

Spektrum

der Wissenschaft

Das Fundament der Physik

Quantenfeldtheorien
auf wackeligem Grund

HYPERSCHALLWAFFEN Hintergründe eines neuen Wettrüstens

GEOLOGIE Wo Kohlendioxid zu Stein wird

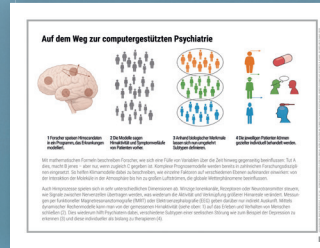
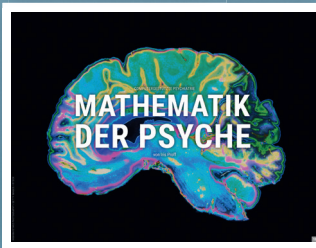
DINGOS Evolutionäre Grenzgänger zwischen Wolf und Hund

Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



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

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



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



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



EDITORIAL NATÜRLICHE VERBÜNDETE

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Zu den wichtigsten Aufgaben der Menschheit in den nächsten Jahren gehört sicher, dass wir unsere Kohlendioxidemissionen reduzieren. Angesichts unseres Energiehungers und der weltweit immer noch hohen Nachfrage nach fossilen Brennstoffen wie Kohle oder Öl werden wir wahrscheinlich mit Einsparungen allein die steigenden Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre nicht bremsen. Gefragt sind deshalb unkonventionelle Lösungen. Einen verblüffenden Ansatz beschreibt Douglas Fox ab S. 56: Eine ungewöhnliche Gesteinsformation im Oman entzieht der Luft aktiv Kohlendioxid und wandelt es in Minerale um – und das in geologisch betrachtet kurzer Zeit. Ein erstes Projekt testet inzwischen die Aufnahmekapazitäten des Mantelgesteins und eine mögliche industrielle Umsetzung.

Eines muss uns aber klar sein: Selbst bei einem Gelingen kann und wird diese Kohlenstoffsenke nur ein natürlicher Verbündeter gegen die Klimakrise sein. Ein zweiter – ebenfalls überraschender – Partner dafür lebt in Australien: der Dingo. Seit er vor mehreren tausend Jahren eingewandert ist, bestimmt er das Ökosystem des Fünften Kontinents mit. Wo heute noch Dingos in großer Zahl leben, sorgen sie dafür, dass die Lebensräume weniger durch eingeschleppte Arten wie Füchse, Katzen oder Kaninchen geschädigt werden. Und dadurch sind diese Ökosysteme besser in der Lage, Kohlenstoff einzulagern und sich an den Klimawandel anzupassen.

Doch was sind die Dingos überhaupt: Verwilderte Haushunde der Aborigines oder natürliche Nachfahren von Wölfen? Die Anthropologin Pat Shipman geht ab S. 32 auf Spurensuche im Erbgut und Verhalten der Dingos, die leider bei vielen Menschen völlig zu Unrecht einen schlechten Ruf haben.

Fundamental wird es schließlich in unserem Titelthema und dem Auftakt der dreiteiligen Serie zu Quantenfeldtheorien. Kevin Hartnett widmet sich darin dem »Fundament der Physik« aus mathematischer Sicht: eine harte Kopfnuss, an der sich wohl noch einige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Zähne ausbeißen werden.

Viel Vergnügen beim Mitdenken wünscht



NEU AM KIOSK!

Aufstieg und Fall eines westafrikanischen Reichs – wie das Königreich Benin und seine Hofkunst in den Griff europäischer Kolonialmächte gerieten, lesen Sie in **Spektrum GESCHICHTE** 5.21.

IN DIESER AUSGABE



PATY DAVIS JAMBETH

PAT SHIPMAN

Die US-amerikanische Anthropologin begibt sich ab S. 32 auf Spurensuche nach den geheimnisvollen Dingos in Australien.



WILHELM HAVERKAMP

Der Kardiologe und Charité-Professor interessiert sich dafür, wie KI und Datenverarbeitung die Medizin erweitern können. Ab S. 48 hinterfragt er den Nutzen tragbarer Computersysteme, die Körperfunktionen überwachen.



DAVID WRIGHT, CAMERON TRACY

Die Technikspezialisten untersuchen Nuklearwaffen und Raketensysteme und setzen sich für Rüstungskontrolle ein. Ab S. 68 erläutern sie die Hintergründe eines neuen Wettlaufs.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

Von Spezies zu Spezies

Gene überwinden Artgrenzen – selbst bei Tieren.

Verursacherprinzip wirkt

CO₂-Schulden beschleunigen die Technologieentwicklung.

Die Symmetrie von Phasenübergängen

Verschiedene Stoffe zeigen gleiches Verhalten.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Die Seele einer Fliege

Gestresste Insekten reagieren verblüffend menschlich.

47 FREISTETTERS FORMELWELT

Unvorstellbare Zahlen

Kapituliert der Taschenrechner, bleibt nur die Näherung.

66 SCHLICHTING!

Wie Spagetti erweichen

Eine Wasserfront nimmt Nudeln ihre Härte.

86 ZEITREISE

88 REZENSIONEN

97 IMPRESSUM

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 QUANTENFELDTHEORIE **DAS FUNDAMENT DER PHYSIK**

Bis auf die Gravitation folgen aus dem Standardmodell alle Grundkräfte und Elementarteilchen. Aus mathematischer Sicht ist der theoretische Unterbau unserer Welt aber kaum verstanden.

Von Kevin Hartnett

32 ZOOLOGIE **DER MYSTERIÖSE DINGO**

Weder domestiziert noch vollkommen wild, entziehen sich die australischen Dingos der zoologischen Kategorisierung und gehen ihre eigenen evolutionären Wege.

Von Pat Shipman

40 ARZNEIMITTELENTWICKLUNG
NEUE MEDIKAMENTE DANK SUPERCOMPUTERN

Serie: Von der Molekülstruktur zum Medikament (Teil 2) Computersimulationen revolutionieren die langwierige Suche nach Arzneimitteln.

Von Konstantin Fackeldey, Christoph Gorgulla und Marcus Weber

48 MEDIZINTECHNIK **GESUNDHEITSCHECK AM HANDGELENK**

Können transportable Elektronikgeräte wie Smartwatches erkennen, wenn ihre Nutzer krank sind? Das prüfen Forscher in vielen Studien – mit durchwachsenen Ergebnissen.

Von Wilhelm Haverkamp

56 GEOCHEMIE **FÜR IMMER GEBUNDEN**

Besondere Felsformationen im Oman könnten enorme Mengen an Kohlenstoffdioxid buchstäblich in Stein verwandeln.

Von Douglas Fox

68 MILITÄRTECHNIK **DER HYPE UM DEN HYPERSCHALL**

Ein Rüstungswettlauf droht: Neuartige Lenkflugkörper sollen kaum zu entdecken und abzuwehren sein. Allerdings können die Waffen die hochgesteckten Erwartungen nur wenig erfüllen.

Von David Wright und Cameron Tracy

76 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
EXISTIERT ECHTER ZUFALL?

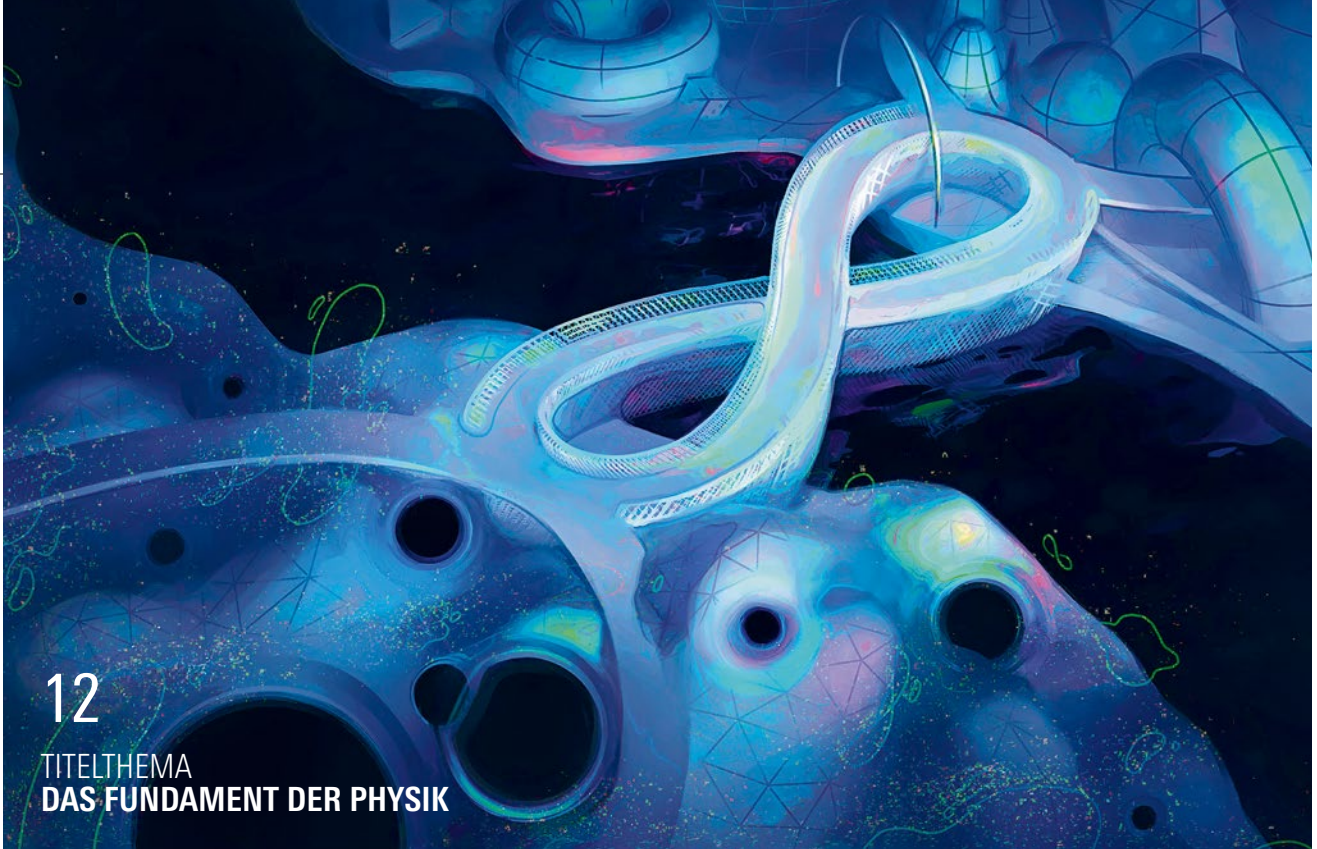
Quantenmechanische Effekte wirken sich nicht nur auf den Mikrokosmos aus, sondern beeinflussen auch den Wurf eines Würfels.

Von Axel Lorke und Peter Kohl

80 INFORMATIK **PROGRAMM MIT KÖPFCHEN**

Künstliche neuronale Netze arbeiten mit einem Mechanismus, der dem Gehirn nicht zur Verfügung steht. Um die Geheimnisse des Lernens zu lüften, suchen Fachleute nach biologisch plausiblen Alternativen.

Von Anil Ananthaswamy



12

TITELTHEMA
DAS FUNDAMENT DER PHYSIK

DEENA SIMHAHAD / QUANTA MAGAZINE



32

ZOOLOGIE
DER MYSTERIÖSE DINGO

ALAMY / AUSCAPE / JEAN-PAUL FERRERO



40

ARZNEIMITTELENTWICKLUNG
VIRTUELLE MEDIKAMENTENSUCHE

DESIGN CELLS / GETTY IMAGES / ISTOCK



48

MEDIZINTECHNIK
DIE UHR ALS ARZT

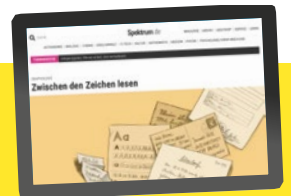
PROSTOCKSTUDIO / GETTY IMAGES / ISTOCK



68

MILITÄRTECHNIK
HYPERSCHALLWAFEN

JOSHUA ARMSTRONG, U.S. AIR FORCE



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

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

SPEKTROGRAMM

SAGENHAFTER GOLDSCHATZ

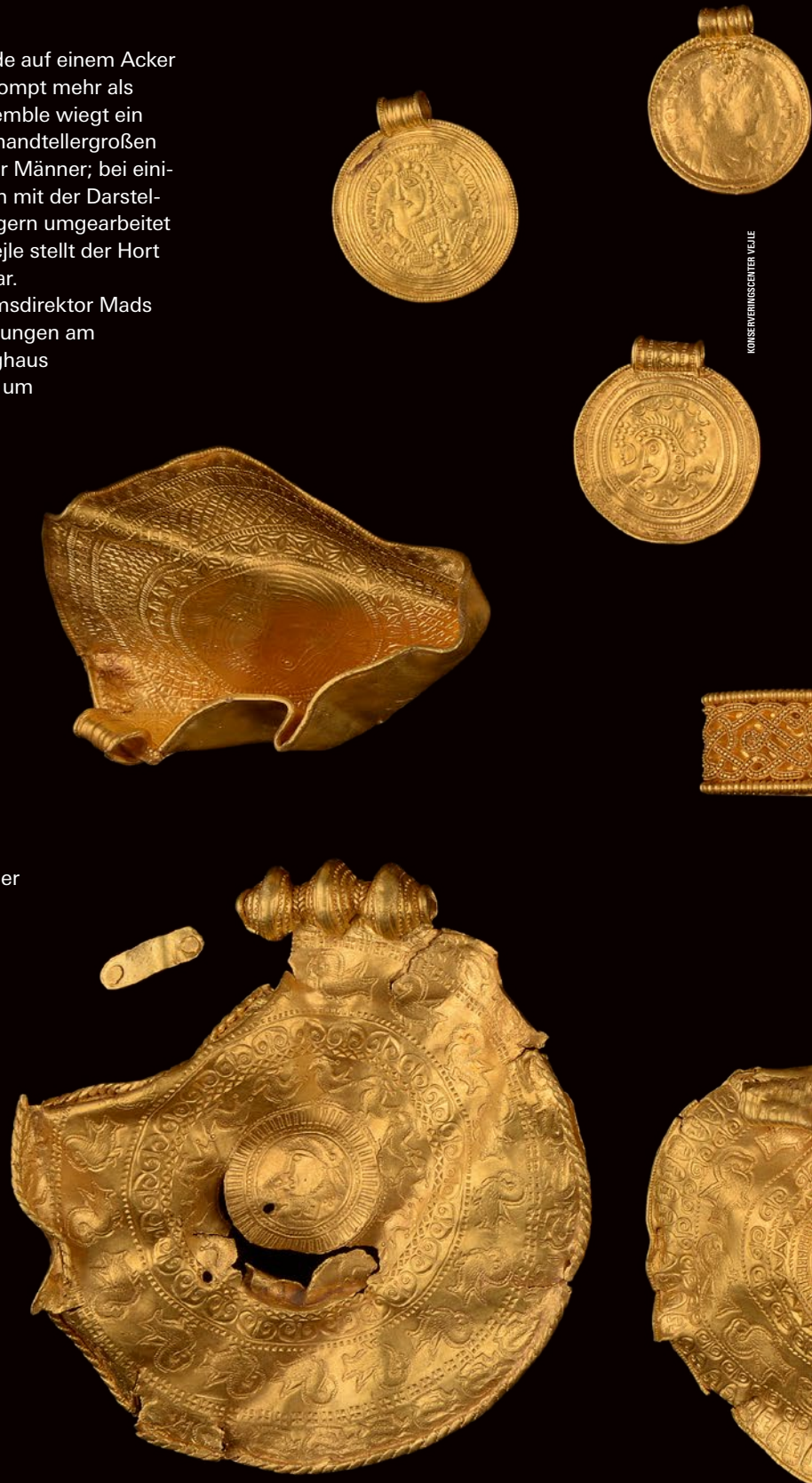
Als Ole Ginnerup Schytz seine neue Metallsonde auf einem Acker im dänischen Vindelev ausprobierte, fand er prompt mehr als 20 Goldobjekte aus dem 6. Jahrhundert. Das Ensemble wiegt ein knappes Kilo und besteht fast ausschließlich aus handtellergroßen Medaillons. Die Stücke zeigen Bildnisse berühmter Männer; bei einigen handelt es sich um spätrömische Goldmünzen mit der Darstellung etwa des Kaisers Konstantin I., die zu Anhängern umgearbeitet wurden. Laut dem Museumsverbund der Stadt Vejle stellt der Hort einen der größten Goldschatzfunde Dänemarks dar.

Die Artefakte begeistern das Team um Museumsdirektor Mads Ravn aus mehreren Gründen. So haben Nachgrabungen am Fundort ergeben, dass an der Stelle einst ein Langhaus stand. Wie die Forscher vermuten, könnte es sich um den Sitz eines Lokalfürsten gehandelt haben. Unweit von Vindelev befindet sich ein bedeutender Fundplatz der dänischen Frühzeit, der alte Königssitz von Jelling, an dem unter anderem der Dänenkönig Harald Blauzahn Monumente errichten ließ. Ravn und seine Kollegen waren bislang nicht davon ausgegangen, dass im Umfeld dieses Ortes schon zuvor ein einflussreicher Herrscher residiert hatte. Doch darauf lassen Umfang und Qualität des neuen Goldhorts schließen.

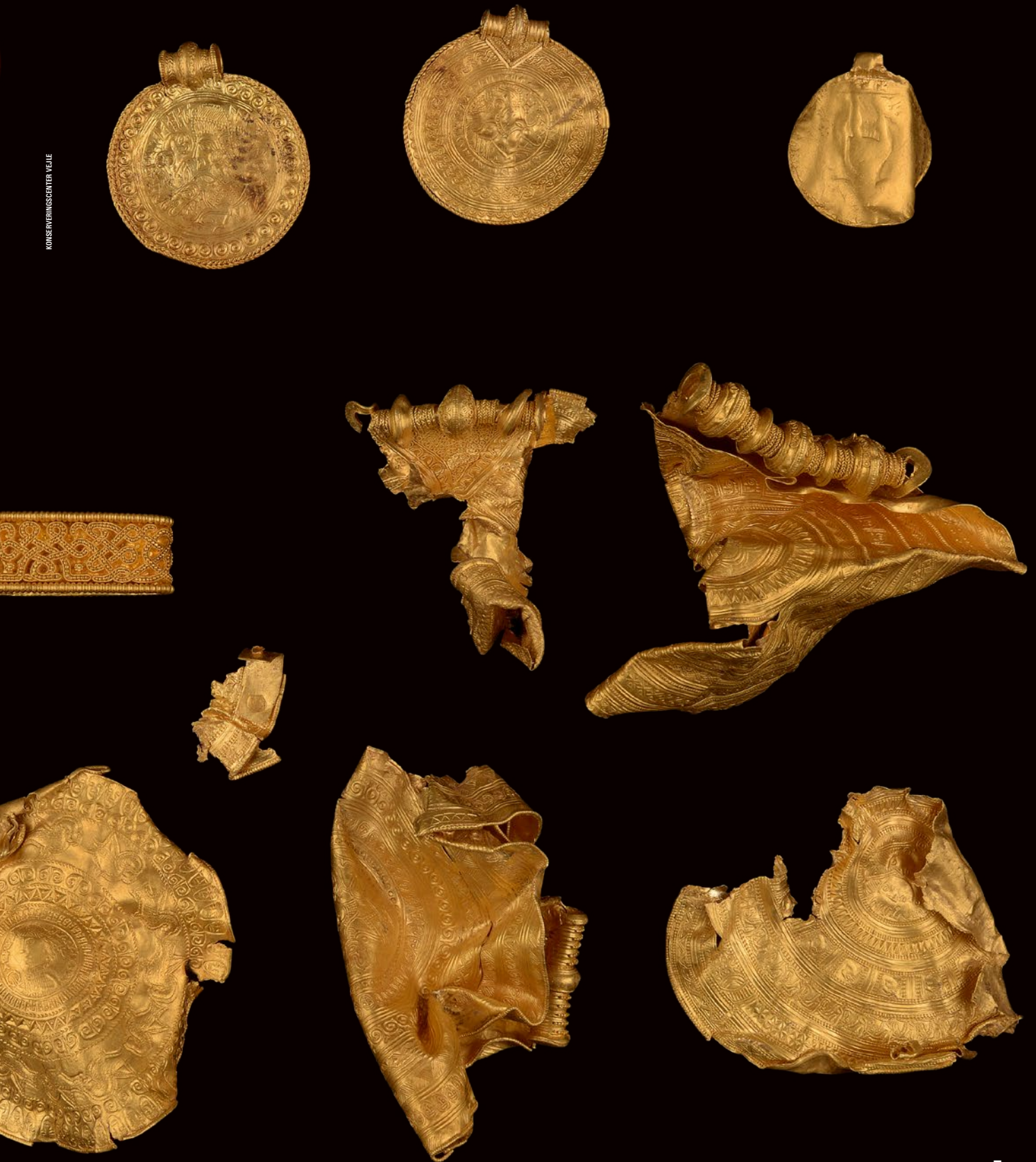
Einige Medaillons sind mit Runen beschriftet und zeigen womöglich Figuren aus der nordischen Mythologie. Auf einem Anhänger ist ein bärtiger Mann von der Seite abgebildet nebst einem Pferd und einem Vogel. Die Runenbeischrift entziffern die Forscherinnen und Forscher als »der Große«. Der Titel könnte einen Herrscher meinen, bezeichnet in der Mythologie aber auch den Götterkönig Odin.

Warum die Goldobjekte vergraben wurden, ist nicht bekannt. Womöglich hing das mit einer weltweiten Klimakatastrophe zusammen, dem Beginn der so genannten Kleinen Eiszeit der Spätantike. Um das Jahr 536 ereigneten sich mindestens zwei gewaltige Vulkanausbrüche in Mittelamerika oder Südostasien. Staubwolken verdunkelten die Atmosphäre, und es kam zu Ernteaussfällen und Hungersnöten. Die Zeiten dürften unsicher geworden sein, womit ein Anreiz entstand, Wertvolles zu schützen.

Pressemitteilung des Museumsverbunds Vejle, 5. September 2021



KONSERVIERUNGSZENTRUM VEJLE



SPEKTROGRAMM

PHYSIK

LASERFUSION FEIERT BEINAHE-DURCHBRUCH

► Die National Ignition Facility (NIF) der USA hat einen wichtigen Erfolg gemeldet bei dem Versuch, mit Kernfusion Energie zu gewinnen. Erstmals setzte die Anlage rund 70 Prozent der Energie frei, die vorher aufgewendet wurde, um den Vorgang zu starten. Bei vorherigen Testläufen hatte der Wert bei gerade einmal 3 Prozent gelegen. Das Ziel der Arbeiten lautet natürlich, am Ende mehr Energie zu gewinnen als vorher investiert zu haben.

In der NIF-Anlage erzeugen hochenergetische und ultrakurze Laserpulse die Hitze und den Druck, die zur Kernverschmelzung notwendig sind. Der Brennstoff, ein Gemisch aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium, befindet sich in einer kugelförmigen Kunststoffkapsel von zwei Milli-

meter Durchmesser, die ihrerseits in einem vergoldeten Metallzylinder sitzt. 192 Laserstrahlen konzentrieren für je 20 milliardstel Sekunden ihr Licht auf das Gold, das verdampft und dabei Röntgenstrahlen aussendet, die wiederum die Kapsel implodieren lassen. Erfolgt die Kontraktion hinreichend symmetrisch, erhitzt sich ihr Zentrum auf bis zu 100 Millionen Kelvin und erreicht eine Dichte weit oberhalb jener von Blei, so dass die Atomkerne des Wasserstoffs zu verschmelzen beginnen.

Der Ansatz entpuppte sich als vertrackter als beim Projektstart im Jahr 2009 erwartet. Die jüngsten Fortschritte verdanken sich einem besseren Verständnis der Abläufe; so gelang es, die Kapselwände von mikroskopischen Unregelmäßigkeiten zu befreien. Der Prozess steht und fällt mit der »Zündung«: Die durch erste Verschmelzungen freigesetzte Energie muss so lange im Zentrum der Implosion bleiben, bis die Fusionsreaktion

selbsttätig weiterbrennt und den Großteil des Materials erfasst. Offenbar ist dies nun erstmals ansatzweise erreicht worden.

Allerdings steckt die Methode noch im Frühstadium der Entwicklung. Die freigesetzte Energie fällt zunächst in Form schneller Neutronen an. Um sie nutzbar zu machen, müssten laut der Fachzeitschrift »Science« mindestens zehn Kapseln pro Sekunde beschossen werden – eine gewaltige Herausforderung. Der Erfolg der Laserfusion erscheint darum ebenso ungewiss wie der anderer Verschmelzungsverfahren, etwa das am europäischen Kernfusionsforschungszentrum ITER erprobte.

Die Kernfusion gilt theoretisch als relativ umweltschonend, da sie deutlich weniger radioaktiven Abfall erzeugt als die herkömmliche Kernspaltung. Außerdem besteht bei ihr keine Gefahr einer unkontrollierbaren, zerstörerischen Kernschmelze.

Science 10.1126/science.abl9769, 2021



FUSIONSSTÄTTE Mitarbeiter inspizieren die Reaktionskammer der US-amerikanischen NIF, in der die Kernverschmelzung gelingen soll.

BIOLOGIE KLAPPERSCHLANGEN TÄUSCHEN MIT AKUSTISCHEM TRICK

► Das Rasseln der Klapperschlange ist eine akustische Drohgebärde: Es bedeutet Näherkommenden, besser Abstand zu halten. Die Schlange unterstreicht das, indem sie umso schneller klappert, je dichter man an sie heranrückt. Als letztes Mittel greift sie sogar zu einem akustischen Trick, wie ein Forscherteam der Ludwig-Maximilians- und der Technischen Universität in München sowie der Universität Graz berichtet.

Die in Amerika heimischen Klapperschlangen (*Crotalus*) rasseln mit Hilfe lose ineinandersteckender Hornringe am Schwanzende, was ein meterweit hörbares Geräusch erzeugt. Dabei lassen die Tiere die Töne umso schneller aufeinander folgen, je näher ihnen ein Eindringling kommt – ähnlich wie der Abstandssensor eines einparkenden Autos. So wächst die Rasselfrequenz der Texas-Klapperschlange (*Crotalus atrox*) in Experimenten stetig von 40 auf 50 Hertz, während ein Versuchsobjekt an sie heranrückt.

Beim Unterschreiten einer gewissen Distanz erfolgt ein plötzlicher Sprung, wie die Forscher herausfanden: Die Schlangen klappern dann unvermittelt mit 60 bis 100 Hertz.

Vermutlich wirkt die überraschende Änderung auf näherkommende Tiere so, als hätte sich der Abstand schlagartig vermindert. Dafür sprechen jedenfalls Experimente, in denen das Team die Schlangen und ihr Geklapper in einer virtuellen Landschaft simulierten, durch die hindurch menschliche Versuchsteilnehmer eine Spielfigur manövierten. Die Probanden sollten jeweils anhand der Rasselgeräusche abschätzen, ob sie den Schlangen auf rund einen Meter

nahegekommen waren. Bei gleichmäßig zunehmender Klapperfrequenz gelang das recht gut. Stieg die Frequenz jedoch sprunghaft, unterschätzten viele Teilnehmer den Abstand deutlich.

Der Mechanismus dürfte in der Natur dafür sorgen, dass Näherkommende einen Schreckmoment erleben und reflexartig auf Distanz gehen. Die Schlangen vermeiden so beispielsweise, dass große Vierbeiner auf sie treten. Zwar können sie sich mit giftigen Bissen wehren, doch es ist besser für sie, eine solche Kraft raubende Eskalation zu vermeiden.

Current Biology 10.1016/j.cub.2021.07.018, 2021

MAHNUNG
Klapperschlangen warnen Herankommende mit einem Rasseln. Es empfiehlt sich, das nicht zu überhören.



TOBIAS KOHL, TU MÜNCHEN

ERDE/UMWELT UNGBREMSTE FCKW-PRODUKTION HÄTTE VERHEERENDE FOLGEN GEHABT

► Was wäre geschehen, wenn die internationale Staatengemeinschaft sich nicht darauf geeinigt hätte, die Produktion Ozon zerstörender Chemikalien – allen voran Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) – einzuschränken? Dies hat ein Forschungsteam jetzt in einer Modellrechnung analysiert. Ergebnis: Das Montreal-Protokoll von 1989 mit seinem faktischen Verbot solcher Substanzen hat die Welt vor einer dramatischen Erwärmung bewahrt. Ohne es wäre die globale Durchschnittstemperatur bis zum Ende dieses Jahrhunderts um zusätzliche 2,5 Grad weiter gestiegen, als infolge des aktuell stattfindenden Klimawandels zu erwarten ist.

FCKW haben eine doppelte Klimawirkung: Sie sind zum einen hochpotente Treibhausgase, die noch stärker wirken als Kohlenstoffdioxid oder Methan. Dies allein hätte die globale Durchschnittstemperatur um rund 1,7 Grad angehoben, zeigen die Simulationen. Zum anderen wären ohne das Montrealer Abkommen nur noch Reste der Ozonschicht geblieben. Die daraus folgende enorme UV-Belastung am Boden hätte das Pflanzenwachstum beeinträchtigt und damit die Fähigkeit der Vegetation, Kohlenstoff zu binden. Das hätte für eine weitere weltweite Erwärmung von rund 0,8 Grad gesorgt. Zusammengekommen wäre das ein Plus von 2,5 Grad, verglichen mit dem vorin-

dustriellen Mittelwert, das zum ohnehin stattfindenden Temperaturanstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts noch hinzukäme. Das läge weit jenseits der 1,5-Grad-Marke, bis zu der die klimatischen Veränderungen noch als beherrschbar gelten.

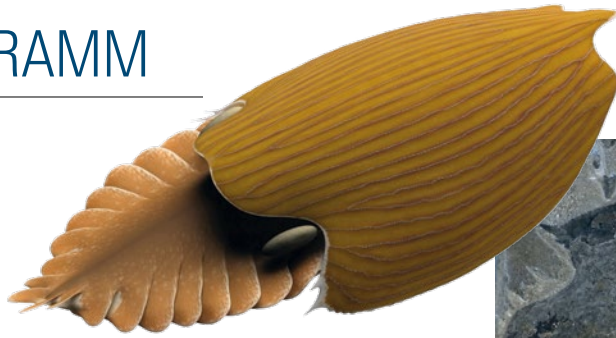
Wie die Autorinnen und Autoren betonen, zeigt die Analyse, dass die Bedeutung des Montreal-Protokolls erheblich über den Schutz der Ozonschicht hinausgeht. Wären dem FCKW-Ausstoß keine verbindlichen Grenzen gesetzt worden, hätte das verheerende Konsequenzen für die Biosphäre und das Erdklima gehabt.

Nature 10.1038/s41586-021-03737-3, 2021

PALÄOBIOLOGIE GEPANZERTER URZEIT-GIGANT

▶ Mit einem halben Meter Länge gehörte *Titanokorys gainesi* zu den größten Meeresbewohnern seiner Zeit, des mittleren Kambriums vor mehr als 500 Millionen Jahren. Paläontologen haben zwölf Fossilien der bislang unbekanntenen Art im Burgess-Schiefer entdeckt, einer Fossilagerstätte in den kanadischen Rocky Mountains. Wie Jean-Bernard Caron und Joe Moysiuk vom Royal Ontario Museum in Toronto berichten, handelte es sich bei den Urzeiträubern um primitive Gliederfüßer aus der ausgestorbenen Gruppe der Radiodonta. Markant an *T. gainesi* sei nicht nur seine Größe von rund 50 Zentimetern, sondern auch sein mächtiger zentraler Körperschild (Carapax).

Radiodonta zeichneten sich durch eine rundliche Mundöffnung aus, die ringsherum mit Zähnen besetzt war. Mit Fangarmen schnappten sie ihre



LARS FELIUS / ROYAL ONTARIO MUSEUM

GUT GERÜSTET Das kambrische Raubtier *Titanokorys gainesi* besaß einen großen Körperschild. Anhand der Fossilien (rechts) haben Forscher sein Aussehen rekonstruiert (oben).



JEAN-BERNARD CARON / ROYAL ONTARIO MUSEUM

Beute und schoben sie sich in den Schlund. Die Tiere besaßen Facettenaugen ähnlich heutigen Gliederfüßern wie Insekten, Krebstieren und Spinnen. Bei *T. gainesi* steche vor allem der Carapax prominent hervor, der das Tier zu zirka drei Vierteln bedeckte, wie die Forscher schreiben. Vermutlich habe der Räuber am Meeresboden gelebt. Mit seinem Panzer könnte er durchs Sediment gepflügt, Beute aufgescheucht und ergriffen haben.

Gemessen an heutigen Verhältnissen erscheint *T. gainesi* recht klein, doch in der kambrischen Welt war er ein Gigant. Zu den wenigen, die ihn überragten, zählten Wirbellose der Gattung *Anomalocaris*, die 60 bis 120 Zentimeter Länge erreichten und damit die größten Tiere waren, die man aus jener Zeit kennt. Auch sie lebten räuberisch.

Royal Society Open Science 10.1098/rsos.210664, 2021

MATERIALFORSCHUNG METALL MACHT AMEISENKIEFER SCHARF

▶ Ameisen müssen 60 Prozent weniger Kraft aufwenden, um Dinge durchzubeißen, als Tiere mit normalen Zähnen. Daher schneiden sie mühelos Blätter oder brechen gar die Panzer anderer Insekten auf, obwohl ihre Kiefer oft feiner als ein Menschenhaar sind. Ihr Trick ist eine Schneidkante, die dank eingelagerter Metallatome viel schärfer sein kann als klassische Biokomposite, berichtet eine Arbeitsgruppe um Robert M. Schofield von der University of Oregon. Anders als etwa beim Zahnschmelz besteht sie nicht aus Kristallen, die in einer Grundmasse aus Proteinen lagern, sondern aus einem homogenen Material, dessen Proteine über Metallatome wie Zink oder Mangan vernetzt sind. Das macht sie vergleichbar hart wie klassische Biokomposite in Zähnen oder Krebscheren, aber bruchfester.

Das Team um Schofield untersucht seit geraumer Zeit solche mit schweren Elementen angereicherten Biomaterialien – eine Substanzklasse, die nicht nur bei Ameisen, sondern auch Skorpionen, Spinnen und einigen Meerestieren verbreitet ist. Lange schien rätselhaft, welchen Aufbau diese Kompositmaterialien besitzen. Den Messungen zufolge sind ihre Metallatome nicht untereinander verbunden, sondern selbst auf kleinsten Skalen homogen verteilt.

Die Metallatome fungieren als »Querstreben«, die Proteine in sich sowie untereinander vernetzen und das Material härter machen. In bisher bekannten Komposit-Biomaterialien hingegen liegen harte Stoffe neben weichen, und beide nehmen Lasten sehr unterschiedlich auf. Beispielsweise brechen Zähne oft an der Gren-

ze zwischen hartem Mineral und flexiblem Protein, vor allem bei feinen Strukturen.

Die homogener aufgebaute, mittels Zink vernetzte Schneide eines Ameisenkiefers kann hingegen viel dünner sein – und somit viel schärfer. Bei der Blattschneiderameise *Atta cephalotes* ist sie lediglich 50 Nanometer dick. Zudem bildet das Metall mit den Proteinen koordinative Bindungen, die sich lösen und neu knüpfen lassen. Das macht die metallhaltigen Biomaterialien extrem abriebfest, wie mechanische Tests belegen. Entstehen Risse in dem Material, heilt es sich bis zu einem gewissen Grad selbst, weil die Metallatome aufgebrochene Bindungen wieder neu herstellen.

Nature 10.1038/s41598-021-91795-y, 2021

MEDIZIN

REAKTIVIERTE VIREN VERURSACHEN NEUEN EBOLA-AUSBRUCH

► Genetische Analysen von Ebolaviren deuten darauf hin, dass der jüngste Ausbruch der Krankheit in Guinea auf reaktivierte Viren zurückgeht, die Genesene zuvor jahrelang in sich getragen hatten. Wie eine Arbeitsgruppe um den Virologen Alpha Kabinet Keita von der Université de Conakry in Guinea berichtet, unterscheidet sich die Erregervariante von 2021 genetisch kaum von jener, die zwischen 2013 und 2016 in Westafrika kursierte.

Damals infizierten sich mindestens 30 000 Menschen mit dem hochgefährlichen Virus, mehr als 11 000 von ihnen starben. Anscheinend trug eine überlebende Person seither den Keim in sich. Aus noch unbekanntem Grund begann der Erreger sich Anfang 2021 wieder zu vermehren und sprang auf andere Menschen über. Dies verursachte einen Ausbruch in der

Region Nzérékoré im Südosten Guineas. Von Januar bis Februar infizierten sich mehr als 20 Personen, 12 von ihnen erlagen dem Virus, bevor die Behörden die Epidemie erstickten. Dies lässt vermuten, dass Ebola-Ausbrüche seltener auf Tier-Mensch-Übertragungen zurückgehen als bisher angenommen.

Keitas Team sequenzierte virales Erbgut von zwölf Patientinnen und Patienten und verglich es mit DNA-Sequenzen der vorherigen Epidemie. Dabei zeigte sich, dass die Varianten eng verwandt waren. Zudem trugen die Erreger von 2021 nur etwa ein Fünftel der Zahl an Punktmutationen, die zu erwarten wäre, wenn das Virus in den zurückliegenden sechs Jahren permanent von Mensch zu Mensch gesprungen wäre. Sie besaßen aber eine Mutation namens A82V, die sie deutlich ansteckender machte.

All das sei nur dadurch zu erklären, dass das Virus in einem Genesenen überdauerte und schließlich wieder aktiv geworden sei, so die Wissenschaftler. Wie das funktioniert, ist allerdings völlig rätselhaft. Der Erreger des Ebolafiebers ist ein RNA-Virus, dem die molekulare Maschinerie fehlt, sich in DNA zu übersetzen – was für einen Einbau ins zelluläre Erbgut nötig wäre. Ohne diesen erscheint es nicht plausibel, dass der Erreger jahrelang im Körper verbleibt. Keita und sein Team vermuten: Der Keim vermehrt sich im Organismus weiterhin, nur sehr langsam. Eine Rolle dabei könnten so genannte immunprivilegierte Gewebe spielen, in denen Entzündungsreaktionen unterdrückt werden, etwa die Augen oder das Gehirn.

Nature 10.1038/s41586-021-03901-9, 2021

ASTRONOMIE

KOSMISCHE KOLLISION LÖST SUPERNOVA AUS

► Erstmals gibt es konkrete Anzeichen dafür, dass ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch mit einem Begleitstern verschmolzen ist und dadurch eine Supernova ausgelöst hat. Bislang hatten Astronominnen und Astronomen ein solches Ereignis nur theoretisch modellieren können. Dank des Projekts Very Large Array

Sky Survey (VLASS) konnten sie es jetzt beobachten.

VLASS kartiert mit Hilfe zahlreicher Radioteleskope rund 80 Prozent des Himmels. Es wird voraussichtlich rund zehn Millionen kosmische Radioquellen erfassen. In seinem Wellenlängenbereich kann es Objekte beobachten, die von uns aus gesehen hinter interstellaren Staubwolken liegen und deshalb im sichtbaren Licht verborgen bleiben.

Ein Team um Dillon Dong vom California Institute of Technology in Pasadena hat anhand von VLASS-Daten eine Zwerggalaxie untersucht, die etwa 480 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Dort existiert nachweislich seit 2017 eine starke Radioquelle, die bei früheren Beobachtungen nicht aufgefallen war. An derselben Stelle hatte sich 2014 ein Gammastrahlenausbruch ereignet, den ein Messgerät der Raumstation ISS aufzeichnete.

Dong und sein Team haben die Daten beider Ereignisse ausgewertet und schließen daraus, dass in der fraglichen Region ein Doppelsternsystem

untergegangen ist. Beide beteiligten Sterne waren wohl deutlich massereicher als unsere Sonne und umrundeten sich auf einer engen Umlaufbahn. Der schwerere Partner brauchte seinen Brennstoff schneller auf, explodierte als Supernova und endete als Schwarzes Loch oder als Neutronenstern. Anschließend kreiselten die Partner immer dichter umeinander und begannen vor zirka 300 Jahren zu verschmelzen. Dabei bildete sich ein Ring aus Gas um sie herum.

Die fortschreitende Verschmelzung störte zunehmend die Kernfusion des noch intakten Sterns. Infolgedessen ließ der Strahlungsdruck in seinem Innern nach und er kollabierte seinerseits in einer Supernova. Sie verursachte den Gammastrahlenausbruch von 2014. Die später nachgewiesene Radiostrahlung entstand, als die Stoßwelle der Explosion den umgebenden Gasring traf, wie aus den spektralen Eigenschaften der dort freigesetzten elektromagnetischen Strahlung hervorgeht.

Science 10.1126/science.abg6037, 2021

STERNTOD Die Stoßwelle der Supernova trifft den Gasring (Illustration).



QUANTENFELDTHEORIE DAS FUNDAMENT DER PHYSIK

Von den Kernkräften und dem Elektromagnetismus bis zu Quarks und Elektronen: Bis auf die Gravitation lassen sich alle Grundkräfte und Elementarteilchen mit dem Standardmodell erklären, einer Quantenfeldtheorie. Doch aus mathematischer Sicht ist dieser theoretische Unterbau der physikalischen Beschreibung unserer Welt noch zu wenig verstanden.



Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia, South Carolina.

► spektrum.de/artikel/1924921

AUF EINEN BLICK GESUCHT: EIN VOLLSTÄNDIGES MATHEMATISCHES MODELL

- 1** In den letzten Jahrzehnten haben sich Quantenfeldtheorien (QFT) durchgesetzt, um grundlegende physikalische Phänomene unseres Universums zu erklären.
- 2** Allerdings erweisen sich die Ansätze als so komplex, dass sie sich nicht ohne Vereinfachungen, die in der Realität nicht immer gegeben sind, beschreiben lassen.
- 3** Aus mathematischer Sicht ist unklar, was eine QFT ausmacht. Indem man solche Fragen klärt, könnte man vielleicht die hartnäckigsten Rätsel der Physik lösen.

KOMPLIZIERTE BERECHNUNG
Möchte man die Gleichungen von Quantenfeldtheorien lösen, tauchen zahlreiche Unendlichkeiten auf, die es zu eliminieren gilt.

SERIE

Quantenfeldtheorien

Teil 1: November 2021

Das Fundament der Physik

Kevin Hartnett

Teil 2: Dezember 2021

Stachelige Oberflächen für die Schwerkraft

Charlie Wood

Teil 3: Januar 2021

Die Grundkräfte der Welt

Manon Bischoff

Im Lauf des 20. Jahrhunderts hat sich das Standardmodell als die erfolgreichste physikalische Theorie erwiesen, die je erfunden wurde. »Es kann so gut wie jedes Experiment erklären, das wir bisher gemacht haben«, sagt der Teilchenphysiker David Tong von der Universität Cambridge. Es beschreibt alle bekannten Elementarteilchen sowie die zwischen ihnen wirkenden Kräfte und hat sogar Phänomene wie das Higgs-Boson vorhergesagt, das man erst Jahrzehnte später in riesigen Teilchenbeschleunigern nachweisen konnte.

Dennoch hat das Modell ein großes Manko: Die Schwerkraft passt nicht in das Bild. Seit mehr als 50 Jahren ist es Physikerinnen und Physikern nicht gelungen, sie in den quantenphysikalischen Rahmen einzupflegen. Damit bleiben Ereignisse wie der Urknall oder das Innere von Schwarzen Löchern der Forschung verschlossen. Einige fragen sich inzwischen, ob es überhaupt möglich ist, die Gravitation mit der Quantenphysik zu vereinigen – vielleicht sind völlig neue Ansätze nötig.

