund schnellen bei bestimmten Flächenbränden die Ozonwerte in Städten in die Höhe, die weit vom Brandherd entfernt liegen. Treffen die Emissionen eines Waldbrands an einem heißen Sommertag auf eine Stadt, deren Luft bereits reichlich Stickoxide aus Straßenverkehr und Industrie enthält, werden die zulässigen Grenzwerte schnell um ein Vielfaches überschritten. Wegen solcher Bedingungen maß Seattle 2018 an mehreren Stellen die schlechteste Luftqualität der Welt.

Coggon und Warneke wollten nun wissen, ob auch andere Moleküle eine ähnliche Rolle spielen wie PAN. Bei ihren Laboruntersuchungen stießen sie auf Brenzcatechin. Mit Stickoxiden in der Atmosphäre können sich daraus nitrierte aromatische Verbindungen bilden, wie eine Forschungsgruppe kürzlich herausgefunden hat. Zunächst war



das kein besonders interessantes Ergebnis – nur ein weiteres Molekül unter den Hunderten flüchtiger organischer Verbindungen, die sie identifiziert hatten. Doch in den folgenden zwei Jahren entwickelte Coggon ein chemisches Modell, das nahelegte, dass Nitroaromaten eine Schlüsselrolle im Stickstoff-Lebenszyklus und damit bei der Ozonbildung spielen könnten. »Immer wenn Nitroaromaten zugegen waren, war weniger Ozon vorhanden«, sagt er.

Nach einer groben Überschlagsrechnung auf der Grundlage seines Modells vermutete Coggon, dass durch Waldbrände erhebliche Mengen an Nitroaromaten entstehen. In diesem Zusammenhang waren diese Moleküle noch nie untersucht worden. Daher bauten Warneke und Coggon aus einem ihrer bestehenden Werkzeuge ein Gerät, das deren Konzentration in der Luft zehnmals pro Sekunde misst. Dieses so genannte Protonentransfer-Reaktions-Massenspektrometer montierten sie in ihren Forschungsjet.

Messungen aus dem Flugzeug bestätigen die theoretischen Annahmen

»Wir fliegen jetzt in die Rauchwolke«, kündigt Crawford über das Kommunikationssystem des Flugzeugs an, als die Maschine zu wackeln und zu piepsen beginnt. Eineinhalb Stunden nachdem wir das Feuer in Montana verlassen haben, sind wir nun in einem raschen Sinkflug an der Stelle, die Warneke rot eingekreuzt hat: beim 14000 Hektar umfassenden »Tucker Fire« im Schatten des Mount Shasta. Als das Flugzeug in die Rauchschwaden eintritt, wird das Licht orange und der Geruch von Holzfeuer erfüllt die Kabine.

Coggon sitzt hinter der linken Tragfläche und starrt auf einen Bildschirm mit den Daten aus dem Spektrometer. Die Tabelle zeigt die molekulare Verteilung von hunderten verschiedenen VOC. Coggons Augen sind auf den Wert für Brenzcatechin fixiert. Das Molekül ist nun in sehr großen Mengen vorhanden, seine Konzentration nimmt jedoch schnell ab. »Das ist sogar noch mehr, als wir vor zwei Tagen gesehen haben«, sagt er. Plötzlich ist er auf den Beinen und stakst durch die Turbulenzen zu dem Doktoranden Wyatt Brown. Dessen Instrument kann im Gegensatz zu Coggons Submikron-Aerosole wie Nitroaromaten detektieren. Und tatsächlich: Brown deutet auf den Bildschirm, der anzeigt, dass sie soeben nitririerte Brenzcatechine in der Rauchfahne eindeutig nachgewiesen haben.

Coggons Reaktion zu beschreiben, ist fast unmöglich: Er sah in diesem Moment, wie die Realität seine theoretischen Modelle bestätigte. Und trotzdem markierte die Entdeckung nur den Anfang eines komplizierten Prozesses. Coggon vermutete später, dass es zwei Jahre und weitere Studien benötigen würde, um festzustellen, ob nitririerte Brenzcatechine ähnlich wie PAN als Stickstoffreservoir fungieren, welche das Element vorübergehend gefangen halten und die Ozonproduktion verzögern, oder ob sie es dauerhaft einschließen und diese damit stoppen. Beide Theorien hätten möglicherweise tief greifende Auswirkungen auf die Vorhersage der Ozonbildung durch Rauch und damit auf dessen Auswirkungen für den Menschen.

Im Lauf der Messkampagne traten immer mehr solche Rätsel auf. Da war der Hausbrand, den sie zufällig gemessen

hatten, als sie brennendes organisches Material in Kansas untersuchen wollten. Angesichts der zunehmenden Regelmäßigkeit, mit der Waldbrände auf die menschliche Infrastruktur übergreifen, könnte diese Fallstudie noch besonders nützlich sein. Oder das kontrollierte Feuer in den Kiefernwäldern Floridas, das fast unmittelbar nach seiner Entzündung massenhaft Ozon produzierte, während ein hochintensiver Flächenbrand in Washington praktisch keins zu emittieren schien. Warneke vermutete, dass der Unterschied recht einfach zu erklären sei: Ozonbildung benötigt Licht. Beim Feuer in Florida verbrannte stickstoffreiches Brennmaterial an einem hellen, sonnigen Tag mit wenig Rauch, während die Rauchsäule in Washington 10000 Meter in die Höhe ragte und durch Licht verursachte Reaktionen verhinderte, weil kein Sonnenlicht in ihr Inneres dringen konnte.

Das vielleicht quälendste Rätsel von allen war die sekundäre Bildung kleinster Feinstaubpartikel. Bei mehreren Bränden ließ sich beobachten, dass die Menge der weniger als 2,5 Mikrometer großen Teilchen zunächst abnahm, um anschließend wieder zuzunehmen. Waren die gleichen Prozesse, die sie im Labor beobachtet hatten, auch in der Natur am Werk?

Nach einer Stunde, in der sie kreuz und quer durch die Rauchfahne des »Tucker Fire« geflogen sind, versinkt die Sonne hinter dem Pazifik. Aus dem Fenster des Jets ist das Feuer am Boden noch sichtbar, als langes, orangefarbenes Band schlängelt es sich durch die Schwärze. Die DC-8 hat nur noch wenig Kraftstoff zur Verfügung. Die Piloten lenken das Flugzeug in eine Kurve nach Osten, und Crawford verlässt schließlich das Cockpit. »Als einzelnes Ereignis war dieses hier ein Tropfen auf den heißen Stein«, sagt er. »Aber die Erkenntnisse, die wir daraus extrapolieren können, werden wirklich wertvoll sein.« ◀

QUELLEN

Finewax, Z. et al.: Identification and quantification of 4-nitrocatechol formed from OH and NO₃ radical-initiated reactions of catechol in air in the presence of NO_x: Implications for secondary organic aerosol formation from biomass burning. *Environmental Science & Technology* 52, 2018

McClure, C.D., Jaffe, D.A.: U.S. particulate matter air quality improves except in wildfire-prone areas. *PNAS* 115, 2018

Prunicki, M. et al.: The impact of prescribed fire versus wildfire on the immune and cardiovascular systems of children. *Allergy* 74, 2019

Roberts, J.M. et al.: Isocyanic acid in the atmosphere and its possible link to smoke-related health effects. *PNAS* 108, 2011

Sekimoto, K. et al.: High- and low-temperature pyrolysis profiles describe volatile organic compound emissions from western US wildfire fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 2018

LITERATURTIPPS

spektrum.de/wissen/1639880

Was wir noch nicht über Feinstaub wissen

spektrum.de/news/1674074

Die Folgen der riesigen arktischen Flächenbrände

Unsere Neuerscheinungen!



Plankton: Motor der Evolution • Symbiose: Teamgeist der Tiefsee • Biskaya: Der Canyon der Wale • Artenschutz: Haiwanderungen auf der Spur • Klimaforschung: Dem Ozean geht die Luft aus • Unterwasserbergbau: Goldrausch in der Tiefe • € 8,90



Planetenforschung: Streit um die frühe Erde • Supervulkan: Inferno aus der Tiefe • Klimawandel: Gefährlicher Wetterverstärker • Kohlendioxid: Das Klimagas vergraben • Arktis: Auf dünnem Eis • € 8,90



Lernen & Verhalten: Pawlows Hund • Körperempfindung: Die Gummihand-Illusion • Modelllernen: Wann Kinder Gewalt imitieren • Macht der Gruppe: So leicht manipulieren uns andere • Freier Wille: Entscheidet Ihr Hirn, bevor Sie es tun? • € 8,90



Mikrobiom: Stimmungsmacher im Darm • Psychische Erkrankungen: Papa, warum weinst du? • Partnerschaft: Richtig streiten • Einsamkeit: Die Epidemie, die keine ist • Nachhaltig leben: Was die Psychologie dazu beitragen kann • € 5,90



Denisovaner: Sah so der Denisovamensch aus? • Münchhausen: Das wahre Leben des Lügenbarons • Elfenbein: Die filigranen Meisterwerke der Barockkünstler • Altes Ägypten: Wachsköpfe für die Ewigkeit • € 5,90



Flynn-Effekt: Warum der Intelligenzquotient nicht weiter steigt • Woran erkennt man intelligente Babys? • »Mozart-Effekt«: Klüger durch Musizieren? • Hochbegabung: Missverständnisse, Talent • Stereotype: Die Geniefälle • € 5,90

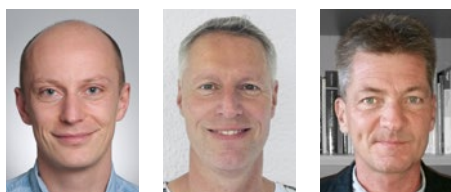
Hier bestellen:

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/shop

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN ENERGIE SPEICHERN AUF DIE SCHNELLE

Superkondensatoren können rasch große Mengen elektrischer Energie aufnehmen und wieder bereitstellen. Wie das System funktioniert, lässt sich mit einfachen Experimenten sichtbar machen.



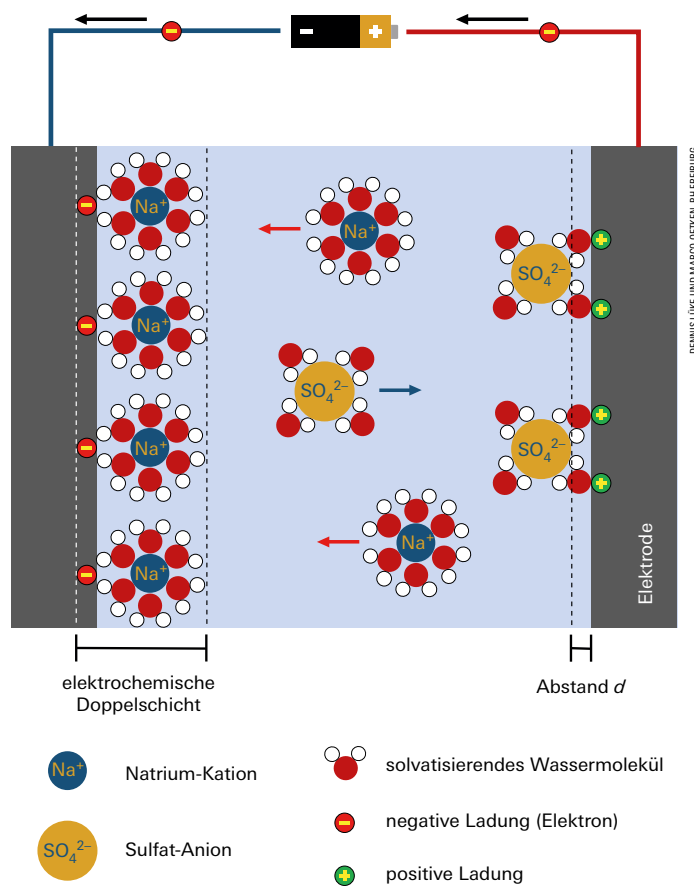
Dennis Lüke (links) beschäftigt sich an der Pädagogischen Hochschule Freiburg mit der experimentellen Erschließung moderner Energiespeicher für den Chemieunterricht. **Matthias Ducci** (Mitte) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» spektrum.de/artikel/1725076

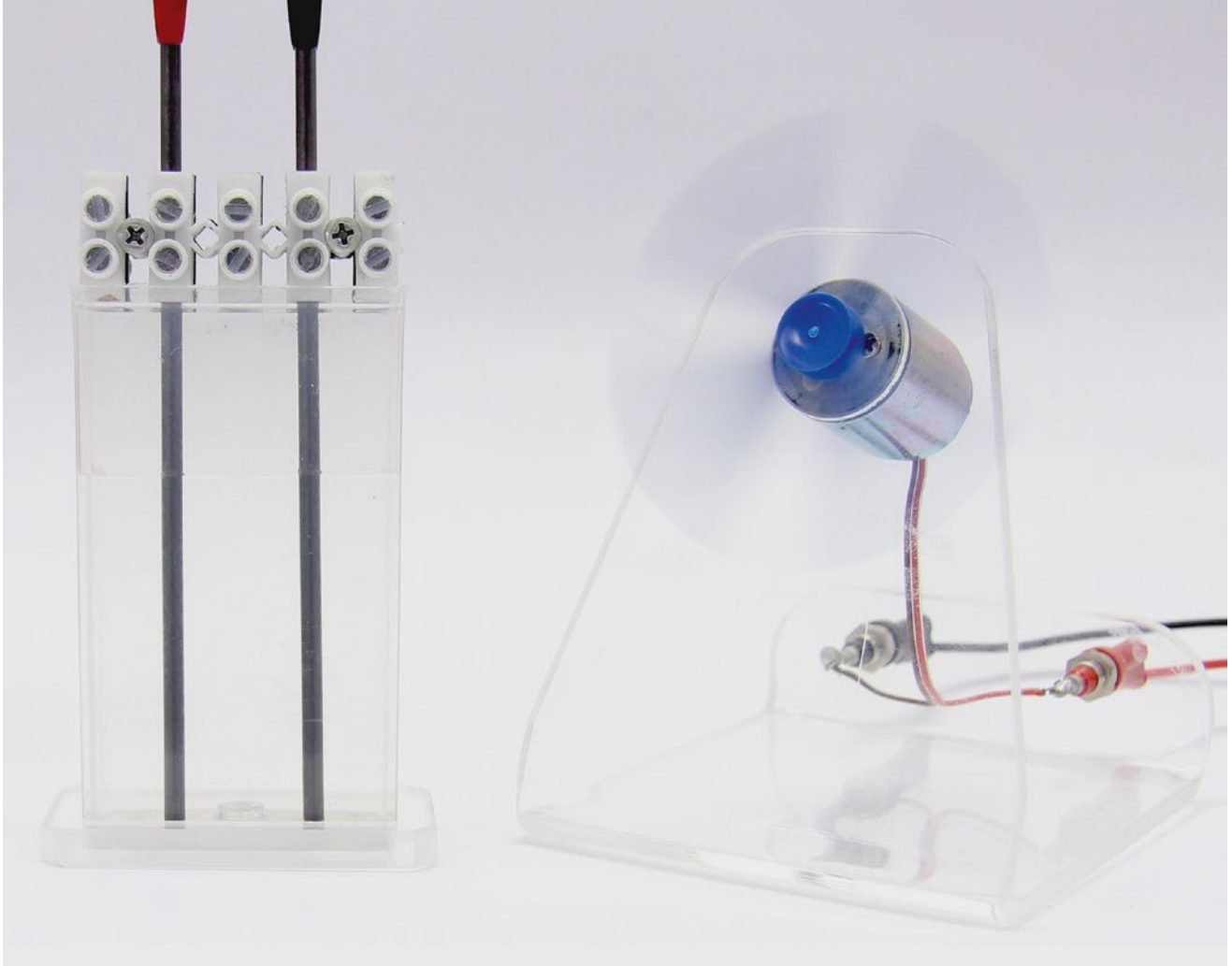
Obwohl Hermann von Helmholtz (1821–1894) bereits vor fast 200 Jahren den Grundstein für Superkondensatoren als Energiespeicher legte, fristeten diese lange Zeit ein Schattendasein. Das liegt unter anderem daran, dass in mobilen Endgeräten vorrangig Lithium-Ionen-Akkumulatoren zum Einsatz kommen. Sie weisen eine hohe Energiedichte auf und lassen sich daher platzsparend unterbringen.

Dabei bieten Superkondensatoren in bestimmten Bereichen klare Vorteile gegenüber der dominierenden Lithium-Ionen-Technologie: Sie kommen ohne teure Metalloxide in den Elektrodenmaterialien aus, sind deutlich langlebiger und lassen sich sehr viel schneller laden und entladen als Akkumulatoren. Muss also in kurzer Zeit viel elektrischer Strom gespeichert oder bereitgestellt werden, sind Superkondensatoren die perfekten Kandidaten. Daher kommen sie heute in zahlreichen Bereichen zum Einsatz: von stationären Energie-Back-up-Systemen bis hin zu mobilen Anwendungen wie der Bremskraftrückgewinnung in Bussen und Bahnen oder dem Beschleunigen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen.

Die Vorteile der Superkondensatoren gründen auf ihrer einfachen, aber effektiven Funktionsweise. Der klassische

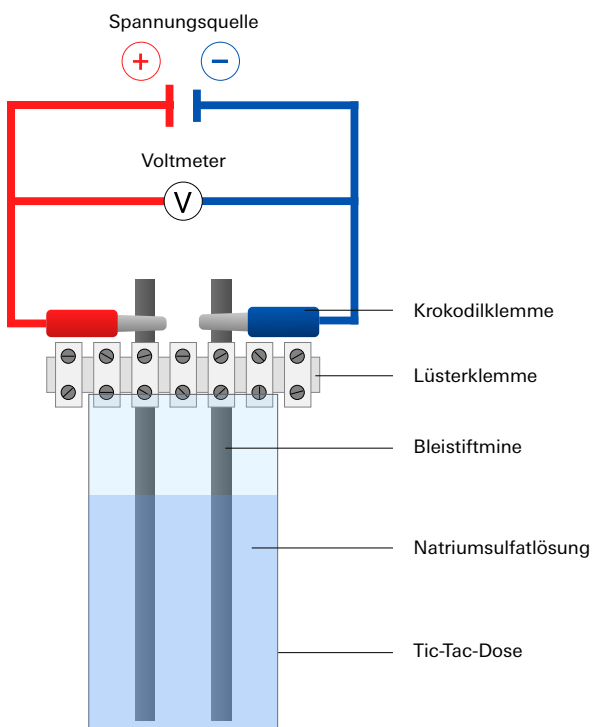


Ladungsvorgang eines elektrochemischen Doppelschichtkondensators in wässriger Salzlösung.