Der naheliegendste Gedanke besteht jedoch darin, das bisherige theoretische Konstrukt zu erweitern, schließlich hat es sich als überaus erfolgreich erwiesen. Dafür ist es hilfreich, mehr über den mathematischen Unterbau des Standardmodells herauszufinden: Es basiert auf einer so genannten Quantenfeldtheorie (QFT). Davon existieren zahlreiche verschiedene Versionen, mit dem Standardmodell als prominentestem Vertreter. Aber es könnte Kandidaten

geben, die sich besser eignen, alle vier Grundkräfte unseres Universums in einem einzigen Formalismus zu vereinigen.

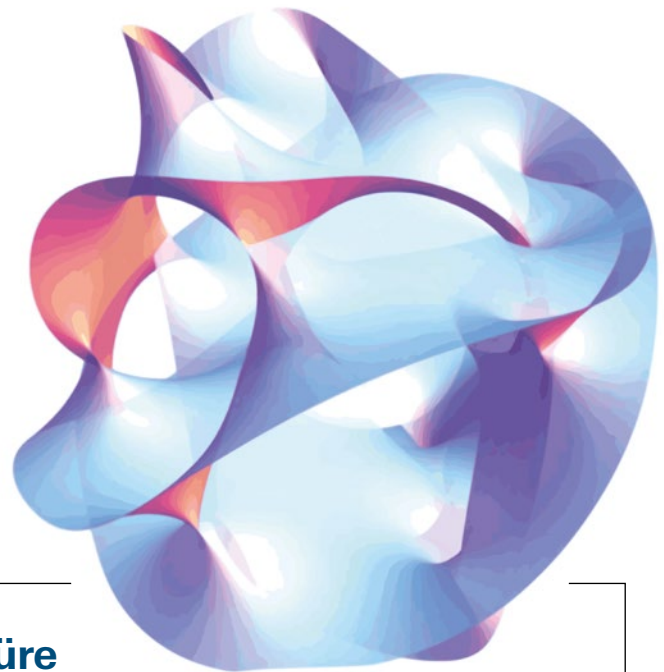
Obwohl Fachleute schon seit Jahrzehnten mit Quantenfeldtheorien arbeiten und sie inzwischen ein regulärer Bestandteil des Physikstudiums sind, ist unklar, was eine derartige Theorie im Detail auszeichnet. Welche Eigenschaften muss sie erfüllen? Zwar hat man mehrere konkrete Beispiele konstruiert und konnte mit einigen davon beeindruckende physikalische und mathematische Erkenntnisse gewinnen, doch der allgemeine Rahmen blieb bisher verborgen. »Es ist wie ein riesiges Geschöpf, das man von vielen Stellen aus beobachten kann, ohne es jemals vollständig zu erblicken«, so der Stringtheoretiker Nathan Seiberg vom Institute for Advanced Study in Princeton.

Die meisten Menschen stellen sich vor, unsere Welt bestehe auf fundamentaler Ebene aus Elementarteilchen und ihren Kräften: Elektronen, Quarks, Photonen und dergleichen. Tatsächlich entspricht das einem veralteten Bild, von dem sich die moderne Physik in den letzten Jahrzehnten längst entfernt hat. Die Grundbausteine der erfolgreichsten Theorien sind heute nicht mehr Teilchen, Wellen oder Kräfte, sondern so genannte Quantenfelder, die wie eine Art Gewebe unsere gesamte Raumzeit durchziehen.

Diese tauchen in vielen verschiedenen Varianten auf und kräuseln sich wie eine wogende Meeresoberfläche. Durch die Schwankungen entspringen ihnen Teilchen, die gleich darauf wieder in den Feldern verschwinden. »Partikel sind keine Objekte, die für immer da sind«, erklärt Tong. »Man kann sie eher als kurzzeitige Äußerung der Felder veranschaulichen.«

Um das besser zu verstehen, hilft folgendes Beispiel aus der klassischen Physik: Stellen Sie sich vor, Sie bestimmen die Temperatur an jedem Punkt der Erdoberfläche. Die Menge der unendlich vielen Positionen mit den entsprechenden Temperaturwerten bildet ein geometrisches Objekt, ein Feld, das alle Informationen zusammenfasst. Im Allgemeinen spricht man von einem Feld, wenn es eine Größe gibt, die sich eindeutig mit beliebig feiner Auflösung im Raum messen lässt.

Möchte man hingegen quantenphysikalische Größen, etwa die Energie eines Elektrons, zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer Stelle beschreiben, braucht man Quantenfelder. Sie unterscheiden sich grundlegend von den klassischen Varianten: Während die Temperatur ihren tatsächlichen Wert wiedergibt (unabhängig davon, ob man sie misst), haben Elektronen bis zu ihrer Beobachtung keine eindeutige Position im Raum. Davor lässt sich ihr Aufenthaltsort nur probabilistisch beschreiben: Man ordnet jedem Punkt Werte zu, die die Wahrscheinlichkeit wiedergeben, ein Teilchen an diesem Ort zu finden. Vor der Messung existiert ein Elektron überall und nirgendwo. »Die meisten physikalischen Objekte sind keine handfesten Partikel oder Ähnliches, sondern Dinge, die in jedem Punkt der Raumzeit leben«, erklärt der theoretische Physiker Robbert Dijkgraaf, Direktor des Institute for Advanced Study in Princeton.



JOURNAL UND PHOTOGRAPHIA COMMUNIS WIKIMEDIA ORGANIKU
FLECALAB_YAU_FORNATEDSVCJ / PUBLIC DOMAIN

Quantenfeldtheoretische Schnüre

In den 1960er Jahren standen Physiker vor der schwierigen Aufgabe, die starke Kernkraft zu beschreiben. Nachdem sie mit ihren ersten Ansätzen gescheitert waren, schlugen einige vor, sich auf eindimensionale Objekte zu fokussieren anstatt auf Punktteilchen. Das war die Geburtsstunde der Stringtheorie, die beschreibt, wie sich winzige, schwingende Schnüre durch die Raumzeit bewegen.

Allerdings stellte sich schnell heraus, dass das Modell für die starke Kernkraft ungeeignet war: Einerseits, weil kurz darauf die so genannte Quantenchromodynamik entwickelt wurde, welche die physikalischen Phänomene innerhalb der Atomkerne sehr gut erklärte. Andererseits folgte aus den Schwingungen der Schnüre, dass es ein Elementarteilchen geben müsste, das in der Kernkraft keinen Platz findet.

Doch wie sich zeigte, besitzt das seltsame Partikel genau die Eigenschaften, die ein Graviton auszeichnen würde – das hypothetische Teilchen, das für die Schwerkraft verantwortlich ist. Das machte die Stringtheorie zu einem Anwärter für eine Quantengravitationstheorie.

Anders als beim Standardmodell sind die grundlegenden Gleichun-

gen der Stringtheorie unbekannt. Tatsächlich orientiert man sich beim Aufbau der Theorie direkt am störungstheoretischen Ansatz: Man übersetzt die Feynman-Diagramme der Quantenfeldtheorien, die schematisch die physikalischen Prozesse zwischen den Elementarteilchen darstellen, in entsprechende Grafiken für eindimensionale Schnüre. Sie ergeben jedoch nur dann einen Sinn, wenn die Wechselwirkungen der Strings klein sind – sobald sie stark interagieren, bricht dieser Ansatz zusammen.

Im Gegensatz zur gewöhnlichen QFT ist die bisherige Formulierung der Stringtheorie mathematisch fundiert. Neben einer nicht störungstheoretischen Beschreibung wirft sie aber viele Fragen auf: Zum Beispiel existieren fünf verschiedene Stringtheorie-Versionen – und Physiker vermuten, dass es eine sechste, übergeordnete Theorie gibt, aus der sich die anderen ergeben. Wie diese allerdings aussieht, ist völlig unklar.

Eine weitere Schwierigkeit entsteht, wenn man untersucht, welche Eigenschaften die Modelle für ein Universum vorhersagen: Sie liefern unzählige Lösungen, zu denen vielleicht auch unsere bekannte Welt gehört. Grund dafür

sind die zusätzlichen Dimensionen, unter denen die Stringtheorie nur funktioniert. Die Raumzeit bräuchte demnach sechs weitere Raumdimensionen.

Um das mit unserem Universum in Einklang zu bringen, nehmen Fachleute an, sie seien an jedem Punkt im Raum winzig aufgerollt, in Form einer so genannten Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit. Von diesen Objekten gibt es aber mindestens 10^{500} – was über 10^{500} verschiedene Modelle unserer Welt liefert. Einige Physikerinnen und Physiker führen dieses unbefriedigende Ergebnis darauf zurück, dass man die Stringtheorie nur störungstheoretisch betrachtet. Eine vollständige Theorie könnte das Problem aus dem Weg räumen, hoffen sie.

Eine der Hauptschwierigkeiten ist, dass eine quantenphysikalische Beschreibung der Schwerkraft die zu Grunde liegende Geometrie der Theorie beeinflusst. Denn die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt Gravitation als eine Krümmung der Raumzeit. Daher muss eine entsprechende Formulierung mit vielen verschiedenen überlagerten Zuständen von gekrümmten Räumen umgehen, was Wissenschaftler vor eine enorme Herausforderung stellt.

Das macht Quantenfeldtheorien zu komplizierten Objekten, die sich nur schwer untersuchen lassen, weshalb ihre Geschichte von Höhen und Tiefen geprägt ist. Sie nahm bereits in den 1920er Jahren mit der Quantenelektrodynamik ihren Anfang, wurde aber von vielen Rückschlägen heimgesucht: Auftretende Schwierigkeiten führten immer wieder dazu, dass Physiker sich von der Theorie abwandten – und sich ihr schließlich erneut zuwandten, wenn es einen Durchbruch gab. Spätestens in den 1980er Jahren erregte der Formalismus auch das Interesse von Mathematikerinnen und Mathematikern, als man über eine seltsame Übereinstimmung unterschiedlicher geometrischer Räume stolperte.

Doch erst in den letzten Jahren haben sie begonnen, einige der grundlegenden Strukturen von Quantenfeldtheorien zu verstehen: Sie konnten Konzepte aus der Welt der Teilchenphysik in eigenständige, abstrakte Objekte verwandeln. Aber die Bemühungen stehen noch am Anfang. »Ich gehe davon aus, dass wir erst die Spitze des Eisbergs sehen«, erklärt der Physiker Greg Moore von der Rutgers University in New Jersey.

Eine wechselseitige Beziehung

Mathematik erfordert Präzision bis ins letzte Detail. Damit scheint sie geeignet, um das theoretische Grundgerüst zu vervollständigen. »Wenn es tatsächlich gelingen würde, Quantenfeldtheorien auf stringente Weise zu verstehen, bekämen wir Antworten auf viele offene Fragen der Physik – vielleicht sogar auf die Vereinheitlichung der Teilchenphysik mit der Schwerkraft«, so Dijkgraaf.

Von der Forschung könnten auch Mathematikerinnen und Mathematiker profitieren: Schon seit Jahrtausenden erweist sich die physikalische Welt als die größte Muse der abstrakten Wissenschaft. Als beispielsweise die alten Griechen die Bewegungen von Sternen studierten, erfanden sie hierfür die Trigonometrie. Daraus wurde schließlich ein eigenes Feld mit Definitionen und Regeln, das Studierende heute ohne jeden Bezug zu den himmlischen Ursprüngen lernen. Fast 2000 Jahre später untersuchte Isaac Newton die Gesetzmäßigkeiten der Planetenbewegungen, die Kepler notiert hatte, und entwickelte daraus den korrekten Umgang mit winzigen Veränderungen. Zusammen mit den Arbeiten von Gottfried Leibniz brachten diese Bemühungen die so genannte Infinitesimalrechnung hervor, die heute aus so gut wie keinem naturwissenschaftlichen Bereich mehr wegzudenken ist und unter anderem zur modernen Analysis führte. »Die Physik liefert oft einen besseren Weg, über mathematische Dinge nachzudenken, an denen wir bereits interessiert sind«, so der Geometer David Ben-Zvi von der University of Texas in Austin.

Ähnliches möchte man mit Quantenfeldtheorien erreichen. Dafür müssen die zu Grunde liegenden physikalischen Ideen, Objekte und Techniken – die ursprünglich dazu dienten, Teilchen und ihre Wechselwirkungen zu beschreiben – in einen mathematischen Kontext eingebettet werden, damit daraus ein eigenständiger Bereich entsteht. Fachleute bemühen sich daher, die Eigenschaften der Theorien abstrakt zu definieren und genau abzustecken, so dass man nicht mehr zwangsläufig über den physikalischen Hintergrund nachdenken muss, aus dem sie entstanden.

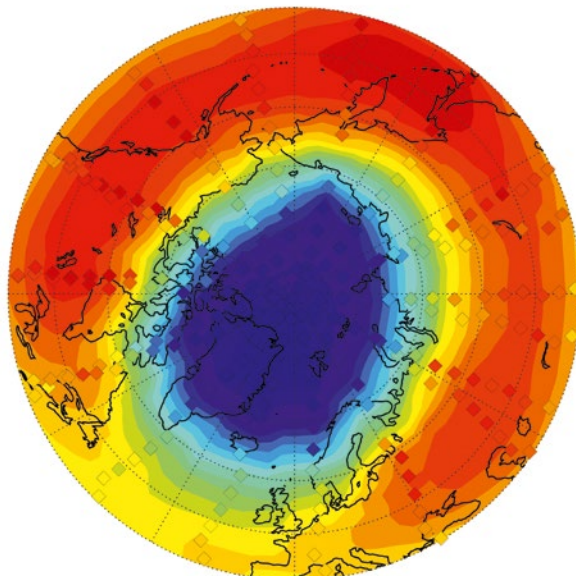
Sollte das gelingen, wird man höchstwahrscheinlich belohnt. Denn die Geschichte hat gezeigt, dass, sobald neue Objekte in der Mathematik auftauchen, diese meist mit anderen Strukturen zusammenhängen (etwa Zahlen, Gleichungen oder geometrischen Formen) und dadurch zu unerwarteten Erkenntnissen führen.

Quantenfeldtheorien gibt es in vielen verschiedenen Varianten und können unterschiedlichste physikalische Systeme beschreiben. In zwei Dimensionen erweisen sie sich beispielsweise als nützlich, um den Übergang gewisser Materialien von einer isolierenden Phase in eine Supraflüssigkeit zu untersuchen. Sechsdimensionale Modelle sind hingegen für Stringtheorien relevant, die möglicherweise eine Theorie der Quantengravitation ergeben könnten (siehe »Quantenfeldtheoretische Schnüre«).

Möchte man mehr über unser Universum erfahren, benötigt man eine vierdimensionale QFT wie das Standardmodell. Dieses enthält zwölf verschiedene Teilchenfelder für die bekannten Materieteilchen wie Quarks, Elektronen oder Neutrinos; dazu vier Kraftfelder, die drei Grundkräfte erzeugen (Elektromagnetismus, starke und schwache Kernkraft, wobei sich Letztere aus zwei Feldern zusammensetzt), sowie ein Higgs-Feld. Dieses verursacht einen Mechanismus, der den Teilchen ihre Masse verleiht. Das Standardmodell kombiniert die 17 Komponenten in einer einzigen Gleichung, die ihre Wechselwirkungen beschreibt. Unsere bekannte Welt geht demnach aus den immerwährenden Fluktuationen und Interaktionen der Felder hervor, welche die Elementarteilchen und ihr komplexes Zusammenspiel erzeugen.

Bereits in den 1920er Jahren erkannten Wissenschaftler, dass eine Theorie, die auf Feldern statt auf Teilchen basiert, einige wichtige Ungereimtheiten aus dem Weg räumt: Angefangen mit Fragen der Kausalität (Wie kann ein weit

TEMPERATURFELD Die europäische Weltraumbehörde (ESA) nimmt regelmäßig die Temperaturen an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche auf, wie hier über der Arktis. Die Daten bilden ein kugelförmiges, klassisches Feld.



KANISCHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE MIT UNIKLINIKUM ANTIKES
MULTIMEDIA IMAGES 2011/ARCTIC_TEMPERATURE_FIELD

entferntes Elektron ein anderes über große Distanzen hinweg augenblicklich beeinflussen?) bis hin zu der unerwarteten Tatsache, dass Partikel nicht ewig existieren. Es erklärt auch eine Beobachtung, die wie ein extrem unwahrscheinlicher Zufall erscheint: »Alle Teilchen des gleichen Typs sind überall im Universum identisch«, betont Tong. »Wenn man am Large Hadron Collider in Genf ein Proton durch eine Kollision erzeugt, lässt es sich nicht von einem Exemplar unterscheiden, das schon 10 Milliarden Jahre aus den Tiefen des Universums unterwegs ist. Das verdient eine Erklärung.« Die QFT liefert sie: Alle Protonen sind Fluktuationen derselben zu Grunde liegenden Felder der Quarks, aus denen sie bestehen.

Ein Meer voller Unendlichkeiten

All diese Vorzüge haben jedoch einen Preis. »Quantenfeldtheorien gehören zu den schwierigsten Objekten in der Mathematik«, erklärt Tong. Aber was macht sie so kompliziert? Schließlich arbeiten Physikerinnen und Physiker schon seit Jahrzehnten damit. Die Antwort lässt sich in einem Wort zusammenfassen: Unendlichkeiten.

Wenn man ein Quantenfeld an einem bestimmten Punkt auswertet, ist das Ergebnis kein einfacher Zahlenwert, wie es bei der Temperatur oder einem elektrischen Feld der Fall ist. Stattdessen erhält man eine Matrix, also eine Tabelle, die mit Zahlen gefüllt ist. Meist handelt es sich sogar um einen Operator, eine Matrix mit unendlich vielen Zeilen und Spalten. Das spiegelt all die möglichen quantenphysikalischen Zustände wider. »Ein Teilchen kann sich an allen Positionen befinden, deshalb muss die Matrix, welche die Ortsmessung beschreibt, unendlich-dimensional sein«, erklärt die mathematische Physikerin Kasia Rejzner von der University of York in Großbritannien. Auch wenn die Unendlichkeiten nachvollziehbar sind, erschweren sie doch eine theoretische Formulierung.

Die Probleme werden noch schwerwiegender, sobald die Quantenfelder miteinander wechselwirken. Aber genau solche Betrachtungen sind bei der Untersuchung physikalischer Phänomene entscheidend, etwa um zu beschreiben, was bei Teilchenkollisionen am Large Hadron Collider in Genf passiert. Für verlässliche Vorhersagen braucht es Computersimulationen, die auf einem theoretischen Grundgerüst basieren. In der klassischen Mechanik ist die Berechnung von Zusammenstößen einfach: Um beispielsweise die Kollision zweier Billardkugeln zu simulieren, benötigt man bloß die jeweiligen Impulse und fügt sie in eine simple Formel ein.

Wenn hingegen zwei Quantenfelder wechselwirken, erfordert das subtilere Methoden: Man multipliziert den unendlich-dimensionalen Operator des einen Felds mit dem unendlich-dimensionalen Operator des anderen und wertet das Produkt an jenem Punkt in der Raumzeit aus, an dem sie sich treffen. »Genau da laufen die Dinge furchtbar schief«, so Rejzner. Es entstehen zahlreiche Terme, die unendliche Werte annehmen.

Das stellt die physikalische Bedeutung eines Modells in Frage. Unendlichkeiten existieren zwar als abstraktes theoretisches Konzept – aber sie tauchen in Experimenten niemals auf. »Uns behagt es nicht, einen Formalismus zu

haben, der explizite Unendlichkeiten enthält. Man braucht ein besseres mathematisches Verständnis dessen, was vor sich geht«, sagt die Quantengravitationstheoretikerin Alejandra Castro von der Universität Amsterdam.

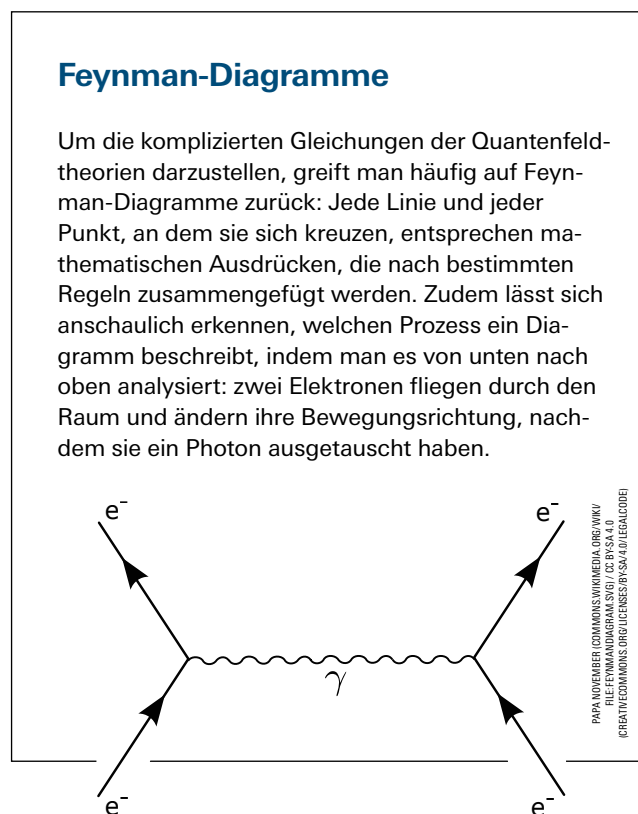
Zwar kann man mit Unendlichkeiten nicht explizit rechnen, aber Fachleute haben inzwischen verschiedene Möglichkeiten entwickelt, um zumindest einigen der komplizierten Gleichungen dennoch ein paar Geheimnisse zu entlocken. Anstatt die Formeln exakt zu lösen, nähern sie sich den Größen, welche die Probleme verursachen, auf kontrollierte Weise an. Durch diese Näherungen können Forscherteams Vorhersagen treffen, die gut genug sind, um sie mit experimentellen Messungen zu vergleichen, die ebenfalls nur eine begrenzte Genauigkeit aufweisen. »Wir können in Laborversuchen einige Phänomene bis auf 13 Nachkommastellen bestimmen – und sie passen bis in dieses Detail zu den theoretischen Ergebnissen. Für mich ist das eines der erstaunlichsten Resultate in den gesamten Naturwissenschaften«, so Tong.

Betrachtet man eine freie Theorie (ohne Wechselwirkungen), muss man sich keine Gedanken über die Multiplikation unendlich-dimensionaler Matrizen machen, da nichts kollidieren kann. Eine solche Situation lässt sich in allen mathematischen Details formulieren – auch wenn sie nicht viel wert ist. »Es ist total langweilig, weil es nur ein einsames Feld gibt, mit dem nichts wechselwirkt«, so Rejzner.

Von dem Punkt aus kann man es interessanter gestalten. Dazu versieht man die Gleichungen, die die Wechselwirkungen beschreiben, mit einem Faktor, der mit dem Wert null startet (freie Theorie) und dreht diesen dann allmählich hoch. Da die Wechselwirkungsterme so klein sind, kann man bekannte Näherungsverfahren anwenden, um sie in einer vereinfachten Form erscheinen zu lassen. Dieser Ansatz wird

Feynman-Diagramme

Um die komplizierten Gleichungen der Quantenfeldtheorien darzustellen, greift man häufig auf Feynman-Diagramme zurück: Jede Linie und jeder Punkt, an dem sie sich kreuzen, entsprechen mathematischen Ausdrücken, die nach bestimmten Regeln zusammengefügt werden. Zudem lässt sich anschaulich erkennen, welchen Prozess ein Diagramm beschreibt, indem man es von unten nach oben analysiert: zwei Elektronen fliegen durch den Raum und ändern ihre Bewegungsrichtung, nachdem sie ein Photon ausgetauscht haben.



als Störungstheorie bezeichnet. Damit ist gemeint, dass man kleine Änderungen in einem freien Feld zulässt und deren Auswirkungen auf das System untersucht.

Ein wichtiger Vorteil des Ansatzes ist, dass er sich grafisch darstellen lässt. In den 1950er Jahren entwickelte der Physiker Richard Feynman ein Verfahren, um die störungstheoretischen Terme einer QFT extrem schnell zu ermitteln: dank so genannter Feynman-Diagramme, die nach einem simplen Schema konstruiert werden. Außerdem stellen die Zeichnungen die physikalischen Vorgänge anschaulich dar, etwa zwei Elektronen, die aneinander streuen und dabei Photonen austauschen.

Man kann diese Methode allerdings nur auf Situationen anwenden, in denen die Quantenfeldtheorie einer freien Theorie ähnelt, also wenig Wechselwirkungen auftreten. Insbesondere bei hochenergetischen Prozessen zwischen Atomkernen im Inneren von Teilchenbeschleunigern oder bei vielen elektrodynamischen Effekten ist das der Fall. »Die theoretischen Ergebnisse sind erstaunlich präzise und stimmen extrem gut mit experimentellen Messungen überein«, sagt Rejzner.

Wenn ein System hingegen stark wechselwirkt, bricht der störungstheoretische Ansatz zusammen. Zwar scheint die Methode ein nützlicher Leitfaden für viele Experimente zu sein, aber letztlich erweist sie sich nicht als der richtige Weg, um unsere Welt vollständig zu beschreiben. Zum Beispiel lässt sie eine der dringendsten Fragen des Fachs unbeantwortet: Warum Quarks immer nur in Trios auftauchen, beziehungsweise als Quark-Antiquark-Paar, und nicht alleine anzutreffen sind.

Ein diskretes Universum mit einer gitterförmigen Raumzeit

Daher haben Physikerinnen und Physiker weitere Näherungsverfahren entwickelt, um sich auf verschiedenen Wegen an eine vollwertige Formulierung einer Quantenfeldtheorie heranzuschleichen. Ein prominentes Beispiel dafür ist die so genannte Gittereichtheorie, die ebenfalls nützliche Ergebnisse liefern konnte.

Eigentlich zeichnet sich eine Feldtheorie dadurch aus, dass sie kontinuierlich ist; man kann also an jedem Ort oder Zeitpunkt beliebig nah hineinzoomen und die Eigenschaften des Felds dort untersuchen. Wenn man sich jedoch auf ein Gittermodell beschränkt, lassen sich die störenden Unendlichkeiten der Theorien umgehen. Das heißt, man erlaubt nur Messungen an den Stellen, wo sich die Linien des Gitters kreuzen. Um nach einer erfolgreich durchgeführten Berechnung ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, muss man den Abstand zwischen den Gitterpunkten allmählich verringern. Man fügt immer mehr Linien hinzu und zieht sie gleichzeitig enger zusammen, wodurch ein zunehmend feineres Gewebe entsteht. Dabei erhöht sich die Anzahl der Punkte, und man nähert sich der idealisierten Vorstellung eines kontinuierlichen Felds, das sich überall untersuchen lässt.

Damit der Ansatz verlässliche Ergebnisse liefert, muss man beweisen, dass das kontinuierliche Quantenfeld tatsächlich dem Grenzwert des dichter werdenden Gittermodells entspricht. Auch wenn es intuitiv so scheint, ist das

Seiberg-Witten-Invarianten

In den 1980er Jahren tauchten erstmals Verbindungen der Quantenfeldtheorie zu dem abstrakten Gebiet der Topologie auf. Deren Ziel ist es, ein möglichst allgemein gültiges Schema zu finden, um Objekte zu klassifizieren. Denn für Topologen gelten zwei Figuren als gleich, wenn man sie – ohne sie zu zerreißen – ineinander verformen kann, so wie eine Henkeltasse und ein Donut.

Für zweidimensionale Oberflächen lässt sich schnell herausfinden, ob zwei Kandidaten topologisch gleich sind: Eine Möglichkeit besteht darin, die Anzahl ihrer Löcher zu zählen. In höheren Dimensionen können die Figuren jedoch extrem abstrakt werden – in jenen Fällen ist es unheimlich kompliziert und manchmal sogar unmöglich zu beurteilen, ob zwei Exemplare übereinstimmen.

Deshalb suchen Fachleute nach so genannten Kenngrößen (etwa Zahlen, Matrizen oder Gruppen), die eine Figur eindeutig charakterisieren und sich nicht ändern, wenn man sie verformt. Mathematiker haben viele solcher Objekte gefunden, die sie für bestimmte Mannigfaltigkeiten berechnen können. Das löst das Problem allerdings noch nicht, denn zwei äquivalente Figuren haben zwar stets gleiche Kennzahlen, doch das heißt nicht, dass Körper mit identischen Kennzahlen zwingend einander entsprechen.

Man braucht mehrere solcher Größen, so genannte Invarianten, um Objekte eindeutig zu klassifizieren. Für null-, ein- und zweidimensionale Flächen hat man diese schnell gefunden. Auch in mehr als vier Dimensionen kennt man inzwischen die benötigten Kenngrößen.

Es bleiben also nur noch die Klassifikationen von drei- und vierdimensionalen Mannigfaltigkeiten übrig. Hier erweist sich die Quantenfeldtheorie als äußerst nützlich, wie Nathan Seiberg und Edward Witten herausfanden. Dazu muss man Quantenfelder auf den entsprechenden Oberflächen definieren und bestimmen, wie viele so genannte Instantone (eine bestimmte Teilchenart) darauf entstehen können. Wie sich herausstellt, entspricht dieser Wert einem charakteristischen Index der Mannigfaltigkeiten.

Ihn auf herkömmliche Weise mit den Mitteln der Topologie zu berechnen, ist allerdings wesentlich komplizierter und nicht immer möglich. Somit stellte die Arbeit von Witten und Seiberg einen wichtigen Fortschritt in dem Bereich dar. Inzwischen konnten auch in anderen Fällen Quantenfeldtheorien dazu dienen, geometrische Flächen zu untersuchen und ungeahnte Zusammenhänge aufzudecken.

nicht zwingend der Fall. Zum Beispiel haben einige Quantenfeldtheorien Symmetrien, die auf einer diskreten Raumzeit andere Formen annehmen. Es ist unklar, wie sie sich entwickeln, wenn sich das Modell dem Kontinuum nähert.

Trotzdem sind die meisten Fachleute davon überzeugt, dass sich das verdichtende Gitter auf die idealisierte Vorstellung eines Quantenfelds zubewegt. Denn die Vorhersagen stimmen extrem gut mit den experimentellen Messungen überein. Aber deutliche Hinweise darauf zu haben, dass etwas richtig ist, und es schlüssig zu beweisen, sind zwei völlig verschiedene Dinge.

Es gibt weitere Verfahren, um die bekannten Quantenfeldtheorien im Bereich starker Wechselwirkungen zu untersuchen, etwa Dyson-Schwinger-Gleichungen oder funktionale Renormierungsgruppen. Aber auch sie basieren auf Annahmen und Vereinfachungen, von denen nicht ganz klar ist, ob sie in der Natur realisiert sind. Zudem sind diese Ansätze häufig extrem kompliziert, so dass es selbst mit Hilfe von Computern nicht möglich immer ist, konkrete Ergebnisse zu berechnen.

Insgesamt unterscheidet sich die QFT grundlegend von den physikalischen Theorien, die sie ablösen soll. Isaac Newtons Bewegungsgesetze, die Quantenmechanik und Albert Einsteins Relativitätstheorien fußen auf soliden mathematischen Konzepten und sollten in einer idealen Quantenfeldtheorie enthalten sein – und tatsächlich um-

fasst das Standardmodell alle von ihnen, bis auf die allgemeine Relativitätstheorie. »Quantenfeldtheorien haben sich zu einer Art universellen Sprache entwickelt, um physikalische Phänomene zu beschreiben, aber sie stehen auf wackeligen Beinen«, urteilt Dijkgraaf. Für einige seiner Kollegen ist das ein Grund zum Zweifeln. »Wenn nicht einmal das Grundkonzept verstanden ist, warum ist man sich dann so sicher, dass es die Welt korrekt beschreibt?«, so Dijkgraaf.

Doch selbst in diesem unvollständigen Zustand haben Quantenfeldtheorien zu mehreren wichtigen Entdeckungen geführt – auch in der Mathematik. »Die QFT ist wie eine Maschine, die Ideen generiert«, sagt Tong. Vor allem im Bereich der Geometrie hat sie erstaunliche Verbindungen offengelegt.

Es ist schon länger bekannt, dass physikalische Phänomene eng mit diesem Gebiet zusammenhängen: Wenn man zum Beispiel einen Ball auf einer hügeligen Oberfläche anstupst, wird er den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten auf der Bahnkurve zurücklegen. Diese entspricht also einer so genannten Geodäte. Das heißt, man kann physikalische Modelle nutzen, um die geometrischen Eigenschaften einer Form zu enthüllen.

Wenn man statt einer klassischen Kugel das Verhalten eines Elektrons auf einer Oberfläche betrachtet, lässt sich erstaunlich viel über die zu Grunde liegende Figur erfahren.

Eine formale Quantenfeldtheorie

Obwohl die Anfänge der Quantenfeldtheorie bis in die 1920er Jahre zurückreichen, steht das Gebiet noch immer auf wackeligen Beinen. Die meisten Physiker haben sich damit arrangiert, sie nutzen die Objekte als Werkzeuge und ignorieren die mathematischen Probleme – denn in vielen Fällen kann man Ergebnisse berechnen, die hervorragend zu den experimentellen Messungen passen.

Es gibt aber einige Forschungsgruppen, die versuchen, die bisherigen Methoden zu erweitern, um starke Wechselwirkungen beschreiben zu können. Dafür existieren inzwischen mehrere Ansätze, die viel versprechend wirken. Den Physikern geht es meist jedoch nicht darum, eine mathematische Basis zu schaffen, sondern Techniken auszuarbeiten, die praktische Anwendung finden können.

Einige Forschende stören sich allerdings an den unsauberen Formu-

lierungen, die teilweise schon seit Jahrzehnten genutzt werden.

Um Quantenfeldtheorien erfolgreich zu definieren, müssen sie drei Anforderungen erfüllen: Zuerst braucht man die Größen, von denen die Theorie abhängt (etwa einen geometrischen Raum, Korrelationsfunktionen und so weiter), anschließend definiert man die Eigenschaften, welche diese Bestandteile besitzen sollen (zum Beispiel die Symmetrien der Korrelationsfunktionen). Ist das gelungen, bleibt zu zeigen, dass die neue Formulierung alle erzielten Ergebnisse des Bereichs reproduzieren kann.

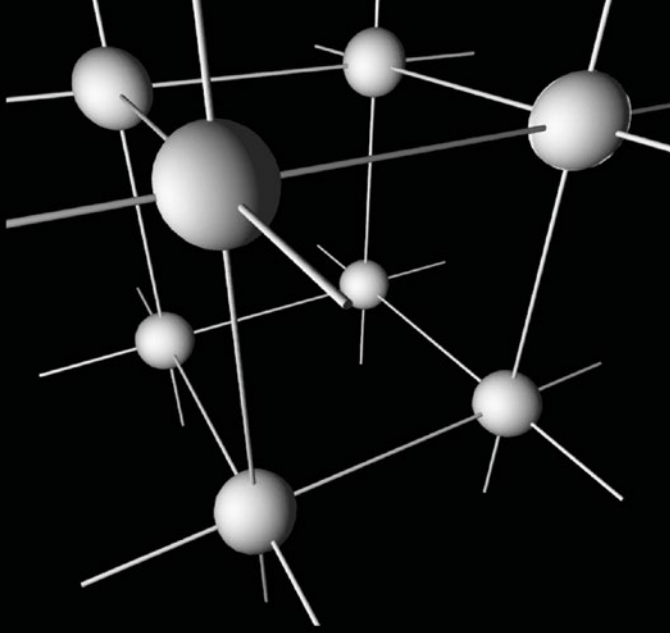
Zu kompliziert für die Praxis

Der letzte Punkt führt bei den meisten Bemühungen zu Problemen. Fachleute konnten zwar die wichtigsten Objekte definieren und plausible Anforderungen an sie stellen, doch die Konstrukte erwiesen sich als so

kompliziert, dass viele der bisherigen Errungenschaften gewöhnlicher Quantenfeldtheorien unerreichbar scheinen.

Ein populärer Ansatz besteht beispielsweise darin, nicht die Felder als zentrale Bestandteile einer QFT zu sehen, sondern abstraktere Strukturen. Wenn man die Wechselwirkungen eines Felds berechnen möchte, muss man unendlich-dimensionale Operatoren an einem festen Punkt im Raum miteinander multiplizieren. Das führt zu Unendlichkeiten in den Ergebnissen.

Ein Ausweg besteht darin, die Felder nicht an einem einzelnen Raumpunkt zu betrachten, sondern sie über eine endliche Umgebung zu verschmieren. Das heißt, man wertet das Feld in einem kleinen Bereich des Raums aus, bevor man es mit einem anderen – ebenfalls verschmierten – Objekt multipliziert. Die QFT hängt dann von verschiedenen Variationen



GITTERMODELLE Um auch starke Wechselwirkungen zu simulieren, greift man häufig auf Gittermodelle zurück. Dabei vereinfacht man die kontinuierliche Raumzeit zu einem quadratischen Gitter. Somit besitzen die Quantenfelder nur an den Gitterpunkten feste Werte, wodurch man unter anderem verhindert, dass sie sich unendlich nahe kommen. Häufig verschwinden die Unendlichkeiten durch diese Vereinfachung.

Denn das Teilchen hat überall eine nicht verschwindende Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Indem man das dazugehörige Quantenfeld untersucht, kann man zum Beispiel herausfinden, wie viele Löcher die Form hat – eine Frage von höchster Bedeutung für Geometer und Topologen.

Wenn man eine Oberfläche im dreidimensionalen Raum betrachtet, mag eine solche quantenphysikalische Vorgehensweise unnötig komplex erscheinen; und das ist sie in diesem Fall auch. Schließlich gibt es zahlreiche Methoden, um zweidimensionale Gebilde zu visualisieren und mit ihnen algebraisch umzugehen. Doch sobald man beispielsweise hochdimensionale Oberflächen (so genannte Mannigfaltigkeiten) untersucht, wird es extrem kompliziert. Selbst so rudimentär anmutende Fragen wie die Anzahl der vorhandenen Löcher entpuppen sich plötzlich als erstaunlich schwierig: Wie definiert man überhaupt ein Loch in mehr als drei Dimensionen? Woran erkennt man, dass eine bestimmte Form löchrig ist? Gerade in solchen Situationen erweist sich die Physik als nützlich: »Selbst ein Teilchen, das einfach nur da sitzt und nichts tut, kann hilfreiche Informationen über die Topologie einer Mannigfaltigkeit preisgeben«, sagt Tong.

In den späten 1970er Jahren nutzten Mathematiker diese Zusammenhänge, um geometrische Fragen zu beantworten. Eines der bedeutendsten Ergebnisse lieferte der theoretische Physiker und Fields-Medaillen-Preisträger Edward

der Felder ab: Man kann sie nach bestimmten Regeln multiplizieren, addieren und so weiter, ein solches Konstrukt nennt man eine Algebra.

Algebraische Quantenfeldtheorien sind abstrakt formuliert. Sie enthalten beispielsweise keine klaren Darstellungen der Felder, was es erschwert, konkrete Ergebnisse zu berechnen. Deshalb gelang es mit diesem Ansatz noch nicht, die bisherigen Erkenntnisse bekannter QFTs zu reproduzieren.

Notwendige Abstraktion

Doch auch wenn die abstrakte Herangehensweise auf den ersten Blick wie ein Nachteil wirkt, ist sie notwendig. Denn in der Form, wie gewöhnliche Quantenfeldtheorien in der Physik definiert werden, haben sie keinen Bestand. In der Regel startet man dabei mit den klassischen Gleichungen einer Feldtheorie – etwa dem Elektromagnetis-

mus – und verändert diese, damit sie quantenphysikalischen Prinzipien folgen. Allerdings stellte Rudolf Haag (1922–2016) in den 1960er Jahren fest, dass aus einer klassischen Theorie keine eindeutige QFT folgt. Das heißt, es gibt zahlreiche verschiedene Formeln, welche die Quantenfelder enthalten, die zu ein und demselben klassischen System passen. Wie die richtige Formulierung aussieht, ist unklar.

Die Erkenntnis brachte einige Physiker dazu, an Quantenfeldtheorien im Allgemeinen zu zweifeln. Doch schnell bemerkten sie, dass die verschiedenen Gleichungen Ergebnisse hervorbringen, die nur minimal voneinander abweichen. Tatsächlich sind die Unterschiede so gering, dass kein Experiment sie jemals auflösen könnte. Deshalb ignorieren die meisten Fachleute das Problem und wählen eine Formel aus, die gut zu ihrer Berechnung passt.

Mathematiker geben sich mit einer solchen Lösung nicht zufrieden. Durch ihren algebraischen Ansatz gelingt es ihnen jedoch, die Schwierigkeit zu umgehen: Sie wählen keine bestimmte Darstellung aus, sondern nutzen abstrakte Algebren, um die nötigen Rechenschritte durchzuführen. Das ist allerdings wesentlich aufwändiger und führt deshalb nicht zu den gleichen Fortschritten, die Physiker in vergleichbarer Zeit erzielen.

Auf einem solchen Ansatz beruht auch die Arbeit von Kevin Costello, dem es gelang, zumindest das störungstheoretische Modell von QFTs klar zu formulieren. Bereits in dieser Annäherung entstehen Unendlichkeiten, die zu Problemen führen. Fachleute haben in den letzten Jahrzehnten Möglichkeiten ausgearbeitet, mit ihnen umzugehen, und Costello hat hierfür nun die mathematische Basis geliefert.

Witten zusammen mit Seiberg Anfang der 1990er Jahre, als er die heute als Seiberg-Witten-Invarianten bekannten Kenngrößen definierte (siehe »Seiberg-Witten-Invarianten«). Diese lassen sich durch quantenphysikalische Modelle berechnen und charakterisieren die topologischen Eigenschaften einer Mannigfaltigkeit: Indem man bestimmt, wie häufig eine gewisse Art von Teilchen in einem System vorkommen kann, erhält man die Anzahl der Löcher der zu Grunde liegenden Figur. »Witten hat gezeigt, dass die Quantenfeldtheorie völlig unerwartete Einblicke in geometrische Fragen bietet und damit scheinbar unlösbare Probleme bewältigbar macht«, sagt Graeme Segal, Mathematiker an der University of Oxford.

Eine unerwartete Übereinstimmung

Kurze Zeit später lieferte die QFT ein weiteres erstaunliches Ergebnis. Beim Untersuchen zweier verschiedener Stringtheorien, die auf grundlegend unterschiedlichen geometrischen Räumen definiert sind, tauchte in beiden Fällen immer wieder die gleiche lange Liste von Zahlen auf. Mathematiker glaubten zuerst an einen Fehler. Schließlich etablierte sich daraus ein neues Forschungsgebiet, die Spiegelsymmetrie, welche die unerwartete Übereinstimmung zwischen den zwei Zweigen der Geometrie untersucht. Inzwischen hat die Arbeit zahlreiche weitere Analogien hervorgebracht (siehe »Spektrum« Juni 2019, S. 18).

Obwohl die QFT so erfolgreich Verbindungen offenlegt, haben ihre Kernideen in der Mathematik noch nicht Fuß gefasst. Wäre das der Fall, bestünde die Hoffnung, mehr als gelegentliche Übereinstimmungen zu erhalten. Die meisten Erkenntnisse waren Zufallsfunde, da es bisher keinen systematischen Weg gibt, gezielt mit den Konstrukten zu arbeiten. Ein besseres Verständnis könnte sich aber auszahlen, denn Quantenfeldtheorien enthalten viele spannende Eigenschaften wie Symmetrien, die beschreiben, wie sich die Punkte eines Felds zueinander verhalten. Damit lässt sich beispielsweise erklären, warum einige Größen wie die Gesamtenergie eines Systems immer gleich bleiben. Symmetrien und andere geometrische Aspekte sind schon lange tief in der Mathematik verankert. Man greift ständig darauf zurück, sei es, um Lösungen für verschiedene Arten von Gleichungen zu finden oder die Verteilung von Primzahlen zu untersuchen. Oft enthält die Geometrie auch Antworten auf zahlentheoretische Fragen – zumindest auf versteckte Art und Weise. Quantenfeldtheorien könnten sich in ganz unterschiedlichen Bereichen als nützlich erweisen.

Wie sich in der Vergangenheit zeigte, kann das viel Zeit erfordern. Viele Konzepte durchliefen zahlreiche Versuche, bevor sie ihren Platz in der Mathematik einnahmen. Ein Beispiel dafür sind die reellen Zahlen: Es dauerte fast zwei Jahrtausende, bis man sich auf eine Definition dieser Objekte einigen konnten. Schließlich gelang in den 1850er Jahren der Durchbruch, seither beschreibt man sie durch drei kryptische Wörter: Die reellen Zahlen sind ein »vollständiger, geordneter Körper«. Vollständig heißt, sie enthalten keine Lücken; sie sind geordnet, da man stets bestimmen kann, ob eine solche Zahl größer oder kleiner als eine andere ist. Zudem

bilden sie einen so genannten Körper, weil sie die arithmetischen Rechenregeln befolgen.

Um die QFT zu einem mathematischen Werkzeug zu machen, müsste man ihr die gleiche Behandlung zukommen lassen wie den reellen Zahlen: Man benötigt eine Liste von eindeutigen Eigenschaften, die jede Quantenfeldtheorie erfüllen muss. Das würde es ermöglichen, einen Raum aller möglichen solchen Theorien zu konstruieren. Darin könnten Physiker nach expliziten Beispielen suchen, welche die wichtigsten offenen Fragen klären, etwa wie eine QFT der Gravitation aussieht. Bis dahin ist es ein weiter Weg.

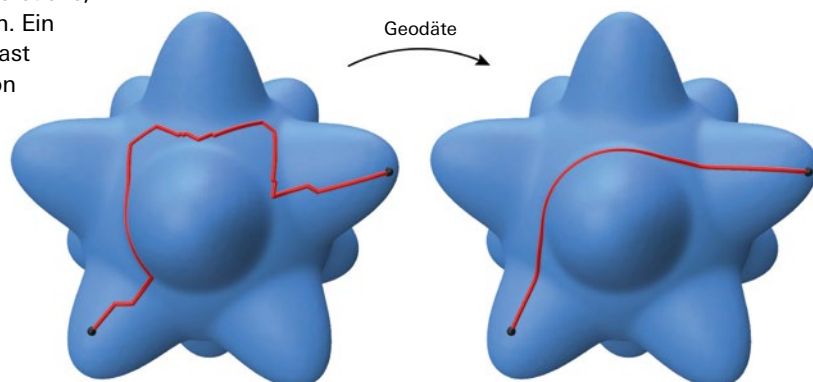
Fast alle bisherigen Modelle sind entstanden, indem man klassische physikalische Systeme durch eine Feldtheorie ausdrückt und dann »quantisiert«, also in einen quantenphysikalischen Rahmen rückt. Das Vorgehen aber in eine allgemeine mathematische Prozedur zu übersetzen, die nicht zu Problemen führt, ist ungemein kompliziert.

Einige der benötigten Bestandteile für eine QFT sind jedoch klar: Man braucht zumindest einen geometrischen Raum, in welchem sich an jedem Punkt Beobachtungen machen lassen. Darüber hinaus muss die Theorie so genannte Korrelationsfunktionen liefern, die ausdrücken, wie eine Messung an einer bestimmten Stelle eine Messung an einer anderen beeinflusst – erst mit diesen Größen kann man theoretische Vorhersagen treffen.

Ein Vorreiter ist der Mathematiker Kevin Costello vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo, Kanada. Ihm ist es gelungen, mehrere Eigenschaften auszumachen, die Korrelationsfunktionen besitzen müssen, um als brauchbare Grundlage für eine QFT zu dienen.

Die bekanntesten physikalischen Modelle enthalten darüber hinaus weitere Merkmale, die jedoch nicht zwingend erforderlich sind. Womöglich gibt es aber noch unentdeckte Prinzipien, die Phänomene erklären könnten, bei denen das Standardmodell versagt. Daher sollte man sich bei einer konkreten Definition nicht zu sehr auf die bereits bekannten Versionen stützen. Sonst fällt es nur noch schwerer, sich andere Möglichkeiten überhaupt vorzustellen. »Neben den existierenden Feldtheorien wie dem Standard-

GEODÄTEN Physikalische Modelle erweisen sich als nützlich, wenn man geometrische Erkenntnisse gewinnen möchte. Um beispielsweise herauszufinden, was der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten einer Oberfläche ist, kann man einen Ball darauf rollen lassen. Ähnlich lassen sich kompliziertere geometrische Strukturen mit Elektronenfeldern untersuchen.



modell gibt es zahlreiche weitere Quantenfeldtheorien, von denen unklar ist, wie sie zu definieren sind – aber wir wissen, dass es sie gibt«, so der Physiker Davide Gaiotto vom Perimeter Institute.

Costello hat mit seinen Definitionen ein wenig Licht ins Dunkel gebracht. Dank ihnen konnte er zwei bisher unbekannte Quantenfeldtheorien konstruieren. Zwar beschreibt keine davon unser vierdimensionales Universum, aber sie erfüllen die Kernanforderungen an einen geometrischen Raum, der mit passenden Korrelationsfunktionen ausgestattet ist.

2016 machte Costello einen weiteren Fortschritt. In dem Buch »Factorization Algebras in Quantum Field Theory«, das er mit seinem Kollegen Owen Gwilliam von der University of Massachusetts verfasst hat, stellt er die störungstheoretische QFT auf eine solide mathematische Grundlage. Darin beschreibt er unter anderem, wie man formal mit den Unendlichkeiten umgehen muss, die durch Einführung der Wechselwirkungen entstehen. »Seine Beiträge sind extrem aufschlussreich. Er hat die Theorie in einen neuen mathematischen Rahmen gestellt«, so Moore. Das Werk folgt früheren Bemühungen aus den 2000er Jahren, welche die QFT formalisieren sollten, so genannte algebraische Quantenfeldtheorien (siehe »Eine formale Quantenfeldtheorie«).

Eine formale Definition der Störungstheorie für Quantenfelder

Auch wenn der störungstheoretische Ansatz unser Universum nicht in Gänze beschreiben kann, liefert das Buch doch einen wichtigen Beitrag. »Ich fand die Methoden einiger Physiker einfach unmotiviert und ad hoc. Ich wollte etwas, das in sich geschlossen ist und mit dem ein Mathematiker arbeiten kann«, erklärt Costello. Indem er dargelegt hat, wie die Störungstheorie funktioniert, hat er eine Grundlage geschaffen, auf der sich neuartige Quantenfeldtheorien konstruieren lassen – zumindest solche, die den Diktaten des Störungsansatzes entsprechen. Seine Werke wurden schnell von anderen Fachleuten auf dem Gebiet angenommen. »Er hat sicherlich eine Menge junger Menschen beeinflusst, die in diesem Rahmen arbeiten«, urteilt Dan Freed, ein Mathematiker an der University of Texas, Austin.

Leider ist man von einer allgemeinen Formulierung einer wechselwirkenden Theorie noch weit entfernt. Für einige wenige Beispiele von Quantenfeldtheorien ist es aber gelungen, die Gleichungen vollständig zu lösen und damit die zu Grunde liegenden Systeme umfassend zu bestimmen. Die Modelle waren dabei wesentlich einfacher als jene, die unser Universum beschreiben. Kürzlich hat etwa ein Team in Frankreich alle mathematischen Details einer QFT ausgearbeitet, die auf einer zweidimensionalen Raumzeit definiert ist.

Andere Vereinfachungen bestehen darin, zusätzliche Symmetrien anzunehmen, die es in der physikalischen Realität nicht gibt. Aus mathematischer Sicht sind die Modelle durch solche Eigenschaften einfacher zu handhaben. Zu dieser Kategorie gehören etwa supersymmetrische und topologische Quantenfeldtheorien. Auf Ersteren basieren Stringtheorien, in denen die Quantenfelder keine Elementarteilchen erzeugen, sondern eindimensionale Schnü-

re. Bei topologischen Quantenfeldtheorien sind die Korrelationsfunktionen hingegen unabhängig von der zu Grunde liegenden Geometrie. Das heißt, die Theorie führt zu identischen Ergebnissen, egal wie die Raumzeit gekrümmt ist – damit entsprechen die beobachtbaren Größen topologischen Invarianten: Sie bleiben unter Verformungen gleich.

Diese Fälle sind zwar interessant und haben auch spannende mathematische Zusammenhänge offenbart, dennoch möchte man eine präzise Formulierung einer Quantenfeldtheorie finden, die unser Universum beschreibt: eine kontinuierliche vierdimensionale Raumzeit, in der alle bekannten Grundkräfte vorhanden sind. »Es ist ziemlich peinlich, dass wir keine einzige Quantenfeldtheorie kennen, die sich in vier Dimensionen ohne Störungstheorie beschreiben lässt«, so Rejzner.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



PETER JURIK / STOCKADOBEE.COM

Das hält Experten aber nicht davon ab, es immer weiter zu versuchen. Um die Eigenschaften herauszuarbeiten, die alle Quantenfeldtheorien gemeinsam haben, muss man höchstwahrscheinlich zwei elementare Bereiche der Mathematik miteinander verschmelzen: die Analysis, die erklärt, wie man Unendlichkeiten kontrolliert, und die Geometrie, die eine Sprache liefert, um mit Symmetrien umzugehen.

Physiker erhoffen sich von einer vollständigen Definition der QFT vor allem eines – eine korrekte Beschreibung der physikalischen Realität. »Ich glaube daran, dass es eine übergeordnete Struktur gibt, welche die gesamte Physik umfasst«, sagt Seiberg. Jetzt müssen die Mathematiker sie nur noch aufdecken. ◀

QUELLEN

Costello, K.: Supersymmetric gauge theory and the Yangian. ArXiv: 1303.2632, 2013

Costello, K.: M-theory in the Omega-background and 5-dimensional non-commutative gauge theory. ArXiv: 1610.04144, 2016

Costello, K., Gwilliam, O.: Factorization algebras in quantum field theory. Cambridge University Press, 2017

Rejzner, K.: Perturbative algebraic quantum field theory. Springer International Publishing, 2016

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »The Mystery at the Heart of Physics That Only Math Can Solve« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



DIE MASSE MACHT'S
Fische setzen unzählige Eier ins Wasser ab. Einige davon nehmen beim Befruchten wohl Fremd-DNA auf.

MOLEKULARBIOLOGIE GENE SPRINGEN ÜBER ARTGRENZEN HINWEG

Beim »horizontalen Gentransfer« tauschen Individuen ihr Erbgut untereinander aus, ohne sich dabei fortzupflanzen. Das Phänomen ist von Mikroorganismen bekannt, doch immer mehr Studien belegen: Es tritt auch bei Wirbeltieren auf, und zwar überraschend oft.

► In den kalten Gewässern der Polargebiete haben Meereslebewesen diverse Mechanismen ausgeprägt, um mit den tiefen Temperaturen umzugehen. Verbreitet ist die Fähigkeit, Gefrierschutzproteine (»Anti-Freezing Proteins«, AFP) zu bilden, die das Wachstum von zerstörerischen Eiskristallen in Blut, Körpergewebe und Zellen verhindern. Dieses Merkmal hat sich mehrfach unabhängig voneinander entwickelt – sowohl bei Fischen als auch bei Pflanzen, Pilzen und Bakterien.

Daher überrascht es zunächst nicht, dass Heringe (*Clupeidae*) und Stinte (*Osmeridae*) – zwei Fischfamilien, die im Nordatlantik und Nordpazifik zahlreich vertreten sind – beide AFP produzieren. Bei näherem Hinsehen verblüfft es jedoch, dass sie hierfür dasselbe Gen nutzen. Die Entwicklungslinien der beiden Familien haben

sich vor mehr als 250 Millionen Jahren getrennt, und enger verwandte Gruppen besitzen die entsprechende Erbanlage nicht.

Ein Team um Laurie Graham von der Queen's University (Kanada) hat eine aufsehenerregende Erklärung dafür gefunden. Laut der These wanderte das Gen aus dem Herings- direkt in das Stintgenom – und zwar ohne geschlechtliche Vereinigung, denn diese Gruppen sind unfähig, sich miteinander zu kreuzen, wie zahlreiche Experimente belegt haben. Die Erbanlage ist somit auf nichtsexuelle Weise übertragen worden.

Graham, die als Molekularbiologin arbeitet, weiß, dass sie damit eine kühne Behauptung aufstellt. Wenn genetisches Material innerhalb ein- und derselben Generation von einem Individuum auf ein anderes übergeht, statt von Vorfahren auf Nachkommen vererbt zu

werden, bezeichnen Fachleute das als »horizontalen Gentransfer«. Von Mikroorganismen wie Bakterien kennt man dieses Phänomen schon lange. Bei Tieren jedoch, und besonders bei Wirbeltieren, hielten Biologen das früher für ausgeschlossen. Doch je genauer Graham und ihre Kollegen das Erbgut von Stinten untersuchten, umso erdrückender wurden die Beweise hierfür.

Und Stinte sind nicht die einzigen Tiere, die horizontalen Gentransfer praktizieren. Neuere Studien haben den Mechanismus auch bei anderen Fischen, Reptilien, Vögeln und Säugtieren nachgewiesen. Es scheint, als sei er weit verbreitet.

Graham fiel die Ähnlichkeit der AFP-Gene von Stinten und Heringen bereits Anfang der 2000er Jahre auf. Sie stellte fest: Die Introns – also die nichtcodierenden Bereiche dieser

Gene, die meist schneller mutieren als die codierenden – sind in beiden Gruppen zu mehr als 95 Prozent identisch. »Daraus konnten wir nur die Schlussfolgerung ziehen: Das Gen ist horizontal von einer Familie auf die andere übertragen worden«, erinnert sich die Forscherin.

Doch als sie und ihr Team versuchten, die Arbeit zu publizieren, stießen sie auf erheblichen Widerstand. Eine Fachzeitschrift nach der anderen lehnte ab. Möglicherweise war es ein ungünstiger Zeitpunkt: 2001 stellte eine der wichtigsten Veröffentlichungen, die sich mit dem neu sequenzierten menschlichen Genom befasste, außergewöhnliche Thesen über den horizontalen Gentransfer auf, die rasch widerlegt wurden. »Vor diesem Hintergrund hielten viele Leute unsere Ergebnisse für Quatsch«, sagt Graham. Als eine Arbeit, die den damaligen Stand der Untersuchungen zusammenfasste, 2008 im Fachjournal »PLoS ONE« erschien, hielten die Zweifel immer noch an.

Eine fast unmögliche Ereigniskette

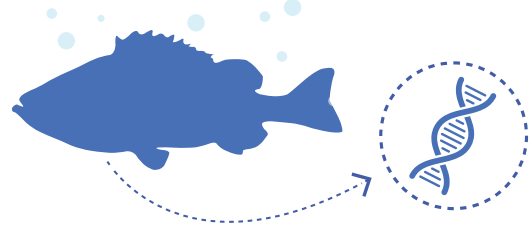
Die Skepsis war verständlich, denn horizontaler Gentransfer schien bei Eukaryoten (Lebewesen mit echten Zellkernen und räumlich stark untergliederten Zellen) unmöglich zu sein. Bei Bakterien, deren DNA im Zellplasma schwimmt, ist die horizontale Weitergabe von Erbgut vergleichsweise unkompliziert und häufig. Hat ein DNA-Fragment die Zellhülle eines Bakteriums durchdrungen, steht seiner Integration ins Zellgenom nicht mehr viel im Weg. Bei Eukaryoten hingegen ist das Genom von einer zweiten Barriere umgeben, der Kernmembran; zudem liegt es meist in Form von eng aufgewickelterm Chromatin vor, einem schwer zugänglichen Komplex aus DNA und Proteinen. Obendrein muss ein horizontaler Gentransfer, um in einer eukaryotischen Spezies bleibende Spuren zu hinterlassen, in einer Keimzelle erfolgen und anschließend an die Nachkommen weitergegeben werden. Diese Kette von Ereignissen schien den meisten Fachleuten äußerst unwahrscheinlich.

Jede Menge Hürden

Ein horizontaler Gentransfer zwischen verschiedenen Tierarten galt lange Zeit als praktisch unmöglich, weil er eine Abfolge von Ereignissen erfordert, von denen jedes einzelne wenig wahrscheinlich ist. Dennoch findet er in der Natur hin und wieder statt, wie Studien belegen.

1

Ein Stück aus dem Erbgut der Spezies A – etwa ein Gen – wird vom restlichen Genom getrennt, beispielsweise wenn eine verirrte Spermienzelle zerfällt.



2

Eine Eizelle von Spezies B nimmt das Gen auf, während sie von Spermien eines Artgenossen befruchtet wird.



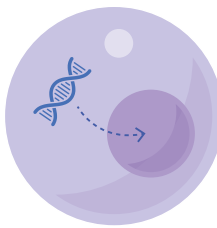
2

Parasiten schleppen das Gen in ein Tier der Spezies B ein, wo es in Keimbahnzellen gelangt.



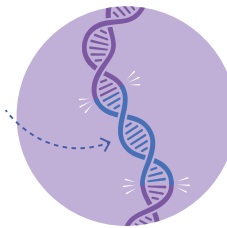
3

Das Gen dringt in den Zellkern ein.



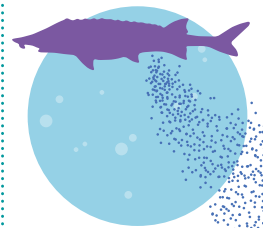
4

Es wird erfolgreich in die dortige DNA eingebaut.



5

Zellen, die den frisch erworbenen Erbfaktor tragen, bringen Nachkommen der Spezies B hervor.



6

Die Nachkommen pflanzen sich ihrerseits fort, wobei sie ihre neue Erbanlage verbreiten, so dass sie in den Genpool der Spezies eingehen.



Nur horizontale Gentransfers, die all diese Hürden überwinden, hinterlassen bleibende Spuren.

SEITENSPRUNG EINES GENS Genomanalysen deuten darauf hin, dass die Erbanlage für ein Gefrierschutzprotein (AFP) von Heringen auf Stinte überging, und zwar auf direktem Weg im Zuge eines horizontalen Transfers. Wäre sie von Generation zu Generation vererbt worden, hätte der gemeinsame Vorfahre dieser beiden Tiergruppen sie besitzen müssen, und damit sämtliche Abstammungslinien, die aus ihm hervorgingen – was nicht der Fall ist.

Graham und ihr Team ließen sich nicht abschrecken. Indem sie die Genome von Stinten entschlüsselten, stellten sie fest, dass die Tiere nur ein AFP-Gen besitzen. Als sie bei Fischen anderer Familien an den entsprechenden Stellen des Erbguts suchten, fanden sie keine Spuren eines solchen Erbfaktors – nicht einmal eine inaktivierte Form. »Die Stinte hatten den Faktor offensichtlich neu erworben«, resümiert Graham.

Im Jahr 2019 publizierte eine Arbeitsgruppe um Leif Andersson von der Universität Uppsala, Schweden, die vollständige Genomsequenz des Atlantischen Herings (*Clupea harengus*). Das ermöglichte es Graham und ihren Kollegen, die Bereiche rund um das AFP-Gen besser zu untersuchen. Es stellte sich heraus, dass dort einige Transposons sitzen: mobile DNA-Abschnitte, die sich selbst kopieren und ihre Position innerhalb des Erbguts verändern können. Das Genom des Atlantischen Herings enthält zahlreiche Transposons, die in anderen Fischen nicht zu finden sind – mit einer wichtigen Ausnahme. Drei dieser mobilen Abschnitte flankieren das AFP-Gen des Arktischen Stints (*Osmorus mordax*), und zwar in der gleichen Reihenfolge wie beim Hering. Für Graham ein schlagender Beweis dafür, dass ein kurzer Sequenzabschnitt aus dem Erbgut des einen in das des anderen gewandert ist: »Ich wüsste nicht, mit welchem Argument man das bestreiten wollte.«

Der Genetiker Cédric Feschotte von der Cornell University, New York, der nicht an der Studie beteiligt war, stimmt dem zu: »Wenn man sich die Daten ansieht, scheint das unverkennbar zu sein.« Ihn erstaunt, wie gut sich dieses Ergebnis mit dem deckt, was er

und andere Forscherinnen und Forscher über Transposons und das Erscheinen neuer Gene herausgefunden haben. Im Jahr 2008 entdeckten seine Kollegen und er eine Transposonvariante, die nur in wenigen Wirbeltierarten vorkommt – darunter einigen Säugern, einer Reptil- und einer Amphibienspezies. Die fraglichen Transposons stimmten in all diesen Arten zu mehr als 96 Prozent überein, fehlten aber merkwürdigerweise in den Genomen anderer Spezies. Da sich nicht erklären ließ, wie sie in das Erbgut einer derart speziellen Auswahl von Lebewesen gekommen waren, nannten Feschotte und sein Team sie »Space-Invader-« (SPIN-) Elemente und postulierten, dass sie vor Kurzem horizontal über Artgrenzen hinweg weitergegeben worden sein müssten. In manchen Fällen hatte dies den betroffenen Tieren neue Merkmale verliehen: Bei Mäusen etwa wurde ein übernommenes SPIN-Element zusammen mit anderen Abschnitten des Erbguts abgelesen, woraus ein chimäres Protein entstand, das vor der Übernahme nicht da gewesen war.

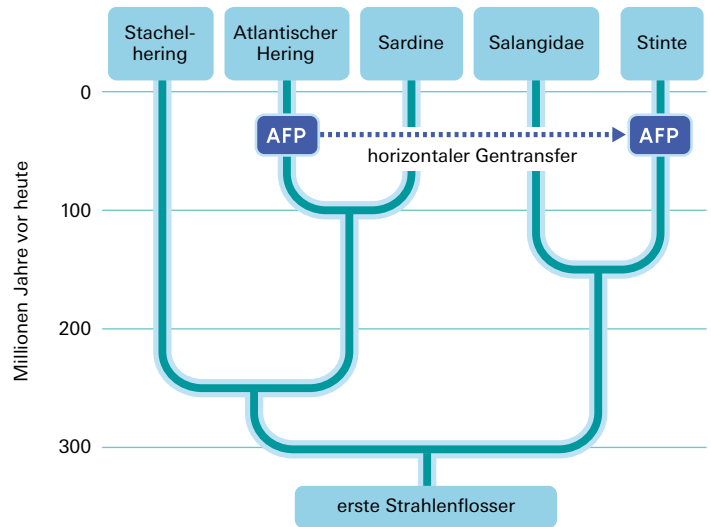
Riesige Dunkelziffer

Seither gab es Berichte von tausenden weiteren mutmaßlichen horizontalen Gentransfers zwischen Tieren. Während sie anfangs auf große Skepsis stießen, sind die empirischen Belege dafür, dass solche Transfers stattfinden, mittlerweile unbestreitbar. Man muss sich hierzu vergegenwärtigen, dass die horizontale Weitergabe von

genetischem Material schwer nachzuweisen ist. Denn sowohl im Spender- als auch im Empfänger genom häufen sich nach und nach immer mehr Mutationen an, nachdem die Übertragung stattgefunden hat, wodurch die verräterische Ähnlichkeit der weitergegebenen Sequenz allmählich abnimmt. Darum zeigt sich die Evolutionsbiologin Sarah Schack vom Reed College in Portland, Oregon, überzeugt: »Horizontaler Gentransfer findet wahrscheinlich viel häufiger statt, als uns das bewusst ist.«

Im Jahr 2020 untersuchten der Evolutionsbiologe Clément Gilbert von der Université Paris-Saclay und sein Team die Genomsequenzen von 307 Wirbeltiergenomen, die sie aus der Datenbank »GenBank« abgerufen hatten. Die Forscher fanden darin Hinweise auf mindestens 975 horizontale Gentransfers. Auffallend war, dass die Übertragungen meist zwischen Fischen stattgefunden hatten: Fast 94 Prozent von ihnen betrafen Strahlenflosser, weniger als 3 Prozent hatten sich bei Vögeln oder Säugern ereignet.

Eine Erklärung hierfür könnte im Fortpflanzungsverhalten vieler Fische liegen. »Schaut man aus einem Flugzeug auf Küstenabschnitte hinunter, wo Heringe laichen, ist das Wasser milchig verfärbt, weil die Tiere unzählige Spermien abgeben«, schildert Graham. Die meisten solchen Keimzellen finden kein Ziel zum Befruchten, zerfallen und setzen ihre DNA frei.



Graham nimmt an, dass diese DNA sich hin und wieder an die Keimzellen anderer Arten heftet, die im selben Gebiet laichen, und während der Befruchtung in eine Eizelle eingeschleppt wird. Seit Jahrzehnten nutzen Gentechniker eine ähnliche Technik, den »spermienvermittelten Gentransfer«, um Organismen genetisch zu verändern. Auch wenn die Chance klein sein mag, dass dies zu einem erfolgreichen Einbau der artfremden DNA führt – angesichts der unzähligen Gelegenheiten dazu gelingt es möglicherweise hin und wieder. So könnte das AFP-Gen eines Herings in einen Stint gelangt sein.

Parasiten als Genfähren

Das ist aber sicherlich nicht die einzige Erklärung, denn horizontale Gentransfers treten ebenso bei Tieren auf, die nicht laichen. So gibt es Hinweise darauf, dass an der artübergreifenden Weitergabe genetischen Materials Parasiten mitwirken. Viele von ihnen wechseln zwischen verschiedenen Wirtsspezies hin und her und kommen in engen Kontakt mit diesen.

Die Genetikerin Atma Ivancevic von der University of Colorado, Boulder, hat festgestellt: Einige Transposons

kommen bei Rindern und manchen Beuteltieren vor, aber kaum bei anderen Säugerspezies. Zudem sind sie in Schlangen und weiteren Reptilien zu finden. Als Ivancevic und ihr Team nach dem Grund der eigenartigen Verteilung suchten, stießen sie im Erbgut von Zecken und Bettwanzen auf sehr ähnliche Sequenzen. Studien haben gezeigt, dass diese beißenden Parasiten ihre Wirte manchmal mit Viren infizieren, die sie in kleinen membranumhüllten Bläschen ausscheiden, so genannten Exosomen. Vielleicht übertragen sie so auch Transposons.

Eine unterschiedliche Parasitenlast könnte somit erklären, warum manche Tierarten häufiger von horizontalem Gentransfer betroffen sind als andere. Eine Rolle hierbei spielt weiterhin, wie gut eine Spezies dazu in der Lage ist, die Integration von Fremd-DNA in ihr Erbgut zu verhindern.

Falls die horizontale Weitergabe von genetischem Material zwischen Tieren tatsächlich häufig vorkäme, wäre sie ein bedeutsamer Faktor im evolutionären Geschehen. Denn mit ihrer Hilfe könnten Organismen schlagartig neue Merkmale erwerben, die ihre Fitness verändern. So dürfte das aufgenom-

mene AFP-Gen und der damit zusammenhängende Gefrierschutz den Stinten erlaubt haben, sich weiter nach Norden zu verbreiten und kältere Gewässer zu besiedeln.

Christie Wilcox ist Wissenschaftsautorin in Washington, USA.

QUELLEN

Graham, L.A., Davies, P.L.: Horizontal gene transfer in vertebrates: a fishy tale. *Trends in Genetics* 37, 2021

Pace, J.K. et al.: Repeated horizontal transfer of a DNA transposon in mammals and other tetrapods. *PNAS* 105, 2008

Petersson, M.E. et al.: A chromosome-level assembly of the Atlantic herring genome – detection of a supergene and other signals of selection. *Genome Research* 29, 2019

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »DNA Jumps Between Animal Species. No One Knows How Often.« 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.



KLIMAPOLITIK CO₂-SCHULDEN ALS TECHNOLOGIE- ENTWICKLUNGSTURBO

Ein neuartiges Modell für den Emissionshandel könnte sich als wirksamer Hebel im Kampf gegen die Klimaerwärmung entpuppen. Dabei zahlen Unternehmen Zinsen auf überschrittene Kohlenstoffdioxidbudgets.

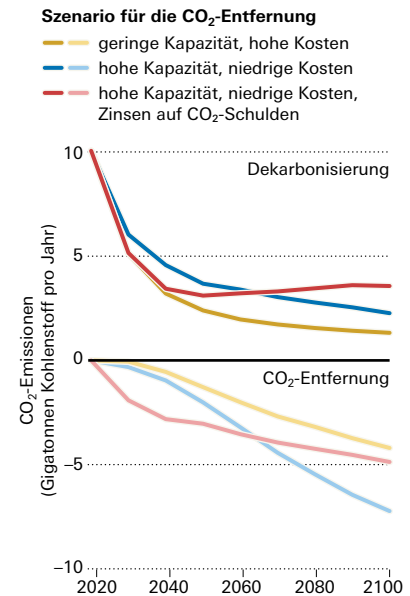
Im Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 haben fast 200 Staaten das Ziel festgesetzt, die globale Erwärmung auf 2 oder besser 1,5 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu beschränken. Weder die eine noch die andere Vorgabe ist allein durch die Senkung der CO₂-Emissionen zu erreichen – zusätzlich muss Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre entfernt werden. Ein internationales

Team um den Klimaökonom Johannes Bednar vom International Institute for Applied Systems Analysis in Laxenburg (Österreich) hat jetzt untersucht, welche politischen Mechanismen die Entwicklung und Umsetzung der dafür notwendigen Technologien unterstützen. In der Fachzeitschrift »Nature« schlägt es ein spezielles Emissionshandelssystem vor: Abhängig von der Grenze für die globale Erwärmung

werden Genehmigungen zur Emission von Treibhausgasen erteilt. Überschreitet ein Unternehmen sein Kontingent, so verpflichtet es sich, die zusätzlich ausgestoßene Menge später wieder zu beseitigen. Für die zwischenzeitliche »Lagerung« des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre sollen die Emittenten nach Ansicht der Forschungsgruppe bezahlen. Mit dieser Maßnahme sinken nach ihren

Finanzielle Stellschraube

Die Verzinsung von CO₂-Schulden kann sich direkt auf das Klima auswirken: Wissenschaftler haben für verschiedene Szenarien untersucht, wie sich jeweils die Menge an ausgestoßenem CO₂ verringert (Dekarbonisierung) und wie viel Kohlenstoffdioxid künftige Technologien aus der Atmosphäre ziehen (negative Emissionen). Ziel dabei: die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Haben die Technologien zur Rückholung des Klimagases eine geringe Kapazität und sind teuer (gelb), erwarten die Autoren eine schnelle, kurzfristige Abnahme der Emissionen, während Abscheidungstechnologien allmählich eingeführt werden. Bei höheren Kapazitäten und geringeren Kosten für die Treibhausgasentfernung (blau) rechnen sie mit einer langsameren Dekarbonisierung und dafür mit mehr CO₂-Abscheidung. Müssen Kohlenstoffdioxidherzeuger ab einem vereinbarten Grenzwert für jede zusätzlich freigesetzte Tonne Gas Zinsen zahlen, sinken die Emissionen laut Modellierung schneller, und CO₂ wird bereits früher aus der Atmosphäre entfernt (rot). Die Daten entsprechen beispielhaften Szenarien und sollen lediglich zeigen, wie sich die unterschiedlichen Annahmen auswirken.



NATURE, STANFORTH, CA: "POLITICAL RISK: POLICY COULD SPEED UP EMISSION REDUCTIONS AND REMOVAL OF ATMOSPHERIC CO₂". NATURE 598, 2021, FIG. 1. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Modellierungen zum einem die CO₂-Emissionen früher, zum anderen kommen Technologien zum Abbau des Klimagases schneller zum Einsatz (siehe »Finanzielle Stellschraube«).

Schuldenabbau? Später vielleicht ...

Jeder vereinbarten Begrenzung der künftigen globalen Erwärmung lässt sich, wenn auch mit einer gewissen Unsicherheit, ein CO₂-Budget zuordnen. Der gesamte, seit der vorindustriellen Zeit zusammengekommen Kohlenstoffdioxidausstoß darf diesen Wert nicht übertreffen. Wird das Budget gesprengt, wie Fachleute bei den Zielen des Pariser Abkommens erwarten, müssen die überschüssigen Emissionen wieder aus der Atmosphäre entfernt werden. Das darf nicht zu spät geschehen, da sonst das Klimaziel verfehlt wird; ein gewisser Spielraum besteht aber. Doch wer ist für die Einführung der CO₂-Abscheidungstechnologien verantwortlich, wer bezahlt dafür, und welches ist der geeignete Zeitpunkt, um damit zu beginnen?

Einige Technologien zum Abbau des Klimagases entstehen derzeit, andere werden künftig erwartet (siehe »Für immer gebunden«, S. 56). Fachleute gehen allerdings davon aus, dass

sie erst spät in diesem Jahrhundert eingeführt werden – und zwar aus zwei Gründen: Zum einen werden die Lösungen, die sich durchsetzen, mit der Zeit günstiger, wenn sie weiter entwickelt und großflächig im Einsatz sind. Darüber hinaus ist es billiger, eine bestimmte Summe Geld in Zukunft auszugeben als denselben Betrag zum gegenwärtigen Zeitpunkt (temporal discounting). Dadurch verschiebt sich jedoch die Verantwortung, den Klimawandel einzudämmen, auf künftige Generationen. Die Wissenschaftler um Bednar haben daher untersucht, welche Auswirkungen es hat, wenn die Verantwortlichen für die überschüssigen Emissionen (solche, die über das CO₂-Budget hinausgehen) dazu verpflichtet werden, die Technik

Der Zins macht es für Unternehmen weniger attraktiv, die Beseitigung des Kohlenstoffdioxids aufzuschieben

für deren Entsorgung später auch zu implementieren: wenn sie also CO₂-Schulden aufnehmen.

Es birgt natürlich gewisse Risiken, wenn man sich darauf verlässt, dass die heutigen Emittenten des Klimagases künftig für dessen Beseitigung aufkommen. Unternehmen können beispielsweise zahlungsunfähig werden oder Regierungen durch geschickte Lobbyarbeit dazu bringen, ihnen ihre Schulden zu erlassen; außerdem muss eventuell mehr Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre entfernt werden, als wir derzeit annehmen. Bednar und seine Kollegen schlagen daher vor, die CO₂-Schulden zu verzinsen – ähnlich, wie man Zinsen auf einen Kredit bei der Bank zahlt. So sind die Emittenten nicht nur verpflichtet, das Klimagas zu entfernen, sondern bezahlen auch dafür, es bis zu diesem Zeitpunkt in der Atmosphäre zwischenzulagern.

Solch ein Zins macht es für die Unternehmen finanziell weniger attraktiv, die Beseitigung des Kohlenstoffdioxids aufzuschieben. Nach den Modellierungen sinken die Emissionen dank diesem Instrument schneller, und Technologien für ihre Entfernung kommen früher zum Einsatz.

Die Autoren schlagen vor, die derzeitigen Emissionshandelssysteme (ETS, englisch: emissions-trading schemes) um Verpflichtungen zur Entfernung des Treibhausgases zu erweitern (CROs, carbon-removal obligations). Auf diese CO₂-Schulden fallen Zinsen an, genau wie im Finanzwesen. Außerdem sollen die Emissionsgenehmigungen so gedeckelt werden, dass sie mit dem jeweils vorhandenen Kohlenstoffdioxidbudget vereinbar sind. Die Änderungen machen die Systeme flexibler, und Probleme wie etwa »gestrandete Vermögenswerte« lassen sich besser vermeiden, das heißt Situationen, in denen wertvolle emissionsproduzierende Anlagen früher abgeschaltet werden müssen als sonst notwendig. Um die Risiken zu überwachen und sicherzustellen, dass die Verpflichtungen eingehalten werden, wären allerdings komplizierte Verwaltungs- und Regulierungssysteme nötig, an

denen Geschäfts- und Zentralbanken mitwirken.

Wie genau ein ETS mit CROs in der Praxis funktionieren würde, ist noch nicht klar. Die übergeordnete Botschaft der Studie ist jedoch, dass Technologien zur CO₂-Reduktion früher ihren Betrieb aufnehmen und die Dekarbonisierung schneller erfolgt, wenn sie mit einem generationengerechten Ansatz eingeführt werden. Das ist ganz unabhängig davon, wie das System umgesetzt wird.

Investitionsanreize gesucht

Alternativ ließe sich das Verursacherprinzip beispielsweise mittels eines staatlichen, durch CO₂-Steuern unterstützten Fonds für die Kohlenstoffdioxidbeseitigung einführen. Auch hier bestünden Risiken, etwa weil sich Verschmutzungsbudgets nicht genau beziffern lassen oder weil Mittel für kurzfristige politische Zwecke umgewidmet werden könnten. Daher wäre

es auch in dem Szenario gerechtfertigt, Zinsen auf künftige Verpflichtungen zur Entfernung des Klimagas zu erheben, und ebenso wie beim beschriebenen Modell würden die dafür benötigten Technologien schneller eingeführt.

Eine weitere Voraussetzung für deren umfassenden und frühzeitigen Einsatz ist das Vertrauen darauf, dass es in den nächsten Jahrzehnten einen entsprechenden Massenmarkt geben wird. Denn nur mit solch einer Überzeugung werden Unternehmen überhaupt in die Technologien investieren und damit deren großindustrielle Herstellung und großflächigen Einsatz ermöglichen. Und das ist wiederum notwendig, um die Kosten zu senken und eine breitere Akzeptanz zu fördern.

Hier lassen sich Lehren aus der Branche der erneuerbaren Energien ziehen: Der Preis für Solarzellen beispielsweise ist in den letzten zehn



MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!

**STERNE UND
WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2022

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

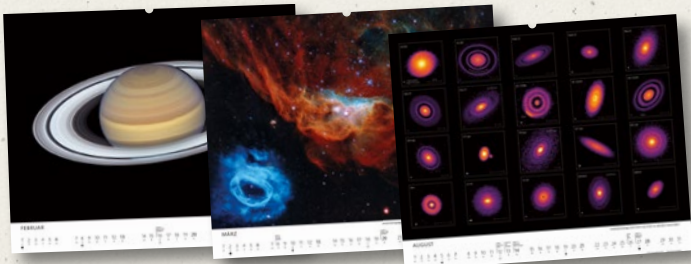
14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/aktion/hue

E-Mail: service@spektrum.de



Jahren um mehr als 80 Prozent gesunken, hauptsächlich, weil die Produktionsanlagen stark ausgebaut wurden. Hätte genügend Vertrauen in die Größe des Markts bestanden, hätten die beteiligten Unternehmen schon mindestens ein Jahrzehnt früher ihre Produktion hochskalieren und die Preise senken können. Die Kapazitäten zur Solarenergieerzeugung wären bereits dann massiv gestiegen. Bei den Technologien zur Rückholung von Kohlenstoffdioxid besteht gleichfalls die Gefahr, dass die politischen Maßnahmen, die ihnen einen Markt sichern könnten, hinter der technischen Entwicklung herhinken und dadurch Investitionen verzögern.

Das von der internationalen Forschergruppe vorgeschlagene System

schafft solch einen Markt für CO₂-Abscheidungstechnologien, weil es Organisationen mit CROs einen Anreiz bietet, in ebendiese zu investieren. Seine Komplexität stellt jedoch eine Hürde dar. Wissenschaftler, politische Entscheidungsträger und die Finanzindustrie sollten daher nun den vorgestellten Vorschlag erörtern – und prüfen, wie sich alternativ eine begründete Erwartung schaffen lässt, dass bald ein Markt für die Entsorgung von Kohlenstoffdioxid entstehen wird. Daneben gilt es eine Politik umzusetzen, welche die Verursacher für die Überschreitung ihres Treibhausgasbudgets zur Kasse bittet. Die wichtigste politische Botschaft von Bednar und seinen Kollegen ist jedoch: Nur weil wir auf künftige Tech-

nologien hoffen, dürfen wir bei der Verminderung der Treibhausgase heute nicht trödeln. ◀

Der Klimawissenschaftler **David A. Stainforth** forscht am Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment an der London School of Economics and Political Science und am Physikalischen Institut der University of Warwick (UK).

QUELLE

Bednar, J. et al.: Operationalizing the net-negative carbon economy. *Nature* 596, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 596, S. 346–347, 2021

THERMODYNAMIK DIE SYMMETRIE VON PHASENÜBERGÄNGEN

Unterschiedlichste physikalische Systeme weisen die gleichen Merkmale auf, wenn sie von einem Zustand in einen anderen übergehen. Diese Erkenntnis von fünf Mathematikern könnte dabei helfen, zu klären, ob eine noch tiefer gehende Vermutung über ein fundamentales Verhalten der Materie stimmt.

▶ Dass Stoffe bei äußeren Einflüssen wie Temperaturänderungen ihre Eigenschaften teilweise ruckartig wechseln, faszinierte die Menschheit bereits in der Antike. Die physikalischen Beschreibungen solcher Phasenübergänge offenbaren spannende Symmetrien, weswegen sich inzwischen auch Mathematikerinnen und Mathematiker mit dem Gebiet befassen. Im Dezember 2020 hat ein Forscherteam ein erstaunliches Ergebnis veröffentlicht: Unterschiedlichste Systeme erweisen sich als rotationsinvariant, wenn sie kontinuierlich von einer Phase in eine andere übergehen – unabhängig von ihren mikroskopischen Details.

Das Paradebeispiel für eine rotationsymmetrische Figur ist ein Kreis. Ganz gleich, von welcher Seite man ihn betrachtet, sieht er immer identisch aus. Auf physikalische Systeme übertragen heißt das, ihre beobachtba-

ren Eigenschaften ändern sich nicht, wenn man sie dreht. Zwar war schon früher bekannt, dass einige Modelle in der Nähe von Phasenübergängen rotationsinvariant sind, aber bei vielen anderen blieb die Frage offen.

Die Autoren der neuen Arbeit konnten erstmals Rotationssymmetrie für eine breite Klasse von Systemen nachweisen. Es handelt sich dabei somit nicht um Einzelfälle, sondern ist ein universelles Phänomen. »Dieselben Muster tauchen unabhängig von den Unterschieden zwischen den physikalischen Modellen auf«, so Hugo Duminil-Copin vom Institut des Hautes Études Scientifiques (IHES) in Paris und von der Université de Genève.

Er ist Koautor des Fachartikels, den er zusammen mit Karol Kajetan Kozłowski von der École Normale Supérieure in Lyon, Dmitry Krachun von der Université de Genève, Ioan Manolescu von der Universität Freiburg in der

Schweiz und Mendes Oulamara vom IHES und der Université Paris-Saclay verfasst hat.

Mit dem Resultat hoffen Fachleute nun zeigen zu können, dass die physikalischen Systeme eine so genannte konforme Invarianz haben, zu der unter anderem eine Rotationssymmetrie gehört. Das würde eine 50 Jahre alte Hypothese bestätigen. In den letzten Jahrzehnten ließ sich die Invarianz für einige Modelle belegen, aber nicht auf alle vermuteten Systeme erweitern. Der neue Beweis könnte den Grundstein für Fortschritte in diese Richtung legen.

Anders, als man es von Wasser kennt, das ruckartig verdampft oder zu Eis wird, sind die in der aktuellen Arbeit betrachteten Phasenübergänge kontinuierlich. Das heißt, die Materie befindet sich zwischen zwei Phasen in der Schwebelage. Sie ist weder in ihrem ursprünglichen Zustand noch hat sie ihre künftigen Eigenschaften erlangt.