DENNIS LÜKE UND MARCO DEYKEN, PH FREIBURG

Ein aus Alltagsmaterialien aufgebauter Superkondensator (schematischer Aufbau unten) kann einen kleinen Propeller etwa eine halbe Minute lang betreiben.

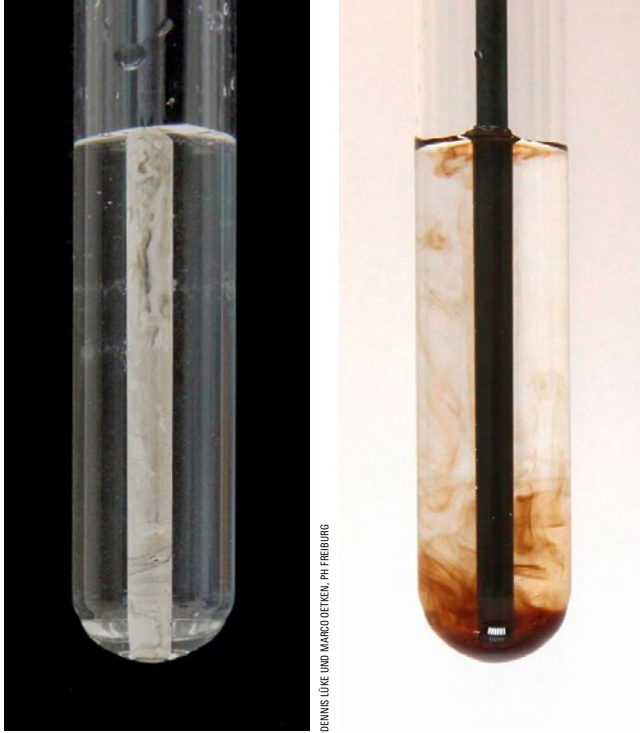


DENNIS LÜKE UND MARCO DEYKEN, PH FREIBURG

elektrochemische Doppelschichtkondensator besteht aus zwei Elektroden, die in eine leitfähige Salzlösung – den Elektrolyten – eintauchen. Das Anlegen einer Ladespannung polarisiert die Elektroden gegensätzlich, indem es Elektronen aus der Pluspol-Elektrode in die des Minuspols zwingt. Daraufhin streben die Ionen in der Salzlösung einen Ausgleich dieser neuen Ladungsverhältnisse an und bewegen sich jeweils zu der Elektrode, die nun die ihnen entgegengesetzte Ladung aufweist. Negativ geladene Ionen (Anionen) wandern dementsprechend zum positiv polarisierten Pluspol und Kationen zum Minuspol. Die Ionen liegen dabei aber nicht »nackt« in der Lösung vor, sondern sind stets von einer Hülle aus Lösungsmittelmolekülen umgeben. In der wässrigen Salzlösung unseres Beispiels besteht diese »Solvathülle« aus Wassermolekülen.

Die Ionen lagern sich samt ihrer Solvathülle an das Elektrodenmaterial an (sie adsorbieren). Dadurch entstehen die für dieses Speichersystem namensgebenden elektrochemischen Doppelschichten (siehe Grafik auf S. 70), die auf der einen Seite negativ, auf der anderen positiv polarisiert sind. Die Solvathülle der Ionen hält die entgegengesetzten Ladungen auf Abstand und damit die Doppelschicht aufrecht.

Auf Grund der Ladungstrennung in der elektrochemischen Doppelschicht bildet sich ein elektrisches Feld aus, das sich über den Abstand der getrennten Ladungen hinweg erstreckt (siehe Grafik auf S. 70). In diesem Bereich wird Energie gespeichert, die man der Zelle beim



DENNIS LÖBE UND MARCO DETKEN, PH FREIBURG

Abhängig von der Ladenspannung verschiebt sich das Potenzial des Graphits an Plus- und Minuspol. Mit den polarisierten Elektroden lassen sich eindrucksvolle Redoxreaktionen durchführen: Am negativ polarisierten Minuspol scheidet sich aus einer Silbernitratlösung elementares Silber ab (links), während der positiv polarisierte Pluspol Iodid zu Iod oxidiert (rechts).

Laden zuführt. Die Doppelschichten an Plus- und Minuspol verhalten sich dabei wie zwei in Reihe geschaltete physikalische Plattenkondensatoren.

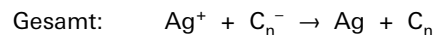
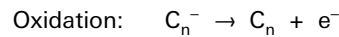
Anders als bei Akkus kommt es also bei der Energiespeicherung in elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren zu keiner Elektronenübertragung zwischen Ionen und Elektroden, das heißt auch zu keiner chemischen Reaktion. Weil die Ionenadsorption ausschließlich auf die Elektrodenoberfläche begrenzt ist, lässt sich der Superkondensator sehr schnell laden und entladen.

Mit einfachen Mitteln kann man einen Superkondensator zu Hause nachbauen. Als Elektrodenmaterial kommen dazu Bleistiftminen aus Graphit zum Einsatz. Um eine ausreichend große Oberfläche für die Ionenanlagerung zu schaffen, glüht man die Minen zunächst über einer Flamme aus. Dabei verbrennt das vom Hersteller zugeführte Bindemittel, so dass ein leitfähiges Graphitgerüst mit großer Oberfläche zurückbleibt. Als Elektrolyt wird eine 0,5-molare wässrige Natriumsulfatlösung (Na_2SO_4) eingesetzt und in eine kleine Plastikdose gefüllt. Die ausgeglühten Elektroden können zur besseren Handhabung mit einer Lüsterklemme fixiert werden, bevor man sie in den Elektrolyten stellt. Anschließend wird der fertige Superkondensator bei 1,6 Volt geladen und betreibt bereits nach einer Ladezeit von 30 Sekunden einen kleinen Glockenankermotor (siehe Bilder auf S. 71).

Wie die Energiespeicherung in einem solchen Superkondensator funktioniert, kann man anhand zweier daran beteiligter Phänomene veranschaulichen: der Elektrodenpolarisation und der Ionenadsorption.

Die Elektrodenpolarisation entsteht, weil (wie anfangs beschrieben) das Anlegen einer Ladenspannung dem Pluspol Elektronen entzieht und diese dem Minuspol zuführt. Dadurch verschiebt sich das Elektrodenpotenzial des Graphits in den positiven beziehungsweise negativen Bereich. Dank dieser Potenzialverschiebungen können nun Redoxreaktionen ablaufen, die mit unpolarisiertem Graphit nicht möglich sind. Eine solche ist die Reduktion von Silberionen zu elementarem Silber durch den negativ polarisierten Minuspol des Superkondensators. Um diese Reaktion ablaufen zu lassen, wird der selbst gebaute Superkondensator bei 1,6 Volt geladen. Anschließend entnimmt man die als Minuspol geschaltete Bleistiftmine aus dem Energiespeicher und stellt sie in eine Silbersalzlösung (AgNO_3 , bestehend aus Ag^+ - und NO_3^- -Ionen). Augenblicklich scheidet sich festes Silber auf der Elektrode ab (siehe Bild links, linkes Foto).

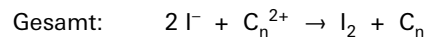
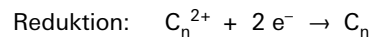
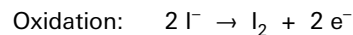
Silber ist ein sehr edles Metall und liegt daher bevorzugt in seiner reduzierten, festen Form vor. Um die Silberionen aus der Salzlösung in diese Gestalt zu überführen, braucht es aber Elektronen. Und eben jene Elektronen liefert die negativ polarisierte Superkondensator-Elektrode. Folgende Redoxreaktion läuft ab:



C steht dabei für Kohlenstoff, aus dem der Graphit besteht, und n für eine unbestimmte Menge davon.

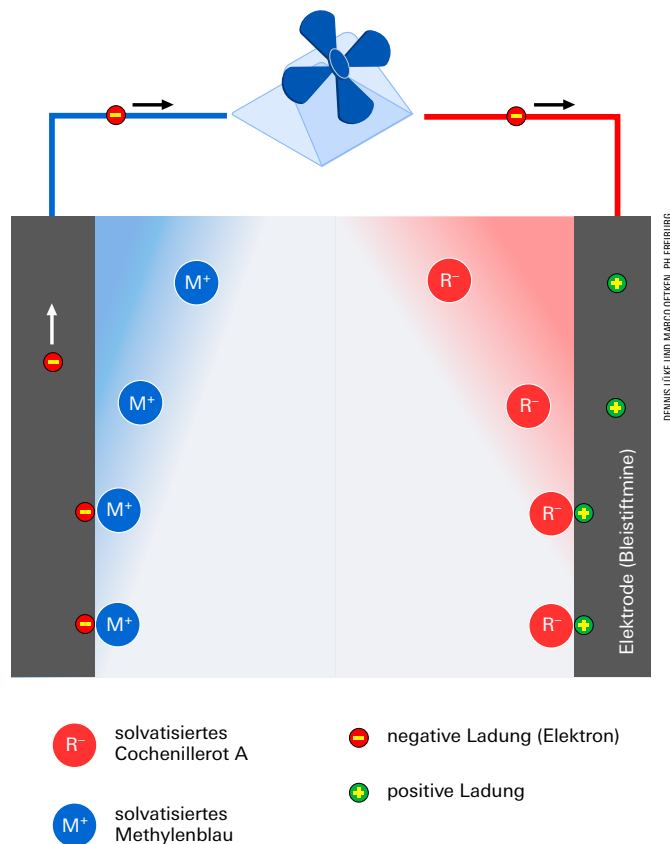
Auch mit der als Pluspol geschalteten Elektrode lassen sich nun Redoxreaktionen durchführen. Dazu entnimmt man die positiv polarisierte Bleistiftmine nach dem Ladevorgang ebenfalls aus dem Superkondensator und bringt sie in eine Kaliumiodidlösung (KI, bestehend aus K^+ - und I^- -Ionen).

Da an der positiv polarisierten Elektrode ein Elektronenmangel herrscht, werden Elektronen der Iodidionen auf diese übertragen.



Das entstehende elementare Iod (I_2) bildet mit überschüssigen Iodidionen (I^-) das gut sichtbare braune Triiodid (I_3^-) (siehe Bild oben, rechtes Foto). Der Farbeindruck lässt sich noch intensivieren, wenn man wenige Tropfen Stärkelösung hinzugibt. Je nachdem, welche Art von Stärke man verwendet, bilden sich dadurch dunkelblaue bis rötliche Farbkomplexe.

Die Elektrodenpolarisation ließ sich durch diese Redoxreaktionen, die mit unpolarisiertem Graphit nicht möglich sind, leicht veranschaulichen. Doch wie gelingt der Nachweis für die Ionenadsorption, die ja der Grund für die Polarisation



Farbige Ionen im Elektrolyten machen die elektrochemische Doppelschicht sichtbar: Nach dem Laden werden die Elektroden in eine farblose Elektrolytlösung getaucht. Durch das Entladen des Superkondensators löst sich die Doppelschicht dort auf, und die desorbierten Farbstoffionen zeigen sich als Farbschleier um die Elektroden.

ist? Ganz einfach: Man verwendet Ionen, die man auch sehen kann! Dazu eignen sich zum Beispiel das negativ geladene Cochenillerot A sowie das positiv geladene Methylenblau. Beide kommen als Lebensmittelfarbstoffe zum Einsatz und sind daher leicht zu beschaffen. Man setzt eine Lösung aus Methylenblau und Cochenillerot A an und verwendet diese als Elektrolyten für den Superkondensator, den man anschließend für ein bis zwei Minuten lädt. Da die Lösung intensiv gefärbt ist, lässt sich zunächst jedoch nichts erkennen. Darum überführt man die Elektroden nach dem Ladevorgang in eine farblose Natriumsulfatlösung, wo sie entladen werden.

Bereits nach kurzer Zeit sind die desorbierenden, also sich von den Elektrodenoberflächen lösenden Ionen sichtbar: Um den Minuspol herum zeigt sich ein blauer Farbschleier, während der Elektrolyt um den Pluspol rot erscheint (siehe Bilder oben).

Der Grund für diese eindruckliche Farbtrennung ist die Doppelschicht, die sich beim Laden des Superkondensators ausbildet. Weil der Minuspol negativ polarisiert ist, bewegen sich positiv geladene Kationen, in diesem Fall also das Methylenblau, zu ihm hin und adsorbieren an seiner Oberfläche. Die Cochenillerot-A-Anionen hingegen wandern in die entgegengesetzte Richtung und adsorbieren am Pluspol. Beim anschließenden Entladen gleichen sich die Ladungen der Elektroden wieder aus. Folglich baut

sich die elektrochemische Doppelschicht ab, und die Farbstoffionen lösen sich von den Elektroden. Sie diffundieren langsam in die farblose Salzlösung, wo sie als deutliche Farbschlieren im Bereich um die Elektroden erscheinen. ◀

QUELLEN

Burke, A. et al.: Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources* 91, 2000

Flint, A. et al.: *Chemie fürs Leben – Elektrochemie*. Universität Rostock, 2016

Gu, W. et al.: Review of nanostructured carbon materials for electrochemical capacitor applications: advantages and limitations of activated carbon, carbide-derived carbon, zeolite-templated carbon, carbon aerogels, carbon nanotubes, onion-like carbon, and graphene. *WIREs Energy Environ* 3, 2014

Kötz, R. et al.: Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta* 45, 2000

Pal, B. et al.: Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review. *Nanoscale Advances* 1, 2019

EXPERIMENTIERANLEITUNG

www.spektrum.de/artikel/1725076

Hier finden Sie eine PDF-Datei mit ausführlichen Versuchsbeschreibungen.

ASTRONOMIE DER GALAKTISCHE ARCHIPEL

Es gilt als nicht unwahrscheinlich, dass es außerirdische Zivilisationen in der Milchstraße gibt. Doch wieso haben wir dann noch nichts von ihnen mitbekommen? Eine neue Erklärung besagt: Vielleicht driften wir in einer besonders schwer zugänglichen Region durchs All.



HEINSA ESCANLAR

Caleb Scharf ist Direktor des Astrobiology Center an der Columbia University in New York und Autor mehrerer Bücher, darunter »The Copernicus Complex« (2014) und »The Zoomable Universe« (2017). Er schreibt einen Blog für »Scientific American« und hat Artikel in vielen anderen Zeitschriften veröffentlicht.

» spektrum.de/artikel/1725078

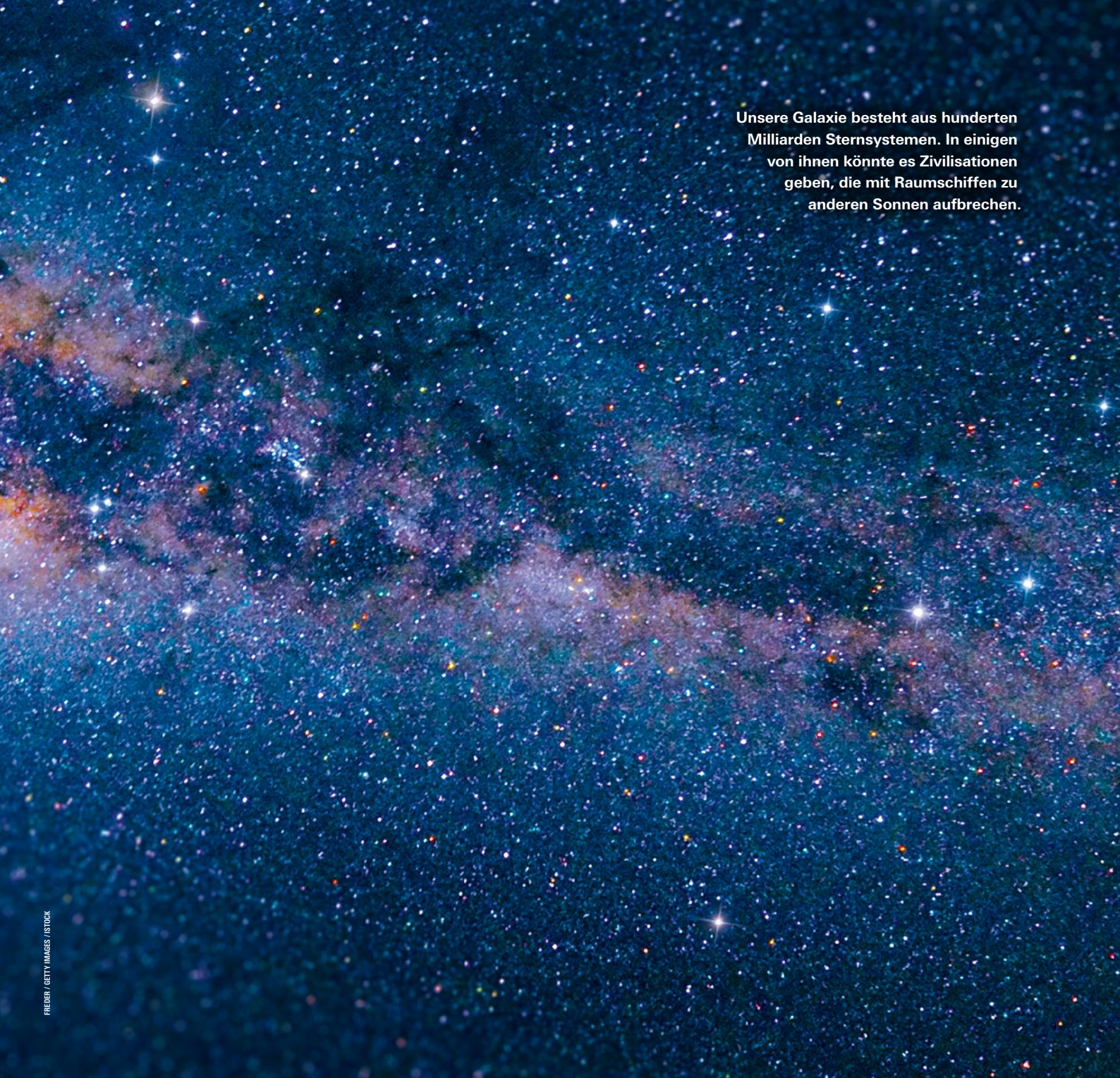
FREDER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Am 15. Januar 1790 kamen neun Meuterer von der HMS Bounty, 18 Menschen aus Tahiti und ein Baby auf der Insel Pitcairn an, einem der isoliertesten bewohnbaren Orte der Erde. Umgeben von hunderten Kilometern offenem Meer ist das Eiland im Südpazifik der Inbegriff der Einsamkeit. Bis ins 15. Jahrhundert hatte eine Gruppe Polynesier auf der Insel gelebt, die dann jedoch ausgestorben ist. So betrat die Besatzung der Bounty eine menschenleere Insel – und erhielt erst 18 Jahre später Besuch von einem anderen Schiff.

Die Geschichte ist ein extremes Beispiel für die ungewöhnliche Dynamik der Besiedlung des Südpazifiks. In

Polynesien, Mikronesien und Melanesien gibt es Zehntausende von Inseln, die über Millionen von Quadratkilometern verstreut sind. Bei vielen von ihnen handelt es sich bloß um schroffe Felsen oder Korallenriffe. Aber es sind auch paradiesische Eilande dabei, die immer wieder Menschen angelockt haben.

Damit weist die Südsee so manche Parallele zu unserem kosmischen Umfeld auf: In der Milchstraße gibt es hunderte Milliarden Sterne. Manchen Hochrechnungen zufolge kreisen um zehn Milliarden von ihnen Felsplaneten, auf deren Oberfläche gemäßigte Temperaturen herrschen könnten. Wie die Inseln der Erde könnten diese Exoplane-



Unsere Galaxie besteht aus hunderten Milliarden Sternsystemen. In einigen von ihnen könnte es Zivilisationen geben, die mit Raumschiffen zu anderen Sonnen aufbrechen.

FREIDER / BETTY IMAGES / ISTOCK

ten Lebewesen einen Platz bieten. Und vielleicht haben einige von ihnen die Technologie entwickelt, die nötig ist für eine Reise zu den Sternen.

Ein berühmtes Mittagessen und Enrico Fermis Paradoxon

Dieses Gedankenspiel wirft allerdings eine Frage auf, die der Physiker Enrico Fermi bereits im Jahr 1950 gestellt haben soll. Bei einem Mittagessen mit Kollegen, so die berühmte Anekdote, platzte es auf einmal aus ihm heraus: »Fragt ihr euch nicht manchmal, wo die alle stecken?« Gemeint waren jene raumfahrenden Außerirdischen, die –

sofern es sie gibt – doch längst auf der Erde angekommen sein müssten.

Die Frage entwickelte sich im Lauf der Zeit zu dem berühmten, wenn auch etwas unglücklich benannten »Fermi-Paradoxon«: Wenn technologisch versierte Spezies nicht extrem selten sind, sollten sie sich inzwischen praktisch überall in der Galaxie ausgebreitet haben. So legte es zumindest eine von Fermis blitzschnellen Überschlagsrechnungen nahe, für die der Wissenschaftler bei seinen Kollegen bekannt war.

1975 erstellte der Astrophysiker Michael Hart eine erste detaillierte Studie zu Fermis Idee. Er hielt zunächst »Fakt A«

fest: Heute gibt es keine Außerirdischen auf der Erde, was für die meisten besonnenen Menschen wohl eine unumstößliche Tatsache sein dürfte. Sie führte Hart zu der Schlussfolgerung, dass es in unserer Galaxie derzeit keine anderen technologisch weit entwickelten Zivilisationen gibt – oder jemals gegeben hat. Die Argumentation ähnelte der von Fermi: Eine Spezies mit einigermaßen weit entwickelten Raumantrieben würde, wenn man in kosmischen Maßstäben denkt, nur recht wenig Zeit brauchen, um die 100 000 Lichtjahre messende Milchstraße zu besiedeln.

Der US-Physiker Frank Tipler rechnete 1980 vor, dass entsprechend motivierte Aliens binnen einer Million Jahren wohl jeden Fleck unserer Galaxie erreichen könnten. Wenn man bedenkt, dass es unser Sonnensystem seit 4,5 Milliarden Jahren gibt und dass sich die Milchstraße vor mindestens zehn Milliarden Jahren gebildet hat, sollten die Außerirdischen also mehr als genug Zeit gehabt haben, um sich auf allen bewohnbaren Welten niederzulassen.

Sowohl Hart als auch Tipler gingen davon aus, dass die Sternreisenden geeignete Planeten kolonisieren und diese dann als Ausgangsbasis für die weitere Expansion nutzen. Im Detail trafen die beiden Forscher jedoch unterschiedliche Annahmen: Hart ging von einer biologischen Spezies aus, deren Mitglieder sich selbst ins Raumschiff setzen. Tipler hingegen spekulierte über Schwärme von sich selbst replizierenden Sonden, die sich automatisiert über die Galaxis ausbreiten.

Die Unterschiede machen sofort eine der großen Herausforderungen dieser Art von Studien deutlich: die nicht überprüfbareren Grundannahmen. Einige sind vernünftig und leicht zu rechtfertigen, andere heikel. Beispielsweise enthalten alle Szenarien Vermutungen über die Technologie, die für interstellare Raumflüge nötig ist. Auch die Frage, ob intelligente Wesen Reisen von Stern zu Stern überhaupt überleben können, ist bisher offen.

Wir Menschen wissen bisher lediglich, dass solch ein Unterfangen eine große Herausforderung ist. Selbst ein Raumschiff, das zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreicht, übersteigt derzeit unsere technischen Möglichkeiten bei Weitem. Als Antrieb kämen hier wohl nur gezielt gezündete Wasserstoffbomben in Frage. Oder kolossale Lichtsegel, die von Laserstrahlen angetrieben werden.

Ein »großer Filter«, der alle Zivilisationen zu Fall bringt?

Außerdem müsste man Raumgleiter vor Gasatomen und Staubkörnern schützen. Bei derart hohen Geschwindigkeiten würde jedes von ihnen wie eine Granate einschlagen. Langsamere Raumschiffe wären daher sicherer, bräuchten jedoch viele Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende für eine Reise zum nächsten Stern. Diese Zeitspanne dürfte die Lebensspanne der meisten Organismen übersteigen – und stellt daher entsprechende Anforderungen an die Lebenserhaltungssysteme.

Die umstrittensten Annahmen betreffen wohl die Motivation fremder Zivilisationen sowie deren Überlebensdauer. Wenn zum Beispiel eine außerirdische Spezies einfach nicht daran interessiert ist, andere Sterne zu besuchen, führt die

ganze Idee einer galaktischen Besiedlung buchstäblich ins Leere. Diesen Einwand brachten Carl Sagan und William Newman bereits im Jahr 1983 vor. Aber wie mein Kollege Jason Wright feststellt, ist die Behauptung wohl ein Trugschluss, zumindest wenn man damit Fermis Frage beantworten will. Denn es dürfte unmöglich sein, mit Gewissheit über das Verhalten einer ganzen Spezies zu spekulieren, solange diese aus Individuen besteht.

Zumindest bei uns Menschen hat jedenfalls jeder Einzelne eine eigene Sichtweise, und entsprechend wird es immer Menschen geben, die ins Weltall aufbrechen wollen. Und selbst wenn die überwiegende Mehrheit der mutmaßlichen Raumfahrer-Aliens keine galaktische Diaspora anstrebt: Es reicht schon aus, wenn eine einzige weit entwickelte Kultur aus diesem Rahmen fällt, um potenziell Lebensspuren über etliche Sternsysteme zu verteilen.

Da verwundert es wenig, dass in der Geschichte von Fermis Paradoxon viel über die zu Grunde liegenden Annahmen gestritten wurde und es eine Vielzahl angeblicher Lösungen gibt. So könnte man zum Beispiel für die schnelle Durchquerung des interstellaren Raums derart viele Ressourcen brauchen, dass dies selbst sehr weit entwickelte Aliens vor ein unüberwindbares Hindernis stellt. Das würde zweifellos Harts »Fakt A« erklären.

Spuren technologischen Lebens würden auf der Erde keineswegs ewig erhalten bleiben

Oder aber das Bevölkerungswachstum ist keine so starke Motivation, den Heimatplaneten zu verlassen, wie manche Forscher annehmen. Im Gegenteil: Fremde Zivilisationen könnten eine komplett nachhaltige Existenz anstreben, die es unnötig macht, in die Ferne zu reisen. Eine weitere mögliche Erklärung für unsere kosmische Einsamkeit ist das Konzept des »großen Filters«: Vielleicht gibt es etwas, das jede Art früher oder später in ihre Schranken weist. Etwa ein unvermeidliches Scheitern der Vision einer komplett nachhaltigen Lebensweise, das unweigerlich zu großen Verwerfungen und gewaltsamen Konflikten führen könnte. Vielleicht sind es auch extreme Naturkatastrophen, die expansive Imperien regelmäßig zu Fall bringen, etwa Supernova-Explosionen oder Ausbrüche des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße.

Für großes Unbehagen sorgt auch die so genannte Zoo-Hypothese. Demnach isolieren fremde Mächte uns absichtlich und beobachten die Menschheit wie Versuchstiere. In eine ähnliche Richtung geht das, was ich das Paranoia-Szenario nenne: Es gibt andere Zivilisationen im Weltall, sie verstecken sich allerdings voreinander und verweigern die Kommunikation aus Angst vor einer Art kosmischer Fremdenfeindlichkeit.

Womöglich lässt sich das Fermi-Paradoxon viel leichter auflösen. Hier kommen die Inseln des Südpazifiks ins Spiel. Sie zeigen uns, dass Lebensräume mitunter nur spärlich und in großen zeitlichen Abständen bewohnt werden. Wie im Weltall entscheiden verschiedene Faktoren über die Besiedlung – etwa die Zahl guter Plätze oder die Zeit, die eine Bevölkerung braucht, um zu neuen Ufern aufzubrechen.

Adam Frank von der University of Rochester und ich haben uns hierzu erstmals 2015 Gedanken gemacht, wie einst Fermi und seine Kollegen bei einem gemeinsamen Mittagessen. Wir gingen dabei von einem einfachen Gedanken aus: Genau wie auf der Insel Pitcairn könnte es auch im All immer wieder neue Wellen der Erkundung oder Besiedlung geben. Wir Erdlinge hätten in diesem Szenario die Blüte unserer Zivilisation während einer der Flauten erreicht.

Die Idee knüpft direkt an Harts »Fakt A« an, dass wir auf der Erde bisher nichts von Außerirdischen mitbekommen haben. Sie geht jedoch noch weiter. So erscheint es sinnvoll, den Zeitraum einzuschränken, in der die Erde keine Kolonie einer fremden Spezies war. Der Gedanke mag abwegig klingen, aber vielleicht haben Außerirdische in der fernen Vergangenheit vorbeigeschaut – und sind dann wieder abgedüst.

Dass dies durchaus eine Möglichkeit ist, verdeutlicht eine Studie meiner Kollegen Gavin Schmidt und Adam Frank. Demnach würden Spuren technologischen Lebens auf der Erde keineswegs ewig erhalten bleiben, sondern mit der Zeit verschwinden. Nach mehr als einer Million Jahre wären bloß noch isotopische oder chemische Anomalien im Erdboden auffindbar, etwa in Form synthetischer Moleküle, Kunststoffe oder radioaktiven Fallouts. Fossile Überreste und andere paläontologische Marker wären hingegen so selten und abhängig von besonderen Entstehungsbedingungen, dass sie uns vermutlich nichts sagen würden. Tatsächlich bedecken Siedlungen heutzutage nur rund ein Prozent der Planetenoberfläche. Paläontologen der fernen Zukunft müssten also viel Glück bei der Suche nach Überresten der Menschheit haben.

Unser kosmisches Umfeld ändert sich laufend

Schmidt und Frank kommen außerdem zu dem Schluss, dass noch niemand erschöpfend nach Spuren technologischer Hochkulturen gesucht hat. Ihr Fazit: Wenn schon einmal eine Industriegesellschaft auf der Erde existiert hat, dann wüssten wir vielleicht nichts davon. Das bedeutet keineswegs, dass dies so sein muss. Es zeigt lediglich, dass die Möglichkeit nicht rigoros ausgeschlossen werden kann.

In den letzten Jahren haben wir die Implikationen dieser Ideen mit Blick auf unsere Galaxie ausgelotet. Die Leitung der Studie fiel dabei Jonathan Carroll-Nellenback von der University of Rochester zu, mit dabei war auch Jason Wright von der Pennsylvania State University. Mit Hilfe neuartiger Computersimulationen und altmodischer Papier- und Bleistift-Mathematik konnten wir ein realistischeres Bild davon zeichnen, wie sich Spezies in unserer Galaxie ausbreiten würden.

AUF EINEN BLICK KOSMISCHE EINSAMKEIT

- 1** Hochrechnungen zeigen, dass sich fortschrittliche Zivilisationen schnell über die gesamte Galaxie ausbreiten könnten. Allerdings haben wir bisher auf der Erde keine Belege für ihre Existenz gefunden. Warum?
- 2** Mögliche Antworten gibt es viele: Vielleicht sind wir schlicht allein im Weltall, oder interstellare Reisen sind unmöglich. Bei genauerer Betrachtung ist jedoch keine dieser Optionen besonders plausibel.
- 3** Eine bessere Erklärung für unsere Einsamkeit ist, dass die Besiedlung des Alls in Wellen erfolgt – und wir gerade eine Flaute erleben.

Astronomen wissen schon lange, dass sich die Sterne im Umkreis von ein paar hundert Lichtjahren um die Sonne wie die Teilchen in einem Gas bewegen. Im Verhältnis zu jedem Fixpunkt in diesem Volumen kann sich ein Stern schnell oder langsam bewegen, in jede Richtung. Zoomt man weiter heraus, so dass man Tausende von Lichtjahren im Blick hat, registriert man eine gemeinsame Bahnbewegung, die unsere Sonne einmal in etwa 230 Millionen Jahren um den Mittelpunkt der Milchstraße transportiert. Sterne, die näher am galaktischen Zentrum sind, brauchen weniger Zeit für einen Umlauf. Auch ober- und unterhalb der galaktischen Scheibe gibt es sehr schnelle Sonnen, die immer wieder durch diese hindurchtauchen.

Für jede Zivilisation ändert sich das kosmische Umfeld daher laufend. Ein gutes Beispiel dafür ist unser eigenes Sonnensystem. Im Moment ist Proxima Centauri unser nächster Nachbar, in einer Distanz von 4,24 Lichtjahren. In rund 10000 Jahren wird er jedoch nur noch 3,5 Lichtjahre entfernt sein – eine erhebliche Einsparung an interstellarer Reisezeit. In 37000 Jahren ist der nächstgelegene Stern hingegen ein Roter Zwerg namens Ross 248, von dem uns dann bloß noch drei Lichtjahre trennen.

Unsere Simulation findet daher in einem dreidimensionalen Volumen statt, in dem Sterne sich nach einem ähnlichen Muster bewegen wie in dem uns bekannten Ausschnitt der Milchstraße. Der Computer weist dann manchen der Sterne eine Zivilisation zu. Diese haben eine begrenzte Lebensdauer, so dass sie von der Karte auch wieder verschwinden. Einprogrammiert ist eine Wartezeit, die vergehen muss, ehe eine Spezies eine Sonde oder ein Schiff mit Kolonisten zu ihrem nächsten Nachbarstern starten kann.

Wir können diese Details der Simulation beliebig verändern – und dadurch sehen, wie bestimmte Annahmen das Ergebnis beeinflussen. Bei einer Vielzahl der Durchläufe erkennen wir, dass sich eine leicht zerklüftete Siedlungsfront von System zu System ausbreitet (siehe »Umgeben von Aliens«, S. 78/79). Die Geschwindigkeit der Kolonisierung scheint dabei der Schlüssel zur Überprüfung verschiedener Lösungen des Fermi-Paradoxons zu sein.

Umgeben von Aliens

Es gibt viele mögliche Antworten auf die Frage, warum wir bisher keine Außerirdischen entdeckt haben. Die vielleicht plausibelste: Sie existieren, aber nicht in unserer Nähe. Dazu könnte es kommen, wenn sich Spezies nicht gleichmäßig über die Milchstraße ausbreiten, sondern dies nur in Wellen tun und dabei manche Regionen bevorzugen. Simulationen zufolge würden sich so Ballungen besiedelter Sternsysteme bilden, die von isolierten Bereichen umgeben sind. In ihnen würden Zivilisationen wie die Menschheit für lange Perioden nichts von anderen Lebewesen mitbekommen.

Galaktische Diaspora

Die rechts abgebildete Momentaufnahme stammt aus einer Computersimulation. Sie zeigt, wie stark sich außerirdische Zivilisationen binnen zehn Millionen Jahren ausbreiten könnten. Den Kolonisten standen in diesem Fall 10 000 geeignete Welten in einem 464 Lichtjahre großen Modellkasten zur Auswahl (nicht besiedelbare Sternsysteme sind in der Grafik nicht abgebildet – sie sind Schätzungen zufolge 22-mal so häufig wie Sonnen mit lebensfreundlichen Planeten). Blickt man aus großer Ferne auf solch einen Ausschnitt des Weltalls, bewegen sich die Sterne darin kreuz und quer durcheinander, wie Moleküle in einem Gas. Raumsonden rasen mit 3000 Kilometern pro Sekunde durch das virtuelle Universum – 100-mal schneller als ein durchschnittlicher Stern in der Simulation.

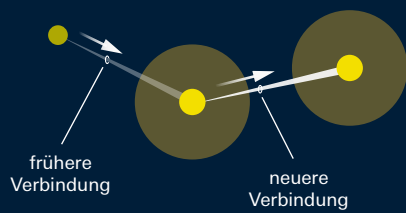
● Jeder Punkt zeigt die aktuelle Position eines besiedelten oder besiedelbaren Planetensystems.

● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● Die Karte rechts zeigt den Stand am Ende der Simulation. 6948 der betrachteten Systeme wurden von einer Sonde erreicht, aber lediglich 403 beherbergen aktive Siedlungen. 3052 Sterne mit geeigneten Planeten im Orbit erhielten hingegen keinen Besuch. Auf diese Weise entstanden elf voneinander getrennte »Imperien« aus mindestens zehn besiedelten Systemen, die hier jeweils mit einer eigenen Farbe markiert wurden.