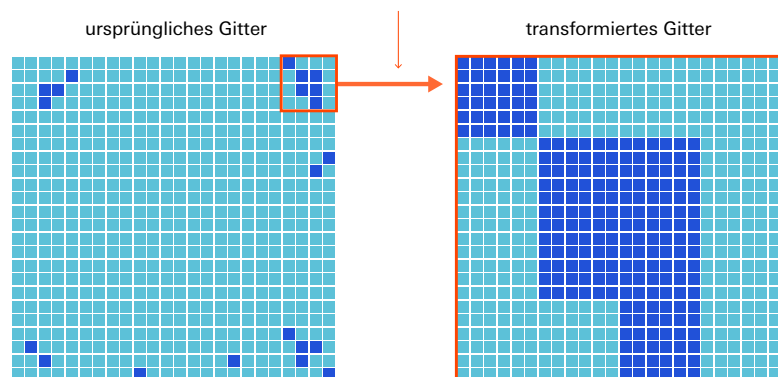
Konforme Invarianz im Ising-Modell

Physikerinnen und Physiker nutzen das Gittermodell seit Jahrzehnten, um verschiedene Systeme zu modellieren. Es setzt sich typischerweise aus Pfeilen zusammen, die entweder nach oben oder unten zeigen. Sie sollen die Magnetisierung eines Teilchens darstellen.

Vor einem Phasenübergang

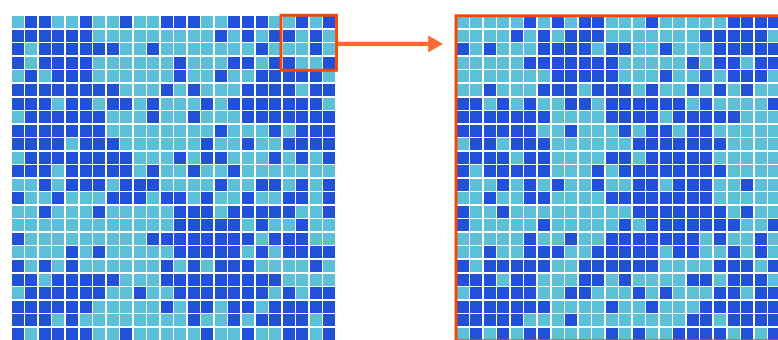
Die Farben symbolisieren die verschiedenen magnetischen Ausrichtungen der Atome. Die meisten Teilchen sind gleich ausgerichtet. In diesem Zustand hat das System keine konforme Invarianz, weil die unterschiedlich orientierten Bereiche im zweiten Gitter größer erscheinen als im ursprünglichen.

Konforme Transformation enthält Skalenänderung.



Während des Phasenübergangs

Die Atome verändern ihre magnetische Orientierung, was dem Gitter eine konforme Symmetrie verleiht: Die Bereiche gleich ausgerichteter Teilchen im ursprünglichen und im transformierten Gitter fallen gleich groß aus.



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Um solche Phänomene zu beschreiben, greift man meist auf vereinfachte Modelle zurück. Zum Beispiel lässt sich Eisen durch zahlreiche Miniaturmagnete modellieren, die sich gegenseitig beeinflussen: Benachbarte Teilchen tendieren zu einer gleichen Ausrichtung. Erhitzt man den Stoff jedoch, schwingen die Miniaturmagnete – teilweise so stark, dass sie ihre Orientierung wechseln und sich nicht

mehr an ihre Nachbarn anpassen. Bei etwa 770 Grad Celsius gewinnt die Hitze die Oberhand, und das einst magnetische Eisen wird zu einem bloßen Stück Metall.

Fachleute untersuchen den Prozess mit einem so genannten Ising-Modell, das in den 1920er Jahren entwickelt wurde. Dazu simuliert man den Eisenblock durch ein zweidimensionales quadratisches Gitter, das aus kleinen

Pfeilen besteht. Diese übernehmen die Rolle der Miniaturmagnete und zeigen entsprechend nach oben oder unten. Auf die Weise kann man nicht nur Eisen beschreiben, sondern auch andere Metalle, die ihren Magnetismus mit steigender Temperatur verlieren. Ebenso lässt sich Luft betrachten, die von ihrem gasförmigen Zustand in einen flüssigen übergeht, oder der Wechsel zwischen Ordnung und Unordnung in Legierungen. Obwohl alle Phänomene unterschiedlich sind, ähneln sie sich in der Nähe von Phasenübergängen erstaunlich stark.

Verschieden und doch gleich

Das bewegte den russischen Physiker Alexander Poljakow 1970 zu einer gewagten Vermutung: Auch wenn die physikalischen Systeme auf mikroskopischer Ebene grundverschieden erscheinen, bergen sie zwischen zwei Phasen alle eine konforme Symmetrie. Jahrzehntelange Analysen überzeugten seine Kolleginnen und Kollegen, dass er Recht haben könnte. Doch es gelang niemandem, Poljakows Vermutung zweifelsfrei zu beweisen.

Die konforme Invarianz ist eine Form der Symmetrie, deren Transformationen winkelerhaltend sind. Sie setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen: der Translationssymmetrie (man kann einen Körper verschieben), der Rotationssymmetrie (drehen) und der Skaleninvarianz (vergrößern oder verkleinern) – all diese Veränderungen sind möglich, ohne die Winkel eines Objekts zu ändern.

Betrachtet man ein Ising-Modell weit entfernt vom Phasenübergang, wenn der Magnetismus noch intakt ist und die meisten Pfeile nach oben zeigen, gibt es keine konforme Invarianz. Denn im System existieren stets mehrere kleine Bereiche mit abwärts gerichteten Pfeilen. Vergrößert man eine solche Region, nimmt das Gitter eine völlig andere Form an als zuvor (siehe »Konforme Invarianz im Ising-Modell«).

Zwischen zwei Phasen ändert sich das Bild. Die Atome beeinflussen sich über weite Distanzen, was ihre magnetische Ausrichtung destabilisiert. Nun gibt es zahlreiche Ansammlungen,

deren Pfeile entweder nach oben oder unten zeigen. Wenn man ein solches Gitter dreht, verschiebt oder hineinbeziehungsweise herauszoomt, lässt sich kein Unterschied zum ursprünglichen Modell erkennen.

Zum Beweis dieser intuitiven Sichtweise auf die konforme Invarianz eines Systems untersuchen Fachleute die Korrelationen zwischen den Pfeilen – also die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Paar in dieselbe Richtung zeigt. Verändern sich die Korrelationen unter den konformen Transformationen des Gitters nicht, ist die Invarianz bestätigt.

Diese Symmetrie hat auch eine physikalische Bedeutung: Das globale Verhalten eines Systems verändert sich nicht, wenn man die mikroskopischen Details variiert. 2001 konnte der russische Mathematiker Stanislav Smirnow erstmals belegen, dass ein bestimmtes Gittermodell konforme

»Dieselben Muster tauchen unabhängig von den physikalischen Modellen auf«

Hugo Duminil-Copin

Invarianz besitzt. Damals untersuchte er eine Flüssigkeit, die durch ein poröses Medium fließt, etwa einen Stein. Er modellierte den Prozess durch ein Dreiecksgitter, in dem Wasser nur durch geöffnete Punkte rinnen kann.

Anfangs ist jeder Punkt mit gleicher Wahrscheinlichkeit offen. Je niedriger diese allerdings ausfällt, umso schlechter kann sich die Flüssigkeit den Weg durch den Stein bahnen. Erhöht man die Wahrscheinlichkeit hingegen, gibt es irgendwann genügend offene Punkte, um die Passage zu garantieren. Smirnov bewies, dass das Gitter in einem solchen durchlässigen Zustand invariant unter konformen Transformationen ist.

Fünf Jahre später eröffnete Smirnow auf dem Internationalen Mathematikerkongress in Madrid, eine solche Invarianz für das Ising-Modell bewiesen zu haben. Für seine bahnbrechenden Arbeiten erhielt er 2010 die Fields-Medaille, eine der höchsten Auszeichnungen in der Mathematik.

Eine verbreitete Symmetrie

In den folgenden Jahren erbrachten Fachleute ähnliche Beweise für weitere Modelle. Doch niemand konnte Poljakows Vermutung bestätigen, dass eine breite Klasse von Systemen die ungewöhnliche Eigenschaft aufweisen sollte. »Die Resultate waren immer auf bestimmte Merkmale zugeschnitten«, so Federico Camia, ein mathematischer Physiker an der New York University Abu Dhabi. »Sie nutzten extrem spezielle Methoden für ein ausgewähltes System.« Auch Smirnow hat eingeräumt, seine zwei Arbeiten seien nicht einfach auf andere Fälle übertragbar. Tatsächlich ist die neue Veröffentlichung der fünf Mathematiker die erste, die dieses Muster durchbricht. Demnach ist die Rotationsinvarianz, ein Kernmerkmal der konformen Invarianz, weit verbreitet.

Als Duminil-Copin in den späten 2000er Jahren bei Smirnow an der Universität de Genève promovierte, beschäftigte er sich erstmals mit konformen Transformationen von Gittermodellen. Damals entwickelte er ein einzigartiges Gespür für die Techniken seines Mentors – und für deren Grenzen. In den folgenden Jahren arbeitete Duminil-Copin an einer Reihe von Beweisen, die es ihm schließlich ermöglichten, über Smirnows Arbeit hinauszugehen. Dieser hatte einen Weg gefunden, um die konforme Invarianz direkt nachzuweisen, anstatt alle drei Symmetrien, aus denen sie besteht, einzeln abzuarbeiten. Damit kehrte er zu den Anfängen von Poljakows Vermutung zurück, der damals einen Beweis in drei Schritten forderte: einen für jede Symmetrie.

Zuerst widmeten sich die Mathematiker der Skaleninvarianz, denn die Translationsinvarianz wurde bereits belegt, und sie gingen davon aus, die Rotationsinvarianz sei der schwierigste

Teil. Wider Erwarten war es aber der letzte Punkt, den sie in zahlreichen Perkolationsmodellen auf quadratischen und rechteckigen Gittern ausmachten.

Die Forscher verwendeten eine Technik aus der Wahrscheinlichkeitstheorie, die es ermöglicht, das Verhalten von quadratischen Gittern mit denen rotierter rechteckiger Exemplare zu vergleichen. Sie kombinierten diesen Ansatz mit Ideen aus der Integrität, die verborgene Strukturen in Systemen untersucht. So ließ sich herleiten, dass sich alle betrachteten Gitter in der Nähe von Phasenübergängen gleich verhalten – und damit rotationsinvariant sind. Anschließend wandten sie ihren Ansatz auf andere Modelle an und erkannten so die Rotationsinvarianz tatsächlich als eine universelle Eigenschaft vieler zweidimensionaler Systeme.

Nun haben Duminil-Copin und seine Kollegen die Skaleninvarianz im Visier, ihr ursprüngliches Ziel. Weil man die erarbeiteten Methoden vielseitig einsetzen kann, blickt die Fachwelt optimistisch in die Zukunft. Von der Idee zum endgültigen Beweis brauchte ihre Arbeit allerdings fünf Jahre – die nächsten Ergebnisse könnten also noch einige Zeit auf sich warten lassen. ◀

Allison Whitten ist Wissenschaftsjournalistin in Nashville, Tennessee.

QUELLEN

Duminil-Copin, H. et al.: Rotational invariance in critical planar lattice models. ArXiv 2012.11672, 2020

Smirnov, S.: Critical percolation in the plane: conformal invariance, Cardy's formula, scaling limits. Comptes rendus de l'Académie des Sciences 333, 2001

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Mathematicians Prove Symmetry of Phase Transitions« 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.



SPRINGER'S EINWÜRFE DIE SEELE EINER FLIEGE

Auf Stress reagieren Insekten verblüffend menschlich, obwohl sie nur entfernt mit uns verwandt sind.

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

► spektrum.de/artikel/1924945

Kaum ein Lebewesen ist so gründlich erforscht wie die Schwarzbäuchige Taufliege *Drosophila melanogaster*. In der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts war sie das Lieblingsobjekt der Genetiker: lediglich vier Chromosomenpaare, leicht in Flaschen zu züchten, einfach zu kreuzen – der ideale Labororganismus.

Neuerdings dient das kleine Fluginsekt vornehmlich als probates Modell für Verhaltensexperimente. Einerseits besteht zwischen ihm und unsereinem bei allem evolutionärem Abstand große genetische Ähnlichkeit, andererseits fällt es nicht unter das Tierschutzgesetz. Fliegen werden gern lebendig an Fische und Amphibien verfüttert, also darf man sie auch ohne Skrupel Tests unterwerfen, die bei höheren Organismen als Tierquälerei verpönt wären.

Beispielsweise hat ein Team um den Neurobiologen Roland Strauss von der Universität Mainz Gruppen von Taufliegen zusammen in enge Glasröhrchen gesperrt und dort tagelang hochfrequenten Vibrationen ausgesetzt. Danach konstatierten die Forscherinnen und Forscher bei den Versuchstieren einen Zustand, den sie in ihrer Veröffentlichung von 2017 mit der menschlichen Depressionskrankheit verglichen haben. Die Insekten hörten auf, an den Glaswänden hochzuklettern, verhielten sich vielmehr völlig passiv. Außerdem verloren die Fliegen, obwohl ausgehungert, jedes Interesse an Süßigkeiten, die sie sonst gierig verzehren.

Damit nicht genug: Sobald den gestressten Insekten das beim Menschen gebräuchliche Antidepressivum Lithiumchlorid verabreicht wurde, normalisierte sich ihr Verhalten wieder; bei unabsichtlicher Überdosierung verfielen sie in manische Hyperaktivität. Wie die Forscher anmerken, werden solche Versuche vielleicht helfen, den noch immer geheimnisvollen Wirkmechanismus von Lithium bei an Depression erkrankten Menschen aufzuklären (*Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms15738, 2017).

Dem entgegengesetzten Stress unterzog zuletzt eine Gruppe um Wanhe Li und Michael W. Young von der Rockefeller University in New York einzelne Taufliegen. Das Team separierte die Testtiere bis zu einer Woche lang völlig von den Artgenossen und beobachtete die Veränderungen, die der Isolationsstress bei den normalerweise sehr sozial lebenden Insekten auslöste. Das im August 2021 publizierte Ergebnis wirkte so menschenähnlich, dass es sogar in den populären Medien kurz für Aufsehen sorgte: Die vereinsamten Taufliegen schliefen schlecht und entwickelten Heißhunger (*Nature* 597, S. 239–244, 2021).

Die Biologen haben die hirnpfysiologischen Ursachen der Verhaltensänderungen detailliert analysiert. Könnten sie letztlich damit zusammenhängen, dass sozialen Wesen in Isolation das Zeitgefühl abhanden kommt? Teamleiter Michael W. Young ist Chronobiologe; er erhielt 2017 den Nobelpreis für seine Erforschung der »inneren Uhr« bei *Drosophila*. Anscheinend gerät der biologische Zeitsinn aus dem Takt, wenn er nicht durch Rückkopplung mit dem Verhalten der Artgenossen immer wieder bestärkt wird.

Auch für Menschen ist es vielerorts normal, sich zu bestimmten Zeiten zum Essen einzufinden und bei einem Blick auf die Uhr festzustellen: höchste Zeit, schlafen zu gehen! Nicht erst durch die Vorsichtsmaßnahmen, welche die andauernde Pandemie erfordert, wurden geregelte Mahlzeiten weniger selbstverständlich. Die Arbeitswelt individualisiert sich zusehends. Statt dem Takt einer Stechuhr zu gehorchen, bleiben wir oft eben so lange auf, bis die Arbeit getan ist. Nachts sind viele Fenster hell, und dahinter sitzen Menschen vor Bildschirmen.

Einige werden dann schwer einschlafen, zu allen möglichen und unmöglichen Zeiten Snacks einwerfen oder im Dunkeln zum Kühlschrank laufen. Ja, ein bisschen fühle ich mich wie eine einsame Schwarzbäuchige Taufliege.

ZOOLOGIE DER MYSTERIÖSE DINGO

Dingos entziehen sich der zoologischen Kategorisierung. Weder domestiziert noch vollkommen wild, gehen die Nachkommen von Hunden in Australien ihre eigenen Wege.



PATTY DAVIS LAMBETH

Pat Shipman ist emeritierte Professorin für Anthropologie an der Pennsylvania State University in University Park (USA).

» [spektrum.de/artikel/1924927](https://www.spektrum.de/artikel/1924927)

GRENZGÄNGER Australische Dingos sehen zwar wie Hunde aus, erscheinen uns jedoch als mysteriöse Wesen.

▶ Dingos sind tief in der Kultur Australiens verwurzelt. In traditionellen Erzählungen der Aborigines über die so genannte Traumzeit, die von der Erschaffung der Welt und der Gesellschaft handeln, werden die Tiere oft mit Menschen gleichgesetzt, die übernatürliche Kräfte besitzen und wichtige moralische Prinzipien verkörpern. Ungeachtet ihrer kulturellen Bedeutung blieb der evolutionäre Ursprung der Dingos bis heute ein Mysterium.

Etliche Traumzeit-Geschichten sind mit spezifischen Landschaftselementen verknüpft. Eine handelt von einem alten Mann namens Ilbad, der mit seinen beiden Kindern, dem Jungen Aidjumala und dem Mädchen Maidjuminmag, im australischen Busch kampiert. Nachdem sie einen Waran gefangen und verspeist haben, legen sie sich schlafen. Doch die Kinder sind noch hungrig und kauen auf den Knochen herum, so dass sie durch das Knirschen ihren

Vater wecken. Dieser wirft schimpfend einen Stock nach ihnen. Dabei trifft er Maidjuminmags Arm und bricht ihn ihr; das Mädchen weint. Ilbad schleudert nun einen Knüppel zu Aidjumala; der Junge jault auf wie ein Hund. Die beiden Kinder laufen weg; der alte Mann kann sie nicht mehr einholen, um ihnen zu sagen, wie leid es ihm tut.

Die Kinder verwandeln sich daraufhin in Hunde (oder Dingos, wie es wohl in der ursprünglichen Fassung hieß). Unter einem großen Banyanbaum rasten sie eine Weile, gruben ein tiefes Wasserloch und wälzen sich darin. Sie verlassen den Ort und beschließen, dass das Wasserloch fortan als Quelle für Menschen, auch für ihren Vater, dienen soll.

Die Geschichte von Aidjumala und Maidjuminmag gehört zu einem Mythos, der von weiteren Abenteuern des Paares handelt. Die beiden werden zu mächtigen Gottheiten, welche die Landschaft gestalten, für lebenswichtige Wasserstellen sorgen und ihren Zorn über ihre Misshandlung mit Freundlichkeit bändigen. Auf ihren Wanderungen erschaffen sie menschliche Geschöpfe, die sie aufziehen und an verschiedenen Orten aussetzen. Sie bringen auch Welpen zur Welt, die sich an Billabongs genannten Gewässern in markante Felsen verwandeln.

Der gesamte Mythos wird vom Dualismus beherrscht: Aidjumala und Maidjuminmag erscheinen als Menschen, aber gleichzeitig als Dingos. Sie sind wütend auf ihren Vater, doch sie verzeihen ihm und lassen Wasser für ihn zurück. An der Grenze zwischen wild und domestiziert faszinieren Dingos uns noch heute; sie wirken einerseits vertraut und andererseits zutiefst geheimnisvoll.

Dingos entwickelten sich vermutlich aus Haushunden oder deren Vorläufern, die von anderswo nach Australien gebracht wurden. Wenn sich Menschen nicht mehr um deren Aufzucht und Überleben kümmern, überrascht es nicht, dass Tiere verwildern. Schließlich wird »Domestizierung« als die genetische Veränderung einer Art auf Grund von Zucht und Selektion bestimmter Merkmale durch den

AUF EINEN BLICK AUSTRALIER MIT DUNKLER VERGANGENHEIT

- 1** Die australischen Dingos ähneln äußerlich sowie in ihrem Verhalten Hunden und Wölfen. Unklar ist, ob sie direkt von Wildtieren oder von domestizierten Hunden abstammen.
- 2** Früheste Dingofossilien sind keine 4000 Jahre alt und stammen demnach aus einer Zeit, als die nach Australien führenden Landbrücken längst überflutet waren. Also müssen die Tiere den Kontinent per Boot erreicht haben.
- 3** Laut Erbgutanalysen stehen Dingos zwischen Wölfen und wolfsähnlichen Hunderassen. Zoologen streiten jedoch darüber, ob die Tiere eine eigene Spezies darstellen.



ALAMY / IMAGEBROKER / JÜRGEN & CHRISTINE SOHNS

SCHLANKE GESTALTEN Die Dingos dieses Rudels auf Phillip Island im australischen Bundesstaat Victoria haben ein sandfarbenes Fell sowie einen schlanken Körper. Geschickt klettern sie auf Bäume, Felsen oder andere Objekte und besitzen einen ungewöhnlich feinen Geruchssinn zum Aufspüren von Beute und Wasser.

Menschen definiert. Ohne unser Zutun muss daher jedes Haustier »wilder« werden. Doch im Gegensatz zu verwilderten Haushunden oder den ebenfalls in Australien vorkommenden Dingo-Hund-Mischlingen können Dingos ohne den Menschen problemlos überleben.

Für Hunde wie für Dingos sollten die Regeln der biologischen Nomenklatur gelten. Manche Wissenschaftler vertreten die Ansicht, dass Haustiere den lateinischen Namen ihrer wilden Vorfahren (falls bekannt) sowie eine Bezeichnung der Unterart tragen sollten. Nach seinem Stammvater, dem Wolf (*Canis lupus*), heißt der Haushund demzufolge *Canis lupus familiaris* (von lateinisch canis = Hund; lupus = Wolf; familiaris = vertraut). Mitunter firmiert er als eigene Art unter dem Namen *Canis familiaris*.

Falls nun jene Vertreter der Familie der Canidae, die als Erste den australischen Kontinent erreichten, niemals zuvor gezähmt worden waren, wurden sie auch nicht während ihres Zusammenlebens mit den australischen Ureinwohnern domestiziert. Denn die Aborigines haben in den Jahrtausenden, in denen die Dingos von anderen Caniden isoliert waren, deren Fortpflanzung nicht beeinflusst.

Einige der ältesten schriftlichen Aufzeichnungen über Dingos stammen von den ersten Europäern, die nach Australien kamen. Mindestens seit 1623 sind die Raubtiere in der westlichen Welt bekannt; damals erreichte der holländische Seefahrer Jan Carstenszoon mit seinem Schiff »Pera« Nordaustralien und stieß dort auf Aborigines. Die Menschen wurden von Wesen begleitet, die Carstenszoon für Hunde hielt.

1699 landete der englische Entdecker William Dampier (1651–1715) an der australischen Westküste und notierte:

»Meine Männer sahen zwei oder drei Kreaturen, die wie hungrige Wölfe aussahen, hager wie so viele Skelette, nichts als Haut und Knochen.« Auch die heutigen Dingos fallen durch ihren schmalen Rumpf auf – ihr Schädel bildet meist den breitesten Teil ihres Körpers –, und die in traditionellen Siedlungen der Aborigines lebenden Tiere erscheinen häufig recht mager. Dingos begnügen sich mit Essensresten, sie durchwühlen Abfälle nach Fressbarem oder jagen nach Beute. Zweifellos denken die meisten Menschen außerhalb Australiens, wenn sie zum ersten Mal in ihrem Leben einen Dingo sehen, genauso wie ich: Das ist ein Hund. Aber stimmt das?

Dingos kamen wie die Menschen als Eindringlinge

Als die Vorfahren der Dingos laut Fossilfunden vor vielleicht 4000 Jahren den australischen Kontinent erreichten, zählten Menschen, Fledermäuse (die wahrscheinlich dorthin geflogen waren) sowie von Schiffen geflüchtete Ratten zu den einzigen höheren Säugetieren (Placentalia) des Erdteils. Alle heimischen australischen Säugetiere waren Beuteltiere. Dingos kamen als Eindringlinge – wie die Menschen.

Sämtliche dort lebenden Plazentatiere – also Menschen, Pferde, Kamele, Füchse, Katzen und tatsächlich auch Hunde – gelangten per Boot auf den australischen Kontinent. Vor rund 125 000 Jahren, als der Meeresspiegel niedriger als heute lag, bildeten Neuguinea, das australische Festland sowie Tasmanien einschließlich diverser heutiger Inseln die zusammenhängende Landmasse Sahul. Durch Überflutung der Landbrücken entstand vor etwa 8000 Jahren zwischen Nordaustralien und Neuguinea die Torres-Straße, während bereits vor rund 12 000 Jahren Tasmanien von Südaustralien durch die Bass-Straße abgetrennt wurde. Von jeder der Inseln Südostasiens oder Ozeaniens konnte die Entfernung zum australischen Kontinent nur durch eine bis zu 100 Kilometer lange Seereise überwunden werden – zu weit zum Schwimmen für Mensch oder Hund. Die kürzeste Route hätte in den Norden oder Nordwesten Australiens oder vielleicht zum Vogelkop, einer Halbinsel vor Neuguinea, geführt. Archäologische Funde von den Inseln

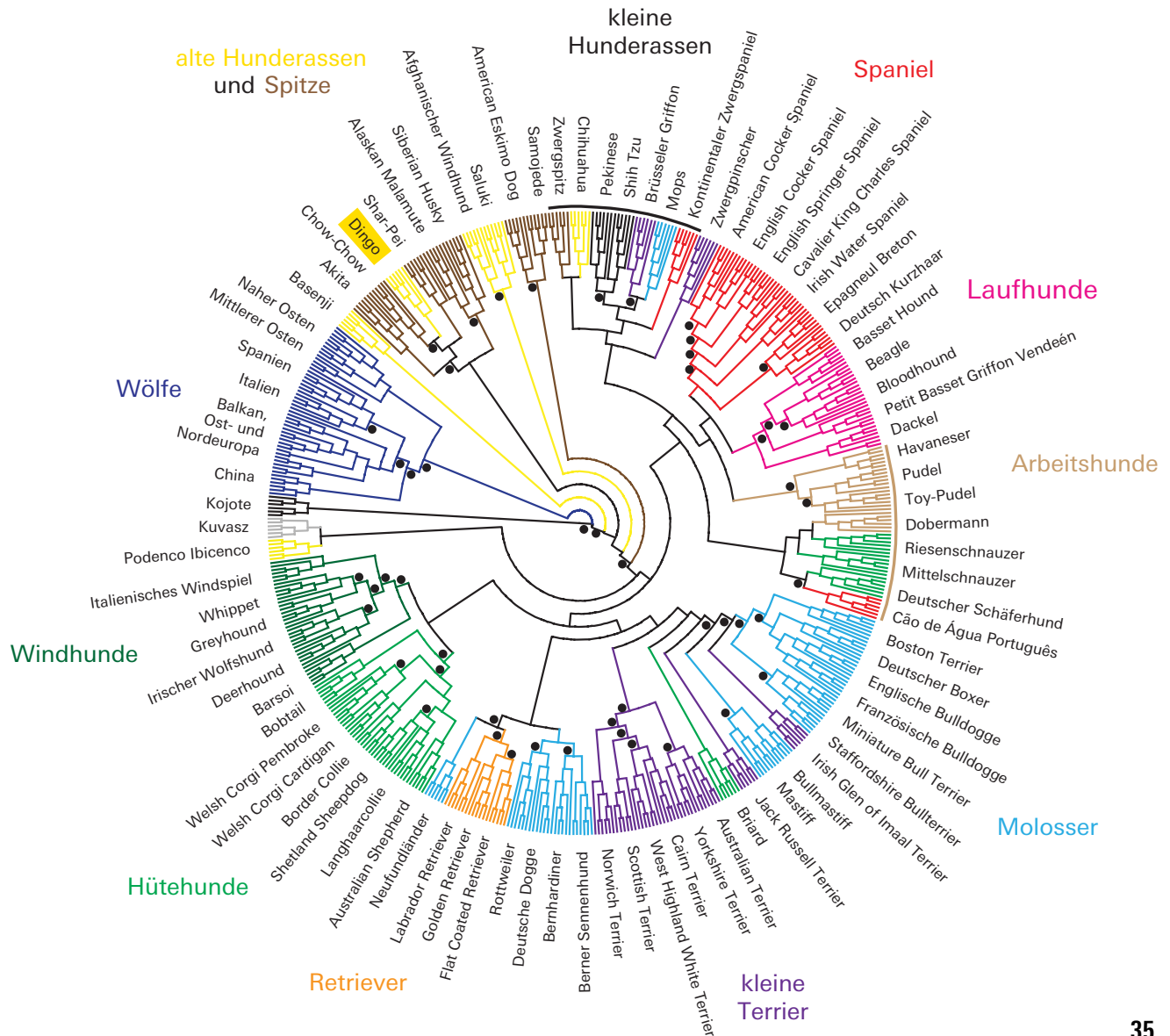
Südostasiens und Ozeaniens bestätigen, dass die dort lebenden Völker versierte Seefahrer waren, die Küsten- und sogar Hochseegewässer zu nutzen wussten. Eine Seereise hätte sie keinesfalls abgeschreckt. Boote aus Holz oder Naturfasern bleiben als archäologische Befunde nicht besonders gut erhalten, doch dafür sprechen Überreste von Angelhaken, Fischgräten, Krebsen, Muscheln, Schildkröten und gelegentlich auch Meeressäugern eine deutliche Sprache.

Laut Datierung der ältesten Fundstätte Australiens, des im Northern Territory gelegenen Madjedbebe, kam der anatomisch moderne Mensch vor ungefähr 65000 bis 55000 Jahren hier an – also noch bevor er Europa und Ostasien von seinem afrikanischen Ursprung aus eroberte. Der australische Kontinent bildete den Endpunkt der ersten größeren territorialen Ausbreitungswelle des Menschen.

Die künftigen Australier müssen daher ziemlich bald, nachdem ihre Vorfahren vor vielleicht 70000 Jahren Afrika verlassen hatten, ihre eigenen Wege gegangen sein, um einen Großteil von Südostasien samt Inseln zu durchqueren, sich dabei geschickt an das Leben am Meer anzupassen und schließlich Australien zu erreichen. Natürlich ahnten die frühzeitlichen Migranten nichts von der Existenz ihres Ziels. Auf alle Fälle führten sie keine Hunde mit sich, da sie sich bereits lange vor der Domestikation der ersten Vieheiner von anderen Menschenpopulationen getrennt hatten.

Die frühesten bekannten Nachweise von Dingos auf dem australischen Kontinent stammen aus der Madura Cave in der Nullarbor-Ebene nahe der Südküste. Eine Datierung dieser Knochen lieferte ein Alter zwischen 3348 und 3081 Jahren. Wie Jane Balme von der University of Western Australia und ihre Kollegen 2018 vermuteten, hatten die Dingos erst kurz zuvor Australien erreicht, selbst wenn der mutmaßliche Ankunftsart im Norden oder Nordwesten des Kontinents Tausende von Kilometern von der Fossilfundstelle entfernt lag. Demnach verlief die Ausbreitung der

GENETISCHER STAMMBAUM DER CANIDAE: Laut Erbgutanalysen von Hunden (Canidae) sitzen Dingos auf einem evolutionären Stammbaum zwischen Wölfen und wolfsähnlichen Hunderassen.



VON HOUTI, B. M. ET AL.: GEMEME-WIDE SNP AND HAPLOTYPE ANALYSES REVEAL A RICH HISTORY UNDERLYING DOG DOMESTICATION. NATURE 464, 2010, 116. DA: NUTZUNG GEMÄßIGT VON SPRINGER NATURE/CC BY. BEARBEITUNG: SPECTRIUM DER WISSENSCHAFT

Dingos von Nord nach Süd sehr zügig – vergleichbar mit den um 1820 eingeschleppten Katzen, die innerhalb von 70 Jahren den größten Teil Australiens eroberten, oder den echten Haushunden auf Tasmanien, die nach Ankunft der ersten europäischen Siedler zu Beginn des 19. Jahrhunderts in etwa 25 Jahren von einem Ende der Insel zum anderen gelangten.

Laut einigen Theorien über den evolutionären Ursprung der Dingos handelte es sich um Haushunde, die Seeleute von Ozeanien oder den Inseln Südostasiens mitbrachten. Aber warum sollte man einen Dingo oder dessen Vorläufer auf eine Seereise mit unbekanntem Ziel mitnehmen? Vielleicht einfach als Gesellschaft – DINGOWELPEN sind außergewöhnlich liebenswert – oder weil sie Abfälle fressen und dadurch das Lager sauber halten. Vielleicht auch, um vor Gefahren zu warnen. Dingos bellen nicht, sondern heulen. Artgenossen antworten daraufhin mit ihrem Geheul und bilden so einen gespenstischen Chor, der weithin zu hören ist. Darüber hinaus können die Tiere als nächtliche Wärmekissen und notfalls als Proviant dienen, wenngleich etliche Aborigines die Vorstellung, einen Dingo zu verspeisen, zutiefst verabscheuen. Allerdings lassen sich Dingos äußerst schwer abrichten und besitzen im Gegensatz zu Hunden kein angeborenes Verlangen, dem Menschen zu gefallen. Einige von ihnen sind daher mit ziemlicher Sicherheit davongelaufen.

Ein weiterer Punkt ist, dass es in Ozeanien oder auf den Inseln Südostasiens kaum Fossilien von Hunden oder anderen Caniden gibt, die älter als 4000 Jahre sind. Woher kamen also die Vorfahren der Dingos? Vermutlich von irgendwoher in Südost- oder Zentralasien, wie genetische Studien nahelegen, aber der endgültige Beweis steht noch

NEUGUINEA-DINGO Im Bergland von Neuguinea leben hundeartige Tiere, die Dingos auffallend ähneln. Ob es sich um eine eigene Spezies namens »*Canis hallstromi*« oder lediglich um eine besondere Hunderasse handelt, ist umstritten.



MIT FOT. GEN. VON JAMES MCINTYRE, NEW GUINEA HIGHLAND WILD DOG FOUNDATION

aus. Untersuchungen partieller Erbgutsequenzen offenbarten nur wenige Abstammungslinien mütterlicher- (mitochondriale DNA) und väterlicherseits (Y-Chromosom), was auf eine kleine Gründerpopulation hindeutet. Die ersten Studien mit vollständigen Genomen lieferten allerdings 20 Haplotypen, die sich in zwei Kladen gruppierten. Demzufolge kamen die Tiere vermutlich in mehreren Wellen ins Land. Ähnliche Haplotypen lassen sich bei rezenten frei lebenden Hunden in Asien nachweisen. Erschwerend kommt hinzu, dass Haushunde sich äußerst eifrig mit Dingos paaren (und auch mit Wölfen, Kojoten, Schakalen oder Füchsen). Anhand einer Kombination von Mikrosatelliten-DNA lässt sich zwar bei jedem Individuum der Hybridisierungsgrad bestimmen, doch es existiert kein Merkmal, das eindeutig die Frage klärt: Dingo oder Haushund?

Angepasst an eine neue Umwelt

Isoliert auf einem Kontinent ohne andere Caniden, passten sich die Vorfahren der Dingos durch Lernen sowie in Körperbau und Verhalten an ihre neue Umwelt an. Im Gegensatz zu Haushunden pflanzen sich Dingos wie Wölfe nur einmal im Jahr fort. Sie besitzen einen selbst für Caniden ungewöhnlich feinen Geruchs- und Gehörsinn, was sich beim Aufspüren von Kleinwild oder unterirdischen Wasservorkommen als nützlich erweist – auf einem ariden Kontinent mit seltenen und nicht vorhersehbaren Regenfällen ein überlebenswichtiger Vorteil. Dingos sind zudem versierte Kletterer, die mühelos Bäume, Felsen, Zäune oder andere Objekte erklimmen, und sie mögen hoch gelegene Aussichtspunkte. Da sie ihre Schultern und Pfoten flexibler als Hunde oder Wölfe einsetzen, können Dingos äußerst clever Riegel, Türen oder andere Vorrichtungen öffnen, die ihnen eigentlich den Zutritt verwehren sollen.

Menschen, die sich Dingos als Haustiere halten, vergleichen diese nicht selten mit Entfesselungskünstlern, die sich intelligent jedem Dressurversuch entziehen. Darren Griffiths und Leigh Mullan von der Western Australian Dingo Association besitzen gleich fünf davon und beschreiben das Zusammenleben mit der Meute so, »als hätte man fünf hyperaktive Kinder, die im Haus herumrennen«. Sie können ihre Hausgenossen nie alleinlassen, da die Tiere sonst aus Angst alles Erreichbare wie Möbel, Haushaltsgeräte, Türen oder Fenster zerstören. Jede Veränderung im Haus, sogar das An- oder Abschalten eines Deckenventilators, setzt die Dingos unter Stress. Einer der beiden Besitzer muss ständig bei den Tieren bleiben, und wenn sie verreisen, fahren alle zusammen in einem speziell ausgestatteten Kleinbus. Eine Haltung im Zwinger bekommt Dingos nicht gut; und Versuche, ihnen ein neues Zuhause zu geben, scheitern in der Regel. Griffiths' und Mullans Berichte erinnern an die Bemerkungen des Verhaltensforschers Konrad Lorenz (1903–1989), der seine Erfahrungen im Buch »So kam der Mensch auf den Hund« wie folgt schilderte: »So brachte mir denn jener Dingo wohl die herzlichen Gefühle entgegen, die ein solches Tier in erwachsenem Zustande einem anderen entgegenbringt, nur gehörten eben die der Unterwürfigkeit und des Gehorsams nicht dazu.«

Besonders viel sagend ist die Tatsache, dass man das älteste australische Dingo-Exemplar in einer Grabstätte ge-



ALAMY / PENNY TWEDIE

TRAUMZEIT-DINGO In den Traumzeit-Mythen australischer Ureinwohner verkörpern Dingos häufig übernatürliche Wesen, die an der Grenze zwischen Mensch und Tier existieren. An einer heiligen Wasserstelle im Arnhemland, einem Siedlungsgebiet der Aborigines im australischen Northern Territory, zeigt der Künstler Tony Bangalang sein Gemälde eines legendären Dingos.

funden hat – Dingos sind die einzigen Tiere, die regelmäßig von den australischen Ureinwohnern bestattet wurden. Manche Dingo-Gräber weisen deutliche Parallelen zu solchen von Menschen auf, etwa in Bezug auf die Lage der Grabstelle, das Einwickeln des Körpers in Baumrinde sowie die sorgfältige Platzierung von Steinen, um Störungen zu verhindern. Und wie bei Menschen waren die Knochen der Dingos in einigen Gräbern mit Ocker bemalt.

Unter Archäologen gilt die Bestattung von Hunden als eines der aufschlussreichsten Anzeichen dafür, dass die Vierbeiner einen fast menschlichen Status erlangt hatten und domestiziert waren. Vor 14 000 bis 12 000 Jahren, also lange bevor Dingos Australien erreichten, gab es Hundegräber und sogar spezielle Hundefriedhöfe in vielen Regionen Asiens, Europas, des Nahen Ostens sowie auf dem amerikanischen Kontinent. Dennoch – und hier liegt das Dilemma – hielten die australischen Ureinwohner Dingos nicht in einer Art und Weise, die eine Domestikation gestattet hätte. Da sie die Fortpflanzung der Tiere nicht kontrollierten, verzichteten sie auf eine bewusste Förderung wünschenswerter Merkmale. Dingos waren zwar etwas Besonderes, aber nicht domestiziert.

Ein Aspekt, der die Arbeit von Zoologen auf diesem Gebiet so kompliziert macht, ist der Umstand, dass der Artname *Canis dingo* (oder als Unterart *Canis lupus dingo*) auf den deutschen Zoologen Friedrich Meyer (1768–1795) zurückgeht, der niemals einen Dingo gesehen hatte. Er beschrieb 1793 die Tiere ausschließlich anhand von Skizzen, Gemälden und kurzen Schilderungen in den Aufzeichnungen von Seefahrern. Mittlerweile legt jedoch ein erlauchter Kreis aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die

Standards zur offiziellen Benennung einer neuen Art fest: die Internationale Kommission für Zoologische Nomenklatur. Zu den zahlreichen spezifischen Anforderungen zählen heutzutage eine detaillierte anatomische Beschreibung sowie ein »Typusexemplar« – ein konservierter Organismus, der den ausgewählten Namen für immer trägt und die Art verkörpert, so dass damit jeder potenzielle Vertreter dieser Spezies verglichen werden kann. Weil es einen solchen Standard 1793 noch nicht gab, existiert für den Dingo auch kein Typusexemplar. Es lässt sich daher nicht mehr feststellen, was ein Dingo eigentlich ist beziehungsweise war – selbst nicht mit Hilfe genetischer Testverfahren, da jedes Genom mit einem Individuum abgeglichen werden müsste, das womöglich eine Hybride ist.

Die Selektion durch Züchter verkompliziert die Genetik bei domestizierten Hunden, denn sie erzeugt Merkmale, die sich natürlicherweise nicht zwangsläufig herausbildeten. Werden sie nicht gemäß Rassestandards vermehrt, kann sich die stark verkürzte Schnauze von Pekinesen nach nur wenigen Generationen verlängern, und ihre großen Augen sowie das lange, flauschige Fell dürften sich ebenfalls wandeln. In ähnlicher Weise bringt ein lang gestreckter, geschmeidiger Afghanischer Windhund mit tiefem Brustkorb ohne selektive Züchtung vielleicht gedrungenerer Nachkommen hervor. Aber genau diese Charakteristika sind es ja, die Liebhaber so schätzen. Hunderassen sind im Wesentlichen während der letzten 200 Jahre in Europa entwickelt worden. Einen ganz gewöhnlichen Hund – nennen wir ihn »Standardhund« – sehen wir nur bei Individuen, die sich eigenständig fortpflanzen und eine Mischung aus zahlreichen Rassen und gelegentlich auch einheimischen, wild lebenden Individuen bilden. Diese etwas ungepflegten, an vielen Orten der Erde anzutreffenden Promenademischungen werden oft als Pariahunde bezeichnet. Sie sind auf Fütterung durch den Menschen angewiesen und ähneln trotz eines mehr oder weniger beliebigen Äußeren selten den Extremformen von Rassezüchtungen: Es handelt sich weder um zierliche Chihuahuas noch um hochgewachsene Greyhounds oder wollige Pudel.

Weder häuslich noch wild

Faszinierend ist die starke Ähnlichkeit zwischen einigen asiatischen Pariahunden und Dingos, was manche als einen Hinweis auf die Abstammung von Letzteren werten. Mehr als alle anderen mir bekannten Caniden sehen die seltenen »Neuguinea-Dingos« (New Guinea Singing Dogs) wie Dingos aus. Mit Letzteren haben sie das Heulen und einige Wesensmerkmale gemeinsam, wie etwa den Widerwillen dagegen, abgerichtet oder eingesperrt zu werden. Vielleicht stammen die Neuguinea-Dingos von Pariahunden ab, die nicht mehr mit Menschen zusammenlebten und sich als Folge von geringen Populationsgrößen und Inzucht genetisch differenzierten.

Dingos nahmen offenbar schon immer einen besonderen Platz ein: dem Menschen nah, aber weder völlig zahm noch wild. Vor und zu Beginn der europäischen Kolonialisierung Australiens verbrachten die Raubtiere oft zumindest einen Teil ihres Lebens in traditionellen Siedlungen der Aborigines. Alte Ethnografien berichten davon, wie austra-

lische Ureinwohner Welpen aus den Wurfhöhlen nahmen und als Haustiere bei sich aufzogen. Waren die täglichen Wanderungen zu anstrengend oder das Gelände zu unwegsam für die kleinen Füßchen, schlangen sich die Frauen ihre Tiere manchmal wie einen Fellgürtel um ihre Taille. Gelegentlich stillten sie die Welpen sogar, befreiten sie von Flöhen, küssten, fütterten und umsorgten sie. Sobald die Dingos heranwachsen und allmählich lästig wurden, weil sie zu viel Proviant stibitzten, Gegenstände zerstörten oder sich einfach zu ungestüm aufführten, jagte man sie nicht selten aus dem Lager, so dass sie eigene Reviere gründeten und Nachwuchs zeugten. Einigen Darstellungen zufolge hatten Frauen und Kinder fast immer Dingos dabei, wenn sie loszogen, um Nahrung zu suchen. Dingos galten als Schutz gegen böse Geister, wilde Tiere oder feindlich gesinnte Fremde; darüber hinaus halfen sie beim Aufspüren von Kleinwild. Strittig ist, ob sie außerdem die Männer bei der Kängurujagd unterstützten. In den Geschichten über die Traumzeit konnte ein Dingo als Canide oder als Mensch auftreten – abwechselnd und manchmal auch gleichzeitig.