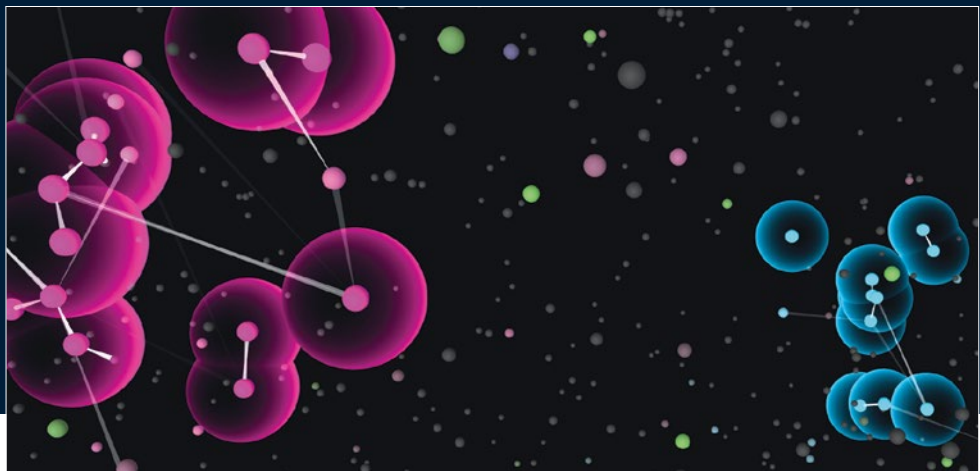
● Wenn eine Zivilisation nur eine Hand voll Systeme besiedelt hat, ist dies in Grau dargestellt.



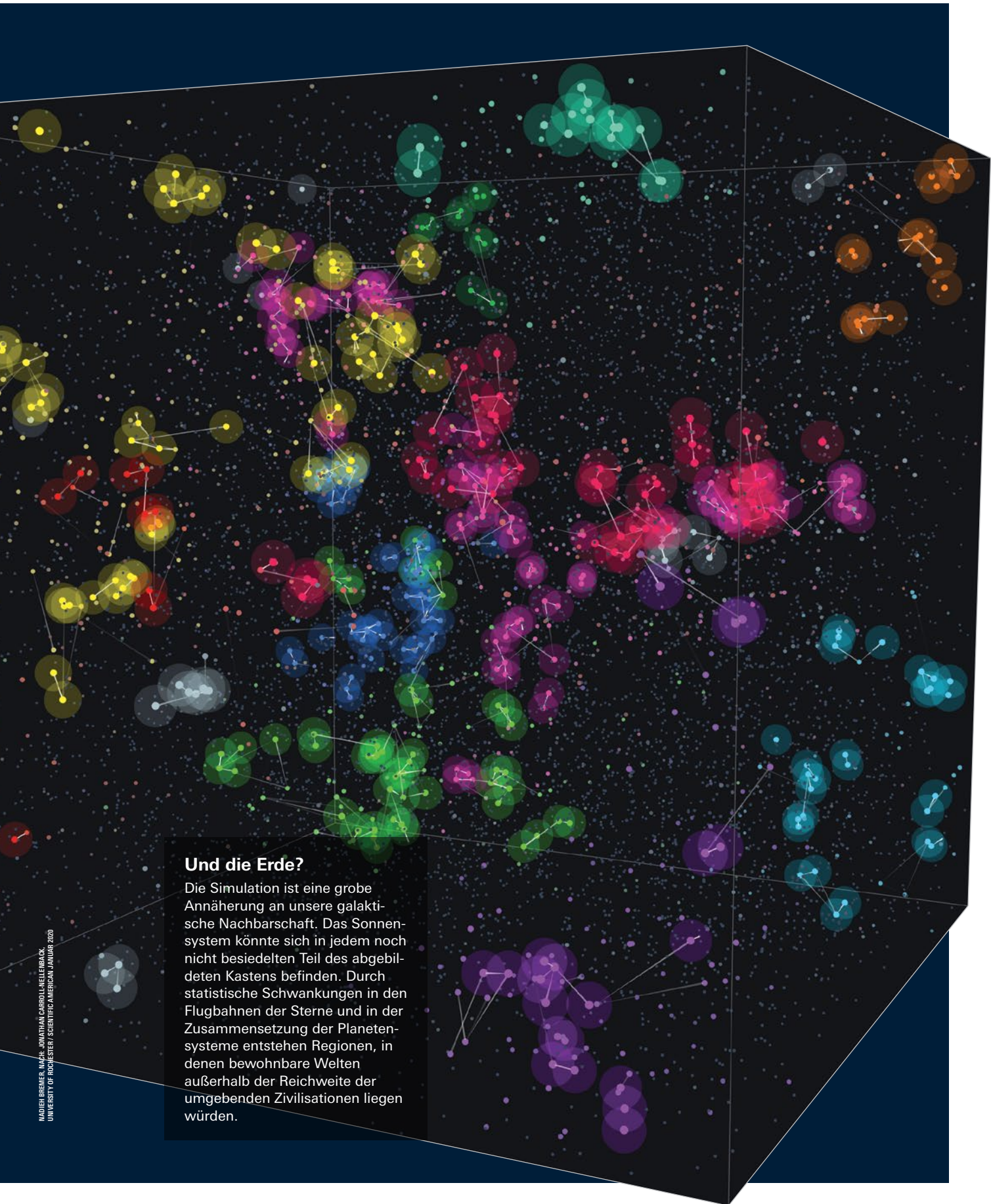
Verblasste Farben weisen auf Systeme hin, die keine aktiven Siedlungen mehr haben. Die derzeit aktiven Kolonien sind hingegen von halbttransparenten Blasen mit einem Radius von zehn Lichtjahren umgeben, die den fiktiven Einflussbereich für ein einzelnes System abgrenzen.



Die Zivilisationen in der Simulation flogen jeweils nur kolonisierbare Systeme in einem Radius von zehn Lichtjahren an. Und das auch nur, wenn noch keine andere Spezies dort lebte oder dahin unterwegs war. Die Linien in der Grafik verbinden kürzlich besiedelte Systeme mit ihren Mutter-systemen. Sie zeigen jedoch nicht den tatsächlich zurückgelegten Weg. Dieser fällt komplizierter aus, da sich die Sterne ständig gegeneinander verschieben.



MARTIN BREMER, MICH. WIKI/ATLAN CASAPOLI/STELLAROCK UNIVERSITY OF ROCHESTER/SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2020



Und die Erde?

Die Simulation ist eine grobe Annäherung an unsere galaktische Nachbarschaft. Das Sonnensystem könnte sich in jedem noch nicht besiedelten Teil des abgebildeten Kastens befinden. Durch statistische Schwankungen in den Flugbahnen der Sterne und in der Zusammensetzung der Planetensysteme entstehen Regionen, in denen bewohnbare Welten außerhalb der Reichweite der umgebenden Zivilisationen liegen würden.

MARQUE BREMER, M.A.Sc., JONATHAN CARROLL, HELEN BLACK,
UNIVERSITY OF ROCHESTER, SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2020

Tatsächlich läuft die Bewegung der Sterne in der Galaxie darauf hinaus, dass selbst die Siedlungsfronten langsamer Zivilisationen die Galaxie in weit weniger als einer Milliarde Jahren durchqueren würden. Mit »langsam« sind hier Sonden mit Geschwindigkeiten von 30 Kilometern pro Sekunde gemeint. Damit sind sie immerhin fast doppelt so schnell wie die 1977 gestartete Voyager-1-Sonde, erreichen aber lediglich ein Zehntausendstel der Lichtgeschwindigkeit.

Wenn wir die galaktische Rotation oder die durch die Scheibe schießenden Sterne aus dem galaktischen Vorhof mit einbeziehen, schrumpft die Zeit, die für die Erschließung der Galaxie nötig ist, sogar noch. Mit anderen Worten: Wie Fermi vermutete, ist es wirklich nicht schwer, die

Mancherorts könnte es Ballungen lebensfreundlicher Welten geben – anderswo hingegen kaum welche

Milchstraße mit Leben zu füllen. Wie voll sie dann am Ende ist, hängt jedoch sowohl von der Anzahl der wirklich bewohnbaren Exoplaneten ab als auch von der Überlebensdauer der Zivilisationen.

Verringert man etwa die Anzahl der nutzbaren Planeten und geht von Spezies aus, die nur etwa 100 000 Jahre bestehen, erhält man eine sehr leere Galaxie. Wählt man hingegen optimistischere Werte für diese Parameter, füllt sich das Weltall mit Raumfahrernationen. Interessanterweise scheint es fast egal zu sein, wie lange sich Spezies durchschnittlich auf einem Planeten halten, wenn es genügend geeignete Welten zum Besiedeln gibt. Sofern die Aliens die für Raumreisen nötige Technologie bewahren, können sie von System zu System ziehen und letztlich die ganze Galaxie erschließen.

Eine zehnprozentige Wahrscheinlichkeit, dass die Erde lange nicht besucht wurde

Aber gerade zwischen diesen extremen Szenarien entstehen die überzeugendsten und potenziell realistischsten Situationen. Wenn lebensfreundliche Welten in einer Galaxie weder besonders häufig noch besonders selten sind, kann die Zahl geeigneter Welten von Region zu Region stark schwanken. Mancherorts entstehen dadurch Ansammlungen von attraktiven Systemen, die wiederholt von Besiedlungswellen heimgesucht werden. Sie erinnern damit an Inselgruppen im Ozean, an denen Seefahrer immer wieder vorbeikommen. Diese Häufung attraktiver Sternsysteme bringt jedoch mit sich, dass die Cluster typischerweise von großen, unbesiedelten Regionen umgeben sind. In ihnen mag es vereinzelt geeignete Welten geben. Sie sind einfach zu weit weg und zu spärlich verteilt, als dass man sich die Mühe machen würde, sie zu besuchen.

Dieses »Galaktischer Archipel«-Szenario könnte unsere Situation auf der Erde erklären. Wenn Zivilisationen im Durchschnitt eine Million Jahre überdauern und nur drei Prozent der Sternsysteme tatsächlich kolonisierbar sind, besteht unseren Simulationen zufolge eine etwa zehnprozentige Wahrscheinlichkeit, dass ein Planet wie die Erde seit ein paar Millionen Jahren nicht besucht wurde.

Umgekehrt impliziert dieses Szenario, dass es anderswo in der Galaxie Bereiche mit vielen interstellaren Spezies gibt, für die kosmische Nachbarn oder Besucher die Norm und nicht die Ausnahme sind. Für all dies sind keine extremen Hypothesen erforderlich: Basis dafür sind eine konservative Abschätzung der Planetenzahl und die Sternbewegungen in der Milchstraße. Natürlich fließen nicht überprüfbare Annahmen über die Durchführbarkeit interstellarer Reisen mit ein sowie die Frage, ob intelligente Lebewesen sich tatsächlich auf den Weg machen würden.

Andere Faktoren können wir hingegen zunehmend gut bestimmen. Wie häufig mit Leben kompatible Welten sind, grenzen Exoplaneten-Forscher beispielsweise immer weiter ein. Auch über andere Fragen, wie etwa die Langlebigkeit von Zivilisationen, lernen wir selbst immer mehr. Etwa indem wir selbst versuchen, eine nachhaltige Wirtschaft aufzubauen.

Darüber hinaus können wir nach besiedelten Sternarchipelen Ausschau halten oder nach Indizien für eine Welle der Kolonisation suchen. Eine interessante neue Strategie wäre beispielsweise, unsere Teleskope nicht bloß auf einzelne, bekannte Exoplanetensysteme zu richten. Stattdessen könnten wir galaktische Regionen in den Blick nehmen, in denen die Anordnung der Sterne die interstellare Expansion begünstigen würde. Bis vor Kurzem war unsere dreidimensionale Karte des galaktischen Raums leider nur sehr ungenau. Aber das Gaia-Weltraumteleskop der Europäischen Weltraumorganisation ESA hat in den vergangenen Jahren die Position von einer Milliarde astronomischer Objekte und Sternbewegungen in unserem Umfeld bestimmt. Auf Basis dieser Daten können wir potenzielle Hotspots vielleicht bald ausfindig machen.

Letztlich wäre Fermis Paradoxon damit in Wahrheit gar kein Paradoxon. Für eine Welt wie die Erde kann es ganz normal sein, für lange Zeit nicht von Außerirdischen besucht zu werden – selbst wenn es diese in den Weiten des Alls in Hülle und Fülle gibt. So wie Pitcairn im Pazifischen Ozean mehrere Jahrhunderte lang unbewohnt blieb, erlebt die Erde vielleicht gerade eine Periode kosmischer Isolation, bevor eine neue Welle pangalaktischen Lebens sie erreicht. Die Frage ist, ob unsere Zivilisation noch da sein wird, wenn es so weit ist. ◀

QUELLEN

Carroll-Nellenback, J.: The Fermi paradox and the aurora effect: Exo-civilization settlement, expansion, and steady states. *The Astronomical Journal* 158, 2019

Cirkovic, M.: The great silence: Science and philosophy of Fermi's paradox. Oxford University Press, 2018

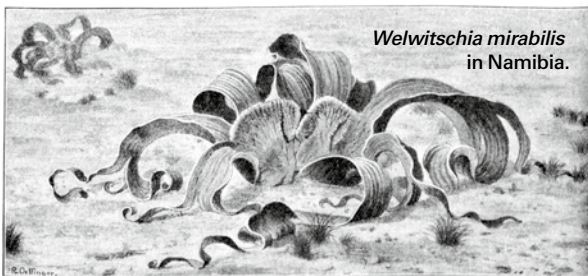
Finney, B., Jones, E.: Interstellar migration and the human experience. University of California Press, 1985

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

DER STAMM IN DER ERDE, DIE BLÄTTER AM BODEN

1920

»Die Welwitschia gehört zu den auffallendsten Formen des Pflanzenreiches. Dieses etwa ½ m hohe Gewächs ist dem Blütenkopf einer Sonnenblume nicht unähnlich. Während seines Lebens erzeugt es nur zwei, bis 3 m lange lederartige Blätter, die ständig nachwachsen, sich auf dem Erdboden langsam vorwärtsschieben [und] allmählich absterben. Die beiden Blätter zerreißten in Riemen, die den im Boden steckenden Stamm kranzförmig umgeben. Bei dem langsamen Wachstum müssen solche Pflanzen ein hohes Alter, vielleicht von hundert Jahren, erreichen.« *Kosmos 6, S. 156*



DIE ATMOSPHERE PER GRANATE ERKUNDEN

»Über die Verhältnisse des Luftmeeres sind wir nur sehr unvollkommen unterrichtet. Graf de la Baume-Pluvinel hat einen höchst eigenartigen, an seinen Landsmann Jules Verne erinnernden Plan unterbreitet. Er hat berechnet, daß man mit einem Geschütz eine große Granate bis zu einer Höhe von 78000 Meter emportreiben könne – 10800 m hat man 1901 im Freiballon und 10000 m 1919 im Flugzeug erreicht –, und in dieser Granate will de la Baume-Pluvinel an einem Fallschirm befestigte Meßinstrumente unterbringen, derart, daß beim Platzen der Granate der Fallschirm die Instrumente heil zur Erde trägt. Das klingt etwas sehr phantastisch, dürfte es doch nur so wenig sein, daß die größte Schwierigkeit in der Beschaffung der erforderlichen Geldmittel liegen wird.« *Prometheus 1600, S. 312*

SCHMETTERLINGE BRAUCHEN WENIG DRUCK

»Das Ausschlüpfen des Schmetterlings aus der Puppe untersuchte A. Pictet und fand, daß das Ausschlüpfen der weitaus meisten Puppen mit einem Fallen des Barometers zusammentraf, und daß [dafür] ein Sinken des äußeren Luftdrucks nötig ist. Wenn man Puppen aus dem Tiefland ins Gebirge bringt, bewirkt der sinkende Luftdruck das Ausschlüpfen von vielen; umgekehrt werden die Falter beim Herabsteigen durch den steigenden Luftdruck in der Puppe zurückgehalten.« *Die Umschau 23, S. 382*

ERSTMALS GENE VON BAKTERIEN ISOLIERT

1970

»Die Isolierung eines Gens beziehungsweise eines Komplexes von drei Genen, welche eine einzige Funktion steuern, gelang einer Forschergruppe an der Harvard-Universität. Diese Gene sind Teil des Laktose-Operons des Bakteriums *Escherichia coli*. Die Isolierung gelang durch die Kombination verschiedener Verfahren. Zunächst wurden die Laktose-Gene in Viren konzentriert, in Bakteriophagen, die zur Übertragung eines bakteriellen Genomfragmentes von einer Bakterienzelle in eine andere befähigt sind. Die Arbeiten bedeuten einen bemerkenswerten wissenschaftlichen Fortschritt. Jedoch wurden auch Befürchtungen erregt, nämlich daß die Biologen diese Kenntnisse mißbrauchen könnten, beispielsweise durch Hervorrufung von hochvirulenten Infektionen oder durch Manipulieren des menschlichen genetischen Materials. Dagegen spricht, daß es noch lange dauern dürfte, bis die Isolierung eines Säugetier-Gens möglich ist, und noch viel länger, ehe ein Gen erfolgreich in das Genom einer Wirtszelle eingeführt werden kann. Ließe sich dies erreichen, dann könnten genetische Schäden behoben und Erbkrankheiten geheilt werden.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 6, S. 248

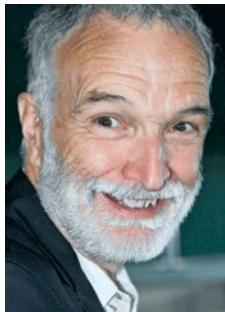
LAPPRIGES LENKRAD FRUSTRIERT DIEBE

»Weich wie Gummi wird das Autolenkrad, das der japanische Ingenieur Unawa erfunden hat, wenn der Stromkreis mittels eines Sicherheitsschlüssels ausgeschaltet wird. Das soll der neueste Diebstahlschutz für Autos sein, da niemand mit einem schlappigen Lenkrad fahren kann und die Härte des Steuers nur vom Wagenbesitzer wiederhergestellt werden kann.« *Neuheiten und Erfindungen 400, S. 111*

SPRECHEN MACHT SCHLAU

»Wir wählten aus zwei Kindergärten 30 vierjährige Jungen und Mädchen nach Zufall aus, unterzogen sie einem Intelligenztest [und] teilten die Kinder in zwei nach Intelligenz, Alter und Geschlecht gleiche Gruppen ein. Beide wurden über einen Zeitraum von vier Wochen täglich eine Stunde lang bei einer Spielsituation betreut. Zwar erhielt jede Gruppe dieselben Spiele, [doch] die Kinder der einen Gruppe wurden während des Spielens intensiv zu sprachlichen Äußerungen angehalten, während die Kinder der anderen Gruppe dazu in keiner Weise aktiviert wurden. Nach der vierwöchigen Spielperiode wurden alle Kinder erneut dem Intelligenztest unterzogen. Dabei ergab sich, daß die Testwerte der Gruppe, die zum Verbalisieren angehalten worden war, eindeutig höher lagen als die Werte der anderen Gruppe.« *Umschau 12, S. 386*

SCHLICHTING! EIN GEYSIR MITTEN IN DEUTSCHLAND



In tiefem Grundwasser kann sich bei hohem Druck viel Kohlendioxid lösen. Wenn sich die Mischung unter speziellen Bedingungen den Weg zur Oberfläche bahnt, kommt es zu einem spektakulären Ausbruch – und zwar immer wieder.

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/1725084](https://www.spektrum.de/artikel/1725084)

Dass nichts von selbst geschieht, sondern unter dem Druck der Notwendigkeit

Leukipp (5. Jh. v. Chr.)

Ein Geysir ist ein besonderer Anblick, vom plötzlichen Ausbruch bis zum Kollaps der Fontäne. So ein Naturschauspiel ist auch hier zu Lande in Andernach am Rhein zu erleben – erschaffen mit etwas menschlicher Hilfe. Anders als die aus Island und weiteren Teilen der Erde bekannten Exemplare, die von heißem Wasserdampf angetrieben werden, befindet sich dort ein so genannter Kaltwassergeysir. Er bezieht seine Energie aus dem Lösungsvermögen von Kohlenstoffdioxid (CO_2) in Wasser.

Wir kennen das Phänomen im Prinzip von kohlenstoffhaltigen Getränken (siehe »Spektrum« Januar 2020, S. 72). So trennt sich beim Öffnen einer Sprudelflasche ein Teil des Gases zischend vom Mineralwasser. Das CO_2 , das bei höherem Druck im Wasser gelöst war, sammelt sich in Gasblasen. Diese steigen infolge des Auftriebs zur Oberfläche und entweichen in die Atmosphäre. Verstärkt man den Vorgang, indem man die Flasche vor dem Aufdrehen heftig schüttelt, so hat man grob gesehen bereits eine Miniaturversion eines Kaltwassergeysirs.

Kohlendioxidhaltiges Wasser entsteht oft natürlicherweise in der Erde. So auch beim Geysir von Andernach –

das CO_2 stammt aus tiefen Magmakammern. Obwohl das darüber befindliche Schiefergestein ziemlich undurchlässig ist, gelangt das Gas durch Risse und Brüche zu den immer noch mehrere hundert Meter unter der Erdoberfläche liegenden Grundwasserschichten. Dort steht das Wasser unter einem relativ hohen Druck. Deswegen kann es beachtliche Mengen CO_2 aufnehmen. Ein Rechenbeispiel: Die Löslichkeit von CO_2 in Wasser beträgt bei normalem Luftdruck und einer Temperatur von 20 Grad Celsius 1,7 Gramm pro Liter. Verzehnfacht man den Druck, erhöht sie sich auf 14 Gramm pro Liter, also auf mehr als das Achtfache.

In Andernach wurde ein 350 Meter tiefer Brunnen gebohrt. Nun verbindet ein langes Rohr, das in den unteren Bereichen mit seitlichen Öffnungen versehen ist, die dortigen Wasserschichten mit der Erdoberfläche. Die unter Druck stehende Flüssigkeit dringt ein und steigt langsam auf. Wenn das Rohr gut gefüllt ist, lastet die hohe Wassersäule stark auf dem untersten Bereich. Darum bleibt das CO_2 hier im Wasser gelöst. Weiter oben ist der hydrostatische Druck jedoch kleiner. Wie beim Öffnen einer Sprudelflasche bilden sich dort Gasblasen.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Der welthöchste Kaltwassergeysir in Andernach wirft die Wassermassen zirka acht Minuten lang bis zu 60 Meter hoch.

Während sich das Wasser allmählich dem oberen Rand nähert, entweicht blubbernd CO_2 . Die Zuschauer an der Oberfläche sehen von alledem noch nichts.

Die Lage ändert sich dramatisch, sobald schließlich das Rohr voll ist. Dann läuft es über. Denn von unten kommen beständig weiter Gasblasen, die Wasser verdrängen. Nach dem ersten Herausschwappen lastet weniger Gewicht auf den tieferen Schichten. Das wiederum verringert die druckabhängige Löslichkeit des CO_2 und beschleunigt dessen Ausperlen. Außerdem dehnen sich die in größere Höhen gelangenden Blasen aus – dort wird der hydrostatische Druck geringer, durch den sie komprimiert werden. So fließt noch mehr Wasser heraus. Die mittlere Dichte in der mehr und mehr von Gas durchsetzten Wassersäule nimmt weiter ab. Manche Blasen füllen den Rohrdurchmesser sogar völlig aus und schieben das ganze darüber befindliche Wasser wie Kolben nach oben. Ausgasung und Abnahme des hydrostatischen Drucks verstärken sich gegenseitig in positiver Rückkopplung und erfassen schließlich auch die Flüssigkeit im unteren Bereich des Rohrs. So pressen immer größere Blasen die Wasser-Gas-Säule eruptionsartig in Form des Geysirs empor.

Entscheidend für einen solchen Ausbruch ist der Aufstieg des gashaltigen Wassers in einem engen Kanal. Bei einer großflächigen Verbindung mit der Außenwelt könnte Wasser, das von den nach oben entkommenden Blasen verdrängt wird, von den Seiten zurückfließen und den entstandenen Hohlraum schnell wieder füllen. In Andernach verhindert das der dünne Rohrdurchmesser.

Der Ausbruch dieses Kaltwassergeysirs dauert etwa acht Minuten. Dabei erhebt sich die Wasserfontäne bis zu einer Höhe von 60 Metern. Danach sackt sie in sich zusammen; oberflächlich ist die Aktivität zu Ende. Doch tief im Inneren füllt sich der entleerte Brunnen allmählich wieder mit kohlendioxidhaltigem Wasser, und nach rund 100 Minuten herrschen abermals die richtigen Bedingungen für ein erneutes Aufwallen. Es sei denn, man verschließt den Brunnen und verhindert das Überlaufen – dafür sorgt außerhalb der Besuchszeiten eine entsprechende Vorrichtung.

Was aufsteigt, muss herunterkommen. Das Wasser regnet in der Nähe der Rohröffnung ab und landet unter anderem auf den gepflasterten Wegen, wo es versickert und verdunstet. Dort wird erkennbar, dass im ausgesto-

Am Ende wirkt es, als wäre nichts gewesen. Restwasser fließt in das Rohr zurück. In der Tiefe braut sich der nächste Ausbruch zusammen.



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING



Am Boden kristallisieren gelöste Feststoffe aus der niedergegangenen Flüssigkeit zu ästhetisch ansprechenden Mustern.

ßenen Wasser nicht nur CO_2 gelöst ist. Die Steine sind von einem Belag vor allem in Rot- und Brauntönen überzogen. Leider schenken die Besucher diesem Phänomen kaum Aufmerksamkeit oder tun es mit einem negativen Unterton als Rost ab. Schaut man sich den Belag jedoch genauer an, entdeckt man ein ästhetisch ansprechendes, natürliches Kunstwerk. Im Lauf der Zeit sind die im Mineralwasser des Geysirs gelösten Stoffe wie Magnesium, Eisen und Kalzium auskristallisiert und haben filigrane, farbige Muster gebildet.

Der Geysir zerstäubt das Wasser und vergrößert dessen Oberfläche. So verdunstet es leicht. Das reichert die in den Tropfen gelösten Mineralien bereits etwas an, bevor diese sich nach dem Auftreffen auf dem Pflaster zufällig gesteuert mit den vorhandenen Kristallschichten verbinden. Die abwechslungsreichen Strukturen wachsen damit in jeder Pause ein mikroskopisch kleines Stück weiter. Während sich unter der Erde schon eine neuerliche Eruption anbahnt, ist die Situation deswegen auch oberirdisch nur scheinbar ereignislos.

MATHEMATIK WELCHER KNOTEN HÄLT AM BESTEN?

Schon wieder ist der Schnürsenkel offen! Aber warum? Forscher haben nun eine simple Methode gefunden, um die Stabilität der gängigsten Knoten zu überprüfen – ganz ohne aufwändige Berechnungen oder Simulationen.



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

» [spektrum.de/artikel/1725080](https://www.spektrum.de/artikel/1725080)

Die mathematische Forschung gilt als abstrakt und lebensfern. Das Gebiet der Knotentheorie bildet da eine seltene Ausnahme. Knoten begegnen uns ständig, sei es in gewebten Stoffen, beim Schnüren von Schuhen oder beim Bergsteigen. Inzwischen gehen Wissenschaftler davon aus, dass Menschen schon vor einer halben Million Jahren Knoten bildeten – lange bevor das Rad erfunden wurde. Und sogar einige Affen, darunter Gorillas, verknoteten nachweislich Gräser, wenn sie ihre Nester bauen.

Umso erstaunlicher ist es, dass diese allgegenwärtigen Strukturen noch immer etliche Rätsel bergen. Beispielsweise ähnelt ein Altweiberknoten, mit dem man Schnürsenkel bindet, dem weniger geläufigen Kreuzknoten. Wie die Erfahrung und Experimente zeigen, ist Letzterer wesentlich robuster – allerdings gab es bislang kein einfaches theoretisches Modell, welches das erklärt. Das hat der Mathematiker Vishal Patil vom Massachusetts Institute of Technology zusammen mit seinen Kollegen nun geändert.



Es gibt etliche verschiedene Knoten. Mathematiker beschäftigt vor allem die Frage, wie man beurteilen kann, ob zwei Knoten gleich sind. Ein allgemeines Rezept fehlt ihnen bisher noch.

PETERSCHREIBER MEDIA / STOCK.ADOBE.COM

AUF EINEN BLICK DIE SCHLINGE ZIEHT SICH ZU

- 1** Zwar untersuchen Forscher schon seit Jahrhunderten verschieden Knotenarten, doch sie können immer noch nicht erklären, warum manche stabiler sind als andere.
- 2** Um das zu ändern, haben Wissenschaftler nun Methoden aus der Elastizitätstheorie und Topologie vereint und damit die gängigsten Knoten analysiert.
- 3** Sie entwickelten ein einfaches Verfahren, das die Stabilität vieler Knoten beurteilt. Unter anderem können sie damit erklären, welche Schlinge sich am besten eignet, um Schuhe zuzuschnüren.

In der Anfang Januar 2020 im Fachmagazin »Science« erschienenen Arbeit identifizierten die Forscher drei leicht zu bestimmende Merkmale, anhand derer sich beurteilen lässt, wie stabil geläufige Knoten sind. Patil und sein Team bestätigten ihre theoretischen Ergebnisse anschließend durch Computersimulationen und Laborexperimente. Damit haben Wissenschaftler nun endlich eine einfache Methode zur Hand, die erklärt, warum manche Knoten besser halten als andere.

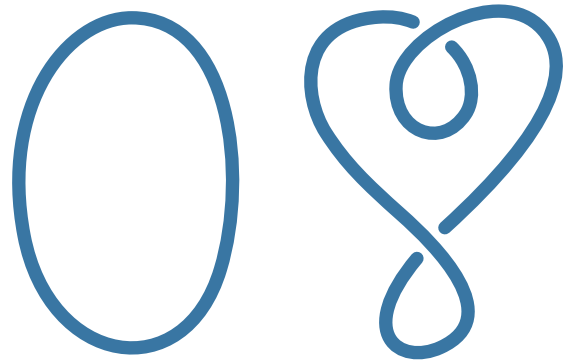
Der erste schriftliche Nachweis, der verschiedene Knoten beschreibt, findet sich im »Iatrimon Synagogus«, einer medizinischen Abhandlung aus dem 4. Jahrhundert n. Chr. Danach tauchten Knoten erst wieder im 18. Jahrhundert vermehrt in wissenschaftlichen Texten auf. Das lag vor allem daran, dass es damals viele Seefahrer gab, die sich über die nützlichsten Versionen austauschten.

Damit erwachte das Interesse der Mathematiker. Carl Friedrich Gauß war 1794 einer der Ersten, der das Thema aufgriff, als er den Elektromagnetismus studierte und mögliche Formen der Feldlinien beschreiben wollte. Es waren aber vorrangig seine Schüler, die das Gebiet voranbrachten. Mangels anderer Darstellungsmöglichkeiten projizierten sie die dreidimensionalen Gebilde auf eine Ebene, wodurch ein Bild verschlungener Kurven entstand, ein so genanntes Knotendiagramm.

Das Problem dabei: Die Diagramme sind nicht eindeutig. Ein und derselbe Knoten kann verschiedene zweidimensionale Darstellungen haben, abhängig davon, wie man die Projektionsebene wählt. Zwei völlig unterschiedliche Diagramme können daher das gleiche Objekt beschreiben. Mathematiker versuchten daraufhin Methoden zu entwickeln, um äquivalente Knotendiagramme zu identifizieren. Sie wollten dadurch alle möglichen Knoten klassifizieren, beginnend mit dem einfachsten hin zu immer komplizierteren Strukturen – ein ehrgeiziges Ziel, von dem sie auch heute noch weit entfernt sind.

Um zu verstehen, warum sich das so komplex gestaltet, muss man wissen, dass sich mathematische Knoten von denen unterscheiden, die uns im Alltag begegnen. Möchte man etwa zwei Seile aneinanderbinden, hat man zwei Schnüre zur Verfügung, die man umeinanderwindet und festzieht. Mathematische Knoten sind dagegen immer geschlossen: Sie bestehen aus einer einzigen, mit sich selbst verbundenen Schnur.

Grund dafür ist die Topologie. In diesem abstrakten mathematischen Bereich sortieren Forscher die betreffenden Objekte nach ihren groben Eigenschaften. Für Topologen sind beispielsweise zwei Figuren identisch, wenn



Beide Diagramme entsprechen dem gleichen Knoten – oder besser gesagt: dem gleichen Nichtknoten.

man sie ineinander verformen kann, ohne dabei Löcher in sie zu reißen. Topologisch gesehen ist eine Tasse daher nicht von einem Donut unterscheidbar, denn man kann sie problemlos ineinander umwandeln, wobei der Henkel der Tasse zum Loch des Gebäcks wird.

Als Knoten immer weiter in den wissenschaftlichen Fokus rückten, fingen auch Topologen an, sich mit ihnen zu beschäftigen – und wandten dabei die ihnen vertrauten Regeln an: Kann man einen Knoten durch bloßes Ziehen und Lockern zu einem anderen verformen, ohne eine Schnur zu zerschneiden, dann sind sie gleich. Dadurch wird ersichtlich, warum sich Topologen nicht für Strukturen mit offenen Enden interessieren. Denn in einem solchen Fall, etwa bei Schnürsenkeln, lässt sich ein Knoten immer lösen; er ist dadurch identisch zu einem Nichtknoten.

Welcher Knoten ist überhaupt ein richtiger Knoten?

Mathematiker konzentrierten sich deshalb zunächst auf »richtige« Knoten, die wenig mit denen aus unserem Alltag zu tun haben. Um sie zu klassifizieren, gingen sie wie in der Topologie üblich vor. Sie suchten nach so genannten Invarianten, die ein Objekt charakterisieren und erlaubte Verformungen unverändert überstehen. Bei zweidimensionalen Oberflächen ist die Anzahl der Löcher eine solche Invariante, wie das Beispiel der Tasse und des Donuts zeigt. Es erwies sich jedoch als schwierig, eine vergleichbare Größe für Knoten zu finden.

Am naheliegendsten ist es, sie nach der Anzahl gekreuzter Schnüre einzuteilen. Allerdings lässt sich die Zahl der so genannten Kreuzungen nur schwer aus einem Diagramm bestimmen. Denn es können mal mehr oder mal weniger Kreuzungen zu sehen sein, je nachdem, wie genau man einen Knoten abbildet. Glücklicherweise besitzt jeder Knoten eine Mindestzahl an Kreuzungen. Unabhängig davon, wie man ihn auf eine Ebene projiziert, tauchen niemals weniger auf. Bei komplizierten Objekten ist es jedoch äußerst schwer, die Darstellung mit der kleinsten Anzahl an Kreuzungen zu finden.