GRIGORITA KO / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/hunde-und-katzen

Weiteren Aufschluss über die Herkunft der Dingos liefert die Genetik. Interessanterweise verfügen sie ähnlich wie die meisten Wölfe lediglich über zwei Kopien des Gens *AMY2B* für das Enzym Amylase, das für eine effiziente Verdauung von Stärke sorgt. Nahezu alle Hunde weisen dagegen mehr als zwei Kopien auf – ein Hinweis, dass die Raubtiere erst nach dem Beginn der Landwirtschaft domestiziert wurden, als stärkehaltige Nahrung in größerem Umfang zur Verfügung stand. Man fand jedoch noch keinen über 7000 Jahre alten prähistorischen Caniden, der in seinem Erbgut das für die Amylase im Speichel codierende Gen *AMY1B* trägt. Dagegen besitzen fast alle Haushundrassen mehrere Kopien dieses Gens; eine Ausnahme stellt der Siberian Husky dar, der im Lauf der Geschichte mit Menschen zusammenlebte, die kaum Landwirtschaft betrieben. Beim Menschen ließ sich eine Mutation zu Gunsten mehrerer Kopien des Gens *AMY1B* bei Angehörigen von Agrarvölkern nachweisen, während Jäger und Sammler, Neandertaler oder Denisovaner, die ohne Landwirtschaft auskamen, nur wenige solcher Genkopien besaßen.

Waren Dingos oder ihre Vorfahren jemals domestiziert? Was genetische Merkmale und Verhaltenseigenschaften betrifft, stehen die Tiere zwischen Wölfen und Hunden. Analysen von vollständigen Genome ordnen Dingos übereinstimmend zwischen Wölfen und wolfsähnlichen Hunderrassen ein (siehe »Genetischer Stammbaum der Canidae«, S. 35). Gleiches trifft auf weniger konkrete Merkmale zu.

Verhaltensuntersuchungen, die im Rahmen von Ádám Miklósis renommiertem Hundeforschungsprojekt in Budapest durchgeführt wurden, verdeutlichen die Unterschiede zwischen wilden Caniden und domestizierten Hunden anhand ihres Verhältnisses zum Menschen: Anders als Wölfe zeigen sich Hunde außerordentlich geschickt darin, aus menschlichen Gesten wie Handzeichen oder einer Änderung der Blickrichtung die zu Grunde liegenden Absichten zu interpretieren. Stehen die Vierbeiner einem unlösbaren Problem gegenüber, schauen sie ihr Herrchen Hilfe suchend an. Wölfe, die wie Hunde in menschlicher Obhut aufwachsen, tun das nicht. Dingos suchen öfter und länger den Blickkontakt mit Menschen als Wölfe, doch sie bitten Menschen nicht so schnell und beharrlich um Hilfe wie Hunde. Von Hand aufgezogene Wölfe können ihrer menschlichen Familie zwar durchaus zugetan sein, nehmen aber weitaus weniger eifrig als Hunde Kontakt zu fremden Personen auf.

Die Arbeitsgruppe von Bridgett vonHoldt von der Princeton University stieß 2018 im Erbgut von Hunden auf eine interessante Parallele zum Williams-Beuren-Syndrom beim Menschen. Bei dieser Erkrankung sind über 20 Gene betroffen, die entweder fehlen oder stillgelegt sind. Die Patienten gelten im Allgemeinen als extrem kontaktfreudig und gesellig; sie zeichnen sich durch charakteristische Gesichtszüge aus, sind oft kleinwüchsig und haben Herz-Kreislauf-Probleme sowie kognitive Störungen. Laut vonHoldts Studien sind bei Hunden drei dieser Gene durch Insertionen blockiert, während die entsprechenden Regionen bei Wölfen normal funktionieren. Der Unterschied führte möglicherweise dazu, dass Hunde ihre Angst und Aggressivität gegenüber Menschen verloren, und förderte wohl ihr freundliches Wesen, was wiederum ihre Domestikation erleichterte. Soweit mir bekannt ist, hat noch niemand diese Erbfaktoren bei Dingos untersucht; vielleicht sind bei ihnen nicht alle drei Gene blockiert. Womöglich bewirkt dieser genetische Unterschied die im Vergleich zu Wölfen und Hunden intermediäre Toleranz von Dingos gegenüber Menschen, auch wenn die Tiere nach wie vor ängstlich auf Veränderungen reagieren.

Bereits Charles Darwin (1809–1882), der Anfang 1836 Australien besuchte, hatte das ambivalente Wesen der Dingos erkannt. 1868 schrieb der Naturforscher: »In Australien ist der Dingo sowohl domestiziert als auch wild.« Andere prominente Denker betrachten Domestikation als einen Prozess. Dingos offenbaren uns davon wohl eine Etappe. ◀

QUELLEN

Shipman, P.: What the dingo says about dog domestication. *Anatomical Record* 304, 2021

Smith, B. P. et al.: Taxonomic status of the Australian dingo: The case for *Canis dingo* Meyer, 1793. *Zootaxa* 4564, 2019

AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

Bewegende Geschichte, spannende Zukunft.



Geschichte, echt spannend.



Neugierig auf morgen.

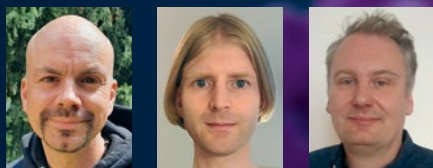
P.M. Jetzt im Handel.

SCHELLER SCHLAU –
ein Podcast von P.M.
Jetzt bei Audio Now und überall
wo es Podcasts gibt.



ARZNEIMITTELENTWICKLUNG NEUE MEDIKAMENTE DANK SUPERCOMPUTERN

Die aktuelle Pandemie verdeutlicht, wie wichtig es ist, rasch geeignete Arzneimittel zu finden. In Computersimulationen gelingt das erheblich schneller als im Labor. Gegen das Coronavirus ließen sich auf diese Weise bereits Wirkstoffkandidaten identifizieren.



Der Mathematiker **Konstantin Fackeldey** (links) lehrt als Privatdozent an der TU Berlin und arbeitet am Zuse-Institut Berlin (ZIB) an der Entwicklung mathematischer Methoden zur Simulation von Biomolekülen. **Christoph Gorgulla** (Mitte) ist Experte für computer-gestützte und quantenchemische Methoden zur Wirkstoffentwicklung. Er forscht an der Harvard Medical School und am Institut für Physik der Harvard University, Cambridge, USA. **Marcus Weber** leitet die Arbeitsgruppe »Computational Molecular Design« am Zuse-Institut Berlin. Er untersucht die Optimierung und das Design mathematischer Methoden für den Wirkstoffentwurf. Die Autoren bedanken sich bei der Biologin Brigitte Klein für die Überarbeitung des Artikels.

» spektrum.de/artikel/1924930

SERIE

Von der Molekülstruktur zum Medikament

Teil 1: Oktober 2021

Das Geheimnis der Proteinfaltung

Gunnar Schröder

Teil 2: November 2021

Neue Medikamente dank Supercomputern

Konstantin Fackeldey, Christoph Gorgulla
und Marcus Weber

Teil 3: Dezember 2021

Wirkstoffe der Zukunft

Rowan Jacobsen

**LANGWIERIGES AUSWAHL-
VERFAHREN** Wirkstoffe in
Medikamenten müssen
passgenau an Strukturen des
Krankheitserregers andocken.
Geeignete Kandidaten für
diese Aufgabe zu finden, ist
extrem aufwändig.

AUF EINEN BLICK ALGORITHMEN SPÜREN WIRKSTOFFE AUF

- 1** Viele Medikamente enthalten Substanzen, die passgenau an Eiweißmoleküle eines Erregers andocken und so den Krankheitsverlauf abmildern oder sogar stoppen können.
- 2** Traditionell fahnden Forschende im Labor mit langwierigen Experimenten nach derartigen Wirkstoffen. Dieser Prozess kann sich über mehrere Jahre hinziehen.
- 3** Das von den Autoren entwickelte und eingesetzte Programm »VirtualFlow« verlagert die Suche ins Virtuelle. Hochleistungsrechnern gelingt es damit, mehrere Millionen Moleküle pro Stunde zu testen.

► Binnen kurzer Zeit hat ein Virus die Welt aus den Angeln gehoben – und die Wissenschaft zu Höchstleistungen angespornt. Im Eiltempo gelang es Forschenden, mehrere effektive Impfstoffe gegen Covid-19 zu entwickeln. Was Medikamente anbelangt, waren sie allerdings weniger erfolgreich. Das liegt größtenteils daran, dass die Arzneimittelentwicklung ein sehr langwieriger Prozess ist. Von der Idee bis zur Zulassung dauert es im Durchschnitt mehr als 13 Jahre. Um diesen Prozess zu beschleunigen, sind daher dringend neue Ansätze und Techniken gefragt.

Bei Infektionskrankheiten gilt es zunächst zu entschlüsseln, wie der Erreger aufgebaut ist und wie er sich im menschlichen Körper vermehrt. Beim Coronavirus ist das mittlerweile gelungen (siehe »Die Zelle kapern«). Ziel der Forscher ist es nun, Wirkstoffe zu finden, die das Virus entweder direkt eliminieren oder seine Vermehrungstaktik entscheidend stören. Funktionieren könnte das beispielsweise mit Molekülen, die an geeignete Angriffspunkte auf der Virusoberfläche andocken. Bei Letzteren handelt es sich in der Regel um Proteine, also Eiweißmoleküle, die sowohl von Viren und Bakterien als auch von körpereigenen Zellen als Werkzeuge genutzt werden.

Etlche Medikamente basieren auf diesem Prinzip: Die darin enthaltenen Wirkstoffmoleküle binden an bestimmte Proteine, um sie entweder zu blockieren oder aber zu stimulieren – je nachdem, welcher Effekt erzielt werden soll. Das Coronavirus nutzt ein so genanntes Spike-Protein auf seiner Oberfläche, um damit an die Körperzellen anzudocken und in sie einzudringen. Ein passendes Molekül könnte diesen Mechanismus unterbinden, indem es sich an das Spike-Protein heftet und dieses dadurch seiner Funktion beraubt.

Die Suche nach derartigen Wirkstoffkandidaten zieht sich aber häufig ziemlich in die Länge. In aufwändigen Versuchen müssen unzählige Moleküle auf ihre Passgenauigkeit untersucht und die dadurch vermittelte Wirkung

geprüft werden. In diesem Kontext sprechen Biologen vom »Schlüssel-Schloss-Prinzip«. Es geht zurück auf den deutschen Chemiker Emil Fischer, der es im Jahr 1894 erstmals formulierte (siehe »Schlüssel-Schloss-Prinzip«). Gemeint ist, dass ein Molekül präzise in eine molekulare Bindungstasche passt. Der Schlüssel heißt im Fachjargon Ligand, und die Tasche ist üblicherweise ein Protein oder Proteinkomplex. Findet eine Bindung statt, auch Docking genannt, entfaltet der Ligand seine Wirkung. Auf Grund des zeitintensiven Suchprozesses waren es zu Beginn der modernen Medizin in der Regel Zufälle, die zur Entdeckung passender Docking-Kombinationen führten – und schlussendlich zur Entwicklung neuer Arzneimittel.

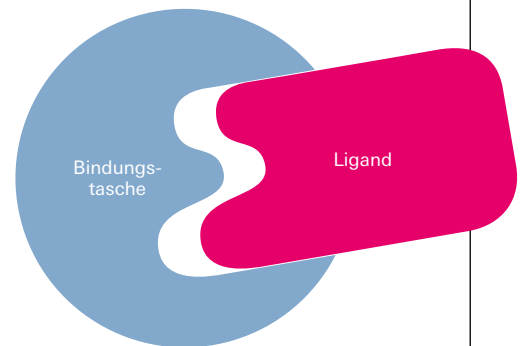
In den 1970er Jahren begannen Chemiker und Mediziner dann, systematisch möglichst viele Stoffe auf ihre Passgenauigkeit zu bestimmten Proteinen zu testen. Beschleunigt wurde die Suche schließlich in den 1990er Jahren durch automatisierte Hochdurchsatz-Screening-Methoden. Dabei prüft ein Robotersystem eine Vielzahl an Liganden. Indem man bereits vorab ungeeignete aussortiert, lässt sich zusätzlich Zeit sparen. Denn wie bei echten Schlüsseln – Haustürschlüssel sind zum Beispiel anders geformt als Autoschlüssel – lassen sich auch molekulare Schlüssel bestimmten Kategorien zuordnen. Und je nach Art der Bindungstasche kommt dann nur eine ganz bestimmte Sorte in Frage. Doch selbst eine solche prozessoptimierte Fahndung führt oftmals nicht oder nur nach viel Arbeit zum Erfolg.

Deutlich rascher geht es dagegen mit Hilfe eines so genannten virtuellen Screenings, bei dem die Laborexperimente entfallen. Stattdessen durchforstet ein Programm digitale Moleküldatenbanken nach Wirkstoffkandidaten, die in ein zu untersuchendes Schloss passen. Die Simulationen werden nicht nur für unterschiedliche Orientierungen der Moleküle im Raum durchgeführt, sondern auch für verschieden geformte Zustände. Folgerichtig müssen für eine

Schlüssel-Schloss-Prinzip

Der deutsche Chemiker Emil Fischer führte im Jahr 1894 das Schlüssel-Schloss-Prinzip ein, das auch heute noch benutzt wird, um die Koppelung eines Moleküls (Ligand) an eine Bindungstasche eines Proteins oder Proteinkomplexes zu beschreiben: »Um ein Bild zu gebrauchen, will ich sagen, dass Enzym und Glucosid wie Schloss und Schlüssel zueinander passen müssen, um eine chemische Wirkung aufeinander ausüben zu können.« 1954 stellte dann der amerikanische Biochemiker Daniel E. Koshland das

so genannte »Induced-Fit«-Modell vor. Es besagt, dass sich die Bindungstasche des Proteins an den Liganden anpasst, weshalb man im Deutschen auch von einem Handschuh-Hand-Modell spricht. Nach dem »Conformational Selection«-Modell des französischen Molekularbiologen Jacques Monod von 1964 nimmt die Bindungstasche unterschiedliche Formen an, während der Ligand sich dann die beste Form aussucht. Wenn ein kleines Molekül an eine Bindungstasche des Proteins bin-

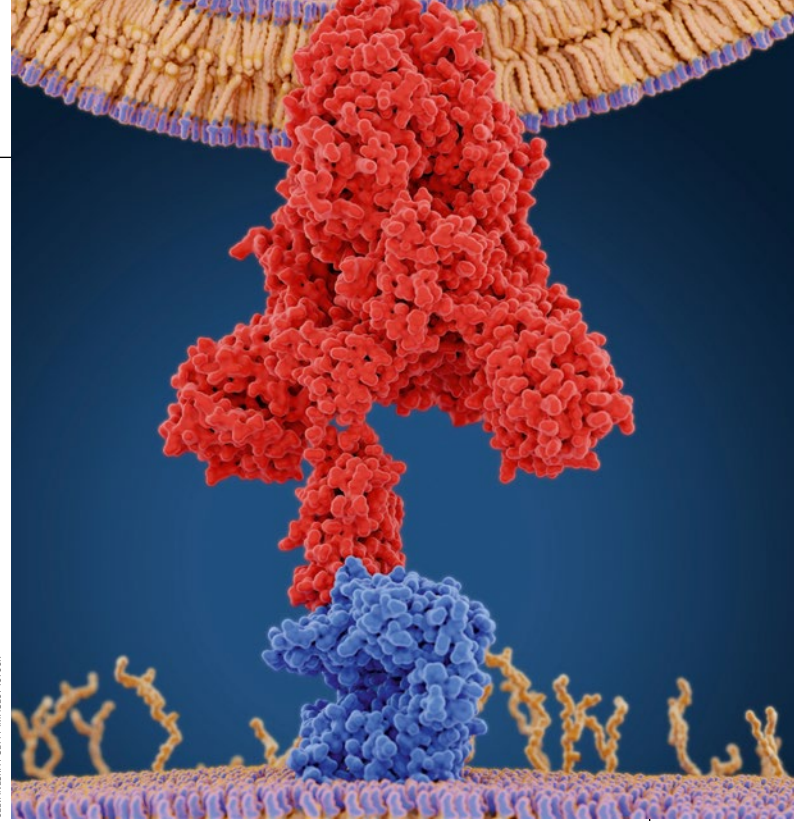


det und es dadurch an einer anderen Stelle verformt, spricht man vom allosterischen Effekt. Inzwischen ist bekannt, dass sich teilweise auch die Schlüssel flexibel anpassen.

Die Zelle kapern

Jedes Virus verfolgt das Ziel, in das Innere einer Wirtszelle zu gelangen und sich dort zu vermehren. Dabei sind stets unterschiedliche Proteine involviert – das Coronavirus besitzt 29 Arten. Mit einem davon, dem Spike-Protein (rot), heftet es sich an den ACE2-Rezeptor (blau) auf der Oberfläche der Wirtszelle und gelangt so ins Zellinnere, wo es seinen Bauplan in Form von RNA entpackt. Die Zelle fängt infolgedessen an, Komponenten für neue Viren herzustellen. So genannte Nukleokapsid-Proteine helfen, die neuen Viren zusammenzufügen. Diese treten anschließend aus der Zelle aus, und der Ablauf beginnt von vorne. Um diese Vermehrungsstrategie zu stören, suchen Forscher nach passenden Molekülen, die an beteiligte Proteine – etwa das Spike-Protein – binden und sie dadurch ihrer Funktion berauben. Der so beschriebene Wirkmechanismus könnte die Grundlage für ein Medikament gegen Covid-19 sein.

SEWANNERA / GETTY IMAGES / ISTOCK



einzigste Schlüssel-Schloss-Paarung sehr viele Kombinationen ausprobiert werden. Außerdem gilt: Je mehr Liganden man überprüft, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, einen passenden zu finden.

Dieser Prozess ist sehr rechenintensiv, schon allein wegen der Anzahl der Moleküle, die als potenzielle Wirkstoffe in Frage kommen. Gesucht wird eine organische Verbindung, die hauptsächlich aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) besteht.

Die Menge aller Kandidaten, auf die diese Kriterien zutreffen, beziffern Fachleute auf die unvorstellbar große Zahl von mehr als 10^{60} . Zum Vergleich: Unser Planet Erde enthält schätzungsweise rund 10^{50} Atome. Es ist also un schwer zu erkennen, dass sich niemals alle potenziellen Liganden untersuchen, geschweige denn herstellen lassen.

Die Zeit für die Berechnung einer typischen Docking-Prozedur eines Moleküls an ein Protein hängt von etlichen Faktoren ab: darunter von Software, Hardware, Einstellungsparametern und dem Aufbau der individuellen Liganden. Die Zeit, die eine Rechereinheit (englisch: central processing unit, kurz CPU) für die Aufgabe benötigt, variiert daher zwischen fünf Sekunden und fünf Minuten. Bei einem optimierten System mit einer durchschnittlichen Rechenzeit von zehn Sekunden für einen Passungstest wäre eine einzelne CPU in der Lage, pro Tag knapp 9000 Liganden zu überprüfen. Natürlich ist die virtuelle Suche nicht begrenzt auf eine einzige CPU. Allerdings fehlte bislang die richtige Software, die »ultragroße« Moleküldatenbanken mit mehr als 100 Millionen Liganden selbstständig und effizient durchforsten kann.

Vor ungefähr sechs Jahren begannen wir daher mit der Entwicklung einer vielseitigen Open-Source-Plattform namens VirtualFlow. 2020 stellten wir das fertige Werk in der Fachzeitschrift »Nature« vor. Im Grunde besteht unser

Programm aus zwei Modulen: VirtualFlow for Ligand Preparation (VFLP) und VirtualFlow for Virtual Screening (VFVS) (siehe »Die Screening-Plattform VirtualFlow«). VFLP bereitet zunächst Milliarden von Molekülen für das Screening vor. Das Modul unterstützt dabei ungefähr 100 verschiedene chemische Dateiformate, in denen die aufbereiteten Liganden gespeichert werden können. Ist eine Datenbank von VFLP einmal erstellt, kann VFVS damit beliebig viele Proteine testen. Identifiziert VirtualFlow passende Liganden, kann man das Schlüssel-Schloss-Paar durch Laborexperimente verifizieren. So erhält der Anwender am Ende ein oder mehrere potenzielle Wirkstoffmoleküle.

Das Programm lässt sich auf Supercomputern und anderen Hochleistungsrechnern wie der Google Cloud Plattform ausführen. Solche Systeme stellen sehr viele CPUs zur Verfügung und können daher zahlreiche Aufgaben parallel bewältigen. Ein großer Vorteil von VirtualFlow ist, dass es linear mit der Anzahl der verwendeten CPUs skaliert. Das bedeutet: Verdoppelt man die Menge der verwendeten CPUs, lassen sich auch doppelt so viele Moleküle pro Stunde testen. In der Praxis ist solch eine Verfahrensweise aber meist nur schwer umzusetzen. Und zwar, weil man normalerweise die Prozesse, die parallel auf den unterschiedlichen CPUs ausgeführt werden, aufeinander abstimmen muss. Dazu sind Koordination und Kommunikation zwischen den Einheiten notwendig, was wiederum Ressourcen kostet und letztlich den Rechenprozess erheblich verlangsamt.

Bei VirtualFlow entfällt diese Abstimmung jedoch, stattdessen wird jedem Prozess – in der Regel einer pro CPU – zu Beginn eine feste Anzahl an zu testenden Liganden zugeordnet. Sobald eine Aufgabe beendet ist, startet eine neue. Die Prozesse sind also voneinander unabhängig, und verschiedene CPUs müssen nicht miteinander kommunizie-

ren. Experten sprechen von einem so genannten Aufgabenlisten-Ansatz. Dank diesem skaliert unser Programm vollkommen linear. In Zahlen bedeutet das: Beim Einsatz von 100000 CPUs kann VirtualFlow eine Milliarde Liganden in rund 30 Stunden testen, wie wir in der »Nature«-Publikation gezeigt haben. In der Google Cloud lief unser Programm bereits erfolgreich mit bis zu 160000 CPUs. Damit lassen sich in der gleichen Zeit zwei bis drei Größenordnungen mehr Moleküle testen als mit bisherigen Ansätzen.

Beim Coronavirus suchten wir mittels VirtualFlow nach Liganden für 40 verschiedene Bindungsstellen an 15 der 29 bekannten Sars-CoV-2-Proteine und an 2 menschlichen Proteinen, die das Virus verwendet. Die Hoffnung ist, dass darunter Kandidaten sind, die durch Kopplung eine Replikation des Virus unterbinden können. Der Suchmaschinenkonzern Google stellte uns dafür rund 100 Millionen CPU-Stunden in seiner Cloud zur Verfügung. So war es möglich, innerhalb weniger Wochen für alle 40 Bindungsstellen ein oder mehrere virtuelle Screenings durchzuführen und

jeweils mehr als eine Milliarde Liganden zu testen. Für alle untersuchten Bindungsstellen fanden wir viel versprechende Moleküle.

Sie sind nun unter <https://vf4covid19.hms.harvard.edu> frei zugänglich. Dort kann sich jeder umfassende Ligandenlisten herunterladen und diejenigen 1000 Moleküle erforschen, die am besten passen. In einer interaktiven dreidimensionalen Ansicht lässt sich etwa nachvollziehen, wie das Molekül an das Protein bindet. Kolleginnen und Kollegen an der Harvard Medical School in Boston und an den National Emerging Infectious Diseases Laboratories (NEIDL), einer biowissenschaftlichen Einrichtung der Boston University, experimentieren bereits mit den von uns gefundenen Kandidaten. Wir hoffen sehr, dass inzwischen weitere Forschungsgruppen auf Basis unserer Ergebnisse eigene Tests und Versuche durchführen.

Parallel zur Entwicklung von VirtualFlow vermeldete das Unternehmen DeepMind von Google im Herbst 2020 einen wichtigen Fortschritt im Bereich der Molekularbiologie:

Wie kommen die Moleküle in den Rechner?

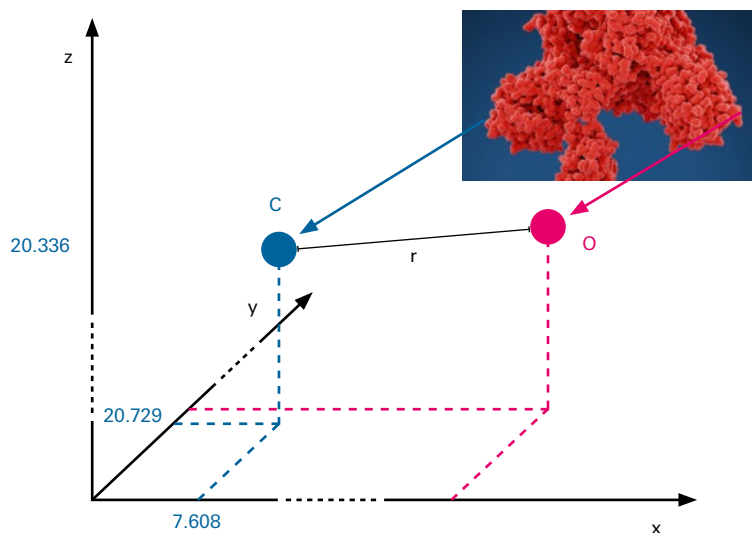
Um mit Wirkstoffmolekülen und Zielproteinen virtuell arbeiten zu können, benötigt man ein mathematisches Modell dieser Objekte, das sich als digitales Format abspeichern lässt. Ein häufig verwendetes Format ist dabei das so genannte »PDB-Format«, das bereits 1976 entwickelt wurde. Proteine sind, wie auch die Wirkstoffmoleküle, aus einer Vielzahl von Atomen aufgebaut. Jedes einzelne Atom wird im PDB-Dateiformat über Buchstaben und Zahlen charakterisiert – zum Beispiel folgendermaßen:

```
»ATOM 2 CA PRO A 1 7.608
20.729 20.336 1.00 17.44 C«
```

Das »C« am Ende der Zeile steht für Kohlenstoffatom. Die Text-Einträge beschreiben gewissermaßen die Rolle des C-Atoms innerhalb des Proteins. So kann man ablesen, dass es um das »2«-te Atom geht. »CA« besagt, dass es sich um einen so genannten Alpha-Kohlenstoff handelt, der bestimmte chemisch-physikalische Eigenschaften aufweist. Das Kohlenstoffatom wiederum

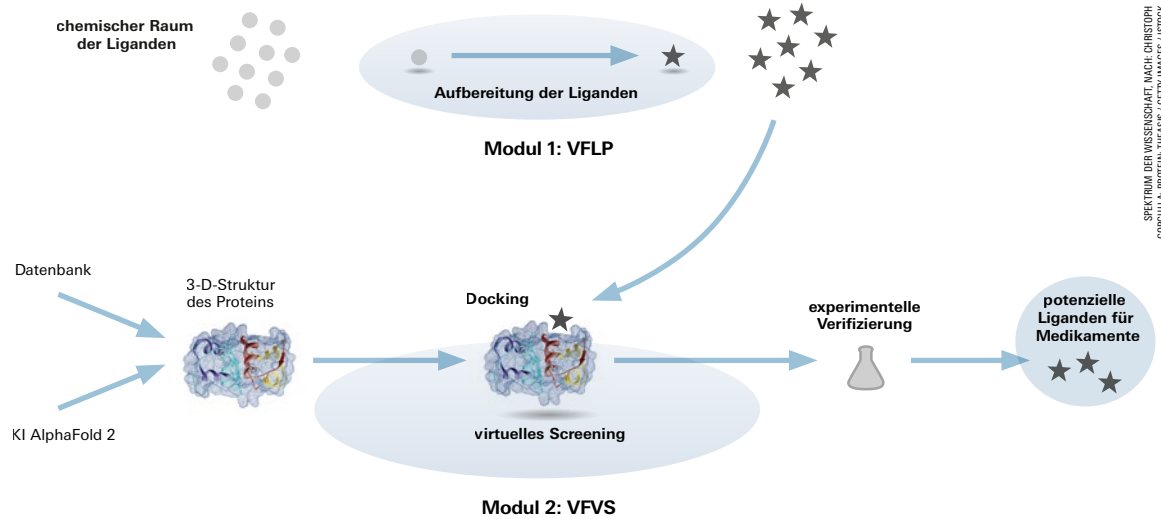
ist Teil der Aminosäure »PROlin«. Sie ist die erste Aminosäure (1) in der »A«-Kette des Proteins. Das gibt etwa Aufschluss darüber, wie stark dieses Kohlenstoffatom mit anderen interagiert. Die ersten drei der insgesamt fünf darauf folgenden Zahlen geben die x-, y- und z-Koordinate des Atoms im dreidimensionalen Raum wieder. (Der Punkt entspricht dem deutschen Komma, und die Koordinaten stehen für eine definierte

Ausrichtung des Moleküls.) Kennt man die Koordinaten aller beteiligten Atome – sowohl des Proteins als auch des Wirkstoffmoleküls –, dann lassen sich ihre Wechselwirkungen in Abhängigkeit des jeweiligen Abstands r berechnen (in der Zeichnung der Abstand zwischen den Atomen C und O). Die beiden letzten Zahlen im Programmcode konkretisieren in diesem Zusammenhang die Berechnung.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT: NACH K. FACKLEIDY C. GORRILLA UND M. WEBER: SPIKE-PROTEIN: SELVANEGRA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Screening-Plattform VirtualFlow



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, ICH: CHRISTOPH GORGULLA, PROTEIN: THEASIS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Viele Medikamente basieren auf der Kopplung eines Ligandenmoleküls an ein Protein. Das Programm der Autoren kann virtuell prüfen, ob die beiden Strukturen zusammenpassen. Um eine große Anzahl an Liganden zu testen, müssen verschiedene Eigenschaften eingespeist werden – etwa ihre dreidimensionale Struktur. VirtualFlow hat zu diesem Zweck zwei Module:

VirtualFlow for Ligand Preparation (VFLP) bereitet Milliarden von Molekülen für das anschließende Screening mit VirtualFlow for Virtual Screening (VFVS) vor. VFLP unterstützt dabei ungefähr 100 verschiedene chemische Dateiformate, in denen es die aufbereiteten Liganden speichern kann. Wurde eine Moleküldatenbank mit VFLP einmal erstellt, kann das VFVS damit

beliebig viele Proteine testen. Die Struktur des zu prüfenden Proteins kann entweder aus einer Datenbank entnommen oder mit Hilfe einer künstlichen Intelligenz (KI, etwa AlphaFold 2) ermittelt werden. Sind passgenaue Liganden gefunden, lässt sich in Laborexperimenten deren Kopplung verifizieren. So erhält man schließlich potenzielle neue Wirkstoffmoleküle.

Seiner künstlichen Intelligenz namens AlphaFold 2 war es gelungen, Eiweißstrukturen in vielen Fällen präzise vorherzusagen. Im Juli 2021 machte das Team um den Chefentwickler Demis Hassabis dann den Quellcode des Programms öffentlich, so dass nun im Prinzip jeder mit genügend Fachkenntnis die Architektur von Proteinen berechnen kann. Zusätzlich sind seither die Ergebnisse der KI auf einer öffentlichen Datenbank im Internet zugänglich. Man findet dort die Strukturen fast aller knapp 24 000 Proteine des menschlichen Körpers sowie die etlicher anderer Organismen. Die Menge der gelisteten Proteinstrukturen wird ständig erweitert und soll bald über 100 Millionen betragen.

Bislang kamen zur Bestimmung des räumlichen Aufbaus in erster Linie experimentelle Methoden zum Einsatz. Das zog sich aber mitunter über mehrere Jahre oder gelang gar nicht. Für viele wichtige Proteine fehlte daher das Wissen über ihr dreidimensionales Aussehen. Seit Jahrzehnten versucht die Fachwelt deshalb, Proteinstrukturen mittels Computerprogrammen vorherzusagen. Lange mangelte es den Ergebnissen jedoch an Genauigkeit. Mit AlphaFold 2 hat sich das nun geändert. Die KI ist somit die ideale Ergänzung für VirtualFlow. Dank ihr lassen sich mit unserem

Programm jetzt auch Wirkstoffkandidaten für zahlreiche Proteine aufspüren, deren Struktur bisher unbekannt war. Diese Fortschritte lassen hoffen, dass Medikamente mit Hilfe virtueller Suchen künftig deutlich schneller zu entwickeln sind. Denn wie die aktuelle Coronakrise zeigt, bleibt in einer Pandemie dafür nicht viel Zeit. ◀

QUELLEN

Callaway, E.: »It will change everything«: DeepMind's AI makes gigantic leap in solving protein structures. *Nature* 588, 2020

Gorgulla, C. et al.: An open-source drug discovery platform enables ultra-large virtual screens. *Nature* 580, 2020

Gorgulla, C. et al.: A multi-pronged approach targeting SARS-CoV-2 proteins using ultra-large virtual screening. *iScience* 24, 2021

Koshland, D.E.: Application of a theory of enzyme specificity to protein synthesis. *PNAS* 44, 1958

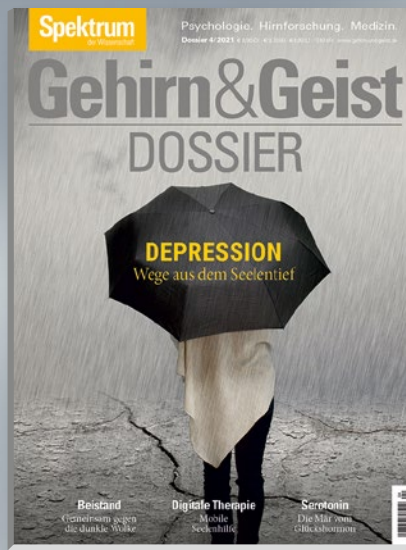
WEBLINK

<https://virtual-flow.org>

VirtualFlow im Internet

Unsere Neuerscheinungen

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



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



FREISTETTERS FORMELWELT UNVORSTELLBARE ZAHLEN

Wenn der Taschenrechner kapituliert, gibt es nur noch eine Rettung: die Näherung!

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

► spektrum.de/artikel/1924948

Früher habe ich gern mit den Buchstaben meines Vornamens gespielt. Wie vermutlich jedes Kind, habe auch ich ihn rückwärts gelesen. »Nairolf« lässt sich zwar aussprechen, richtig begeistert war ich jedoch nicht. Doch ich gab nicht auf und probierte andere Kombinationen aus. Aber unabhängig davon, wie ich die Zeichen umstellte, kam nichts Brauchbares heraus. Ziel war es, alle Möglichkeiten zu testen.

Wenn ich damals schon in der Lage gewesen wäre, zu berechnen, wie viele es gibt, hätte ich es vermutlich gar nicht erst versucht. Die sieben Buchstaben meines Vornamens lassen sich auf 5040 unterschiedliche Weisen schreiben. Nimmt man auch noch den Nachnamen hinzu, ergeben sich deutlich mehr Varianten (über eine Billion). Zentral für diese Rechnung ist eine mathematische Operation namens Fakultät, die durch ein Ausrufezeichen ausgedrückt wird:

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n.$$

Mein Taschenrechner schafft es gerade noch, 69! zu bestimmen – 70! liefert bereits eine Fehlermeldung. Das Ergebnis wäre eine Zahl mit mehr als 100 Stellen, und dafür reicht der Speicher nicht. Um zumindest ein näherungsweise Resultat zu erhalten, kann man sich dieser Formel bedienen:

$$n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

Zwar scheitert mein Taschenrechner auch daran – aber man hat es nun mit einfacheren Rechenoperationen zu tun. Das ist hilfreich, wenn man nicht an einem exakten Wert interessiert ist, sondern lediglich heraus-

finden möchte, wie viele Stellen das Ergebnis hat. Denn deren Anzahl folgt aus dem Logarithmus zur Basis zehn der entsprechenden Zahl; eine solche Rechnung lässt sich mit der rechten Seite der Formel wesentlich leichter ausführen als mit der linken.

Die nach dem schottischen Mathematiker James Stirling benannte Gleichung spielt aber nicht nur beim Vertauschen von Buchstaben eine Rolle. Auch in der Wissenschaft ist es manchmal nötig, riesige Werte auf diese Weise zu nähern. Zum Beispiel bei einem Modell, das Albert Einstein 1907 entwickelte, um die Wärmekapazität von Festkörpern quantenmechanisch zu beschreiben. Dabei modellierte er die Stoffe durch harmonisch schwingende Atome, deren Energien nur quantisierte Werte annehmen. Um die Entropie des Systems zu bestimmen, muss man die Fakultät der Anzahl der oszillierenden Teilchen berechnen. Ein Festkörper besteht jedoch aus Abermilliarden Partikeln, deshalb lässt sich die Gleichung nur durch die Näherung von Stirling einigermaßen in den Griff bekommen.

In der Thermodynamik hat man es auch abseits von Einsteins Modell immer wieder mit Fakultäten großer Zahlen zu tun. Dort tauchen sie ebenfalls meist beim Berechnen der Entropie oder ähnlicher Eigenschaften auf. Die Stirling-Formel findet also auch in diesen Fällen häufig Anwendung.

Bei der Beschäftigung mit den Anagrammen meines Namens bin ich solch großen Zahlen nie auch nur nahegekommen. Glücklicherweise muss man die Kombinationen heute nicht mehr alle selbst durchgehen, so wie ich es als Kind versucht habe. Computerprogramme können das mittlerweile viel schneller. Eines davon hat mich gerade informiert, dass sich mein vollständiger Name zu »Affe einsortiert RTL« umordnen lässt. Hätte ich das nur schon als Kind gewusst!

MEDIZINTECHNIK GESUNDHEITSCHECK AM HANDGELENK

Können transportable Elektronikgeräte wie Smartwatches erkennen, wenn ihre Nutzer krank sind? Das prüfen Forscher in zahlreichen Studien – mit durchwachsenen Ergebnissen.



Wilhelm Haverkamp ist Facharzt für Innere Medizin und Kardiologe. Er arbeitet als Professor an der Charité-Universitätsmedizin Berlin und dort an der Medizinischen Klinik mit Schwerpunkt Kardiologie.

» [spektrum.de/artikel/1924933](https://www.spektrum.de/artikel/1924933)





UNKLARER NUTZEN Tragbare Computersysteme wie Sensorarmbänder oder Smartwatches sollen helfen, die Gesundheit zu erhalten. Wie gut das gelingt, ist allerdings fraglich.

Immer mehr Menschen nutzen tragbare Computersysteme, so genannte Wearables. Das sind Geräte, die man am Körper mit sich führt: etwa Fitnesstracker, Datenbrillen oder mit Sensoren ausgestattete Armbänder beziehungsweise Fingerringe. Sie verfügen über Messfühler, die es erlauben, Körperfunktionen zu überwachen. Damit zeichnen sie gesundheitsrelevante Daten wie den Energieumsatz, die Herzschlagfrequenz oder die Zahl der gelaufenen Schritte auf und senden sie bei Bedarf an andere Geräte. Sie lassen sich als Hilfsmittel einsetzen, um die körperliche Leistungsfähigkeit zu steigern und das Wohlbefinden zu fördern. Smartwatches, das sind elektronische Armbanduhren mit Sensoren, Vibrationsmotoren und weiteren Elementen, bieten zusätzliche Funktionen wie die Möglichkeit, Software zu installieren. Generell wird der Funktionsumfang von Wearables zunehmend größer, und es erscheint denkbar, dass sie in wenigen Jahren die heute gängigen Smartphones ersetzen könnten.

Seit einiger Zeit dringen Wearables auch in den Bereich der medizinischen Anwendungen vor. Denn sie ermöglichen es, gesundheitsrelevante Daten zu erfassen, die für ärztliche Entscheidungen eine Rolle spielen. Hierzu gehören die Herzschlagfrequenz, die Körpertemperatur, die Sauerstoffsättigung des Bluts und der Blutdruck – allesamt Größen, in denen sich Grundfunktionen des menschlichen Organismus spiegeln. Üblicherweise erfordern solche Messungen eine Smartwatch. Manche der hierfür eingesetzten Apps (Anwendungssoftwares) sind als Medizinprodukte zugelassen.

Wearables könnten sich zur Früherkennung von Krankheiten wie Covid-19 nutzen lassen und so helfen, das Pandemie-Management zu verbessern. Dies wird zurzeit intensiv untersucht. Die Verfahren, die aktuell zum Nachweis von Sars-CoV-2-Infektionen dienen – etwa Antigen-Schnell- und PCR-Tests –, sind aufwändig, teuer und bilden das Infektionsgeschehen nur punktuell ab. Hilfreicher wäre eine Methode, die leichter umzusetzen, kostengünstiger und breiter anwendbar wäre und eine kontinuierliche Beobachtung des Patienten schon im Frühstadium der Krankheit erlaubte – das heißt, bevor sich klinische Symptome wie

Husten, Fieber, Luftnot oder Störungen des Geruchs- und Geschmackssinns ausprägen. Ein solches Verfahren würde es erleichtern, die aktuelle und mögliche künftige Pandemien zu bekämpfen.

Mittlerweile gibt es Ergebnisse von ersten Studien dazu. Sie stammen sowohl aus prospektiven (vorausschauenden) wie aus retrospektiven (rückblickenden) Untersuchungen. In prospektiven Studien werden vorher festgelegte Gruppen von Versuchsteilnehmern eine Zeit lang beobachtet; infizieren sich Probanden mit Sars-CoV-2 und erkranken gegebenenfalls daran, lässt sich das in Echtzeit verfolgen. Bei retrospektiven Untersuchungen hingegen werten Forscher das Krankheitsgeschehen im Nachhinein aus.

Robert Hirten von der Icahn School of Medicine at Mount Sinai (New York) und sein Team verfolgten mit Hilfe von Smartwatches die Herzschlagfrequenz von 297 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Gesundheitswesen, von denen während des Beobachtungszeitraums 13 an Covid-19 erkrankten. Die Daten zeigten, dass die Erkrankung mit messbaren Veränderungen der Herzrhythmus einherging: Die Dauer zwischen aufeinander folgenden Schlägen variierte im Tagesverlauf anders als bei Gesunden. Dies ging der klinischen Ausprägung der Krankheit, also dem Auftauchen erster Symptome, um bis zu sieben Tage voraus.

Die Genetikerin Tejaswini Mishra von der Stanford University und ihr Team haben Ähnliches beobachtet. Sie analysierten Smartwatch-Daten von rund 5300 Personen, von denen sich 32 nachweislich mit Sars-CoV-2 infiziert hatten. Die rückblickende Datenauswertung ergab: Bei jenen, die sich angesteckt hatten, waren die Herzrhythmus, die Zahl der täglichen Schritte und das Schlafverhalten teils deutlich verändert – und zwar mitunter schon neun Tage vor dem Einsetzen von Symptomen. Die Forscherinnen und Forscher schätzen, dass sich mit Hilfe von Smartwatch-Daten etwa 60 Prozent der Covid-19-Fälle erkennen ließen, bevor erste Krankheitszeichen auftreten.