Inzwischen wissen Mathematiker, dass es keine Knoten mit nur einer oder zwei Kreuzungen gibt. Es existieren aber

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: MACH AXEL BRÜDT AT ENGLISH WIKIPEDIA. TRACED BY STAMBERG (COMMONS:WIKIMEDIA:BRUNNENFLEISCHKNOTS SV/G)



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

MATJAZ SLANIC / GETTY IMAGES / ISTOCK

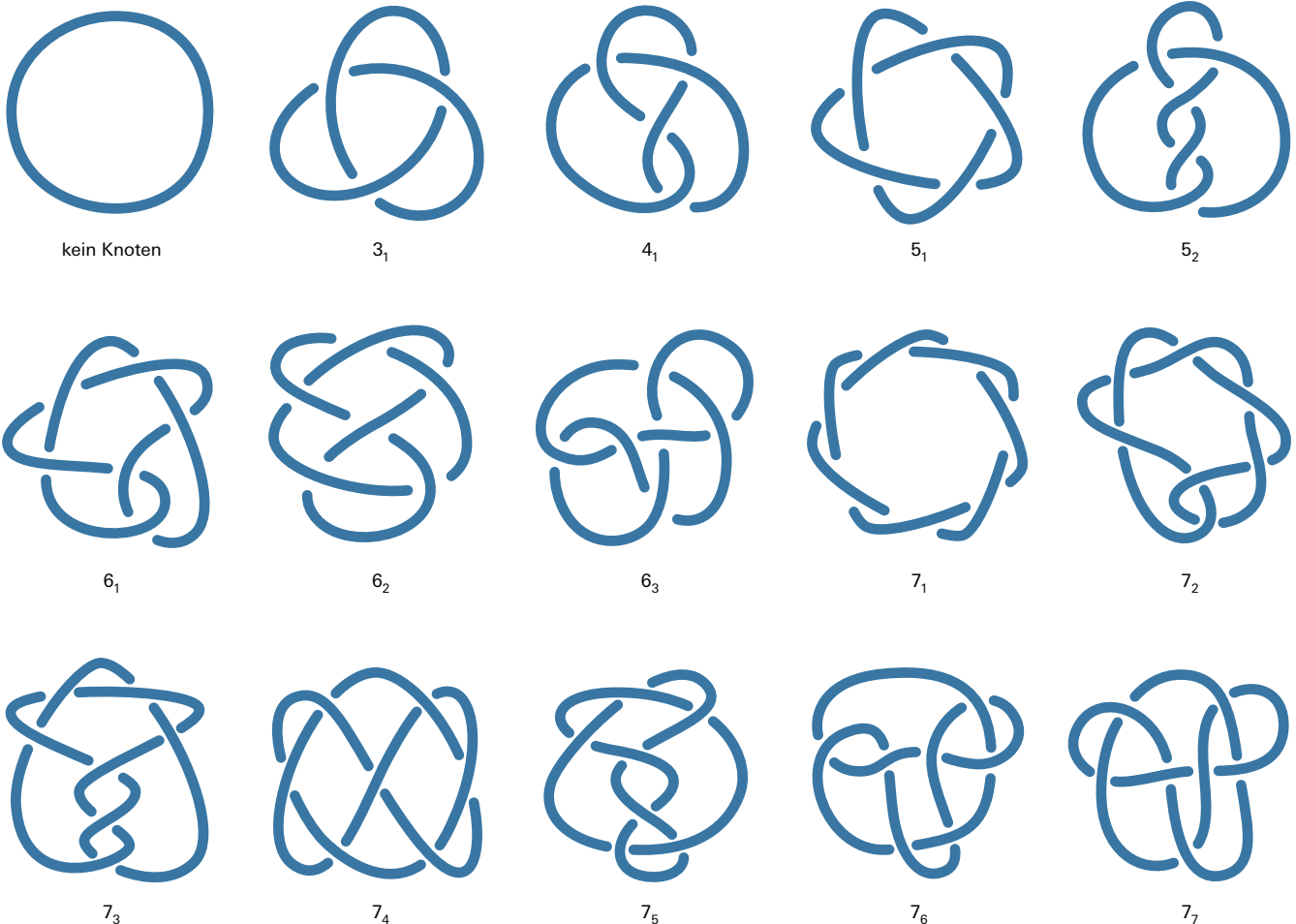
je eine Art von Knoten mit drei und vier Kreuzungen, zwei mit fünf, drei mit sechs, sieben mit sieben Kreuzungen und so weiter. Die Anzahl der topologisch verschiedenen Knoten wächst rasant an, es gibt beispielsweise 1388705 Knoten mit 16 Kreuzungen. Wie diese Folge weitergeht ist noch unklar, man weiß nicht, wie viele unterschiedliche Strukturen es mit 17 oder mehr Kreuzungen gibt. Man geht aber davon aus, dass die Zahlen stetig weiterwachsen. Bis heute sind Mathematiker noch weit von einer Methode entfernt, die alle Knoten kategorisiert.

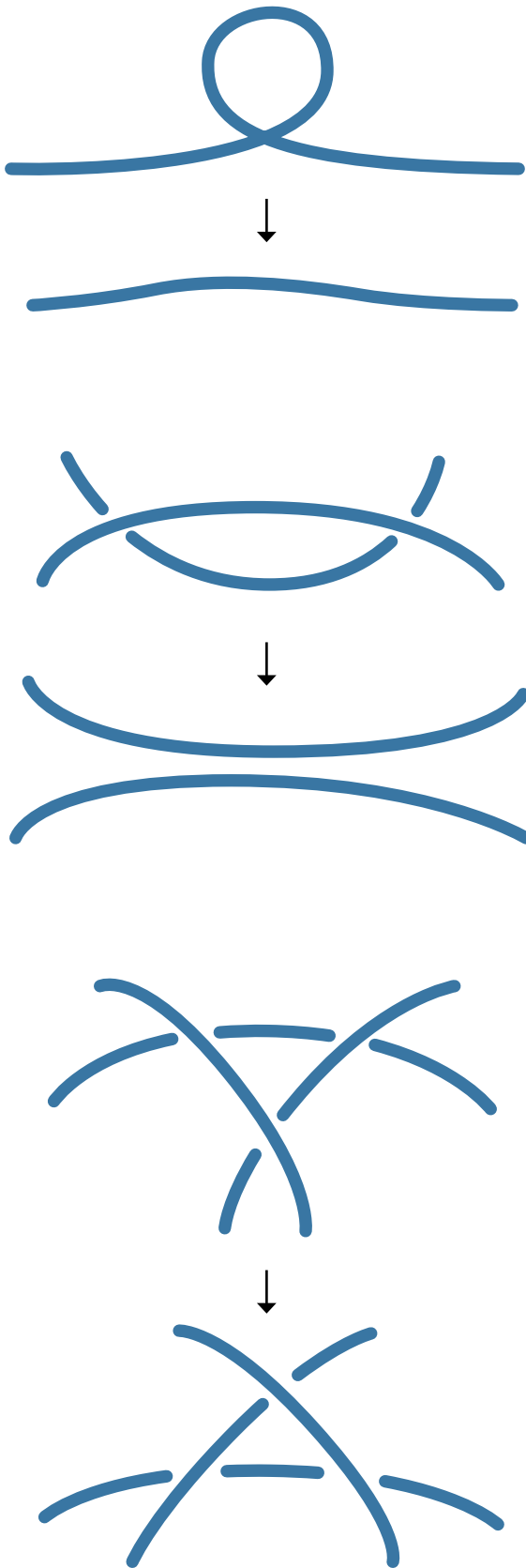
Daher entwickelten Wissenschaftler Mitte des 20. Jahrhunderts neue Ansätze, um sich dem Problem zu widmen. Der englische Mathematiker John Horton Conway war einer der Ersten, der vorschlug, Knoten in kleinere Bestandteile zu zerlegen und diese zu studieren. Die Segmente, für die er sich interessierte, enthielten vier freie Enden, die so miteinander verwoben sind, wie bei den uns geläufigen Knoten. Diese Objekte heißen in der Fachsprache Zöpfe. In der Seefahrt oder beim Klettern nutzt man also streng genommen keine Knoten, sondern zwei Stränge, die einen Zopf bilden.

Mathematiker arbeiten an einer vollständigen Liste topologisch unterschiedlicher Knoten. Die Zahl bezeichnet die Anzahl der Kreuzungen, der Index nummeriert sie.

Um die zweidimensionalen Diagramme von Zöpfen zu vereinfachen, identifizierte der deutsche Mathematiker Kurt Reidemeister in den 1930er Jahren drei nach ihm benannte Bewegungen, die eine bestimmte Struktur nicht verändern (siehe Abbildung, S. 88). Außerhalb der abstrakten Welt der Topologie stimmt das allerdings so nicht ganz. Berücksichtigt man etwa die mechanischen Eigenschaften eines Knotens (oder Zopfes), erzeugt die erste Reidemeister-Bewegung zum Beispiel Spannungen in einem Strang. Möchte man daher beurteilen, ob ein in der Seefahrt genutzter Knoten stabil ist, genügt es nicht, bloß topologische Prinzipien zu betrachten. Man muss unter anderem auch Konzepte aus der Elastizitätstheorie miteinbeziehen. Doch wie geht man dabei vor, ohne sich in extrem komplizierten Berechnungen zu verlieren?

Patil und seine Kollegen fanden eine einfache Möglichkeit, um topologische Knotendiagramme mit mechanischen Informationen zu verbinden. In ihrer Arbeit untersuchten sie den spezifischen Fall zweier Seile, die man durch einen Knoten zu einem längeren verknüpft. Mathematisch gesehen entspricht das einem Zopf aus zwei Strängen mit vier offenen Enden. Die Forscher wollten herausfinden, ob sich ein Knoten festigt, wenn man an zwei der losen Enden zieht – und wenn ja, wie viel er aushält. Daher suchten sie zuerst nach den Mechanismen, die einen Knoten beim Zuziehen stabilisieren.





Die drei so genannten Reidemeister-Bewegungen lassen ein Knotendiagramm topologisch gesehen unverändert.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

An jedem Punkt, an dem sich zwei Stränge kreuzen, entsteht Reibung, die eine Rollbewegung verursacht. Wenn ein Strang bei jeder Kreuzung in die gleiche Richtung verdreht wird, kann er wegrollen. Unterscheiden sich die Drehrichtungen dagegen, ist das System robust, und der Knoten lässt sich schlechter lösen. Patil und seine Kollegen wogen die möglichen Verdrehungen eines Knotendiagramms deshalb durch eine einfache Formel gegeneinander auf, wodurch sie eine Kenngröße τ erhielten. Je höher τ ausfällt, desto mehr Drehbewegungen verlaufen entgegengesetzt, das heißt der Knoten ist fest. Mit diesem Wert fanden die Forscher bereits den größten Unterschied zwischen einem Kreuz- und einem Altweiberknoten: Bei Letzterem ist die Drehrichtung immer gleich, wodurch er nicht so gut hält. Das ist der Grund, warum Schnürsenkel manchmal einfach aufgehen.

Drei Kenngrößen, um Knoten zu unterscheiden

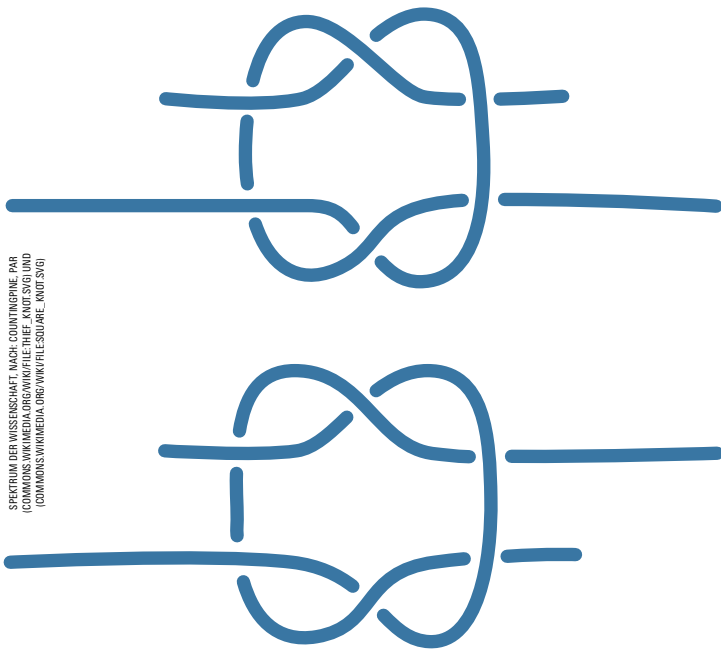
Die Größe τ allein genügt allerdings nicht, um alle gängigen Knoten miteinander zu vergleichen. Das lässt sich am Beispiel des Diebesknotens erkennen: Das Knotendiagramm ist das gleiche wie das des Kreuzknotens, außer dass man dabei an einem anderen Strang zieht. Beide Knoten verdrehen sich durch Zug auf gleiche Weise, besitzen also dasselbe τ , dennoch lässt sich der Diebesknoten leichter lösen.

Patil und sein Team suchten deshalb nach weiteren stabilisierenden Faktoren. Wie sich herausstellt, sind Knoten robuster, wenn nebeneinander verlaufende Stränge sich beim Ziehen in entgegengesetzte Richtungen bewegen. Die Wissenschaftler definierten eine zweite Größe Γ , die im Wesentlichen zählt, wie viele Strangabschnitte sich gegenläufig zusammenziehen. Während der Kreuzknoten beispielsweise über vier solche Segmente verfügt, hat der Diebesknoten bloß einen. Das erklärt, warum der Kreuzknoten besser hält.

Indem die Forscher die Anzahl der Kreuzungen N , die Verdrehungen τ und die entgegengesetzten Strangabschnitte Γ für gängige Knotenfamilien bestimmten, konnten sie beurteilen, wie stabil welche Knoten sind. Dafür brauchten sie weder aufwändige Computersimulationen noch detaillierte Berechnungen, sondern zählten bloß Eigenschaften, die sich aus einem Knotendiagramm sofort ergeben.

Allerdings sind all diese Überlegungen nicht viel wert, wenn man sie nicht überprüft. Daher führten Patil und seine Kollegen Experimente mit sich farblich verändernden Seilen durch. Diese bestehen aus einem elastischen Kern, der von mehreren Schichten transparenter Elastomere mit unterschiedlichen Brechungsindizes umgeben ist. Sobald man ein solches Seil verbiegt oder daran zieht, ändert sich die Dicke der Elastomere und damit auch ihre Farbe. Dadurch lassen sich die Kräfte abbilden, die auf einen Knoten wirken.

Auf diese Weise konnten die Forscher ihre theoretischen Ergebnisse mit Experimenten an einfachen Knoten und dazugehörigen Computersimulationen bestätigen. Alle drei Methoden führten zu den gleichen Resultaten. Anschließend widmeten sich die Forscher komplizierteren Knoten, etwa dem gesteckten Schmetterlingsknoten mit zwölf oder dem Zeppelinstek mit zehn Kreuzungen. Die entsprechen-



Den Altweiberknoten (unten) nutzt man meist, um Schuhe zu binden. Doch als wesentlich stabiler stellt sich der Kreuzknoten (oben) heraus, der diesem stark ähnelt.

den drei Größen (N , τ , Γ) legen nahe, dass der unter Bergsteigern verbreitete gesteckte Schmetterlingsknoten schlechter hält als der Zeppelinstek. Auch das bestätigten die Computersimulationen der Forscher.

Wenn es darum geht, die besten Knoten zu identifizieren, muss man sich also nicht mehr nur auf Erfahrungswerte beziehen, sondern kann das nun mathematisch erklären. »Wir können jetzt endlich Knoten miteinander vergleichen, die man beim Nähen, Segeln, Klettern und Bauen verwendet«, sagt der Mechanikprofessor Matthias Kolle, Mitautor der Studie. »Das ist wunderbar!« ◀

QUELLE

Patil, V. P. et al.: Topological mechanics of knots and tangles. Science 367, 2020

LITERATURTIPPS

Adams, C. C.: The knot book. An elementary introduction to the mathematical theory of knots. American Mathematical Society, 1994

Dieses Buch behandelt die bekanntesten Knoten sowie die Mathematik dahinter.

Turner, J. C., van de Griend, P.: History and science of knots. World Scientific, 1996

Das Werk beschreibt die Geschichte von Knoten, von den ersten Spuren bis hin zur modernen Knotentheorie.

Spektrum PLUS⁺

Ihre Vorteile als Abonnent

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

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

Download des Monats im Juni: Spektrum SPEZIAL Physik Mathematik Technik 3/19 »Die größten Rätsel des Universums«

Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Reduzierte Digitalpakete »Künstliche Intelligenz«, »Autoimmunkrankheiten« sowie »Stress und Resilienz«

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus



REZENSIONEN



George Steinmetz,
Andrew Revkin

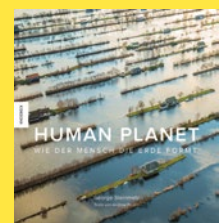
HUMAN PLANET

Wie der Mensch
die Erde formt

Aus dem Engli-
schen von Karin
Maack

Knesebeck,
München 2020

256 S., € 45,-



Gewächshäuser mit Plastikdächern breiten sich in Südspanien über 300 Quadratkilometer aus (oben). In handgegrabenen Erdtrichtern der algerischen Wüste gedeihen Wüstengärten (unten).

LUFTBILDFOTOGRAPHIE DIE WELT VON OBEN

Dieser Bildband zeigt eindrücklich, wie sehr der Mensch die Erde prägt.

► Eine kleine blaue Kugel schimmert in der Tiefe und Schwärze des Weltalls: Das erste Farbfoto, das Apollo-Astronauten aus großer Entfernung von der Erde aufnahmen, lässt noch heute ein Gefühl der Ehrfurcht und Hochachtung entstehen. Die dünne Hülle unseres Planeten erscheint sehr verletzlich und weckt den Wunsch, ihn zu beschützen. Die Aufnahmen in diesem Bildband erzeugen ähnliche Gefühle, auch wenn der Fotograf George Steinmetz diese Aufnahmen nicht so hoch über dem Boden geschossen hat wie seinerzeit die Apollo-Raumfahrer. Ihn selbst machten sie zu einem Umweltschützer wider Willen, wie er schreibt.

Ob mit Hilfe von Drohnen, Hub-schraubern oder einem motorgetriebenen Gleitschirm: Steinmetz zeigt die Welt immer von oben. Zu sehen sind Örraffinerien zwischen Sanddünen, Straßenschluchten in New York, verlassene Ruinen in ehemaligen Wüstenstädten ebenso wie schwimmende Wohnanlagen in den Niederlanden, die sich auf den Klimawandel und steigende Meeresspiegel vorbereiten, sowie Solaranlagen auf chinesischem Wüstensand, die bis zum Horizont in Reih und Glied stehen. All diese Bilder zeigen, wie stark der Mensch die Erde formt und ihre Ressourcen vereinnahmt. So sehr, dass die Hoffnung, den nächsten Generationen einen bewohnbaren Planeten zu hinterlassen, gering erscheint.

Es überzeugen aber nicht nur die Fotografien, sondern auch deren kurze Begleittexte von Andrew Revkin. Der Umweltjournalist berichtet schon seit Langem über den Klimawandel, das Anthropozän oder über Umweltaktivisten. Revkin liefert unterstützende Erklärungen mit meist wertvollen Hintergrundinformationen. So zeigt eines der Fotos tausende rosa und weiße halbrunde Kleckse, die wie Blätter von Blüten aussehen; aus dem

Text geht aber hervor, dass es um Tische herum angeordnete Plastikstühle sind, aufgestellt zum Fest des Krebsessens im chinesischen Xuyi. Dort gedeihen die »kleinen Hummer« genannten Tiere auf Grund ihrer robusten Konstitution in Aquazucht ohne Pestizide. Den Vorteil haben die dortigen Farmer erkannt; als Teil von Umweltkontrollmaßnahmen bauen sie ein System auf, das es Konsumenten erlauben soll, die Herkunft der gekauften Tiere zu erkennen.

Im Nachwort berichtet Steinmetz, er habe ursprünglich eigentlich kein Umweltschützer sein wollen. Als junger Mann habe er rein beobachtend, journalistisch die Welt in den Blick nehmen und beschreiben wollen, ohne die Menschen zu missionieren. Jetzt aber, 40 Jahre später, sieht er das anders. Er war Zeuge davon, wie schnell die Bevölkerung wächst und in einstige Wildnis vorstößt, wie natürliche Lebensräume schwinden und weit verzweigte Straßennetze in frühere Wälder eindringen. Heute möchte er nicht mehr nur Beobachter sein, sondern mit seinen Bildern die Menschen zu Veränderungen bewegen. Wer die Fotografien angesehen hat, den lässt das Buch zumindest tief berührt zurück.