Wissenschaftler um Yi-Ting Chung von der Cheng-Kung-Nationaluniversität (Taiwan) haben wiederum ein Covid-Testverfahren untersucht, das auf tragbaren Armbändern basierte, die mit Infrarot-Temperatursensoren ausgestattet waren. Die Geräte erfassten in zehnstündigen Abständen die Temperatur der Körperoberfläche sowie die Herzschlagfrequenz. Bei Überschreiten eines Grenzwerts erhielt die betroffene Person eine automatische Aufforderung, ihre Körpertemperatur mit einer separaten Methode zu messen, gegebenenfalls gefolgt von der Empfehlung, sich ärztlich behandeln zu lassen. Nach dem Prüfen des Verfahrens an rund 300 Personen kommen die Forscher zu dem Schluss, dass Wearables zur frühzeitigen Erkennung von Covid-19 beitragen können.

Eine weitere Forschergruppe um Benjamin Smarr von der University of California in San Diego untersuchte ebenfalls, ob sich Covid-19 durch veränderte Körpertemperatur verrät und ob sich das mit Wearables registrieren lässt. Die Analyse basierte auf den Daten von 50 Patienten. Bei 38 dieser Personen (76 Prozent) traten auffällige Abweichungen der Körpertemperatur auf, die dem Einsetzen von Krankheitssymptomen vorausgingen.

AUF EINEN BLICK UNTER ELEKTRONISCHER AUFSICHT

- 1 Tragbare Computersysteme (Wearables) erlauben es, Körperfunktionen zu überwachen und Messdaten zu liefern, die für ärztliche Entscheidungen eine wichtige Rolle spielen.
- 2 Forscher prüfen, ob diese Geräte sich zur Früherkennung von Krankheiten eignen.
- 3 Die bisher vorliegenden Ergebnisse sind teils ermutigend, doch es bleiben Zweifel darüber, wie verlässlich die Messwerte sind und ob die Verfahren für den klinischen Einsatz taugen.

Klinische Studien mit Wearables

Wie sich Wearables, insbesondere Fitnessstracker und Smartwatches, klinisch nutzen lassen, erforschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in zahlreichen Untersuchungen. Die Datenbank [clinivaltrials.gov](https://clinicaltrials.gov) listet weltweit etwa 1400 klinische Studien auf, in denen Wearables zum Einsatz kamen (Stand: August 2021). 500 davon sind mittlerweile beendet oder abgeschlossen, die übrigen laufen noch. Um in die Datenbank aufgenommen zu werden, müssen die Studien verschiedene Qualitätskriterien erfüllen. Weil das bei kleineren Erhebungen oft nicht gegeben ist, kann man davon ausgehen, dass die Gesamtzahl solcher Untersuchungen deutlich höher liegt.

Zahlenmäßig am stärksten vertreten sind Studien zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Auch bei neurologischen Problemen wie

Hirnfarkt, Parkinson oder Alzheimer wird getestet, ob sich Wearables medizinisch einsetzen lassen – etwa zur Diagnose. Krebs- und rheumatische Erkrankungen, psychiatrische Komplikationen, Stoffwechselstörungen wie Diabetes und Fettleibigkeit sowie Schlafmuster stehen hier ebenfalls im Fokus.

Fachleute berichten in letzter Zeit vermehrt über Probleme, die auftreten, wenn Wearables zu medizinischen Messungen dienen. Die Geräte liefern üblicherweise keine Rohdaten, sondern Informationen, die von Softwarealgorithmen analysiert und gefiltert wurden. Die meisten Hersteller legen diese Algorithmen nicht offen und verändern sie überdies häufig sowie ohne Vorwarnung. Deshalb liefert ein- und dasselbe Gerät, das zweimal denselben Datensatz auswertet, mitunter verschiedene Resultate – wenn nämlich in der Zwischen-

zeit ein Software-Update stattgefunden hat. Das macht es schwer bis unmöglich, Ergebnisse wissenschaftlich korrekt miteinander zu vergleichen.

Da mehr und mehr Menschen Wearables nutzen, dürfte die Zahl entsprechender Studien künftig drastisch zunehmen. Vor diesem Hintergrund erscheint es immer dringlicher, einheitliche Standards zu schaffen, wie Wearables in klinischen Studien anzuwenden und wie ihre Daten zu bewerten sind. Besonders wichtig wird hierbei sein, nicht nur positive Studienergebnisse zu veröffentlichen, also solche, die die untersuchte These stützen. Auch negative Resultate müssen publiziert werden, um ein realistisches Bild zu erhalten – sonst droht ein verzerrter Eindruck, der einem Blick durch die rosa Brille gleichkommt (siehe »Spektrum« Oktober 2020, S. 38).

Verschiedene Pressemedien haben diese Studien aufgegriffen und leiten aus den Ergebnissen ab, dass es mittels Wearables technisch machbar sein müsste, Pandemien einzudämmen. Was ist davon zu halten? Sollten sich möglichst viele Menschen eine Smartwatch zulegen, um die Früherkennung von Krankheiten zu verbessern, oder ist die Realität komplizierter als in den Studien abgebildet? Für Laien ist es schwer, sich ein fundiertes Urteil hierzu zu bilden, da nicht nur Presse- und PR-Medien, sondern ebenso die Wissenschaftler selbst ihre Untersuchungsergebnisse oft betont positiv darstellen.

Nur wenige fragen danach, wie zuverlässig die Messwerte von Wearables eigentlich sein können. Die meisten Nutzerinnen und Nutzer zeigen sich hier unkritisch und setzen ein hohes Vertrauen in solche Daten. Leider ist das nicht gerechtfertigt. Bei allen derzeit verfügbaren Wearables gibt es Probleme hinsichtlich der Güte der erhobenen Werte; viele Geräte sind ungenau und fehleranfällig. In der Öffentlichkeit und in medizinischen Fachkreisen werden die Einschränkungen, die sich daraus ergeben, aber nur selten thematisiert.

Die Herzfähigkeit im Blick

Bei Covid-19 ist wie bei vielen anderen Infektionskrankheiten die Herzschlagfrequenz oft deutlich erhöht und liegt jenseits von 90 Schlägen pro Minute. Das macht sie zu dem

wichtigsten diagnostischen Parameter, um Krankheiten früh zu erkennen und ihren Schweregrad einzuschätzen. Die Schlagfrequenz nimmt tendenziell umso stärker zu, je schwerer die Infektion verläuft.

Wearables ermitteln die Herzschlagfrequenz meist mit Hilfe der »Photoplethysmografie«. Dabei sendet eine Leuchtdiode (LED), die in den Boden des Geräts integriert ist, Infrarotlicht aus, das sich im Körpergewebe ausbreitet. Einige Bestandteile des Organismus reflektieren es, andere wie der rote Blutfarbstoff Hämoglobin absorbieren es. Die Menge des zurückgeworfenen Lichts schwankt daher zeitgleich mit dem Puls, während das Blut durch die Adern strömt. Eine Fotodiode zeichnet das auf und ermittelt daraus die Herzfrequenz.

Verglichen mit Standardverfahren zum Untersuchen der Herzfähigkeit, etwa dem Elektrokardiogramm (EKG), schneiden Wearables meist recht gut ab, solange die Messungen in körperlicher Ruhe erfolgen und es um Mittelwerte der erhobenen Daten geht. Hier unterscheiden sich die Ergebnisse üblicherweise nur um wenige Schläge pro Minute. Anders sieht es aus, wenn man die Variabilität einzelner Messwerte erfasst: Sie kann bei Wearables deutlich von den Ergebnissen etablierter Messmethoden abweichen, nämlich tageszeitabhängig um mehr als 20 Schläge pro Minute. Diese Diskrepanz wächst mit steigender Herzfrequenz. Aus medizinischer Sicht ist das nicht akzeptabel –

unter anderem deshalb, weil in der Diagnostik bestimmte Grenzwerte eine wichtige Rolle spielen. Werden sie überschritten, erfordert das eine Ursachenklärung, die oft aufwändig ist und darum nicht von Fehlalarmen ausgelöst werden sollte.

Wie präzise und verlässlich ein Fitnessstracker oder eine Smartwatch die Herzschlagfrequenz misst, lässt sich aus Käufersicht oft kaum nachvollziehen. Nicht selten werben Hersteller damit, dass die Geräte »klinisch validiert« worden seien; die Ergebnisse solcher Validierungen bleiben aber unveröffentlicht. Wissenschaftliche Studien, um die Messgenauigkeit von Wearables zu prüfen, finden in der Regel unter streng standardisierten Bedingungen und an Gesunden statt. Sie bilden nur unzureichend ab, wie sehr die Datenqualität im echten Leben beeinträchtigt sein kann. Es gibt zahlreiche Ursachen für Messfehler: etwa Tätowierungen, dunkle Haut, starke Behaarung, Schmutz auf dem Sensor, helles Umgebungslicht, niedriger Blutdruck und eine kalte Umgebung. Der häufigste Grund für falsche Messwerte ist ein schlechter Sitz des Armbands. Fällt der Abstand zwischen Gerät und Handgelenk zu groß aus, dringt das Infrarotlicht der LEDs nicht tief genug ins Gewebe oder der Sensor erfasst zu wenig vom reflektierten Licht. Die Hersteller betreiben mitunter viel Aufwand, um Verfälschungen der Messwerte durch Signalfilter zu unterbinden. Das schlägt sich dann im Preis der Geräte nieder – eine höhere Verlässlichkeit ist auch bei Wearables nicht zum Nulltarif zu haben.

In Medienberichten heißt es oft, dass Wearables die Herzfrequenz kontinuierlich überwachen würden. Das stimmt nicht. Da mit steigender Messhäufigkeit der Stromverbrauch wächst, erfassen solche Geräte die Herztätigkeit im Ruhezustand meist diskontinuierlich und nur im Trainingsmodus fortlaufend. Das genaue Vorgehen ist herstellerabhängig. Um Strom zu sparen und die Akkulaufzeit zu verlängern, können Nutzer zudem die Messfrequenz reduzieren oder die Datenerfassung ganz abschalten.

Fehlmessungen wirken sich selbstverständlich auf die Größen aus, die aus den Daten abgeleitet werden. Hierzu gehört die Variabilität der Herzschlagfrequenz – ein Maß für den Spannungszustand der Muskulatur beziehungsweise die Regulationsfähigkeit des autonomen Nervensystems. Gerät der Organismus unter Stress, etwa infolge einer Infektion, nimmt die Herzfrequenzvariabilität ab. Deshalb dient dieser Parameter im Sport dazu, den Trainingszustand zu ermitteln. Die Hersteller von Wearables geben aber oft nur ungenau an, wie die Geräte ihn berechnen. Werte von verschiedenen Produkten lassen sich somit nicht ohne Weiteres vergleichen. Hier fehlt es an Standards.

Alarmzeichen bei Atemnot

Mittels Photoplethysmografie lassen sich ebenso die Sauerstoffsättigung des Bluts und die Atemfrequenz bestimmen. Bei klinisch manifesten Covid-19-Erkrankungen nimmt die Sauerstoffsättigung ab. Um dies auszugleichen, entwickelt der Organismus eine so genannte Tachypnoe, eine Steigerung der Atemfrequenz auf über 20 pro Minute. Je höher der Wert, umso schlechter die Prognose für den Patienten. Normalerweise liegt die Sauerstoffsättigung des Bluts



TRÜGERISCHE GENAUIGKEIT Viele Wearables erlauben es, die Sauerstoffsättigung des Bluts zu ermitteln. Leider ist das oft mit einer beträchtlichen Fehlerquote behaftet. Falsche Messwerte verunsichern die Nutzer und führen zu unnötigen Behandlungen.

oberhalb von 95 Prozent; das Unterschreiten von 90 Prozent sehen Mediziner üblicherweise als Besorgnis erregend an. Das hängt aber vom Lebensalter ab: Bei älteren Menschen können niedrige Werte normal sein. Im Falle von Covid-19-Erkrankungen gehen sie allerdings mit erhöhter Sterblichkeit einher.

Beim Erfassen dieser Größen durch Wearables gelten die gleichen Einschränkungen wie bei der photoplethysmografischen Bestimmung der Herzfrequenz. Besonders hinsichtlich der Sauerstoffsättigung kommt es oft zu Fehlmessungen. Das gilt sowohl für Smartwatches als auch für Fingerclips, die speziell auf entsprechende Messungen zugeschnitten und seit Jahren als »nicht invasive kontinuierliche Pulsoxymetrie« etabliert sind – sogar im häuslichen Bereich. Laut Definition handelt es sich bei diesen Geräten um Wearables.

Wie groß das Problem der Verfälschungen ist, zeigt eine kürzlich publizierte Studie darüber, wie die Messgenauigkeit von der Hautfarbe abhängt. Forscher um Michael Sjoding von der University of Michigan verglichen bei mehreren tausend dunkel- und hellhäutigen Patienten die Sauerstoffsättigungswerte, die per Pulsoxymetrie ermittelt wurden, mit entsprechenden Direktmessungen in arteriellem Blut. Dabei stellten sie fest: Das erste Verfahren weist eine beträchtliche Fehlerquote auf. 3,6 Prozent der Hellhäutigen, bei denen die Pulsoxymetrie eine Sättigung zwischen 92 und 96 Prozent anzeigte, hatten laut Direktmessung tatsächlich viel weniger Sauerstoff im Blut – nämlich einen

Sättigungswert unterhalb von 88 Prozent. Bei den Dunkelhäutigen lag dieser Fehleranteil mit 11,4 Prozent sogar mehr als dreimal so hoch. Der Grund hierfür scheint zu sein, dass die Geräte für Menschen mit starker Hautpigmentierung falsch kalibriert sind. Die Studie hat in den USA viel Aufmerksamkeit erregt, denn ihren Ergebnissen zufolge beeinflusst die Hautfarbe, wer in Pandemiezeiten durch Triage eine priorisierte Behandlung erfährt.

Wearables, die am Handgelenk getragen werden, erfassen die Sauerstoffsättigung nicht mittels LED-Durchleuchtung eines Fingers wie Fingerclips, sondern sie werten den reflektierten Anteil des ausgesendeten LED-Lichts aus. Der Fachausdruck dafür lautet »Reflexions-Photoplethysmografie«. Nur wenige Smartwatches mit einer solchen Funktion tragen eine CE-Kennzeichnung, sprich eine Erklärung des Herstellers, dass die Geräte den geltenden Anforderungen genügen. In den USA sind smartwatch-basierte Apps zum Messen der Sauerstoffsättigung bislang nicht von behördlicher Seite freigegeben, zudem kursieren mehrere Sicherheitswarnungen hinsichtlich des Einsatzes von Fingerclip-Pulsoximetern. Die Hersteller weisen in den Produktinformationen zwar darauf hin, dass die Messungen für medizinische Anwendungen ungeeignet sind und bloß der Information des Nutzers dienen. Andererseits aber setzen sie die Geräte mit »Gesundheitssensoren« gleich. Es ist für Laien schwer zu beurteilen, was davon zu halten ist. Oft reagieren sie verunsichert, sobald das Gerät abnorme Werte ausspuckt. Wenn sie sich obendrein noch schlecht fühlen, möglicherweise in Reaktion auf das Messergebnis,

VOLLER DURCHBLICK? Körperfunktionen jederzeit elektronisch überwachen zu können, verspricht mehr Kontrolle über das eigene Leben. Andererseits machen wir uns damit stärker von Technik abhängig.

rufen sie nicht selten den Notarzt. Da dieser sich nicht immer mit Wearables und ihrer Verlässlichkeit auskennt, kann es zu mehrtägigen Krankenhausaufenthalten mit unnötigen Untersuchungen kommen.

Zwischen Normaltemperatur und Fieber

Eine Messung der Körpertemperatur erlauben bislang nur wenige Wearables. Yi-Ting Chung von der Cheng-Kung-Nationaluniversität in Taiwan und sein Team haben geprüft, wie belastbar Messdaten sind, die von Armbändern mit Sensoren stammen. Das Ergebnis: Die Daten wichen von den Messwerten kommerziell erhältlicher Infrarot-Thermometer durchschnittlich um 1,5 Grad Celsius ab. Das kann eine bedeutsame Differenz sein, wenn es zu entscheiden gilt, ob ein Patient Fieber hat – nach allgemeiner Übereinkunft ab 38 Grad Celsius – oder nicht. Einzelmessungen unterschieden sich sogar um 4 Grad oder mehr. Das entspricht dem Unterschied zwischen gesunder Körpertemperatur und sehr hohem Fieber. Die Autoren betonen, dass exakte Temperaturmessungen einen engen Kontakt zwischen Sensor und Haut erfordern und es hier häufig zu verzerrten Ergebnissen kommt.

Wie sind all diese Erkenntnisse zu bewerten, wenn es um die Früherkennung von Covid-19 mit Hilfe von Wearables geht? Das zu beantworten, erfordert eine genaue Betrachtung der Methoden. Die bisher zitierten Studien beruhen allesamt auf relativ komplizierten Berechnungsverfahren, der Nutzung von Biomarkern und dem Erfassen von Krankheitssymptomen. Stets flossen Vorerfahrungen aus früheren Untersuchungen ein.

Die Studie von Robert Hirten und seinem Team basiert auf einer ausführlichen Offline-Analyse von Messdaten zur Herzrhythmusaktivität, die vorab von Smartwatches erhoben und gespeichert wurden. Außerdem berichteten die Teilnehmer täglich mittels einer Smartphone-App von Krankheitszei-



chen, die sie an sich selbst bemerkten. Veränderungen der Herzschlagfrequenz, die in die Auswertung einfließen, dienen Kardiologen schon lange als Biomarker – etwa, um Infektionen festzustellen.

Auch die Untersuchung von Tejaswini Mishra und ihrer Gruppe stützt sich auf Offline-Analysen von Daten, die zuvor aus Wearables exportiert worden waren. Daraus ließ sich auf die Herzrhythmickeit, die körperliche Aktivität sowie das Schlafverhalten der Teilnehmer schließen. Zusätzlich wurden die Probanden nach ihrem gesundheitlichen Zustand gefragt.



ISTOCK / ERSINWISACIK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Benjamin Smarr und sein Team betonen in ihrer Arbeit, wie unzulänglich Körpertemperaturdaten von Wearables seien. Die Forscher haben Temperaturprofile ausgewertet, die auf mehr oder weniger kontinuierlichen Messreihen beruhten und damit relativ robust gegenüber zufälligen Schwankungen der Einzelwerte waren. Veränderungen der Herz- und Atemfrequenz sowie Daten zum Befinden der Teilnehmer, die täglich mit einer Smartphone-App erhoben wurden, fanden ebenfalls Berücksichtigung.

Keine dieser Studien kann die klinische Tauglichkeit der eingesetzten Verfahren belegen. Hierfür sind wesentlich größere Untersuchungen mit deutlich mehr Teilnehmern erforderlich. Zudem wäre es aufschlussreich, verschiedene konkurrierende Methoden miteinander zu vergleichen.

Wearables allein genügen nicht

In der Debatte darüber, wie nützlich die Datenerfassung mit Wearables und Apps ist, geht oft unter, dass deren Erhebung kein Selbstzweck ist. Was nützt es, Covid-19 oder andere Erkrankungen früh zu erkennen, wenn daraus nichts folgt? Am Ende des Prozesses sollte eine Handlungsanweisung an die Betroffenen stehen – etwa die Empfehlung, einen Arzt aufzusuchen. Sie muss nicht nur aus den Daten abgeleitet, sondern auch fachlich fundiert überprüft werden, bevor sie an die Empfänger geht. Bei potenziell lebensbedrohlichen Komplikationen wie Covid-19 darf man diese Prüfung keiner Smartphone-App überlassen. Auch die Nutzer kann man hiermit nicht betrauen, da sie in der Regel medizinische Laien sind. Selbst den behandelnden Ärzten dürfte es unmöglich sein, die damit einhergehende Datenflut zu bewältigen.

Diagnostische Konzepte zu verwirklichen, die auf dem Sammeln und Verarbeiten großer Datensätze (Personal Big Data) beruhen und rund um die Uhr verfügbar sind, gelingt deshalb nur unter bestimmten Voraussetzungen. Dazu gehören Cloudstrukturen, um Daten mittels künstlicher

Intelligenz (KI) aufzubereiten und zu speichern, sowie ärztliche Kompetenzzentren, die – möglichst ebenfalls KI-unterstützt – die Richtigkeit einer medizinischen Handlungsanweisung prüfen. Solche Strukturen zu schaffen, ist nur langfristig vorstellbar, und zwar im Rahmen einer umfassenden digitalen Transformation unseres Gesundheitssystems. In Deutschland würde der Datenschutz das stark erschweren bis unmöglich machen.

Das ist aber nicht überall so. Das Healthcare Innovation Lab der Stanford University hat kürzlich die zweite Phase der »Infectious Disease and Covid-19 Wearables Study« (<https://innovations.stanford.edu/wearables>) gestartet. Diese groß angelegte Untersuchung mit derzeit mehr als 5500 Teilnehmern lehnt sich an das Studiendesign von Tejaswini Mishra und ihrem Team an. Das Ziel lautet, Covid-19-Erkrankungen mit Hilfe von Wearables frühzeitig zu identifizieren. Den bis jetzt vorliegenden Ergebnissen zufolge erkennen die Algorithmen, welche die Daten auswerten, die Krankheit durchschnittlich vier Tage vor dem Einsetzen von Symptomen. Wer an der Studie teilnehmen möchte, muss ein Wearable besitzen, das die Herzschlagfrequenz misst, und die App »MyPHD« nutzen. Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Defibrillatoren oder Herzschrittmachern sowie Schwangere können nicht beitreten. Die Studie erfolgt in Zusammenarbeit mit der Cloud-Sparte von Amazon und soll insgesamt 10 Millionen Personen einschließen.

Alles in allem lässt sich absehen, dass Wearables im medizinischen Bereich künftig vermehrt Daten liefern werden, die diagnostischen Zwecken dienen. Sie leisten damit einen Beitrag zur digitalen Transformation des Gesundheitssystems. Weltweit laufen zahlreiche Studien, in denen Forscher prüfen, inwieweit sich Wearables als diagnostische Werkzeuge eignen, um Infektions- und andere Krankheiten zu erkennen. Es gibt viel versprechende Ergebnisse; allerdings generieren die Geräte oft ungenaue und wenig verlässliche Messdaten, und das dürfte auf absehbare Zeit so bleiben. Eine verbesserte Signalverarbeitung sowie das Ermitteln von Biomarkern aus Rohdaten können helfen, die Datenqualität zu verbessern. Effektives Pandemiemanagement allein mit Wearables und Apps zu erreichen, ist freilich eine Illusion. ◀

QUELLEN

Chung, Y.T. et al.: Continuous temperature monitoring by a wearable device for early detection of febrile events in the Sars-CoV-2 outbreak in Taiwan, 2020. *Journal of Microbiology, Immunology, and Infection* 53, 2020

Hirten, R.P. et al.: Use of physiological data from a wearable device to identify Sars-CoV-2 infection and symptoms and predict Covid-19 diagnosis: observational study. *Journal of Medical Internet Research* 23, 2021

Mishra, T. et al.: Pre-symptomatic detection of Covid-19 from smartwatch data. *Nature Biomedical Engineering* 4, 2020

Sjoding, M.W. et al.: Racial bias in pulse oximetry measurement. *New England Journal of Medicine* 383, 2020

Smarr, B.L. et al.: Feasibility of continuous fever monitoring using wearable devices. *Scientific Reports* 10, 2020

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile im Abonnement

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

- ▶ Download des Monats (kostenfrei): im Oktober **Spektrum** KOMPAKT »Topologie«
- ▶ Reduzierte digitale Produkte: im Oktober »Unendlich«, »Seltene Erkrankungen« und »Kontrolle«
- ▶ Regelmäßige Einladungen zu digitalen Redaktionsbesuchen oder zu Vorträgen (kostenfrei)
 - 10. 11. 2021: Websession »Wie **Spektrum**-Redakteure arbeiten: Von der Idee bis zum Artikel«, Mike Zeitz (Redakteur **Spektrum** der Wissenschaft)
- ▶ Eigene Veranstaltungen zum Vorteilspreis:
 - 22. 01. 2022: **Spektrum**-LIVE-Veranstaltung: Digitaler Workshop »Bildverarbeitung von Mond- und Planetenaufnahmen«, Sebastian Voltmer (Astrofotograf)
- ▶ Monatliche Verlosung von Büchern und **Spektrum**-KOMPAKT-Ausgaben
- ▶ Vergünstigungen und Rabatte bei Partnerangeboten:
 - Onlinekurs: **Spektrum**-Schreibwerkstatt (Preisnachlass)
 - Spektrum**-Hörbücher von Fliegenglas (reduzierter Abopreis)
 - Englischkurs von Gymglish (2 Monate kostenlos)
 - BrainPics: Künstlerische Hirnbilder in Perfektion (15 % Rabatt auf ein Bild Ihrer Wahl)
 - iversity Onlinekurse (Preisnachlass): »Teambuilding – Zwischenmenschliche Beziehungen in Teams verbessern«, »Geothermie Teil 1: Geothermie – ein riesiges Potenzial« und »Geothermie Teil 2: Oberflächennahe Geothermie & die Funktionsweisen einer Wärmepumpe«

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

GEOCHEMIE FÜR IMMER GEBUNDEN

Eine geologische Besonderheit auf der Arabischen Halbinsel könnte enorme Mengen an Kohlenstoffdioxid buchstäblich in Stein verwandeln.

AUF EINEN BLICK REAKTOREN AUS DER TIEFE

- 1** Im Oman treten riesige Formationen aus Mantelgestein an der Erdoberfläche zu Tage. Die Minerale reagieren mit dem Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre und binden es in Form fester Karbonate.
- 2** Wissenschaftler wollen den Prozess beschleunigen, um das Klimagas im großen Maßstab dauerhaft in den Boden zu verfrachten.
- 3** Solch ein Unterfangen würde eine enorm aufwändige Infrastruktur erfordern. Ein erstes Projekt dazu läuft derzeit an.



Der Journalist **Douglas Fox** schreibt über Klimawissenschaften, Geologie und Biologie und lebt in Kalifornien.

► spektrum.de/artikel/1924936

NATÜRLICHER REAKTOR Mantelgestein ruht normalerweise viele Kilometer tief unter der Erde. Im Oman ragen ganze Gebirgsformationen davon an die Oberfläche und binden im Regenwasser gelöstes Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre.

Im Innern des Hadschar-Gebirges im Oman auf der Arabischen Halbinsel befindet sich das abgelegene Wüstental Wadi Lawayni. Wer dorthin gelangen möchte, folgt einer einsamen Schotterstraße, die schließlich auf ein paar Reifenspuren in einer kiesigen Senke zusammenschrumpft. Gelegentlich trifft man in der Gegend auf kleine, bläulich gefärbte Tümpel: Grundwasser tritt hier an die Oberfläche. Es ist gesättigt mit alkalischen Salzen und enthält mitunter so viel gelösten Wasserstoff, dass es wie Champagner sprudelt, wenn man es herausschöpft.

Rings um das karge Tal ragen hunderte Meter hohe Zinnen aus verblasstem braunem Stein in die Luft. Die Minerale, aus denen sie bestehen, sind an der Erdoberfläche chemisch instabil. Vermutlich hat sich diese Anomalie Dutzende Kilometer tiefer gebildet – im Erdmantel, der mittleren Schicht unseres Planeten, in die der Mensch noch nie direkt vorgedrungen ist. Ein plattentektonischer Unfall vor etwa 80 Millionen Jahren hat das Gestein ans Tageslicht gebracht, wo es nun, da es den Elementen ausgesetzt ist, langsam, aber sicher geochemisch zerfällt.

Laut dem Geologen Peter Kelemen vom Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University in New York könnte uns diese geologische Besonderheit helfen, den Verlauf der Klimakatastrophe zu beeinflussen. Wie er sich das vorstellt, erzählte mir der Mittsechziger an einem Nachmittag im Januar 2018. Wir saßen auf Campingstühlen im Wadi Lawayni im Schatten einer dünnen Akazie. 100 Meter entfernt befand sich unter einem Vordach ein behelfsmäßiges Freiluftlabor mit Tischen, Chemikalien und einem speziellen Scanner zur Untersuchung von Gesteinsproben. Der Wissenschaftler mit dem kurz geschnittenen grauen Haar und einer durch jahrzehntelange Arbeit im Freien gezeichneten Haut deutete auf die Felswand hinter uns, bestehend aus einem bräunlichen, verwitterten Mantelgestein namens Peridotit. Cremeweiße Adern zogen sich kreuz und quer durch den Fels. Sie entstehen, wenn Regenwasser in die Risse der Formation sickert: Es bringt aus der Luft gelösten Sauerstoff sowie Kohlenstoffdioxid mit, und sowohl das Wasser als auch die Gase reagieren mit dem Gestein. Dadurch bilden sich feste Adern aus neuen Mineralen, die sich wie Baumwurzeln immer tiefer graben. Kelemen zeigte auf eine etwa einen Zentimeter breite Ader aus Magnesiumkarbonat. »Die hier besteht zu rund 50 Gewichtsprozent aus CO_2 «, sagte er. Als ich sie mit einem Kieselstein berührte, gab sie ein glasiges Klirren von sich.

Kelemen und seine Kollegen schätzen, dass das freiliegende Mantelgestein im Oman jedes Jahr bis zu 100 000 Tonnen des Treibhausgases aufnimmt und in Minerale verwandelt. Das ist etwa ein Gramm pro Kubikmeter Fels. »Wenn man die Geschwindigkeit um den Faktor eine Million erhöht« – was der Wissenschaftler für technisch machbar hält –, »dann kann man eine Milliarde Tonnen CO_2 pro Kubikkilometer und Jahr verfestigen«, vermutete er. Und Oman hat mit rund 15 000 Kubikkilometern Gestein reichlich Material zur Verfügung.

Ähnliche Aufschlüsse wie diejenigen im Wadi Lawayni tauchen an der Erdoberfläche unter anderem in Alaska, Kanada, Kalifornien, Neuseeland und Japan auf. Kelemen schätzt die weltweite Speicherkapazität dieser Felsen,

einschließlich derjenigen im Oman, auf 60 bis 600 Billionen Tonnen CO_2 – das ist etwa das 25- bis 250-Fache der Menge, die der Mensch seit 1850 in die Atmosphäre eingebracht hat. Laut dem Geologen könnte der steinerne Speicher enorm viel bewirken. Der »Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung« des IPCC von 2018 kommt zu dem Schluss, dass der weltweite Temperaturanstieg nur dann auf andert-halb Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden kann, wenn der Mensch bis zum Jahr 2100 zwischen 100 Milliarden und einer Billion Tonnen Kohlenstoffdioxid aus der Luft entfernt. Würde der Prozess 2050 beginnen, müssten das demnach jährlich zwischen 2 und 20 Milliarden Tonnen sein.

Seit Jahrzehnten schon sprechen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler davon, das unliebsame Klimagas zu isolieren und in den Boden zu pumpen. So langsam wird das Unterfangen der »negativen Emissionen« aber dringend, wie immer mehr Studien zeigen. Vorschläge, wie das genau passieren soll, gibt es zahlreiche (siehe »Spektrum« Juli 2019, S. 62): Wälder aufforsten oder die Meere düngen, denn die Bäume respektive das Phytoplankton verbrauchen den Stoff bei der Fotosynthese. Landwirtschaftliche Flächen besser bewirtschaften, damit ein größerer Teil des von

KARBONATADERN Dunkler Peridotit ist im Mantelgestein weit verbreitet. Wenn Regenwasser durch Risse einsickert, reagiert der Fels mit dem darin gelösten Kohlenstoffdioxid aus der Luft und bildet weiße Adern aus Karbonatmineralen.



den Pflanzen aufgenommenen Kohlenstoffdioxids nach der Ernte im Boden verbleibt. Anlagen zur CO₂-Abscheidung könnten das Gas aus den Schornsteinen von Kraftwerken oder Fabriken filtern oder Maschinen zur direkten Luftentnahme die Moleküle Tag und Nacht aus der Umgebungsluft ziehen.

Den entnommenen Stoff gilt es anschließend dauerhaft zu binden. Einige wenige Unternehmungen haben das bereits versucht: Im Sleipner-Gasfeld vor der norwegischen Küste etwa wird CO₂, das mit dem Erdgas aufsteigt, wieder zurück in das Sedimentgestein im Reservoir rund einen Kilometer unter dem Meeresboden geleitet. Das Projekt begann 1996 und speichert jährlich etwa eine Million Tonnen Kohlenstoffdioxid unterirdisch. Das Problem bei so einem Vorgehen ist, dass das Gas kaum mit dem Sedimentgestein reagiert. Weil es meist lediglich in die Poren eindringt, befürchten manche Fachleute, es könne mit der Zeit wieder austreten.

Der Geochemiker Jürg M. Matter (heute an der University of Southampton in England) und der Physiker Klaus S. Lackner (heute Direktor des Center for Negative Carbon Emissions an der Arizona State University) untersuchten daher Anfang der 2000er Jahre, ob sich Kohlenstoffdioxid in Gesteine mit hohem Magnesium- und Kalziumgehalt einleiten lässt. Diese sind chemisch reaktiver als Sedimentgesteine und würden das Gas durch den Prozess der so genannten mineralischen Karbonisierung bereitwillig in feste Minerale umwandeln.

Die Mantelperidotite im Oman bestehen zum guten Teil aus solchen magnesium- und kalziumreichen Mineralen,

nämlich Olivinen sowie Pyroxenen. Wie man an den zahlreichen Karbonatadern sieht, haben sie in der Vergangenheit eindeutig Kohlenstoffdioxid aufgenommen. Nach Ansicht von Fachleuten muss das über Millionen Jahre hinweg geschehen sein. Kelemen bezweifelt jedoch, dass die Reaktionen so langsam abgelaufen sind. Er hatte bereits in den 1990er Jahren im Oman geforscht, wenn auch zu einem gänzlich anderen Thema, und war dabei oft an einer alkalischen Quelle in einem Tal namens Khafifah vorbeigegangen. Dort war das aus dem Boden sprudelnde Wasser so stark mit Kalzium gesättigt, dass es fortwährend mit dem CO₂ in der Luft reagierte und eine glatte, perlmuttartige, hauchdünne Schicht aus Kalzit auf der Oberfläche der Becken bildete. Wurde der Kalzitfilm durch Wind oder Regen zerrissen, so erneuerte er sich innerhalb von 24 Stunden. »Für einen Geologen ist das quasi Überschallgeschwindigkeit«, sagt Kelemen.

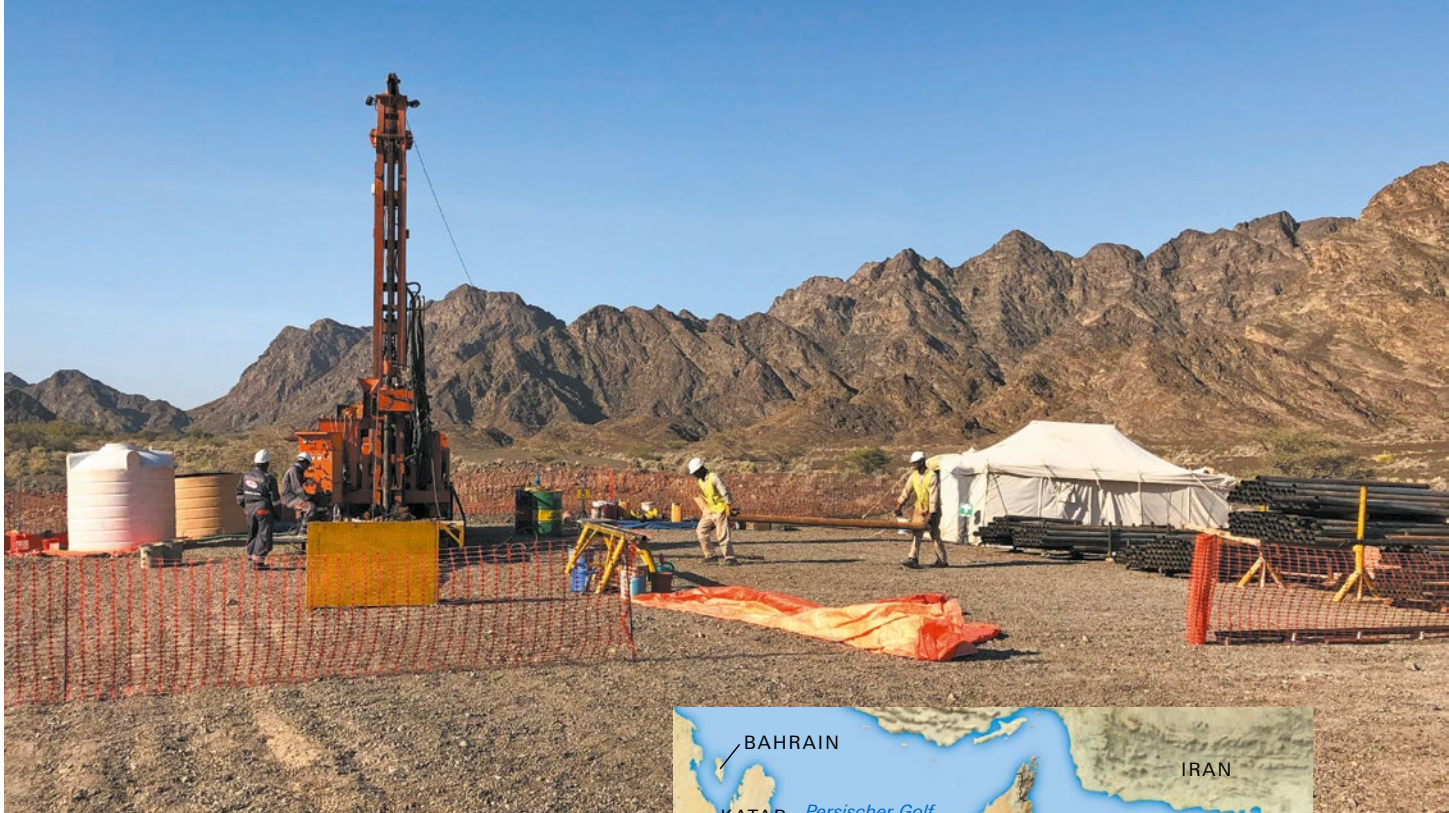
Tausende statt Millionen Jahre – die Reaktion läuft schneller als gedacht

Wenn die Reaktion an der Oberfläche so rasch ablief, hatten sich vielleicht auch die unterirdischen Adern schneller gebildet als gedacht, vermutete der Forscher. Als er 2007 erneut in den Oman reiste, sammelte er mit seinen Studenten daher Bruchstücke von Karbonatadern und ließ die Minerale im Labor datieren. »Ich dachte, diese Adern wären 90 Millionen Jahre alt«, gab Kelemen zu. »Aber sie waren alle jünger als 50 000 Jahre.« Einige waren sogar vor nur 6000 Jahren entstanden. Das Mantelgestein im Oman hat demnach nicht nur in der fernen Vergangenheit Kohlenstoffdioxid absorbiert, sondern tut dies auch jetzt noch, vielleicht sogar 10 000-mal schneller als erwartet.

Die Minerale machen etwa ein Prozent des oberflächennahen Gesteinsvolumens im Hadschar-Gebirge aus, wie Kelemen und Matter bei einer weiteren Reise im Jahr 2008 berechneten. Das bedeutet, dass die gesamte Region jährlich 10 000 bis 100 000 Tonnen Kohlenstoffdioxid auf natürliche Weise in Stein verwandeln könnte (zum Vergleich: 2019 war jeder Mensch in Deutschland laut »Statista« im Schnitt für die Emission von 7,9 Tonnen CO₂ verantwortlich). Diese Menge bremst den Klimawandel zwar nicht nennenswert, doch wenn sich der Prozess beschleunigen ließe, dann hätte er das Potenzial dazu.

In den folgenden vier Jahren nahmen die Wissenschaftler Proben aus den Senken und verfolgten die chemischen Reaktionen, die ablaufen, während sich das Wasser seinen Weg in den Untergrund bahnt. Wenn Regenwasser in die Risse im Gestein eindringt, verbindet sich vermutlich das in den Regentropfen gelöste CO₂ mit Magnesiumatomen aus dem Peridotit und bildet so Magnesiumkarbonat-Adern. Das wenige gelöste Gas ist allerdings rasch aufgebraucht. Gleichzeitig reichert das Wasser auf seiner Reise Kalzium aus dem umgebenden Mantelgestein an, um schließlich – so nehmen die Geologen an – an Quellen wie der in Khafifah wieder aufzutauchen. Gesättigt an Kalzium, reagiert es hier mit dem Kohlenstoffdioxid in der Luft und bildet die Kalzitschichten, die Kelemen gesehen hatte, sowie riesige Steinterrassen aus Travertin, die quer über die ganze Region verstreut sind.





Doch wie stark ließe sich dieser Prozess beschleunigen? Das hängt davon ab, wie tief und wie schnell das Wasser zirkuliert. Um das herauszufinden, warfen Kelemen und Matter im Januar 2018 einen Blick in das Innere der Felsen des Wadi Lawayni, der sich als entscheidend herausstellen sollte. Knirschend und dröhnend fraß sich ein Bohrer auf dem Rücken eines großen Fahrzeugs in den Boden des Tals. Ein Seil hatte bereits neun Meter des Bohrkerns aus dem Loch gezogen. Dessen Stücke, jedes ein paar Meter lang und einige Zentimeter im Durchmesser, lagen der Reihe nach auf Klapptischen ausgebreitet, wo ein halbes Dutzend Wissenschaftler sie begutachtete. »Schon innerhalb der ersten Meter passiert viel«, sagte Kelemen, während er zielstrebig von Tisch zu Tisch ging. Die Farbe des Gesteins änderte sich bereits kurz unter der Oberfläche deutlich.

Als das Mantelgestein noch tief unter der Erde lag, muss es dunkelgrün gewesen sein. Das ist die Farbe der magnesium- und kalziumreichen Olivine und Pyroxene, die bei Temperaturen von über 1300 Grad Celsius und in völliger Abwesenheit von Sauerstoff, Wasser und CO₂ entstanden sind. Aber als Tektonik und Erosion das Gestein an die Oberfläche brachten, hatte es bereits eine Reihe chemischer Reaktionen durchlaufen. Die obersten Meter waren in Orangetönen gefärbt, was darauf hindeutet, dass sich in den oberflächennahen Schichten der vom Wasser mitgeführte Sauerstoff mit dem Eisen in den Mineralen verbunden hatte: Im Endeffekt rostete der Fels. Einige Meter tiefer verschwanden diese Farben. Der Sauerstoff war an der Stelle offenbar aufgebraucht. Von dort an durchzogen unzählige haarfeine türkisfarbene Adern aus Serpentin das graue Gestein. Das Mineral bildet sich, wenn Wassermoleküle an Magnesium- und Eisenatome binden. Bei der chemischen Reaktion entsteht auch das Wasserstoffgas, das hier vielerorts aus dem Grundwasser sprudelt.

Kreuz und quer durch dieses Bild zogen sich weiße Adern aus Magnesium- und Kalziumkarbonat. Weiter oben



waren die Linien etwa fingerbreit, doch in zehn Meter Tiefe kamen sie nur noch gelegentlich vor und waren sehr dünn. Das Wasser musste auf seinem Weg durch den Stein also auch das Kohlenstoffdioxid abgegeben haben.

Die Bohrungen gingen mehrere Tage lang weiter, und die Arbeiter verpackten die Kerne in Kisten, um Platz für Dutzende neuer Segmente zu schaffen, die sich auf den Tischen drängten. Sogar in 400 Meter Tiefe war das Gestein von feinen Serpentin durchzogen – mindestens bis hierher war das Wasser demnach gesickert.

In den folgenden drei Jahren setzten Labors die Analysen fort, um festzustellen, wie schnell der Fels mit CO₂ und Wasser reagiert. Matter fiel dabei eine Eigenart auf, die sich in allen Bohrkernen zeigte: »Unterhalb von maximal 100 Metern findet man absolut keine Karbonatminerale in Adern oder Klüften.« Das Grundwasser in den oberen 50 Metern der Bohrkern war nach Regenfällen in den Fels gesickert und befand sich seit 4 bis 40 Jahren dort, schätzten Kele-



JUERE M. MATTER, LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY

STÜCK FÜR STÜCK Ein Hohlbohrer arbeitet sich langsam in das Mantelgestein vor (links) und erzeugt einen zylindrischen Kern. Die Forscher reihen die Bohrkern e einen nach dem anderen auf (rechts), um zu sehen, wie tief das Wasser eindringt und wie viel CO₂ mineralisiert wird.

men und seine Kollegen 2019, darunter Matter sowie dessen ehemalige Studentin Amelia Paukert Vankeuren, heute Assistenzprofessorin für Geologie an der California State University in Sacramento. In den darunterliegenden Gesteinsschichten hingegen ruhte es seit mindestens 20000 Jahren. Wie Matter und Gérard Lods von der Université de Montpellier in Frankreich 2020 gemessen haben, bewegt sich Wasser oberhalb von 100 Metern Tiefe stellenweise noch relativ leicht durch den Fels, weiter unten jedoch ist er dafür rund 1000-mal weniger durchlässig.

Heißes Sprudelwasser in 1000 Meter Tiefe

Ein zentraler Engpass begrenzt demnach die Geschwindigkeit der mineralischen Karbonisierung im Oman: Regenwasser dringt schlicht nicht tiefer als etwa 100 Meter hinab. Und das Mantelgestein im Oman ist im Durchschnitt etwa drei Kilometer dick. »Es gibt also ein riesiges Potenzial für die Karbonisierung in der Tiefe«, urteilt Matter – sofern das Wasser irgendwie dorthin gelangen und schnell durch das Gestein zirkulieren kann, um eine ständige CO₂-Zufuhr zu gewährleisten.

Folgt man der Vision der Forscher, dann lässt sich dieser Flaschenhals technisch überwinden. Maschinen zur direkten Luftabscheidung könnten Kohlenstoffdioxid aus der

Umgebung ziehen und aufkonzentrieren. Mit Hilfe weiterer Anlagen ließe sich das Gas unter Druck in ein Bohrloch einleiten. In 1000 bis 3000 Meter Tiefe würde es mit separat eingeleitetem Wasser gemischt und beides zusammen in dem umgebenden Mantelgestein freigesetzt. Es versickerte durch die Poren des Gesteins, bis es schließlich ein zweites, bis zu 1000 Meter entferntes Loch erreichte, das als Rücklauf diente. Darüber stiege das nun kohlenstoffdioxidarme Wasser zurück an die Oberfläche, wo es wieder mit dem Gas angereichert würde. In drei Kilometer Tiefe liefen die Reaktionen schneller ab, weil dort Temperaturen von etwa 100 Grad Celsius herrschen. Darüber hinaus erzeugt die chemische Umwandlung selbst zusätzliche Wärme, und das erhitzte Wasser könnte einfacher durch die Rohre wieder nach oben gelangen.

Laut Berechnungen von Kelemen und Paukert Vankeuren aus dem Jahr 2020 ließe sich die Mineralisierung um das 1000-Fache beschleunigen, wenn man Wasser mit leicht erhöhter CO₂-Konzentration in drei Kilometer Tiefe durch das Gestein pumpt. Dank einer solchen Reaktionsgeschwindigkeit könnte eine einzige Bohrung zur Gaseinspeisung bis zu 50000 Tonnen des Klimagases pro Jahr unter die Erde verfrachten. Dieselbe Menge nehmen die Felsformationen im gesamten Oman auf natürliche Weise auf – verteilt auf eine Fläche von neun Fußballfeldern.

Die Grundlage für das, was jetzt auf der Arabischen Halbinsel geschehen soll, haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bereits einige Jahre zuvor auf Island gelegt. Die Insel liegt auf einem Plateau aus Basalt, das entstanden ist, weil aus einem Hotspot tief im Erdmantel kontinuierlich halbflüssiges Magma aufsteigt und am Meeresboden zu dem grauschwarzen Gestein erstarrt. Das

Material enthält mehr Magnesium und Kalzium als die meisten Minerale der Erdoberfläche.

Bereits 2005 waren Matter, Lackner sowie Wallace Broecker von Lamont-Doherty Observatory daher überzeugt, dass diese Basalte das Treibhausgas gut mineralisieren können. Der 2019 verstorbene Broecker startete gemeinsam mit der Firma Reykjavik Energy im isländischen Geothermiekraftwerk Hellisheiði, rund 30 Kilometer entfernt von der Hauptstadt, das Experiment »Carbfix« zur CO₂-Einspeisung. Ab 2012 trennten Maschinen Kohlenstoffdioxid und Schwefelwasserstoffgas – beide natürliche Produkte der geothermischen Anlagen – aus den Abgasen des Kraftwerks ab und pumpten sie durch Bohrlöcher 400 bis 800 Meter tief in das Gestein. Im Lauf von acht Monaten speisten die Ingenieure etwa 250 Tonnen CO₂ in den Boden ein. 95 Prozent davon verfestigten sich innerhalb von zwei Jahren zu Karbonatmineralen, wie die Überwachung zeigte. Seit September 2021 läuft die erste Großanlage des Unternehmens, sie soll jährlich 4000 Tonnen des Gases in den Basalt verfrachten.

Matter, der an der Leitung des Experiments beteiligt war, sieht in den Ergebnissen eine wichtige Bestätigung. Anfangs »hielt man uns für verrückt«, erzählt der Forscher. Fachleute argwöhnten, das Material sei nicht porös genug, um Wasser zu leiten. Seitdem hat das Wallula Basalt Pilot Demonstration Project am Pacific Northwest National Laboratory in Richland, Washington (USA), ebenfalls CO₂ in Basalt mineralisiert.

Mantelgestein könnte noch effektiver sein, da es dreimal so viel reaktives Magnesium und Kalzium enthält. Während eine Tonne Basalt rund 170 Kilogramm Kohlenstoffdioxid verfestigen könnte, kommt eine Tonne Mantelperidotit auf bis zu 500 Kilogramm. Doch nicht alle halten den Ansatz für die beste Lösung. Christopher Zahasky, Hydrogeologe an der University of Wisconsin-Madison, würde das Gas lieber in Sedimentgestein verstaubt sehen. Dort sei es zwar unter Umständen beweglich, räumt er ein. Weil starke Kapillarkräfte die Moleküle in den winzigen Hohlräumen zwischen den Mineralkörnern aber einschließen, sei ein Entweichen unwahrscheinlich – selbst wenn darüberliegende Schichten Risse bekommen sollten.

Einen zentralen Vorteil sieht der Experte gleichwohl in der CO₂-Speicherung in Basalten und Mantelformationen. »Sie lässt sich den Menschen schlicht einfacher verkaufen und erklären«, sagt er – ein wichtiger Aspekt, denn Großprojekte werden ohne eine starke öffentliche Unterstützung vermutlich nicht zu Stande kommen. Außerdem ist das fragliche Gestein in einigen Regionen wie dem Oman, Indien und dem pazifischen Nordwesten der USA möglicherweise reichlicher vorhanden als geeignete Sedimentablagerungen. Um das Klimaproblem zu lösen, so Zahasky, »müssen wir wirklich alles in die Waagschale werfen«.

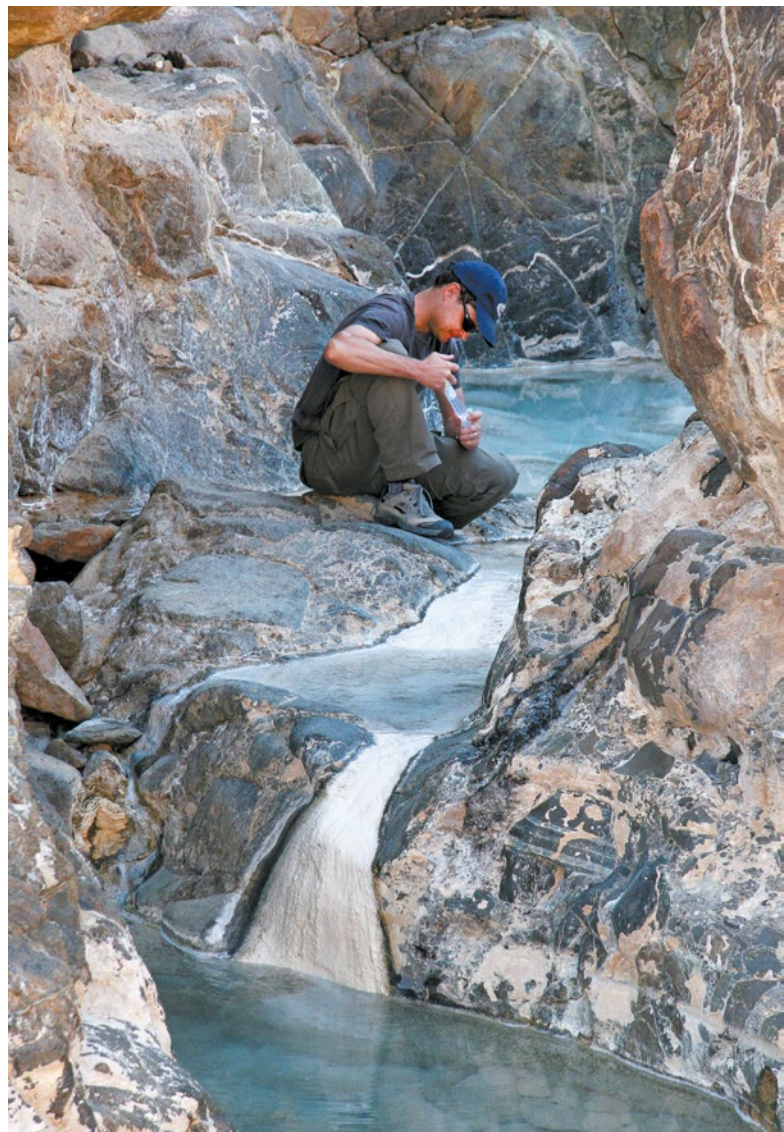
Eine Herausforderung ist in seinen Augen, dass Mantelgestein ein viel geringeres Porenvolumen hat als Sedimentgestein. »Man braucht mehr Bohrungen, um die Flüssigkeiten unterirdisch gleichmäßiger zu verteilen«, sagt er. Kelemen hat sich jahrelang mit dem Problem beschäftigt. Er glaubt an eine Lösung: Wenn die Einspeisung richtig durchgeführt wird, könnten die chemischen Reaktionen selbst

den Fels aufbrechen und den Weg für das Wasser frei machen.

Um zu demonstrieren, was er damit meint, zeigte mir der Geologe einen mehrere Meter großen Felsbrocken mit abgerundeten Kanten, der von Karbonatadern durchzogen war. Ziegelsteingroße Abschnitte, die einst genau zusammenpassten, waren durch die dazwischenliegenden Adern gegeneinander verkippt und unregelmäßig auseinandergedrückt worden. Das Ganze sah aus wie ein kaputtes Bauwerk, bei dem sich der Mörtel zwischen den Ziegeln ausgedehnt hat. »Wenn ich mir diesen Aufschluss ansehe, kann ich fast hören, wie er explodiert«, sagte Kelemen.

Bis in die letzte Pore

Der bildlich als Explosion beschriebene Vorgang fand in Zeitlupe statt, als sich das Gestein noch im Untergrund befand. Wenn sich CO₂ an Magnesium oder Kalzium anlagert, nimmt das neu gebildete Mineral 20 bis 60 Prozent mehr Volumen ein. Nach einer Modellierung von Kelemen können diese Karbonatminerale während ihres Wachstums bis zu 2900 Bar Druck auf den umgebenden Fels ausüben. Daher, so der Forscher, sollte die chemische Umwandlung von Mantelgestein auf natürliche Weise Risse verursachen, die immer tiefer und breiter werden, neue reaktive Oberflächen frei legen und noch mehr Wasser und Kohlenstoffdioxid eindringen lassen.



PETER B. KELEMEN, LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY



JÜRGEN M. MATTER, LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY

HARTES WASSER Der Geologe Jürg Matter (Foto links) analysiert Grundwasser in einem Wüstental im Oman. Es enthält so viel Kalzium, dass dieses mit dem Kohlenstoffdioxid der Luft reagiert und perlweiße Schichten aus Kalzit (CaCO_3) auf dem Wasser bildet (oben). Kalzit kann sich auch auf Gesteinsoberflächen ablagern.

Hinweise auf ein solches Fracking entdeckten Matter und Robert Sohn, ein Geophysiker an der Woods Hole Oceanographic Institution, bei zwei Reisen ins Wadi Lawayni in den Jahren 2019 und 2020. Sie ließen Hydrophone in mehrere wassergefüllte Bohrlöcher hinab, die noch von der letzten Bohrung stammten, und platzierten Seismometer um die Löcher herum. Im Lauf eines Monats zeichneten sie Hunderte mikroskopischer Erdbeben auf, so schwach, dass sie für Menschen nicht spürbar waren. »Wenn der Stein durch die Reaktion aufbricht, erzeugt das sehr charakteristische Signale«, erläutert Sohn. Die Daten, sagt er, »waren voll davon«. Allerdings beweisen die Ergebnisse die Theorie noch nicht, nur weil sie zu ihr passen, gibt der Forscher zu bedenken.

Selbst wenn Ingenieure herausfinden sollten, wie sie die reaktionsbedingte Ausdehnung und Rissbildung zu ihrem Vorteil nutzen können, müssten sie mögliche Nebenwirkungen berücksichtigen. Nach groben Schätzungen könnte die mineralische Karbonisierung von einer Milliarde Tonnen CO_2 pro Jahr das Volumen des Gesteins in diesem Zeitraum um bis zu einen zehntel Kubikkilometer erhöhen. Das entspricht

etwa 35-mal dem Empire State Building. Verteilt sich diese unterirdische Ausdehnung unter 300 Quadratkilometern Land, wie in einem von Kelemens Szenarien, dann würde sich der Boden dort dadurch um bis zu 30 Zentimeter jährlich heben.

Pumpt man auf derselben Fläche hingegen nur eine Million Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr in das Gestein, würde sich die Erde währenddessen weniger als einen Millimeter nach oben wölben. Das ist vielerorts geringer als die natürliche Hebung auf Grund tektonischer Kräfte. Problematisch wird die Ausdehnung erst bei wirklich großen Gasmengen. Einspeisungen im Gigatonnenmaßstab sollten Kelemens Ansicht nach daher nahe der Küste des Golfs von Oman stattfinden. Dort können Ingenieure diagonal in das Mantelgestein bohren, das sich unter dem flachen Meeresboden befindet. Jede Hebung oder Ausdehnung fände dann wahrscheinlich auf dem Grund des Ozeans statt und wäre daher vermutlich harmlos. Außerdem wäre dort reichlich Meerwasser für den Transport von konzentriertem Kohlenstoffdioxid vorhanden – das ist wichtig, da Grundwasser in dem Wüstenstaat eher knapp ist.

Freilich müssen noch einige Fragen geklärt werden, bevor solch ein Unterfangen starten kann. Einen Anfang macht das im Land ansässige Unternehmen »44.01« (benannt nach dem durchschnittlichen Molekulargewicht von CO_2). Mit Genehmigung der Regierung hat es den weltweit ersten Pilotversuch zur Mineralkarbonisierung in Mantelgestein gestartet. Die Firma will Süßwasser zusammen mit Kohlenstoffdioxid und einer inerten Tracer-Chemikalie in

ein Bohrloch pumpen. Indem sie den Gehalt an Tracer, CO₂ und gelösten Mineralen in einem zweiten, etwa 100 Meter entfernten Bohrloch überwachen, wollen die Wissenschaftler herausfinden, wie schnell sich das Wasser durch das Gestein bewegt und wie viel CO₂ ihm entzogen wird. Kelemen und Mitter stehen dem Unternehmen beratend zur Seite.

Bis Ende 2021 will Talal Hasan, der Gründer von 44.01, herausgefunden haben, ob das Gas rasch mineralisiert wird. Falls das der Fall ist, will das Unternehmen im Jahr 2022 mit der ersten kommerziellen Einspeisung beginnen. Dabei sollen mit Hilfe von Süßwasser oder möglicherweise aufbereitetem Abwasser 10000 Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr in ein einziges Bohrloch geleitet werden, in der Hoffnung, die Menge später auf 100000 Jahrestonnen erhöhen zu können. Außerdem plant die Firma einen zweiten Pilotversuch in Küstennähe mit Meerwasser statt Süßwasser.

Nach Hasans Vorstellungen wird 44.01 seine Dienstleistungen an Firmen wie Climeworks aus der Schweiz oder das US-amerikanische Unternehmen Carbon Engineering verkaufen, die wiederum ihre Maschinen zur direkten Luftabscheidung im Oman betreiben würden. Dadurch könnte das Land ein wichtiges globales Zentrum zur CO₂-Abscheidung werden.

Hasan glaubt, dass sein Unternehmen eines Tages in der Lage ist, 1,3 Milliarden Tonnen des Klimagases jährlich in Mantelformationen des Oman zu mineralisieren. Damit würde es einen bedeutenden Beitrag zu den 2 bis 20 Milliarden Tonnen CO₂ leisten, die der Mensch jedes Jahr aus der Luft entfernen muss, um die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius

Das Ausmaß eines solchen Vorhabens mag zunächst schockieren, aber der Klimanotstand wird sich nur mit gewaltigem Aufwand in den Griff bekommen lassen. Und die Maßnahme ist noch vergleichsweise klein gegenüber der Infrastruktur, die fossile Brennstoffe fördert. Allein in den USA gibt es mehr als eine Million Öl- und Gasbohrungen. Natürlich müsste die Menschheit die Gelegenheit nutzen, um auf erneuerbare Energien umzusteigen – und darf die Technologie nicht als Freibrief verwenden, noch mehr Treibhausgase auszustoßen.

Ausschlaggebend für den Erfolg werden die Kosten sein. Carbfix in Island mineralisiert CO₂ für rund 25 US-Dollar pro Tonne (44.01 gibt keine offiziellen Kostenschätzungen heraus). In einem ähnlichen Bereich rangieren andere, weniger langfristige Speicherstrategien wie Aufforstung oder Bodenbewirtschaftung, hat ein internationales Forschungsteam 2018 errechnet.

CO₂-Abscheidung könnte sich dank höherer Preise für das Klimagas künftig rentieren

Die eigentliche wirtschaftliche Herausforderung besteht darin, das Treibhausgas abzufangen und aufzukonzentrieren, bevor es in den Boden geleitet wird. Kelemens Kollegin Jennifer Wilcox, mittlerweile stellvertretende Hauptstaatssekretärin für fossile Energien bei der US-amerikanischen Energiebehörde, und ihr Doktorand Noah McQueen von der University of Pennsylvania haben abgeschätzt, was die Abscheidung und Komprimierung von Kohlenstoffdioxid insgesamt kostet, einschließlich der Gehälter für die Mitarbeitenden und der Ausgaben für den Bau und die Wartung der Geräte über 20 Jahre. Danach beläuft sich jede aus der Atmosphäre entfernte Tonne Kohlenstoffdioxid auf 120 bis 220 US-Dollar. Denn die direkte Luftabscheidung erfordert viel Energie, und »wenn man dazu fossile Brennstoffe einsetzt«, so Wilcox, »muss man die Kosten für das zusätzlich erzeugte CO₂ bedenken«. Die Technologie sei jedoch noch jung, merkt Ajay Gambhir an, ein Klimaökonom am Imperial College London, und Innovationen könnten die Preise senken. Wenn die Maschinen dieselbe Entwicklung nehmen wie die Windkraftanlagen in den letzten zehn Jahren, könnten sie einmal etwa ein Viertel des heutigen Preises kosten. Aber »das wissen wir erst, wenn sie in großem Maßstab eingesetzt werden«, sagt Gambhir.

Es ist unwahrscheinlich, dass Verursacher von Emissionen für die Abscheidung und Mineralkarbonisierung zahlen, solange Regierungen keine Abgaben für den Ausstoß von Treibhausgasen verlangen. Derzeit erheben die meisten Industrieländer weniger als 50 US-Dollar Steuern auf eine Tonne Kohlenstoffdioxid, berichtet Gregory Nemet, der an der University of Wisconsin-Madison über Energiepolitik forscht. Gleichzeitig gibt es andere Anreize für Unternehmen, ihre Klimabilanz zu verbessern. Um etwa die Kriterien für die CO₂-Norm bei Kraftstoffen in Kalifornien einzuhalten, zahlen Firmen dort bis zu 200 Dollar pro Tonne für CO₂-Gutschriften, wobei die Preise mit der Zeit wahrscheinlich steigen werden. Damit öffnet sich eine Marktlücke für Projekte wie dasjenige von 44.01. Wenn mehr Regierungen das Klimagas bepreisen, könnte die Nachfrage nach ihren Dienstleistungen steigen. Mit der Zeit und der Erfahrung



PETMAL / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

zu begrenzen. Derzeit ist 44.01 die einzige Firma, die versucht, das Gas in Mantelgestein einzuleiten, doch die Nationale Akademie der Wissenschaften der USA sieht laut einem Bericht von 2019 Potenzial in der Technologie. Die Fachleute kommen darin zu dem Schluss, dass Mantelformationen sowie Sedimentablagerungen weltweit mehrere zehn Milliarden Tonnen CO₂ jährlich umwandeln könnten.

Das ehrgeizige Unterfangen, im Oman eine Milliarde Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr unschädlich zu machen, würde eine umfangreiche Infrastruktur erfordern. Kelemen hat errechnet, dass 5000 Bohrungen nötig wären, wenn man das Gas auf das 440-Fache seines natürlichen Vorkommens im Meerwasser konzentrierte. Insgesamt würden dann 23 Kubikkilometer Wasser pro Jahr durch das Gestein gepumpt (zum Vergleich: Schätzungsweise 27 Kubikkilometer entlässt die Elbe bei Cuxhaven jährlich in die Nordsee).

werden die Anlagen dann ausgefeilter und größer, und die Kosten sinken.

Auch wegen des vorhandenen technischen Knowhows ist der Oman ein attraktiver Standort für ein solches Vorhaben. Der Staat besitzt eine große Industrie zur Förderung fossiler Brennstoffe und daher bereits Erfahrung im Umgang mit unter Druck stehenden Gasen. Einen weiteren Vorteil bietet die Sonneneinstrahlung, die das ganze Jahr über intensiv ist: Für die jährliche Entfernung einer Milliarde Tonnen Kohlenstoffdioxid aus der Luft sind nach McQueens Berechnungen 700 Milliarden bis 1,3 Billionen Kilowattstunden Energie nötig. Die wiederum könnten Solaranlagen mit einer Fläche von 300 bis 600 Quadratkilometern liefern, was zusammengenommen nicht mehr als 0,2 Prozent der Fläche des Landes wären (berechnet nach Standardformeln basierend auf der Sonnenlichtintensität).

Auf der anderen Seite gilt es, das empfindliche landschaftliche und kulturelle Erbe des Sultanats zu schützen: Seine spektakulären Küsten, Canyons, mittelalterlichen Festungen und Moscheen locken jedes Jahr Millionen von Touristen an. Die traditionelle Beduinenbevölkerung zieht teilweise noch durch das Land. Und trotzdem verfügt der Staat, ebenso wie die gesamte Arabische Halbinsel, über eine Fülle von offenen, trockenen Flächen, die eine aufkeimende Industrie für negative Emissionen beherbergen könnten.

Es gibt auch Wissenschaftler, die sich die Nutzung des Mantelgesteins ganz anders vorstellen. Einige schlagen zum Beispiel vor, die Felsen abzutragen, zur Oberflächenvergrößerung zu zermahlen und über Tausende von Quadratkilometern Wüste zu verstreuen, wo das Material auf natürliche Weise Kohlenstoffdioxid absorbieren würde. Jedes Jahr könnte man die Brocken einsammeln und das CO₂ durch Erhitzen austreiben, um sie dann erneut zu verteilen. Das Gas müsste daraufhin entsorgt werden – wahrscheinlich, indem man es in andere Gesteinsformationen einbringt – oder könnte als Ausgangsmaterial für Kunststoffe oder synthetische Kraftstoffe dienen. Alternativ ließe sich das Gestein auf Ackerflächen ausbringen, wo es ebenfalls das Treibhausgas absorbiert und möglicherweise die Bodenqualität verbessert. Doch ganz gleich, wie man es anstellt: Abbau, Zerkleinerung und Transport würden zweifelsohne die Landschaft zerstören und eine Menge Energie verbrauchen. Zumindest im Oman mag Kelemens Vorschlag, 5000 Bohrlöcher zu installieren, weniger extrem erscheinen. Platzierte man sie entlang von Küstengebieten, in denen sich bereits Industriebetriebe befinden, würden sie das Landschaftsbild nicht stärker stören als ein Windpark am Meer. Solaranlagen könnten auf sorgfältig ausgewählten Parzellen weiter im Landesinneren ihren Platz finden.

Im Moment ist Kelemen froh, dass mit dem Feldversuch im Wadi Lawayni ein erster Schritt getan ist. Der Weg hierhin war lang, und die erste vorsichtige Neugier in den frühen 2000er Jahren ist heute unverhohlener Begeisterung gewichen. Nun denkt der Forscher bereits über Möglichkeiten nach, die physischen Auswirkungen eines solchen Eingriffs zu verringern. An einem Abend meines Besuchs im Jahr 2018 führte er mich eine Schlucht hinauf. Er deutete auf einen Berggipfel zu unserer Rechten, der im schwinden-

den Abendlicht rötlich schimmerte. »In diesem Berg befindet sich eine Milliarde Tonnen CO₂«, erklärte er. Während die Karbonatadern im gesamten Oman nur ein Prozent des Volumens des Oberflächengesteins ausmachen, sei in jenem kleinen Berg »jedes einzelne Magnesiumatom und jedes einzelne Kalziumatom mit Kohlenstoffdioxid zu Karbonat verbunden«.

Diese Felsen bestanden ursprünglich aus denselben Mantelmineralen, die man hier überall sonst findet. Sie haben jedoch schon vor langer Zeit reagiert, als sie noch tief unter der Erde lagen und daher sehr heiß waren. Das Wasser und das CO₂ stammten von einer nahe gelegenen tiefen Subduktionszone. Während die Ozeansedimente dort in den Erdmantel sanken, wurden sie sozusagen unter Hochdruck gegart. Auf Grund geochemischer Analysen aus dem Jahr 2020 geht Kelemen davon aus, dass die Steine bei der Mineralisierung bis zu 250 Grad Celsius heiß waren. Bei solchen Temperaturen lief die reaktionsbedingte Spaltung des Gesteins quasi in Perfektion ab, so dass auch wirklich jedes Stückchen Fels reagierte.

Beginn einer Zukunftstechnologie?

Viele Mantelgesteine im Oman sind heute genauso heiß, aber sie befinden sich fünf bis sechs Kilometer unter der Oberfläche. Um sie zu erreichen, wären anspruchsvollere Bohrungen erforderlich. Sie könnten sich laut Hasan dann wirtschaftlich lohnen, wenn sich die Pilotstudien als viel versprechend erweisen.

Im Endeffekt steckt die Industrie für negative Emissionen ähnlich in den Kinderschuhen wie die Ölförderung zu ihren Anfängen in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Die ersten Ölbohrungen reichten nur wenige Meter tief. Mit der Zeit strebten die Unternehmen nach größeren Vorkommen weiter unter der Oberfläche – das war möglich, weil sich die Bohrtechnologie weiterentwickelte, die weltweite Infrastruktur für die Gewinnung, den Transport und den Verkauf des wertvollen Produkts wuchs und die Menschen immer mehr begehrten. Dieselben Triebkräfte könnten uns eines Tages dazu bringen, auf der Suche nach heißem Gestein zur Verfestigung des Klimagases CO₂ tiefer und tiefer vorzudringen. Der Oman, der Milliarden mit dem Verkauf von unterirdisch schlummernden Kohlenwasserstoffen an die Welt verdient hat, könnte auf geniale Weise weitere Milliarden einnehmen, indem er denselben Kohlenstoff wieder im Boden vergräbt. ◀

QUELLEN

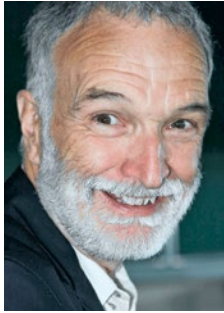
Fuss, S. et al.: Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13, 2018

Kelemen, P. B. et al.: Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO₂ removal from air: Review and new insights. *Chemical Geology* 550, 2020

Lods, G. et al.: Groundwater flow characterization of an ophiolitic hard-rock aquifer from cross-borehole multi-level hydraulic experiments. *Journal of Hydrology* 589, 2020

Paukert Vankeuren, A. N. et al.: Multitracer determination of apparent groundwater ages in peridotite aquifers within the Samail ophiolite, Sultanate of Oman. *Earth and Planetary Science Letters* 516, 2019

SCHLICHTING! WIE SPAGETTI ERWEICHEN



Während harte Spaghetti im heißen Wasser allmählich flexibel werden, läuft eine Reihe physikalischer Vorgänge ab. Diese lassen sich erstaunlich gut modellieren.

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/1924951

Was ein Häkchen werden will, krümmt sich beizeiten

Spruchwort

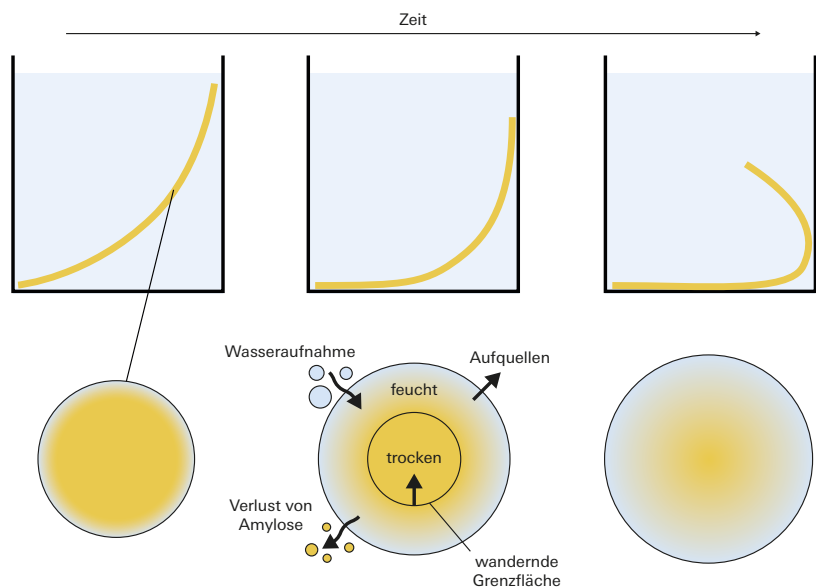
Es spricht wohl für die Beliebtheit der Spaghetti, dass sich Fachleute mit dem Verhalten der dünnen Nudelstäbe seit Jahrzehnten wissenschaftlich auseinandersetzen. Vor einigen Jahren wurde bereits die vom Physiker Richard Feynman (1918–1988) gestellte Frage beantwortet, warum Spaghetti kaum entzweizubrechbar sind. In den meisten Fällen entstehen nämlich nicht zwei, sondern drei oder manchmal auch mehr Bruchstücke (siehe »Spektrum« Juli 2016, S. 42). Rohe Spaghetti gehören aus dem Blickwinkel der Kulinarik allerdings nicht gerade zu den interessantesten Lebensmitteln. Doch inzwischen hat die Forschung auch die gekochten Nudeln in den Blick genommen. 2020 haben zwei Ingenieurwissenschaftler von der University of California in Berkeley

WÄSSERUNG Zunächst beginnt eine einzelne Nudel durchhängen (links), dann setzt sie sich immer mehr auf dem Boden ab (Mitte). Schließlich ist sie so biegsam, dass sich das freie Ende einrollt (rechts). Der Grund: Feuchtigkeit dringt in Form einer rotationssymmetrischen Wasserfront in die Nudel ein und weicht sie auf (untere Reihe).

ein Modell vorgestellt, das die Mechanik des Übergangs beschreibt, bei dem Spagettistäbe vom festen in den biegsamen Zustand und wieder zurück wechseln.

Dabei knüpften sie an eine bekannte Situation an: Bei der Zubereitung werden die trockenen Spaghetti in einen Topf mit heißem Wasser gegeben. Um sie nicht zerbrechen zu müssen, lehnt man sie oft zunächst an die Topfwand. Schon nach kurzer Zeit verformen sie sich und sinken tiefer ins Wasser. Was geht bei dem Vorgang mit den Nudeln vor sich?

Spaghetti werden wie die meisten Nudelarten aus Hartweizengrieß hergestellt. Grieß enthält Stärke und Eiweiße. Letztere kann man sich als mikroskopisch feine, miteinander verschlungene Fäden vorstellen, die Stärke wiederum entspricht winzigen Körnern. Der Grieß wird



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ANNE BECKERS, NACH COUDRETS, N. D., CHELIVY, O. M., MECHANICS-BASED MODEL FOR THE COOKING-INDUCED DEFORMATION OF SPAGHETTI, PHYSICAL REVIEW E 101, 033001, 2020, FIG. 1-2

METAMORPHOSE Beim Kochen verwandeln sich feste und spröde Nudeln in weiche und biegsame Schnüre.

mit Wasser versetzt und der so entstehende Teig kräftig geknetet. Dabei entfalten sich die zunächst kompakt geknüllten Eiweißäden und verfilzen mit der Stärke zu einem zusammenhängenden Teig. Die Verbindung ist so stark, dass später die gekochten Spaghetti nicht zerfallen. Indem der Teig durch eine Düse gepresst wird, erhalten die einzelnen Stränge ihren runden Querschnitt. Eine vorsichtige Trocknung bringt die bekannte Form und Härte.

Das Zubereiten in kochendem Wasser macht den Herstellungsprozess gewissermaßen wieder rückgängig. Bei der Transformation von fest zu flexibel durchdringt die Flüssigkeit allmählich die fein poröse, Wasser liebende (hydrophile) Trockenteigmasse. Der Vorgang läuft von selbst ab, weil die Grenzflächenbildung zwischen Nudelsubstanz und Wasser weniger Energie erfordert als die zwischen Nudel und Luft. Mit kaltem Wasser würde die innere Benetzung allerdings sehr lange dauern. Mit der Temperatur eines Stoffs steigt die mittlere Bewegungsgeschwindigkeit seiner mikroskopischen Bestandteile; eine Front heißer Wassermoleküle schreitet deshalb wesentlich schneller voran.

Das Wasser dringt zunächst radial in die harten Spaghetti ein. Eine scharf umrissene Grenzfläche bewegt sich zum kleiner werdenden trockenen Kern, und der feuchte äußere Ring wächst. Die durchnässte Zone schwillt an und macht so die Verbindung von Stärke und Wasser sichtbar. Dabei werden die gewässerten Stäbe nicht nur dicker, sondern auch etwas länger. Zudem geliert die Stärke in den Außenbereichen des Rings. Diese Verkleisterung lässt die Nudel zusätzlich aufquellen und macht sich in einer mehr oder weniger ausgeprägten Klebrigkeit bemerkbar.

Nach meinen eigenen Messungen nimmt die Masse der ursprünglich harten Spaghetti im gegarten, gut abgetropften Zustand um das 2,4-Fache zu. Eine kleine Menge eines Bestandteils des Stärkemehls (Amylose) wird ausgespült. Das erkennt man auch an der Trübung des Kochwassers.

An der trockenen Luft verdunstet das Wasser der weichen Spaghetti wieder. Sozusagen kehrt sich die Richtung des Flüssigkeitstransports durch die feinen Poren um, bis schließlich wieder harte Nudeln zurückbleiben. Abgesehen von geringen Geschmackseinbußen und Substanzverlusten an das Kochwasser verläuft die Trocknung nahezu reversibel.

SERGIU YILMAZ / GETTY IMAGES / ISTOCK



Um die mechanischen Veränderungen beim Durchfeuchten genauer zu verstehen und modellmäßig zu erfassen, verfolgten die beiden Forscher aus Berkeley die Veränderungen an einer einzelnen Nudel. Diese platzierten sie so in heißem Wasser, dass sie mit dem einen Ende den Boden und mit dem anderen die Wand des Gefäßes berührte.

Während der Anteil der harten Substanz allmählich abnimmt, sinkt auch die Biegesteifigkeit. Sie reicht irgendwann nicht mehr aus, um die durch die Schwerkraft bedingten Biegemomente der Nudel zu kompensieren – diese beginnt durchzuhängen. Indem sie sich dabei immer mehr an die Wand anschmiegt, rutscht der obere Berührungspunkt herab. Gleichzeitig nähert sie sich im unteren Bereich dem Boden.

Kurz bevor der Teig völlig durchweicht ist, kann die verbliebene Biegesteifigkeit das obere Ende nicht mehr senkrecht halten. Kleinste Störungen lassen die Nudel unter dem Einfluss der eigenen Schwere vornüberkippen, bis sie mit der Spitze den Boden erreicht. Der Krümmungsradius im Endzustand ist ein Maß für die restliche Biegesteifigkeit.

Die Wissenschaftler haben ein rein mechanisches und reibungsfreies Modell aufgestellt, und es reproduziert das Verhalten trotz der Vereinfachungen sehr gut. Insbesondere erklärt es die Fähigkeit der Nudel, am Schluss eine Konfiguration anzunehmen, die sowohl geometrisch als auch von der Konsistenz her wesentlich komplexer ist als im Ausgangszustand: Bekanntlich lassen sich Spaghetti nur dann gut um eine Gabel wickeln, wenn sie frisch gekocht sind. Jedem selbst überlassen bleibt indes, ob sie auch besser schmecken, wenn man die Zubereitung einmal unter der physikalischen Perspektive betrachtet.

QUELLE

Goldberg, N. N. et al.: Mechanics-based model for the cooking-induced deformation of spaghetti. *Physical review E* 101, 2020



MILITÄRTECHNIK DER HYPE UM DEN HYPERSCHALL

Neuartige Lenkflugkörper mit vielfacher Schallgeschwindigkeit sollen kaum zu entdecken und abzuwehren sein. Staaten investieren bereits Milliarden in die Entwicklung, ein neuer Rüstungswettlauf droht. Dabei können die Waffen die hochgesteckten Erwartungen schon aus physikalischen Gründen kaum erfüllen.



David Wright (links) ist theoretischer Physiker am Laboratory for Nuclear Security and Policy am Massachusetts Institute of Technology. **Cameron Tracy** ist Ingenieur und Materialwissenschaftler in Cambridge. Beide engagieren sich bei der Union of Concerned Scientists, einer Vereinigung, die sich unter anderem für Abrüstung einsetzt.

► spektrum.de/artikel/1924939

AUF EINEN BLICK ENTZAUBERTE WUNDERWAFFEN

- 1** Militärmächte erforschen Raketen, die mit mehr als fünffacher Schallgeschwindigkeit fliegen und dabei lenkbar bleiben sollen. Das Ziel: feindliche Abwehrsysteme umgehen.
- 2** Aerodynamische Untersuchungen entlarven viele Versprechungen jedoch als überzogen. So weit jenseits der Schallmauer treten extreme physikalische Effekte auf, die technisch nur schwer zu bewältigen sind.
- 3** Praktisch sind Hyperschallwaffen bestehenden Systemen wie Interkontinentalraketen kaum überlegen. Sie wären weder bedeutend schneller noch gut zu steuern – und wegen enormer Hitzeentwicklung obendrein leicht von Satelliten zu entdecken.

▶ 2018 hat der russische Präsident Wladimir Putin eine Ansprache vor der russischen Föderationsversammlung gehalten, in der er ein eskalierendes Wettrüsten mit den USA androhte. Diese waren 2002 aus dem 30 Jahre zuvor geschlossenen ABM-Vertrag zur Begrenzung von Raketenabwehrsystemen ausgestiegen. Nach der einseitigen Aufkündigung entwickelten und bauten die USA ein Netz von Abfangmaßnahmen gegen Langstreckenraketen. Putin habe die US-Amerikaner gewarnt, und nun sähe Russland sich gezwungen, darauf zu reagieren. Darum entwickle Russland neben anderen Systemen jetzt neue Hyperschallwaffen.

Dabei handelt es sich um Flugkörper, die mit mehr als der fünffachen Schallgeschwindigkeit über große Entfernungen durch die Atmosphäre steuern. Mit Mach 1 wird die einfache Schallgeschwindigkeit bezeichnet. Das bis zu Fünffache wird Überschall und alles über Mach 5 Hyperschall genannt. Putin zufolge sollen die »Awangard«-Flugkörper mit einem Anfangstempo von mehr als Mach 20 Tausende von Kilometern weit gleiten und »absolut unverwundbar durch jedes Luft- oder Raketenabwehrsystem« sein. Putin untermauerte die Drohkulisse mit Computeranimationen der Waffen, die sich den Globus entlang- und um Abfangraketen herumschlängeln.

Die Ankündigung heizte einen gefährlichen Rüstungswettlauf an. Die daran beteiligten Militärmächte preisen die neuen Wunderwaffen nicht nur als schnell an, sondern darüber hinaus als gut manövrierbar und schwer zu entdecken. Das wären klare Vorzüge gegenüber den bekannten Interkontinentalraketen. Diese dringen auf einer elliptischen Flugbahn in den Weltraum ein und stürzen dann auf ihr Ziel zu. Dabei erreichen sie zwar ebenfalls Geschwindigkeiten von mehr als Mach 20, haben aber während des größten Teils der Strecke eine vorhersehbare »ballistische« Trajekto-

MODELLUNTERSUCHUNGEN Ein Angehöriger der US-Luftwaffe platziert ein Testobjekt in einem so genannten Ludwig-Rohr. In dieser speziellen Bauart eines Windkanals lassen sich kurzzeitig Strömungen mit Überschallgeschwindigkeit erzeugen.

rie und lassen sich in der Regel nur kurzzeitig steuern, nachdem sie wieder in die Atmosphäre eingetreten sind. Im Gegensatz dazu würden Hyperschallwaffen die meiste Zeit in der Atmosphäre fliegen und den durch die Luftströmung erzeugten Auftrieb nutzen, um Abfangmaßnahmen auszuweichen. Da sie sich in relativ geringer Höhe bewegen, könnten bodengestützte Radarsysteme sie erst in der Nähe ihres Ziels entdecken.

Als Reaktion auf Putins Ansprache erklärten US-Militärs, Hyperschallwaffen würden »die Kriegsführung revolutionieren« – und verstärkten eigene Anstrengungen in dem Bereich. Allein 2021 stellte der US-Kongress 3,2 Milliarden Dollar für die Forschung und Entwicklung von Hyperschallwaffen und zugehörigen Abwehrmaßnahmen bereit. In den verschiedenen Teilstreitkräften des Landes gibt es sechs bekannte Hyperschallprogramme. Auch China forscht an solchen Systemen.

In bestimmten Szenarien militärisch vorteilhaft – aber keineswegs eine Revolution

Befürworter behaupten, die Waffen seien unglaublich flink und praktisch unsichtbar. Wir sind anderer Meinung. Als Teil einer weltweiten Gemeinschaft von Fachleuten aus der Physik und den Ingenieurwissenschaften sammeln wir so viele Informationen wie möglich über neue und in der Regel geheime Technologien, analysieren sie und geben unsere Einschätzungen an die Öffentlichkeit weiter. Unsere Untersuchungen zeigen: Hyperschallwaffen könnten in bestimmten Szenarien militärisch vorteilhaft sein, aber sie stellen keineswegs eine Revolution dar. Viele Behauptungen, die den Hyperschall-Rüstungswettlauf zwischen den USA, Russland und China antreiben und internationale Spannungen verschärfen, sind übertrieben oder schlichtweg falsch.