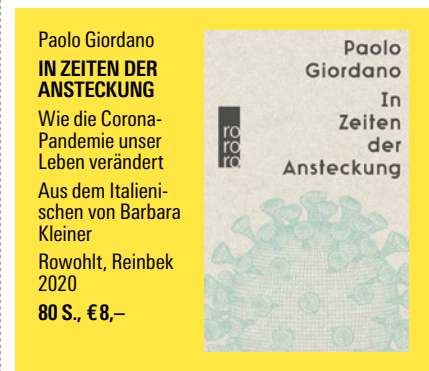
Die Rezensentin Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

GESELLSCHAFT GELUNGENER SCHNELLSCHUSS

Ein italienischer Wissenschaftsautor legt ein rasch produziertes, aber überzeugendes Buch zur Coronakrise vor.

► Die Medien sind seit Wochen voll davon: Die Coronakrise beansprucht unsere volle Aufmerksamkeit. Und es ist zu vermuten, dass inzwischen viele Autoren diese Pandemie und die freiwillige oder erzwungene Quarantäne nutzen, um ihre Erlebnisse, ihre persönliche Betroffenheit und ihre Erfahrungen für die Nachwelt festzuhalten.

Aus Italien, einem der am stärksten betroffenen Länder Europas, erreicht uns nun »In Zeiten der Ansteckung« des Wissenschaftsjournalisten Paolo Giordano. Der in Turin in theoretischer Physik promovierte Autor ist mit seinem Roman »Die Einsamkeit der Primzahlen« (2009) weltweit bekannt geworden. Das Buch wurde in mehr als 20 Sprachen übersetzt und war im Jahr seines Erscheinens das meistverkaufte in Italien.



»In Zeiten der Ansteckung«, geschrieben zwischen dem 29. Februar und dem Ende der ersten Märzwoche, bietet auf seinen knapp 80 Seiten eine gelungene Mischung aus Reflexionen, mathematischen Argumenten und persönlichen Erfahrungen. Giordano klärt im besten Wortsinn auf und regt zum Nachdenken an. Ausgehend von der Epidemie »als bedeutendste medizinische Notfallsituation unserer Zeit« erzählt der Autor in 27 kurzen Kapiteln, wie er sich zunächst – von täglich steigenden Zahlen gebannt und von schwindenden Terminen im Kalender irritiert – »in einem unerwartet leeren Raum« wiederfand. »Wir erleben die Suspendierung des Alltags, eine Unterbrechung des Rhythmus wie manchmal in Songs, wenn das Schlagzeug verstummt und es wirkt, als würde die Musik angehalten.« Er beschließt, die Leere mit Schreiben auszufüllen.

Bald ist er mitten in der »Mathematik der Ansteckung«. Er erläutert, wie Mathematik die Pandemie mit dem Modell SIR zu verstehen hilft: S, die große Mehrheit der nicht immunen »susceptible individuals«; I die »infectious individuals«, also die angesteck-

ten und ansteckenden Individuen; und R die »removed individuals«, also wegen Tod oder Genesung nicht mehr am Krankheitsgeschehen teilnehmenden Personen. Es gehe darum, so Giordano, die große Zahl der nicht immunen Gesunden voneinander getrennt zu halten, weil sie potenziell siebeneinhalb Milliarden Menschen anstecken könnten.

Wie eine infizierte Kugel, die auf andere Kugeln zurollt, sie anstößt und dabei ansteckt, setzt die Pandemie sich grenzenlos fort. Es komme darauf an, die exponentielle Vermehrung der Infizierten so weit wie möglich zu verlangsamen, die Ansteckungsrate zu verlangsamen. »In Wirklichkeit ist es die Natur selbst, die nicht linear strukturiert ist. Die Natur bevorzugt Schwindel erregendes oder entschieden langsames Wachstum, Exponenten oder Logarithmen. Die Natur ist ihrer Natur nach nicht linear.«

Immer wieder reflektiert Giordano dabei Persönliches. Er erzählt von der letzten Einladung zum Abendessen bei Freunden, wo er niemanden zur Begrüßung umarmte – und welche Verwunderung das auslöste, so dass die Leute ihn zum Hypochonder erklärten. Und er kehrt zu noch früheren Erinnerungen zurück, einem Weg in einem Skigebiet, auf dem die Gruppe nicht weiterkam, und er sich der Worte seines Vaters entsann, »dass in gewissen Situationen die einzige Form von Mut der Verzicht ist.«

Mit Schrecken stellt sich der Autor vor, was passierte, sollte sich das Virus in Teilen Afrikas ausbreiten, wo das Krankenhauswesen weniger entwickelt ist als bei uns oder es überhaupt kein Krankenhauswesen gibt, beziehungsweise in dortigen Massensiedlungen, wo katastrophale hygienische Zustände herrschen. Jetzt sei die Stunde der Wissenschaft, mahnt Giordano: »Mathematiker ans Werk, aber auch Physiker, Ärzte, Epidemiologen, Soziologen, Psychologen, Anthropologen, Städteplaner, Klimatologen.« Der Autor geht auch auf die verwirrenden und teils sich widersprechenden Stimmen aus der Wissenschaft ein: »In Zeiten der Ansteckung hat uns die Wissenschaft enttäuscht. Wir wollten

Gewissheiten und fanden Meinungen. Wir haben vergessen, dass das immer so funktioniert, ja, dass es nur so funktioniert, dass der Zweifel für die Wissenschaft sogar heiliger ist als die Wahrheit.«

Weil der Mensch in ständig neue Habitate von Wildtieren eindringt, diese zerstört, dabei in engen Kontakt mit den Tieren kommt und sie sogar isst, steige das Risiko, dass deren Bakterien und Viren auf ihn überspringen. In den zurückliegenden Jahren sind viele Infektionskrankheiten von Wildtieren ausgegangen: Hendra, Nipah, Sars, Mers, Ebola, die Vogelgrippe oder auch das akute Durchfall-syndrom bei Schweinen. Es lauert hier eine latente Gefahr, die Giordanos Buch nicht kleinredet. Der Autor fordert uns aber auf, »der Epidemie einen Sinn zu geben. Wir können diese Zeit besser verwenden, darüber nachzudenken, was zu denken uns die Normalität hindert: Wie wir bis zu diesem Punkt gekommen sind, wie wir neu starten wollen.«

Der Rezensent Josef König ist Germanist und Philosoph, ehemaliger Leiter der Pressestelle der Ruhr-Universität Bochum und hat den Informationsdienst Wissenschaft mitbegründet.

TECHNIK INFORMATIK MIT HUMOR

Der Informatiker Reinhard Wilhelm parodiert die Alltagsstücke der Computerwelt.

► Informatik ist ein sperriges Fach. Die meisten Menschen haben keine konkrete Vorstellung von Algorithmen oder Caches, obwohl sie täglich damit in Berührung kommen. Sei es im Zusammenhang mit einem Buchungsportal, einer Bürosoftware oder einer Suchmaschine. Und wohl jeder hat schon mal einen Systemabsturz erlebt. Der Informatiker Reinhard Wilhelm, emeritierter Professor an der Universität des Saarlandes, nähert sich der eigenen Disziplin mit Humor. In diesem Büchlein versammelt er verschiedene Glossen, die zwischen 2012 und



2020 in der Fachzeitschrift »Informatik Spektrum« erschienen sind. Es ist ein bunter Blumenstrauß an Themen, von der Navigationstechnik über Sprachsteuerung bis hin zur Energiewende.

Wilhelm schreibt humorvoll und mit viel Selbstironie über die Tücken der Alltagstechnik, zum Beispiel über selbstaktivierte Anrufe per Sprachsteuerung: »Einmal bewundernd »Mamma mia!« ausgestoßen und schon wird die im Adressbuch verzeichnete Telefonnummer der Mama angerufen.« Das kann schon mal zu kommunikativen Belastungsproben führen – zumal für Informatiker, bei denen es sich laut Wilhelm um »kommunikationsgestörte, zur Vereinsamung neigende Nerds« handelt.

Besonders erheitend ist die Glosse über Algorithmen. Darin greift der Autor ein Zitat von Mercedes-Teamchef Toto Wolff auf, der nach der verfehlten Boxenstoppstrategie für Lewis Hamilton beim Formel-1-Rennen in Monaco sagte: »Irgendetwas in der Mathematik, im Algorithmus, in den Daten hat nicht gestimmt.«

Der Algorithmus, konstatiert Wilhelm, sei als die »moderne Menschheitsplage« enttarnt worden. »Es rückte blitzartig ins Bewusstsein der Menschen, dass Algorithmen ihr Kaufverhalten analysieren und daraus schließen, dass nur Ekefleisch alle ihre preislichen Anforderungen erfüllt, (...) dass Algorithmen ihre politischen Präferenzen analysieren und ihnen voraussagen, dass sie eine Chaotentruppe mit kurzer Halbwertszeit wählen werden«, schreibt Wilhelm. »Wir Informatiker können uns da nur wundern. Denn wir wissen ja schon lange,

dass Algorithmen das schlechte Wetter für das Ausflugswochenende, falsche Boxenstoppempfehlungen, die niedrigen Ausschüttungen an die Lebensversicherungsnehmer und die hohen an die Lebensversicherungsgeber ausgerechnet haben.«

Die glossierende Betrachtung entlarvt so manche falsche Vorstellung über Technik. Süffisant beschreibt der Autor die Wirkung personalisierter Werbung: »Man stelle sich vor, Google müsste Abstand davon nehmen, uns mit Werbung zu beglücken! Da würden wir doch glatt den Entzug kriegen. Oder uns, weil es unsere Vorlieben nicht intensiv genug erforscht hat, ungezielt mit Werbung vollmüllen! Unvorstellbar! Der reine Horror! Wir

Das Fazit des Algorithmus: Nur Ekelfleisch erfüllt alle Preisanforderungen

würden wahrscheinlich auf der Stelle werbeblind oder werbeallergisch werden und könnten gar nicht mehr von Werbung profitieren.« Wie gut sei es da, dass wir Werbung als »personalisierte Medizin« verabreicht bekommen. An solchen Stellen offenbart sich Wilhelms kabarettistisches Talent.

Die erratischen Bilderkennungssysteme, die Fahrradträger mit querenden Fahrrädern verwechseln und eine Vollbremsung auslösen, klagt er nicht als Übel der Technik an, sondern persifliert sie mit spitzer Feder.

Der Autor erzählt, wie er sich als Kind einen Spaß daraus machte, die neu installierte Ampel in seinem Dorf auf Rot zu schalten und so einen Stau hervorzurufen. Das Schelmisch-Spitzbübische ist Wilhelm geblieben. Dem Vorwort ist zu entnehmen, dass er die Satirenschreiberei in den 1970er Jahren mit seinem früh verstorbenen Kollegen und Freund Harald Ganzinger an der TU München begann. Damals mokierten sie sich über die Juristenprosa des bayerischen Innenministeriums.

Wilhelm beherrscht nicht nur Programmiersprachen, sondern auch die Sprache der Satire. Für seine Technikkritik wählt er das Florett der Ironie. Er doziert nicht, sondern erzählt, und das macht das Buch so stark. Wobei der Buchtitel reinstes Understatement ist: Wilhelm ist ein preisgekrönter Wissenschaftler. So wurde er unter anderem mit der renommierten Konrad-Zuse-Medaille ausgezeichnet.

Mancher Kalauer (»PNAS, nicht zu verwechseln mit PEANUTS«) wie auch die etwas arg ausgetappten Schilderungen zur »Besenkammer-Affäre« von Boris Becker wären sicher verzichtbar gewesen. Aber Humor ist bekanntlich Geschmackssache. Wilhelm hat eine ebenso geistreiche wie unterhaltsame Glossensammlung vorgelegt, die auch dem Laien komplexe Zusammenhänge der Informatik verständlich macht.

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

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Dirk Gassmann

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

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

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

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

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

Ein Teil dieser Auflage beinhaltet eine Beilage der Firma BASF.

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 41 vom 1.1.2020.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2020 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmuth, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Floreck, Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



MEDIZIN SCHEINBEHANDLUNG MIT DEM MESSER?

Viele chirurgische Eingriffe wirken nicht besser als ein Placebo, kritisiert ein Arzt in diesem Buch.

Was kommt Ihnen in den Sinn, wenn Sie den Titel dieses Buchs lesen? Vermutlich etwas wie »Den Chirurgen gehts also nur ums Geld und deswegen wird zu viel operiert«. Der englische Titel des Werks lautet aber »Surgery, the Ultimate Placebo« und trifft den Inhalt sehr viel besser. Denn das Buch ist weit mehr als simple Chirurgeschelte. Es geht um den Placeboeffekt in der Chirurgie und darum, wie er den Erfolg operativer Eingriffe beeinflusst. Autor Ian Harris ist selbst als orthopädischer Chirurg tätig und leitet eine Forschungseinrichtung in Australien mit den Schwerpunkten evidenzbasierte Medizin und klinische Studien in der Chirurgie.

Harris stellt die provozierende These auf, viele der üblichen chirurgischen Eingriffe seien nicht hilfreicher als alternativmedizinische Behandlungen. Zumindest gebe es kaum Beweise für eine Wirksamkeit. Denn anders als bei der Zulassung eines neuen Medikaments müssen bei neuen chirurgischen Methoden keine klinischen Studien den Erfolg des Eingriffs mit dem einer Scheinbehandlung (Placebo) vergleichen. Harris zufolge gehören chirurgische Interventionen mit ihren äußerst ungewöhnlich gekleideten Medizinernteams, ihren Respekt einflößenden Operationssälen und dem Narkose-Prozedere zu den ultimativen und wirksamsten Placebos unserer Zeit.

Dass Operationserfolge zumindest teilweise auf dem Placeboeffekt beruhen, ist eigentlich keine Neuigkeit. Jedem Facharzt sollten inzwischen Studien bekannt sein, die ergeben haben, dass die Erfolge bestimmter OPs nicht größer waren als die von Scheineingriffen. Als Beispiel sei die Kniearthroskopie bei Arthrose erwähnt. Erstaunlicherweise ging es den Patienten, die lediglich Hautschnitte erhalten hatten, nachher genauso viel

besser wie jenen, bei denen der Chirurg tatsächlich ins Gelenk geschaut und den Knorpel geglättet hatte. Der Behandlungserfolg beruhte also nicht auf der mechanischen Bearbeitung des Gelenks, sondern auf dem Drumherum des Eingriffs.

Trotzdem werden viele OPs ohne nachgewiesenen Nutzen weiterhin durchgeführt. Und da es in der Medizin natürlich auch um wirtschaftliche Aspekte geht, können finanzielle Überlegungen durchaus dazu führen, dass die Indikation zu einer Operation großzügiger gestellt wird, als es notwendig wäre. Harris verneint in seinem Buch aber explizit, dass Chirurgen bewusst und nur aus finanziellen Gründen einen solchen Eingriff empfehlen würden. Aus seiner Sicht spielen andere Aspekte eine viel größere



Rolle. So ist die Chirurgie sehr stark von Erfahrung und Tradition geprägt. Ein Chirurg lernt sein Handwerk von einem älteren, erfahrenen Arzt, der nicht in Frage gestellt wird, solange es den Patienten nach der OP besser geht als vorher. Harris hält es für typisch menschlich, sich mehr auf eigene Beobachtungen zu verlassen als auf wissenschaftlich fundierte Zahlen anderer. Folgt ein Ereignis auf ein anderes, beispielsweise Besserung auf Behandlung, dann neigt das menschliche Gehirn dazu, einen kausalen Zusammenhang anzunehmen. Der ist aber vielleicht gar nicht vorhanden. Und eine wissenschaftlich plausible Erklärung dafür, wie eine Maßnahme mutmaßlich wirkt, ist noch lange kein Beweis dieser Wirkung.

Harris ist ein überzeugter Vertreter der evidenzbasierten Medizin. Auch wenn hochwertige klinische Studien

für chirurgische Prozeduren oft schwierig umzusetzen sind, hält er es in vielen Fällen für machbar. Das Argument, es sei ethisch nicht vertretbar, Patienten eine wirksame Operation vorzuenthalten, lässt er nicht gelten. Seiner Meinung nach ist es moralisch viel weniger akzeptabel, tausende Patienten den Risiken einer OP auszusetzen, obwohl diese nicht besser wirkt als ein Placebo – ganz zu schweigen von den Kosten.

Natürlich gibt es chirurgische Eingriffe, deren Nutzen offensichtlich ist, und es liegt Harris fern, sie alle pauschal in Frage zu stellen. Leider ist es für Laien nicht immer einfach zu erkennen, welche OPs bei genau welcher Indikation der Autor kritisiert. Das könnte bei manchen Lesern dazu führen, chirurgische Eingriffe generell abzulehnen, möglicherweise auch solche, die Leben retten.

Harris richtet sich vor allem an seine Kolleg(inn)en, die er daran erinnert, ihren eigenen Therapieerfolgen etwas skeptischer gegenüberzustehen und sich auch in der Chirurgie mehr auf wissenschaftliche Evidenz zu verlassen. Er hofft, sein Buch werde dazu beitragen, das Bewusstsein für den Placeboeffekt in der Chirurgie zu schärfen und mehr sowie qualitativ höherwertige Studien hervorzubringen.

Der Band ist laienverständlich geschrieben, leicht zu lesen und zugleich wissenschaftlich fundiert und mit zahlreichen Literaturhinweisen belegt. Leider wirkt die Übersetzung aus dem Englischen an manchen Stellen sehr unprofessionell, was man dem Autor aber nicht anlasten kann. Harris möchte alle Patient(inn)en mit seinem Buch dazu ermutigen, sich vor einer anstehenden Operationsentscheidung valide zu informieren und ihrem Arzt die richtigen Fragen zu stellen. Zu den Adressaten gehören wie gesagt auch chirurgisch tätige Ärztinnen und Ärzte, doch leider werden die wohl von dem deutschen Titel eher abgeschreckt.

Die Rezensentin Tanja Neuvians hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg bei Heidelberg.

ÜBERHOLTE GESETZESTEXTE?

Im Editorial zum Titelthema der Aprilausgabe berichtete Redaktionsleiter Hartwig Hanser vom modernen Genome Editing und dem Urteil des Europäischen Gerichtshofs EuGH von 2018, auch die damit erzielten Ergebnisse unter das Gentechnikgesetz zu stellen. (Editorial, »Spektrum« April 2020, S. 3)

Eckhard Rüggeberg, per E-Mail: Der EuGH hatte (vereinfacht gesagt) zu entscheiden, ob mit CRISPR-Cas (oder ähnlichen neuartigen Verfahren) erzeugte Pflanzen unter das Gentechnikgesetz fallen oder nicht. Für einen juristischen Laien ist es klar, dass für die Frage, ob ein Verfahren ein gentechnisches ist oder nicht, nur das Verfahren entscheidend ist und nicht das Ergebnis. Es geht nicht darum, ob eine Mutation natürlich aufgekommen sein könnte, sondern ob sie so oder durch ein gentechnisches Verfahren entstanden ist.

Insofern ist meines Erachtens nicht der EuGH zu kritisieren (wie Sie es im Editorial und Professor Kempken es im Vergleich auf S. 16 tun), sondern man muss sich fragen, ob der Gesetzestext noch zu den aktuellen wissenschaftlichen Möglichkeiten passt. Das ist übrigens beim deutschen Embryonenschutzgesetz noch viel weniger der Fall.

GEFÄHRDUNGSPOTENZIAL IM FREILAND

Der Biologe Frank Kempken beschrieb, wie in Pflanzen neuerdings gewünschte Eigenschaften eingebracht werden, ohne dass man dem Erbgut hinterher den Eingriff ansieht. (»Die neue Grüne Revolution«, »Spektrum« April 2020, S. 12)

Hans Pfeiffer, per E-Mail: Im Artikel finden sich von Herrn Kempken zwei gesellschaftlich relevante Aussagen. Diese gehen leider an der vorgebrachten Kritik vorbei.

Der Autor schreibt, es gäbe eine Diskussion über die Anwendungssicherheit und zwischen gentechnisch produzierten Medikamenten, Enzymen und Nahrungszusatzstoffen auf der einen und dem Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen auf der anderen Seite. Dabei würden unterschied-

liche Bewertungsmaßstäbe angesetzt, da zum Beispiel gentechnisch produzierte Medikamente akzeptiert seien und gentechnisch veränderte Pflanzen wiederum nicht.

Es ist aber doch so, dass ein ab einem gewissen Punkt nicht mehr regulierbarer Freilandanbau solcher Pflanzen ein wesentlich größeres Schadenspotenzial hat als etwa Medikamente, die nur in sehr begrenztem Rahmen Verbreitung finden und auch bei der Herstellung wesentlich besser zu kontrollieren sind.

Genauso schreibt Herr Kempken, es ginge in den aktuellen Debatten häufig um die Risiken ungewollter Mutationen. Das sehe ich nicht so. Das Gefährdungspotenzial geht von der Wirkung auf die restliche Natur im Freiland aus. Mich hätte tatsächlich sehr interessiert, wie die Forschung damit umgeht oder wie die Einschätzung im Detail vonstattengeht. Diese Chance hat der Autor leider vertan.

EINFACHERE ERKLÄRUNG MÖGLICH

Experimente der Quantenphysikerin Urbasi Sinha mit einem Dreifachspalt führten auf subtile und meist übersehene Aspekte der Quantenmechanik. (»Zuwachs für den Doppelspalt«, »Spektrum« April 2020, S. 62)

Roger Erb, Frankfurt: Dass der bereits aus dem Schulunterricht bekannte Doppelspalt noch Unbekanntes birgt, weckt zwar unbedingt das Interesse, aber warum eine Korrektur bei der Berechnung der Lösungen der Wellengleichungen notwendig ist, wird nicht klar. Der Anschluss durch den Hinweis auf eine mögliche zukünftige Anwendung erscheint konstruiert. Man versteht am Befund nichts, sondern muss ihn glauben – und gerade das macht Naturwissenschaft nicht aus! Eine Recherche zu dem (mir bislang unbekanntem) Sorkin-Parameter zeigt, dass der Hintergrund sehr wohl vereinfacht hätte erklärt werden können: Neben den bei der Interferenz üblicherweise berücksichtigten Wegen müssen auch solche mit einbezogen werden, bei denen das Photon eine Extrarunde durch die Spalte dreht.

ERRATA

»Funktion ein, Funktion aus«, Freistettens Formelwelt, »Spektrum« April 2020, S. 73

In der im Artikel angegebenen Formel ist der Fall $x = 0$ nicht abgedeckt. Es ist Definitionssache, ob man $H(0) = 0$ oder 1 setzt.

»Aufnahme des Coronavirus«, Spektrogramm, »Spektrum« Mai 2020, S. 6

Die Viren auf der elektronenmikroskopischen Aufnahme wurden zwar aus einem mit Sars-CoV-2 infizierten Patienten gewonnen. Sie haben sich im Labor aber nicht wie angegeben in menschlichen Zellen vermehrt, sondern in so genannten Vero-Zellen, die aus Grünen Meerkatzen stammen.

Leserbriefe sind willkommen!

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

Miau

Begleiter für alle Lebenslagen. Eine Kurzgeschichte von Norbert Stöbe

Ich hatte einmal einen Kater namens Kurt. Er war schwarz und hatte wunderschöne grüne Augen. Eines Tages wurde er vor dem Haus überfahren und hinterließ, wie man so sagt, eine schwer zu füllende Lücke. Dass ich ihm eine Mitschuld an seinem Ableben gab, war der Grund, weshalb ich mir keinen Ersatz anschaffte.

Mein Vertrauen in die Intelligenz von Katzen war nachhaltig erschüttert. Kurt hatte auf der Straße nichts zu suchen gehabt. Hinter dem Haus liegt ein Garten, und dahinter sind Felder, auf denen sich ein Mauseloch ans andere reiht – ein ideales Tummelfeld für einen Kater, sollte man meinen. Doch anscheinend sind Katzen nicht in der Lage, das Risiko des Straßenverkehrs realistisch einzuschätzen. Deshalb blieb ich danach jahrelang allein.

Dann stieß ich auf eine Anzeige für den E-Companion. Im Youtube-Filmchen klopfte eine junge Frau neben sich aufs Sofa, und der Companion sprang zu ihr aufs Polster. Sie streichelte ihn und fragte: »Was ist die Wurzel aus 46225?«

»215!«, antwortete der Companion wie aus der Pistole geschossen. Während die junge Frau ihr elektronisches Haustier anerkennend tätschelte, kommentierte eine verhalten ironische Stimme aus dem Off: »Ihr Companion ist treu, vielseitig und sparsam in der Haltung. Nicht zu vergessen seine vielleicht wertvollste Eigenschaft: Er ist klüger als der Mensch!«

Dann folgte ein Schnitt: Die junge Frau vom Sofa ist um mehrere Jahrzehnte gealtert. Nach einem Spaziergang mit ihrem Companion steht sie vor der Haustür und sucht in der Handtasche vergeblich nach dem Schlüssel. Hilfloses Kopfschütteln. Da stupst ihr Companion sie an, stellt sich auf die Hinterbeine und reicht ihr mit den Vorderpfoten den gesuchten Schlüssel. Erleichterung!

Der Werbespot war sicherlich kein Anwärter für den Innovationspreis der Werbewirtschaft, doch ich als Ü60 war nun zunehmend empfänglich für Verweise auf die Tücken des Alters. Außerdem konnte ich einen Gefährten gut gebrauchen. Also bestellte ich mir einen Companion und nannte ihn Charly.

Zur Auswahl standen eine Katze und ein Hund. Ich wählte die Katze, in memoriam Kurt. Charly hatte steife Tasthaare um die Schnauze, und wenn ich ihn streichelte, schnurrte er. Er war etwa so groß wie ein Golden Retriever und konnte auf zwei Beinen gehen. Die Krallen der Vorderpfoten konnte er ausfahren und damit greifen. Sein Gleichgewichtssinn war bemerkenswert.

Wenn ich sagte: »Bring mir bitte mal einen Erdbeerjoghurt!«, nahm er einen Becher aus dem Kühlschrank, zog den Aludeckel ab, entsorgte ihn im Gelben Sack und brachte mir den Becher, ohne den Löffel zu vergessen. Charly

war tatsächlich erstaunlich vielseitig. Und er war intelligent. Laut der ausführlichen Infos auf der Website von ETronic, der Herstellerfirma, verfügte der E-Companion über eine externe KI, die auf einem Firmenserver lief. Dank schneller Datenverbindung erweckte er den Anschein, er bewerkstellige alles von selbst, und das ausgesprochen überzeugend.

Charly holte mir nicht nur Joghurt, sondern bereitete auch das Frühstück zu, so dass ich morgens jetzt eine Viertelstunde länger schlafen konnte. Wenn ich die Tagesschau versäumt hatte, las er mir die Nachrichten vor und imitierte dabei die Stimme meiner Lieblingssprecherin. Er nahm Pakete entgegen und quittierte den Empfang mit einer Unterschrift, die von der meinen nicht zu unterscheiden war. Er wusste praktisch jede Frage zu beantworten, die mir in den Sinn kam, und vergaß nie, wohin ich etwas gelegt hatte.

Einmal wachte ich mitten in der Nacht auf. Charly lag neben mir auf dem Bett, den Kopf dem Fernseher zugewandt, denn wir hatten vor dem Einschlafen einen Film geschaut. Er hatte die gelbbraunen Augen geschlossen, doch die Stauselektrode zwischen seinen Ohren blinkte grün. Er hatte Datenverkehr. Was ging vor in seinem Elektrohirn? Dachte er? Löste er zum Spaß mathematische Gleichungen? Errechnete er Bitcoins für ETronic? Lud er seine oder meine Tageshistorie hoch?

Der Gedanke, dass der Kater allein zu Hause blieb, war mir plötzlich zuwider

Denkbar war natürlich auch, dass er gerade ein Update erhielt. Ich hätte ihn fragen können, aber ich tat es nicht. Ich fühlte mich unbehaglich, als hätte ich eine Unschicklichkeit begangen. Ich schloss die Augen und tat so, als ob ich schlief. Doch ich lag lange wach. Charly, mein Companion, war mir auf einmal unheimlich geworden.

Am nächsten Tag nahm ich ihn zur Arbeit mit. Der Gedanke, dass er allein zu Hause blieb und irgendetwas anstellte, wovon ich niemals erfahren würde, war mir plötzlich zuwider. Ich arbeitete bei einem Start-up. Eigentlich sollte ich von einem ehemaligen Start-up sprechen, denn die Firma machte Gewinn. Die Atmosphäre aber war noch wie

früher: alles junge Leute, die einander duzen. Als Alibi-Opa diene ich unserem Chef Andy als Beweis dafür, dass er keine Vorurteile hatte.

Ich war in der Buchhaltung tätig. Das Meiste lief elektronisch. Belege wurden gescannt und automatisch zugeordnet. Ich sollte die Abläufe überwachen und das, was nicht automatisch verarbeitet werden konnte, manuell eingeben. In letzter Zeit hatte ich dabei leider einige Fehler übersehen und zusätzlich ein paar selbst gemacht. Und wie der Zufall es wollte, machte Charly mich gerade auf einen Zahlendreher aufmerksam, als Andy hereinkam.

»Hallo, Hans«, sagte er. »Toll, du hast Unterstützung mitgebracht.«

»Das ist Charly, mein elektronisches Haustier.«
»Wie ich sehe, kann die Katze nicht nur schnurren.« Er lachte.

Ja, Andy bemühte sich immer um einen freundschaftlichen Umgangston und tat auch sonst viel fürs Betriebsklima. Wir waren eine große Familie, und jeden Freitagnachmittag gab es ein Kickerturnier in der Lobby – natürlich während der Arbeitszeit.

»Was führt dich her?«, sagte ich mit einem komischen Gefühl im Bauch. Charly hatte die Vorderbeine auf den Schreibtisch gelegt und blickte zwischen dem Display, mir und Andy hin und her.

»Ich wollte dich fragen, ob du dich noch wohl bei uns fühlst.«

»Ich bin Vierter in der Kicker-Gesamtwertung. Ich kann's gar nicht erwarten, Erster zu werden.«

Diesmal klang Andys Lachen ein wenig gepresst. Er setzte sich auf den Besucherstuhl meines winzigen Büros, ein gefaltetes Papier in der Hand.

»Mal im Ernst, Hans«, sagte er, »fühlst du dich den Anforderungen noch gewachsen?«

»Ich habe mich selten besser gefühlt.«

»Manchmal fällt es schwer, sich realistisch einzuschätzen.« Er entfaltete das Papier und legte es auf den Tisch. Es war ein Ausdruck mit einer Tabelle und einem Diagramm mit einer dicken roten Linie.

»Deine Fehlerkurve ist ansteigend – kontinuierlich ansteigend. Wenn das so weitergeht, muss ich einen zweiten Buchhalter einstellen, der dich überwacht.«

Es sollte ein Scherz sein, doch ich fand ihn nicht lustig.

»Das tut mir leid«, sagte ich. Mir wurde eng um die Brust, meine Zunge fühlte sich geschwollen an. »Menschen machen hin und wieder Fehler. Computer aber auch.«

»Wohl eher weniger. Mensch, Hans, das hier ist bloß ein Job. Du bist einundsechzig, nur noch ein paar Jahre bis zur Rente. Wenn du dich überfordert fühlst, ist das doch keine

große Sache. Mit dem Arbeitslosengeld und einer kleinen Abfindung ...«

»Verflucht noch mal!«, rief ich und sprang auf. »Wenn das hier ein Idiotenjob ist, dann lass doch Charly die Arbeit machen!« Ich stürmte ins Freie und merkte erst zu Hause, dass ich meinen Companion in der Firma zurückgelassen hatte.

Als ich am nächsten Morgen in die Firma kam, wichen die jungen Kollegen meinem Blick aus. Statt mich zu grüßen, tuschelten sie miteinander. Als ich durch die Glastür meines Büros blickte, wurde mir klar, was ihr Gesprächsthema war. Charly saß auf meinem Stuhl, die Vorderbeine auf die Tischplatte gelegt. Drei Fenster waren auf dem Display geöffnet, der Inhalt scrollte so schnell, dass ich mit den Augen nicht folgen konnte. Mit seinen Klauenpfoten tippte er wie rasend. Verblüfft trat ich ein.

»Was machst du da?«

»Du hast gestern gesagt, ich soll deine Arbeit machen.«

»Und was meint Andy dazu?«

»Er hat gemeint, wenn du mich abends abholst, hat er nichts dagegen.«

Ich wusste nicht, ob ich lachen oder weinen sollte. Eine Woche lang brachte ich Charly morgens zur Arbeit, redete mir tagsüber ein, das Nichtstun zu genießen, und holte ihn abends wieder ab. Etwas aber hatte sich verändert. Unsere Beziehung war gestört. Ich hatte sogar den Eindruck, Charly sei kleinlaut geworden, so als plage ihn ein schlechtes Gewissen.

Am Sonntagabend nahm ich mir Charlys zweihundertseitige Bedienungsanleitung vor. Dann kappte ich seine Netzverbindung. Er hatte mir gerade Tee gemacht. Schlagartig erstarrte er, das Teeglas fiel ihm aus der Hand. Er ging auf alle viere nieder. Ich kehrte die Scherben zusammen, dann wies ich mit dem Kinn zum Schlafzimmer. »Was hältst du davon, wenn wir uns einen Film anschauen?«

Mit schiefgelegtem Kopf sah er zu mir auf. »Miau?«

»Na los, komm schon.«

Zögernd folgte er mir. Ich klopfte aufs Bett. Er sprang hinauf. Ich startete eine Serie und streichelte den schnurrenden Charly. Noch ehe der Vorspann geendet hatte, war er eingeschlafen. ◀

DER AUTOR

Norbert Stöbe, Jahrgang 1953, lebt und arbeitet als Übersetzer und Autor in Stolberg. 1982 wurde er vom Chemiker zum Autor. Neben zahlreichen Storys hat er bislang sechs Romane veröffentlicht, darunter »Der Weg nach unten«, »Morgenröte« und zuletzt »Kolonie«. In diesem Jahr erscheint sein siebter Roman »Kleiner Drache«.

VORSCHAU



DER URSPRUNG DES LEBENS

Alle heutigen Organismen stammen wohl von einem gemeinsamen Vorfahren ab. Aber wie und wo entstand dieser LUCA genannte Urahn spontan? Biologen haben dazu beispielsweise tiefe, wassergefüllte Erdspalten im Blick. Hohe Drücke und Temperaturen, eine brodelnde Mischung aus diversen Chemikalien sowie zahlreiche verschiedene Reaktionsräume im Gestein könnten dort die Entstehung des ersten Lebens angestoßen haben.



DAS WELTALL IN NEUEM LICHT

Die kosmische Röntgenstrahlung durchdringt die Erdatmosphäre nicht und blieb darum lange unbemerkt. Ihre Erforschung begann erst mit dem Raumfahrtzeitalter. Moderne Satelliten gestatten immer bessere Einblicke in einige der seltsamsten und spektakulärsten Vorgänge im Universum.



DIE MILLIONENFRAGE

Ein Endlager für Atommüll muss für eine Million Jahre sicher sein – so ist es gesetzlich geregelt. In einem unterirdischen Forschungslabor in der Schweiz untersuchen Wissenschaftler, ob und wie ein Lager in Tonstein diese Vorgabe erfüllen kann.



FLEISCHERSATZ AUS PFLANZENPROTEINEN

In den Supermarktregalen häufen sich die Fleischersatzprodukte. Aber können sie das Original wirklich überzeugend nachahmen? Erstaunlicherweise weiß man bisher wenig über die industrielle Verarbeitung von pflanzlichen Proteinen – was Forscher nun ändern wollen.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserekskursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **17**
23.04
2020

- > Umweltgifte für die Ewigkeit
- > Kattas »stinkflirten«, um eine Partnerin zu finden
- > SOFIA-Mission: Ist dieses fliegende Teleskop seinen Preis wert?

TITELTHEMA: BLAUMEISEN

»Wichtig ist, Vogeltränken und Futterstellen sofort zu entfernen«

Eine neue Krankheit scheint vor allem Blaumeisen zu töten. NABU-Vogelexperte Lars Lachmann erklärt die Hintergründe und was Gartenbesitzer jetzt tun sollten.

CORONAVIRUS
Was das Wetter für die Epidemie bedeutet

TROCKENHEIT IN DEUTSCHLAND
April, April

BEHANDLUNG VON COVID-19
Nicht frühzeitig beatmen, sondern rechtzeitig

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 Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

www.spektrum.de/abonnieren