Seit fast einem Jahrhundert versuchen Militärs, Flugzeuge im Hyperschallbereich zu entwickeln, allerdings mit mäßigem Erfolg. In den späten 1930er Jahren haben der österreichische Ingenieur Eugen Sänger und die deutsche Physikerin Irene Bredt das erste Hyperschallflugzeug entworfen, einen Gleiter namens Silbervogel. Es sollte mit Raketentriebwerken starten und sich mit Hilfe aerodynamischer Effekte in der Luft halten. Die Konstrukteure des NS-Regimes sahen wegen der Komplexität und der Kosten jedoch von der praktischen Umsetzung ab.

Die während des Zweiten Weltkriegs entwickelten Raketentriebwerke wurden hingegen vielfach eingesetzt, auch in der Luftfahrt. In den folgenden Jahrzehnten stellten experimentelle Flugzeuge mit dem auf einem Gemisch aus Brennstoff und einem Oxidationsmittel basierenden Antrieb einen Geschwindigkeitsrekord nach dem anderen auf. Im Oktober 1947 durchbrach mit der raketentriebenen X-1 erstmals ein Mensch offiziell die Schallmauer. In den 1960er Jahren erreichte die X-15 bei Tests Mach 6,7. Pilotengesteuerte Raketenflugzeuge kamen nie über die Prototypphase hinaus, auch wegen der extremen Beschleunigungen, die auf den Organismus einwirken. Unterdessen ermöglichte es das Antriebsprinzip den USA und der Sowjetunion, mit Atomwaffen bestückte ballistische Raketen zu bauen, die mit mehr als Mach 20 von Kontinent zu Kontinent jagen können.

In der militärischen und kommerziellen Luftfahrt wurde stattdessen eine andere Technologie zum Standard: das Turbinen-Strahltriebwerk. Das Bauteil nutzt einströmenden Luftsauerstoff zur kontinuierlichen Verbrennung von Treibstoff. Dadurch entfällt das Gewicht des Oxidators, der beim Raketentriebwerk zusätzlich mitgeführt werden muss. 1976 erreichte die Lockheed SR-71 Blackbird mit etwa Mach 3 die bis heute höchste Geschwindigkeit für ein mit Turbinen-Strahltriebwerken ausgerüstetes Flugzeug. Luft einsaugende Triebwerke stecken außerdem in unbemannten, steuerbaren Marschflugkörpern, von denen die schnellsten Überschallgeschwindigkeiten erreichen können.

Unterdessen blieb die Geschichte der Hyperschallgleiter wechselvoll. Nachdem die USA bis 1963 mehr als fünf Milliarden Dollar (nach heutiger Kaufkraft) für die Entwicklung des auf dem Silbervogel beruhenden Flugkörpers X-20 ausgegeben hatten, beendeten sie das Projekt. Erst nach den Anschlägen vom 11. September 2001 ordnete Präsident George W. Bush die weitere Erforschung von Hyperschallwaffen an. Sie sollten mit nichtnuklearen Sprengköpfen auf verschiedenen Kontinenten zur Terrorbekämpfung eingesetzt werden. Ballistische Interkontinentalraketen hätten die Aufgabe ebenso erfüllt, aber ihr Abschuss könnte fälschlicherweise für einen atomaren Erstschlag gehalten werden und einen Atomkrieg auslösen.

Darüber hinaus wollte die Bush-Regierung Abfangmaßnahmen entwickeln, um sich vor Raketen mit Massenvernichtungswaffen von Terroristen oder so genannten Schurkenstaaten zu schützen. Der dazu 2002 aufgekündigte ABM-Vertrag hatte die USA und Russland bis dahin daran gehindert, eine Abwehr gegen die ballistischen Raketen der jeweils anderen Seite aufzubauen. Angesichts des nun verschobenen Abschreckungsgleichgewichts arbeiteten Russland und in jüngster Zeit China Strategien zur Überwindung des US-Schilds aus, und das führte schließlich auch bei diesen Mächten zum gesteigerten Interesse an Hyperschallwaffen. Letztlich haben die Anschläge vom 11. September 2001 also eine Reihe überstürzter Entscheidungen nach sich gezogen, auf die hin die drei Supermächte USA, Russland und China heute aus unterschiedlichen Gründen und mit verschiedenen technologischen Ansätzen um einsatzfähige Hyperschall-Lenkflugkörper ringen.

Der mächtigste Gegner während des Flugs ist der Luftwiderstand

Die ersten Vertreter dieses Waffentyps, die in naher Zukunft eingesetzt werden könnten, funktionieren nach dem so genannten Boost-Glide-Prinzip. Hierbei befördert eine Trägerrakete den Flugkörper auf eine passende Starthöhe. Dort koppelt er ab, baut beim Herabfallen Geschwindigkeit auf und gleitet ohne eigenen Antrieb über weite Strecken, indem er aerodynamische Auftriebskräfte in den Atmosphärenschichten nutzt. Die USA und weitere Länder arbeiten außerdem an Hyperschall-Marschflugkörpern. Sie befinden sich jedoch noch in frühen Entwicklungsstadien.

Unsere Untersuchungen zeigen, welche enormen Herausforderungen die Gesetze der Physik bei der Konstruktion darstellen. Einer der mächtigsten Gegner ist der Luftwiderstand. Er wirkt auf jedes Objekt, das sich durch die Atmo-

Hyperschallschnell unterwegs

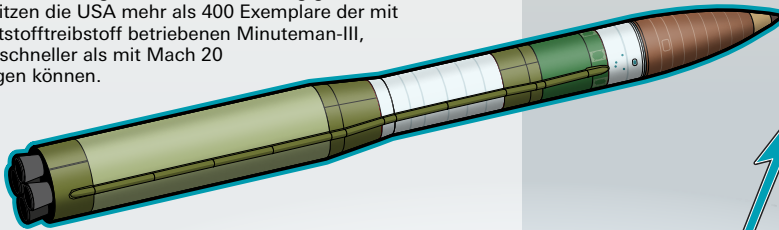
Flugkörper, die sich mit mehr als der fünffachen Schallgeschwindigkeit (Mach 5) über weite Strecken bewegen und dabei mit Hilfe von Auftriebskräften manövrieren, werden als Hyperschallwaffen bezeichnet. Ballistische Raketen fallen nicht in die Kategorie, denn obwohl sie sogar Mach 20 erreichen können, ist ihr Kurs berechenbar. Die Militärmächte forschen an zwei Arten von Hyperschallwaffen. Einerseits werden Marschflugkörper entwickelt, die während des überschallschnellen Flugs von Triebwerken beschleunigt werden. Andererseits besitzen Russland und China nach eigenen Angaben bereits Gleiter, die mit Hilfe konventioneller Raketen in großen Höhen ausgesetzt werden und anschließend durch die Atmosphäre steuern, indem sie die Luftströmungen nutzen.

Eine Interkontinentalrakete hat die größte Reichweite, wenn sie eine weite Strecke hoch über der Atmosphäre zurücklegt, wo der Luftwiderstand gering ist; das dauert allerdings relativ lange. Im Gegensatz dazu bleibt ein Hyperschallgleiter innerhalb der Atmosphäre. Dort manövriert er mittels aerodynamischen Auftriebs und ist schnell am Ziel. Aber auch bei einer ballistischen Rakete lässt sich die Flugdauer deutlich reduzieren. Wenn sie auf eine abgesenkte Bahn geschickt wird, kann sie einen Gefechtskopf in ähnlicher Zeit befördern wie ein Gleiter.

ballistische Raketen

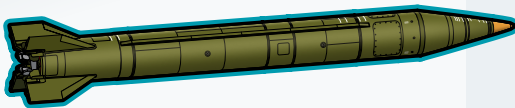
Interkontinentalraketen

Die mehrstufigen Raketen haben eine hohe Reichweite und werden in großer Zahl einsatzfähig gehalten. So besitzen die USA mehr als 400 Exemplare der mit Feststofftreibstoff betriebenen Minuteman-III, die schneller als mit Mach 20 fliegen können.



Kurzstreckenraketen

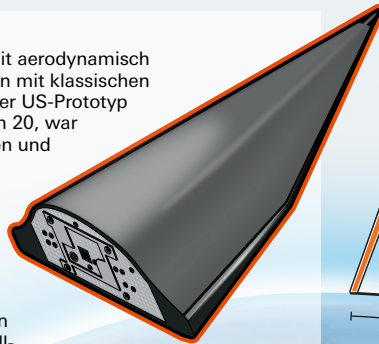
Die in der Sowjetunion entwickelte Feststoffrakete Scud-B kann 300 Kilometer entfernte Ziele treffen und wird heute von vielen Ländern verwendet.



Hyperschallwaffen

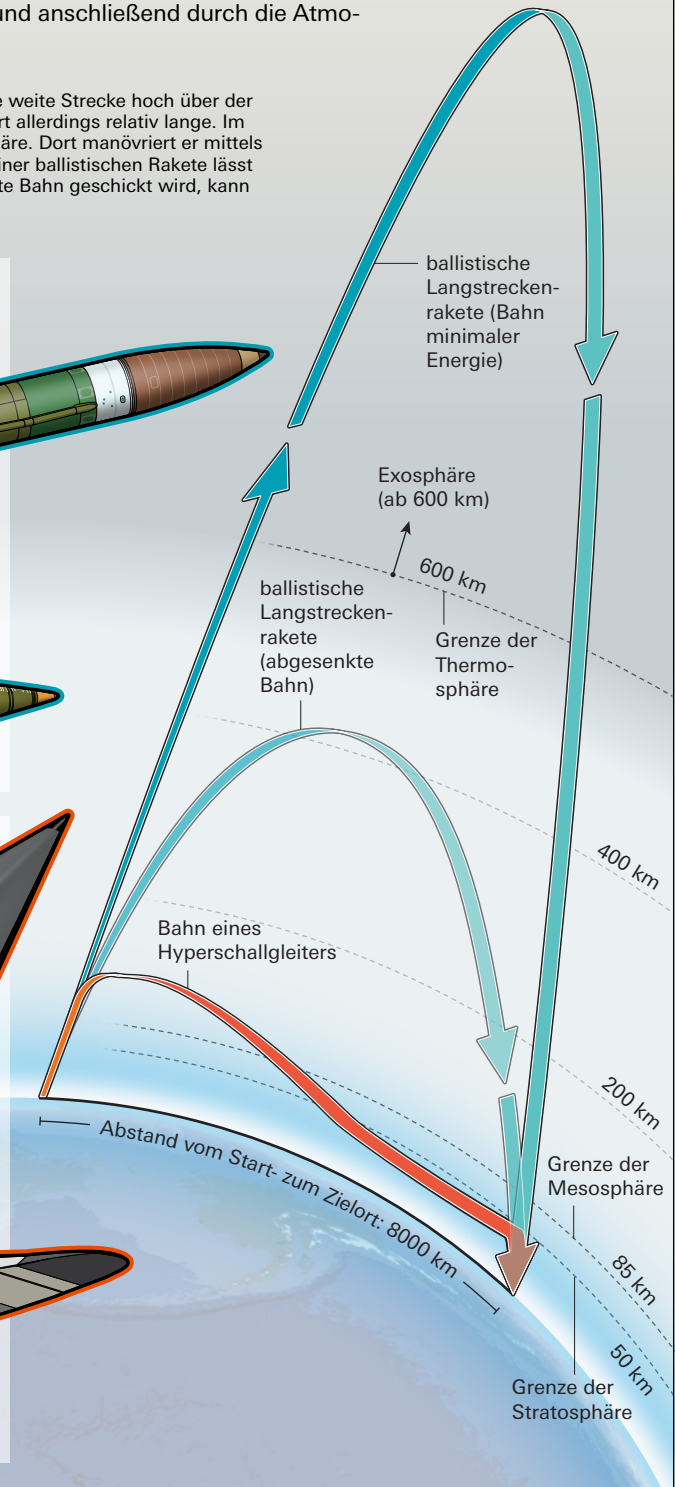
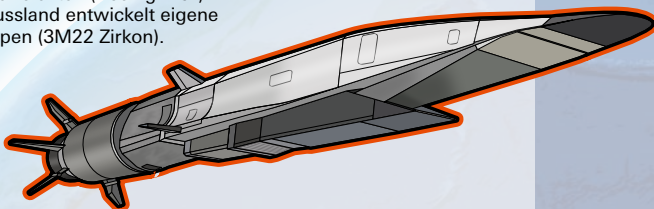
Boost-Glide-Waffen

Langreichweitige Gleiter mit aerodynamisch optimierter Keilform werden mit klassischen Raketenstufen gestartet. Der US-Prototyp HTV-2 kam so bis auf Mach 20, war aber schwer zu kontrollieren und wird seit etwa 2014 nicht weiterentwickelt.



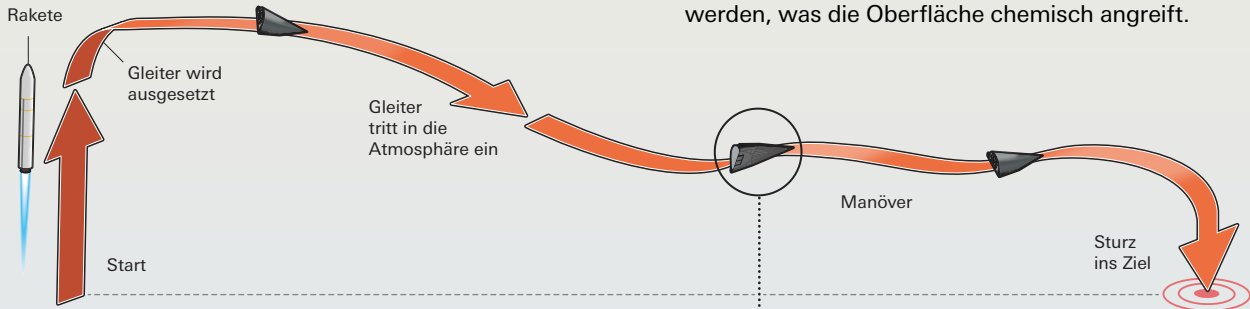
Marschflugkörper

Die Lenk Waffen besitzen spezielle Triebwerke für den Betrieb bei vielfacher Schallgeschwindigkeit. In den 2010er Jahren haben die USA Flugkörper getestet, die Mach 5 erreichten (Boeing X-51). Russland entwickelt eigene Typen (3M22 Zirkon).



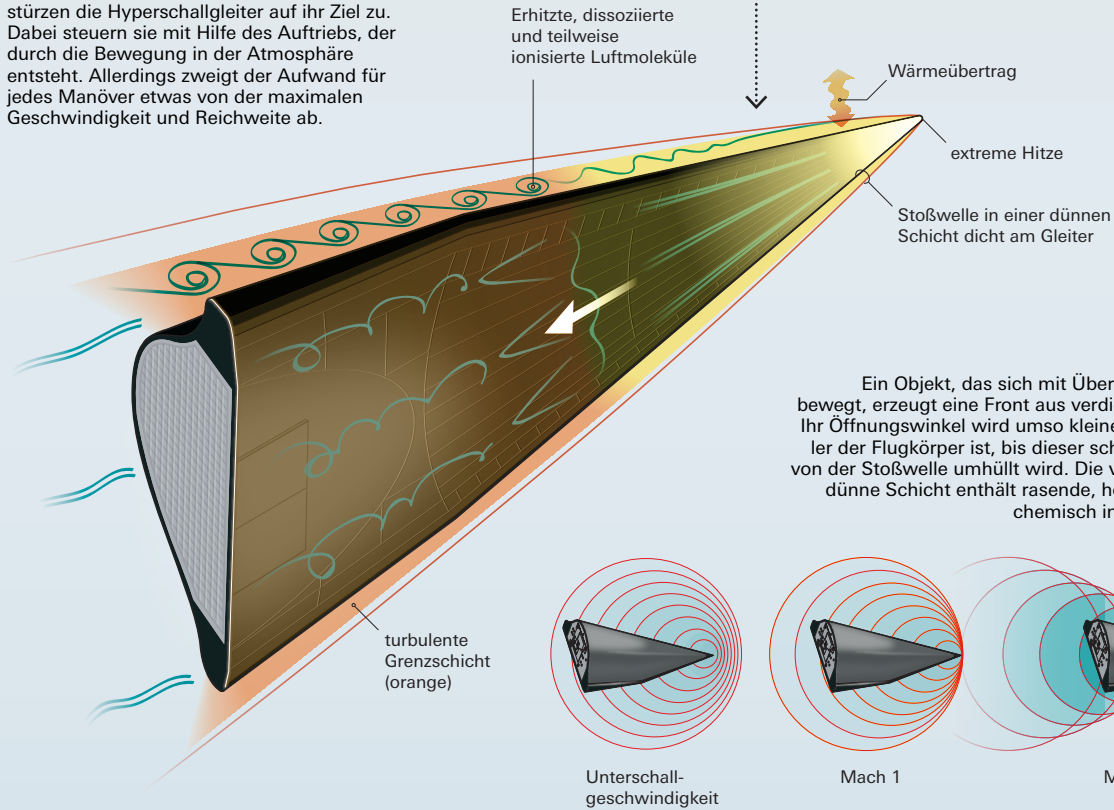
Lästiger Luftwiderstand

Der Widerstand, den ein Objekt bei seiner Bewegung durch Luft erfährt, steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Der Effekt wirkt sich im Hyperschallbereich besonders dramatisch aus. Die Reibung verlangsamt den Flugkörper und wandelt die ihm entzogene kinetische Energie in Stoßwellen und Wärme um. Das kann die Spitze eines Gleiters über längere Zeit auf Tausende von Grad erhitzen und das Material schwächen. Es können sogar Bindungen in den Molekülen der Umgebungsluft auseinandergerissen werden, was die Oberfläche chemisch angreift.



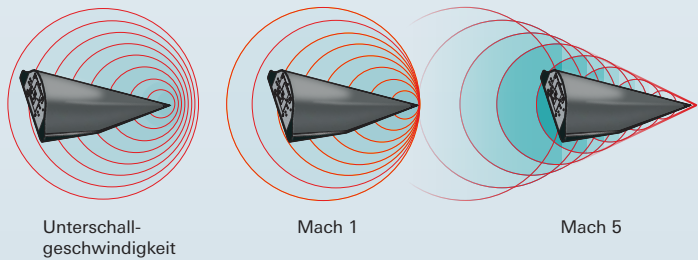
Gleitflug-Grundlagen

Nachdem Raketen sie beschleunigt haben, stürzen die Hyperschallgleiter auf ihr Ziel zu. Dabei steuern sie mit Hilfe des Auftriebs, der durch die Bewegung in der Atmosphäre entsteht. Allerdings zwingt der Aufwand für jedes Manöver etwas von der maximalen Geschwindigkeit und Reichweite ab.



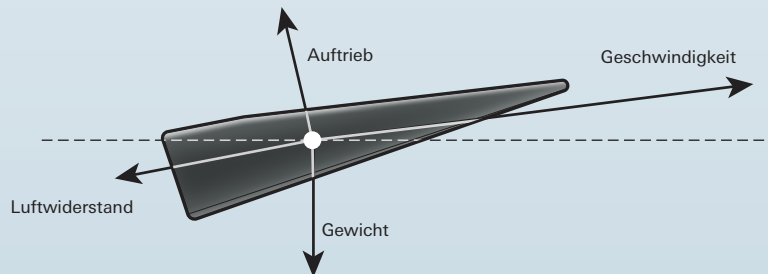
Stoßwellen

Ein Objekt, das sich mit Überschalltempo bewegt, erzeugt eine Front aus verdichteter Luft. Ihr Öffnungswinkel wird umso kleiner, je schneller der Flugkörper ist, bis dieser schließlich eng von der Stoßwelle umhüllt wird. Die verbleibende dünne Schicht enthält rasende, hoch erhitze, chemisch instabile Luft.



Auftrieb und Reibung

Ein Objekt fliegt mit Hilfe des Auftriebs. Die Kraft steht senkrecht zur anströmenden Luft und nimmt quadratisch mit der Geschwindigkeit zu. Doch im gleichen Maß steigt auch der Luftwiderstand. Das Verhältnis aus beiden heißt Gleitzahl und ist im Flugzeugbau ein Kriterium für die Leistungsfähigkeit. Bei Hyperschallgeschwindigkeiten wird es schwierig, gute Werte zu erreichen. Während normale Verkehrsflugzeuge Gleitzahlen über 15 haben, kam HTV-2 bei Tests nur auf 2,6.



sphäre bewegt, und nimmt proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit zu. Ein Flugzeug ist bei Mach 5 zum Beispiel einem 25-fach höheren Luftwiderstand ausgesetzt als eines bei Mach 1. Mach 20 bedeutet gar das 400-Fache.

Noch gravierender wirkt sich die Energie aus, die ein Flugzeug aufwenden muss, um die Luftmoleküle vorwärts und zur Seite zu drücken. Sie steigt mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit. Der Verlust bei Mach 5 ist also 125-mal größer als bei Mach 1. Bei Mach 20 liegt der Unterschied sogar bei einem Faktor von 8000. Die kinetische Energie, die vom Flugzeug auf die umgebende Luft übertragen wird, wandelt sich in Wärmeenergie und Stoßwellen um. Ein Teil davon fließt in Form von Wärme zurück: Die Vorderkanten können bei Mach 10 oder mehr leicht Temperaturen von rund 2000 Grad Celsius erreichen. Der Schutz eines Flugkörpers vor der intensiven Hitzeeinwirkung ist eines der größten ingenieurtechnischen Probleme.

Gleichzeitig muss ein Hyperschallgleiter wie jedes andere Gleitflugzeug Auftrieb erzeugen, das heißt eine senkrecht zur Luftströmung gerichtete Kraft. Nur so kann er sich in der Atmosphäre halten und manövrieren. Wie bereits der Luftwiderstand ist auch der Auftrieb proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit – die aerodynamischen Prozesse, die Letzteren erzeugen, rufen unvermeidlich Ersteren hervor. Das Verhältnis zwischen der Auftriebskraft und dem Luftwiderstand wird als Gleitzahl bezeichnet und ist eine wichtige Kennzahl für die Leistungsfähigkeit eines solchen Fliegers.

Die erreichbaren Gleitzahlen sind im Hyperschallbereich viel niedriger. Bei einem konventionellen Unterschallflug beträgt das Verhältnis von Auftrieb zu Luftwiderstand typischerweise 15 oder mehr. Doch die im letzten Jahrzehnt von den USA getesteten Hyperschallwaffen scheinen trotz jahrzehntelanger Forschung lediglich Gleitzahlen von weniger als drei zu haben. Das begrenzt die mögliche Geschwindigkeit und Reichweite eines Hyperschallgleiters, verringert seine Manövrierfähigkeit und erhöht die Erwärmung des Materials.

Und damit nicht genug: Die Physik und Chemie der Luft, die an einem Objekt vorbeiströmt, ändern sich bei Hyperschallgeschwindigkeit radikal. In der auf Tausende von Grad erhitzten Umgebung brechen die Bindungen der Gasmoleküle, und freie Sauerstoffatome greifen die Oberfläche des Flugkörpers an. Selbst wenn das Material der Hitze und der chemischen Beanspruchung standhält, sendet es intensives Licht im Infrarotbereich aus, das von Satelliten detektiert werden kann.

In den frühen 2010er Jahren führten die USA Tests mit einem Langstreckengleiter namens Hypersonic Technology Vehicle 2 (HTV-2) durch. Es sollte von einer Rakete auf ein Anfangstempo von Mach 20 beschleunigt werden und anschließend knapp 8000 Kilometer weit gleiten. Wir haben die bekannten Versuchsergebnisse mit anderen Daten über den Flugkörper kombiniert und detaillierte Computersimulationen des Hyperschallflugs erstellt. Außerdem haben wir die Leistungsfähigkeit von Boost-Glide-Waffen mit etablierten Technologien wie ballistischen Raketen oder Marschflugkörpern verglichen. Dabei haben wir uns auf die drei Bereiche konzentriert, in denen Hyperschallgleiter beson-

ders leistungsfähig sein sollen, das heißt in Bezug auf Geschwindigkeit, Manövrierfähigkeit und Tarnung.

Oft wird behauptet, Hyperschallwaffen würden die Zeit verkürzen, in der ein Gefechtskopf an sein Ziel gebracht werden kann. Die Einschätzung beruht größtenteils auf einem irreführenden Vergleich mit Unterschall-Marschflugkörpern oder mit den außerordentlich lang gezogenen Trajektorien ballistischer Raketen. Die energieeffizienteste Bahn eines ballistischen Flugkörpers schießt den Sprengkopf in einem Bogen hoch über die Erde, bevor er auf sein Ziel fällt. So ist er auf dem größten Teil der Bahn zwar wenig Luftwiderstand ausgesetzt, legt aber viel mehr Strecke zurück als ein Hyperschallgleiter. Darum kann er etwas mehr Zeit benötigen, bis er das gleiche Ziel erreicht.

Allerdings kann eine ballistische Rakete stattdessen ebenso in geringerer Höhe auf einer »abgesenkten Bahn« fliegen. Sie gilt schon lange als Mittel der Wahl für schnelle Nuklearschläge von U-Booten aus. Eine solche Bahn wäre viel kürzer als eine mit minimaler Energie, und sie würde ebenfalls zum größten Teil durch Abschnitte ohne nennenswerten Luftwiderstand führen. Im Gegensatz dazu verbringt ein Hyperschallgleiter wesentlich mehr Zeit in der abbremsenden Atmosphäre. Laut unseren Berechnungen kann ein Gefechtskopf mit einer ballistischen Rakete auf einer abgesenkten Bahn mit gleicher oder sogar kürzerer Flugzeit über dieselbe Distanz befördert werden.

Jede Kurve erfordert Energie fressende und raumgreifende Manöver

Auch bei einem weiteren angepriesenen Vorteil von Hyperschallwaffen, der Manövrierfähigkeit, sieht es in der Realität kompliziert aus. Die USA entwickeln und testen seit Jahrzehnten manövrierfähige Wiedereintrittskörper (kurz MARV für englisch: maneuverable reentry vehicle). Das sind Gefechtsköpfe, die unter Ausnutzung aerodynamischer Kräfte ihre Richtung ändern können, während sie sich dem Ziel nähern. Das erhöht ihre Treffgenauigkeit und erschwert Abwehrmaßnahmen. Die Steuerbarkeit ist also keine prinzipielle Besonderheit von Hyperschallwaffen. Zwar vollführen MARV solche Manöver üblicherweise erst spät, wohingegen Hyperschallgleiter die ganze Flugzeit über ihre Bahn verändern sollen. Allerdings leidet bei Hyperschallgeschwindigkeiten die Manövrierfähigkeit unter den großen Kräften, die hier für jede Kursänderung erforderlich sind.

Um seine Richtung zu ändern, muss ein Hyperschallgleiter mit Hilfe von Auftriebskräften eine zusätzliche horizontale Geschwindigkeitskomponente erzeugen, die ihrerseits überschallschnell sein kann. Um etwa eine Kurve von 30 Grad zur Seite zu fliegen, muss ein Gleiter mit Mach 15 (4,5 Kilometer pro Sekunde) eine Geschwindigkeit von Mach 7,5 (2,3 Kilometer pro Sekunde) in die entsprechende Richtung aufbringen. (Da sich die Schallgeschwindigkeit mit der Dichte und somit der Höhe ändert, dient als Konvention für Mach 1 oft ein Tempo von 300 Meter pro Sekunde.) Gleichzeitig braucht der Flugkörper genügend vertikalen Auftrieb, um in der Luft zu bleiben. Solche Manöver verringern Geschwindigkeit und Reichweite erheblich.

So könnte der Gleiter den für den Richtungswechsel erforderlichen zusätzlichen Auftrieb erzeugen, indem er in

eine niedrigere Höhe vordringt und die größeren Kräfte in der dichteren Luft nutzt. Er würde anschließend in eine größere Höhe mit weniger Reibung zurückkehren und seinen Flug fortsetzen. Das Abtauchen würde die für die Kurve benötigte Zeit verkürzen; zugleich würde es den Luftwiderstand erhöhen. Bei Mach 15 fliegt ein Gleiter wie HTV-2 beispielsweise in einer Höhe von zirka 40 Kilometern. Während eines Sinkflugs um 2,5 Kilometer würde die 30-Grad-Drehung etwa sieben Minuten dauern und einen großen Bogen mit einem Radius von 4000 Kilometern beschreiben. Dabei verringerte sich die Geschwindigkeit des Gleiters um rund Mach 1,3, wodurch er 450 Kilometer seiner ursprünglichen Reichweite von 3000 Kilometer einbüßen würde. Ein gewisses Manövrieren kann durchaus sinnvoll sein, etwa zum Ansteuern eines neuen Ziels, und Gleiter könnten das wahrscheinlich eher leisten als ballistische Gefechtsköpfe. Dennoch kann ein MARV den anvisierten Bereich bereits heute um Hunderte von Kilometern ändern, so dass sich solche Fähigkeiten schwerlich als revolutionär bezeichnen lassen.

Eine weitere gängige Behauptung ist, Gleiter wären auf Grund ihrer geringeren Flughöhe für Frühwarnsysteme nahezu unsichtbar. Ein bodengestütztes Radar kann einen Gefechtskopf in einer Höhe von 1000 Kilometern aus einer Entfernung von etwa 3500 Kilometern erkennen. Wegen der Erdkrümmung würde es einen Gleiter 40 Kilometer über dem Boden erst in einem Abstand von zirka 500 Kilometern sehen. Sowohl die USA als auch Russland verfügen allerdings über Frühwarnsatelliten mit empfindlichen Infrarotsensoren. Sie würden auf die intensive Strahlung ansprechen, die ein extrem heißer Gleiter aussendet. Unserer Analyse zufolge wären die derzeit eingesetzten US-Satelliten in der Lage, Gleiter mit Geschwindigkeiten im größten Teil des Hyperschallbereichs zu identifizieren und auf ihrem Weg durch die Atmosphäre zu verfolgen.

In absehbarer Zukunft ließe sich ein Auftauchen in Satellitenbildern nur vermeiden, wenn die Flugkörper mit weniger als Mach 6 fliegen. Das Bestreben, diesen blinden Fleck zu beseitigen, könnte hinter Forschungen der USA an neuen Satellitenkonstellationen stecken. Eine Boost-Glide-Waffe ähnlich dem HTV-2 mit einer Anfangsgeschwindigkeit von Mach 5,5 käme jedoch weniger als 500 Kilometer weit. Hyperschall-Marschflugkörper indes könnten solche Geschwindigkeiten über größere Entfernungen beibehalten. So ein relativ niedriges Tempo entwertet aber ein weiteres wichtiges Argument für Hyperschallwaffen, nämlich ihre Fähigkeit, feindlicher Raketenabwehr zu entgehen.

Russland und China scheinen Hyperschallwaffen vor allem deshalb zu entwickeln, weil sie in der Lage sein sollen, die US-Schilde zu durchdringen. Die bodengestützte Midcourse Defense und die schiffsgestützte Aegis SM-3, welche die USA, Japan und andere Länder verteidigen, fangen Raketen oberhalb der Atmosphäre ab. Sie wären nutzlos gegenüber Hyperschallwaffen, die in niedrigeren Höhen fliegen. Gleiter mit ausreichender Geschwindigkeit und Manövrierfähigkeit könnten außerdem kurzreichweitige Abwehr umgehen, die innerhalb der Atmosphäre arbeitet, wie die US-Systeme Patriot, SM-2 und THAAD. Sie schützen kleine Regionen von einigen zehn Kilometern



DARPA

STÜRZENDE PFEILSPITZE Der Gleiter HTV-2 wird von Raketenstufen in den Weltraum befördert (hier eine Illustration) und fällt von dort zurück zur Erde, wobei er Hyperschallgeschwindigkeiten erreicht. Tests in den 2010er Jahren offenbarten größere Probleme bei der Flugkontrolle als erwartet.

Durchmesser um militärische Anlagen und Schiffe. Sie sind so lange wirksam, wie sie weniger sind als die Rakete, die sie zu treffen versuchen, was wiederum stark von der Geschwindigkeit abhängt. Die Patriot-Flugkörper zum Beispiel erreichen mit Hilfe von Raketenantrieben Geschwindigkeiten von bis zu Mach 6. Eine Hyperschallwaffe könnte ihnen bei hohen Geschwindigkeiten wahrscheinlich entkommen, wäre jedoch unterhalb von Mach 6 verwundbar. Das bedeutet: In Bereichen, in denen ein Gleiter für Satelliten unsichtbar ist (aber möglicherweise auf bodengestütztem Radar erscheint), wird eine Abwehr wieder möglich.

Inzwischen schlägt sich die Ernüchterung auch in neuen Designs nieder

Darüber hinaus haben nicht nur Hyperschallgleiter die Fähigkeit, Raketenabwehr zu überwinden. Gerade Abfangraketen, die jenseits der Atmosphäre operieren, sind besonders anfällig dafür, von Täuschkörpern und anderen Gegenmaßnahmen in die Irre geleitet zu werden. Solche Technologien haben Russland und China bereits entwickelt. Außeratmosphärische Systeme könnten zudem vollständig von Raketen kurzer und mittlerer Reichweite umgangen werden, die von einem Flugzeug aus niedriger Höhe entlassen werden. Verteidigungsanlagen innerhalb der Atmosphäre könnte ein MARV ausmanövrieren, das von einer ballistischen Rakete aus startet.

Inzwischen haben die USA ihr Augenmerk von der Entwicklung von Langstreckengleitern wie dem HTV-2 auf Hyperschallwaffen mit kürzerer Reichweite von bis zu einigen tausend Kilometern verlagert. Dazu trugen nicht nur

unbefriedigende Tests mit dem HTV-2-Prototyp bei, sondern auch neue Missionsprofile: Die Waffen sollen auf lokal begrenzten Kriegsschauplätzen eingesetzt werden, um dort Verteidigungssysteme zu umgehen und zu zerstören. In Bezug auf ihre Fähigkeiten sind Hyperschallgleiter mit kürzerer Reichweite jedoch praktisch nicht von ballistischen Raketen mit abgesenkter Bahn und einem MARV-Gefechtskopf zu unterscheiden.

Die Ähnlichkeit wurde 2018 deutlich, als das US-Verteidigungsministerium seine Wahl des Designs für einen Hyperschallflugkörper bekannt gab, das von Heer, Marine und Luftwaffe gemeinsam genutzt werden soll. Anstatt sich für eine keilartige Form wie beim HTV-2 mit größerer Gleitzahl zu entscheiden, wählte das Pentagon ein älteres konisches Profil, das auf einem experimentellen, in den 1970er Jahren entwickelten MARV basiert. Diese Waffe hätte eine geringere Reichweite und wäre weniger manövrierfähig, räumten die Militärs ein, doch sei die Technologie weniger riskant. Ein Design aus den 1970er Jahren ist wohl kaum revolutionär. Für uns scheint es vielmehr so, als würde das Pentagon den Hype um Hyperschallwaffen lediglich nutzen, um sich finanzielle Mittel zu sichern, während es sich eher randständig mit neuartigen Entwürfen beschäftigt und seinen eigentlichen Fokus auf die Weiterentwicklung althergebrachter Technologien legt.

Zumindest theoretisch würde eine deutliche Verbesserung der Gleitzahl die technischen Hürden für den Hyperschall-Langstreckenflug verringern. Im Prinzip können »Waverider«-Konstruktionen den Wert auf sechs oder mehr erhöhen. Dabei passt eine spezielle Keilform genau zum Muster der Stoßwellen, das die Luftströmung um den

RAKETENSTART 2020 hob auf Hawaii eine Rakete mit einem experimentellen Hyperschall-Flugkörper ab, dessen Konstruktionsprinzip aus den 1970er Jahren stammt. Das konventionellere Design geht auf Kosten von Reichweite und Manövrierfähigkeit, erscheint aber sicherer.

U.S. NAVY PHOTO



Flugkörper bei einer bestimmten Geschwindigkeit und Höhe hervorruft. Die Hülle schließt dann einen Teil der Stoßwelle unter sich ein und erzeugt so zusätzlichen Auftrieb. Das Konzept stammt aus den späten 1950er Jahren, hat sich allerdings als schwer umzusetzen erwiesen. Das HTV-2 basierte zwar auf einem solchen Prinzip, erreichte aber nur eine Gleitzahl von 2,6. 2020 zog sich die Luftwaffe aus dem teilstreitkräfteübergreifenden Hyperschallprogramm zurück und kündigte an, das keilförmige Design des HTV-2 für einen Kurzstreckengleiter zu adaptieren.

Am Ende bleibt gefährliches Säbelrasseln

Eine Erhöhung der Gleitzahl auf vier oder sechs würde dazu beitragen, die Wärmebelastung zu verringern und die Reichweite eines Gleiters zu erhöhen. Doch wir bezweifeln, dass solche Verbesserungen wirklich neue militärische Möglichkeiten eröffnen würden. Die Erwärmung ist nach wie vor eine große Herausforderung, da die Oberflächentemperatur eines Flugkörpers mit zunehmender Gleitzahl nur langsam sinkt. Laut unseren Berechnungen würde eine Erhöhung des vom HTV-2 erreichten Werts von 2,6 auf 6 die Oberflächentemperatur um höchstens 15 Prozent reduzieren. Damit wäre es kaum einfacher, Materialschäden bei Langstreckenflügen zu verhindern. Eine höhere Gleitzahl würde auch das Infrarotsignal eines Flugkörpers verringern und womöglich die Geschwindigkeit auf bis zu Mach 7 steigern, mit der er – zumindest von momentan eingesetzten Satelliten – unentdeckt fliegen könnte. Dazu käme eine etwas bessere Manövrierfähigkeit. Diese ließe sich jedoch leichter durch eine vergleichsweise geringe Zunahme der Anfangsgeschwindigkeit steigern, da die Manövrierfähigkeit vom Auftrieb abhängt, der mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst. Darum sieht es insgesamt nicht so aus, als verliehen erwartbare Fortschritte bei Hyperschallgleitern den Waffen plötzlich revolutionäre Eigenschaften.

Dessen ungeachtet hat die Propaganda rund um Hyperschallwaffen die Militärmächte zu steigenden Investitionen in solche Systeme getrieben sowie das Risiko eines Konflikts zwischen den USA, Russland und China erhöht. Die Angst vor einem unabwendbaren Angriff, so vage und unberechtigt sie sein mag, verleitet die Länder möglicherweise zu überhasteten und eskalierenden Reaktionen. Deswegen braucht es unparteiische technische Analysen, die der Öffentlichkeit und der Politik dabei helfen, fundierte Entscheidungen zu treffen. Doch obwohl die Mittel für die Entwicklung und den Bau neuartiger Waffen unerschöpflich zu sein scheinen, schrumpfen die Ressourcen für unabhängige Forschung auf dem Gebiet. Ihr Verlust wäre ein Freifahrtschein für verschwenderische Ausgaben und wachsende globale Spannungen. ◀

QUELLEN

Tracy, C.L., Wright, D.: Modelling the performance of hypersonic boost-glide missiles. *Science and Global Security* 28, 2020

Urzay, J.: Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. *Annual Review of Fluid Mechanics* 50, 2018

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN EXISTIERT ECHTER ZUFALL?

Folgt die Welt fest vorgeschriebenen Regeln oder gibt es Ereignisse, die man nicht vorhersagen kann? Die Quantenmechanik lässt vermuten, dass Letzteres stimmt – und wie sich zeigt, wirkt sich das nicht nur auf den Mikrokosmos aus, sondern auch auf so alltägliche Dinge wie den Wurf eines Würfels.



Axel Lorke (links) ist Professor für Experimentalphysik an der Universität Duisburg-Essen. **Peter Kohl** ist dort Mitarbeiter für Öffentlichkeitsarbeit im Sonderforschungsbereich »Nichtgleichgewichtsdynamik«.

» spektrum.de/artikel/1924954

»Zufall ist ein Wort ohne Sinn – nichts kann ohne Ursache existieren«, äußerte der französische Philosoph Voltaire im 18. Jahrhundert. Viele Menschen teilen seine Vorstellung einer Welt, die sich nach strengen Regeln ändert und eine vorhersehbare Zukunft besitzt. Denn das entspricht unserer alltäglichen Erfahrung: Wirft man einen Ball in die Höhe, folgt er den Gesetzen der Physik. Würde man den Wurf unter den gleichen Bedingungen wiederholen, sieht die Bahnkurve genauso aus. Meist lassen sich solche Versuche jedoch nicht exakt reproduzieren, weil es unkontrollierbare Einflüsse gibt, wie einen Lufthauch, eine nicht perfekt ausgeführte Bewegung oder ein winziges Stück Material, das sich vom Ball löst. Das, was man nach jener Auffassung Zufall nennt, spiegelt also nur das Unvermögen wider, alle Einflussgrößen zu kennen.

Auch Albert Einstein schien diese Vorstellung zu teilen, als er 1926 seinen Unmut über die Quantenmechanik in einem Brief an den Freund und Kollegen Max Born ausdrückte: »Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns nicht näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt.« Ist in der Physik, beispielsweise der Quantenwelt, dennoch echter Zufall verankert? Und wenn ja, hat dieser nur Konsequenzen für Atome und Elementarteilchen oder beeinflusst er auch die makroskopische Welt? Auf der Suche nach Antworten begeben wir uns auf eine gedankliche Reise, die mit der Unbestimmtheit in der Physik startet, dann zur Quantenmechanik übergeht und beim Glücksspiel endet.

Das Abenteuer beginnt mit einer roten Ampel – ärgerlicherweise einer, die besonders lange Phasen hat. Gelangweilt schauen wir uns die wartenden Autos an und beobachten, dass die Blinker von zwei Linksabbiegern genau im Takt sind. Nach einer Minute und 90-mal Blinken leuchten sie jedoch im Gegentakt auf. Damit ist sicher: Die beiden Lampen haben eine unterschiedliche Frequenz.

Das wird aber erst nach einer gewissen Zeitspanne klar. Je länger man sie beobachtet, desto besser lassen sich zwei ähnliche Taktungen unterscheiden. Das lässt sich auch in Zahlen fassen: Bei einer Beobachtungszeit von $\Delta t = 60$ s beträgt die Blinkfrequenz des einen Autos $f_1 = \frac{90}{\Delta t}$. Da das andere Fahrzeug ein halbes Mal mehr geblinkt hat, ist seine Frequenz $f_2 = \frac{(90 + 1/2)}{\Delta t}$. Deren Differenz entspricht $\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\Delta t}$, das heißt, um einen Frequenzunterschied Δf auf diese Weise wahrzunehmen, muss man das System mindestens über eine Zeitspanne von $\Delta t = \frac{1}{2\Delta f}$ beobachten. Anders ausgedrückt: $\Delta f \cdot \Delta t = \frac{1}{2}$. In sehr kurzen Zeiträumen ist es also unmöglich, Frequenzen präzise zu bestimmen.

Töne voneinander unterscheiden

Dieser Zusammenhang gilt für alle Arten von Schwingungen. Zum Beispiel überlagern sich in der Musik zwei Töne mit ähnlichen Frequenzen zu einer Schwebung: Die Lautstärke schwillt periodisch an und ab, je nachdem, ob die Schallwellen im Gleich- oder Gegentakt schwingen. Beträgt die Dauer zwischen »lauter« und »leiser« eine Sekunde, unterscheiden sie sich um ein halbes Hertz. Wieder gilt $\Delta f \cdot \Delta t = \frac{1}{2}$ und man muss die Zeit Δt (zwischen maximaler und minimaler Lautstärke) abwarten, um eindeutig einen Unterschied Δf auszumachen. Wenn beide Töne hingegen nur ganz kurz angespielt werden, ist es unmöglich, auf die Weise festzustellen, ob sie verschieden sind.

Tatsächlich lässt sich diese Ungenauigkeit mathematisch beweisen. Das erforderliche Werkzeug liefert die so genannte Fouriertransformation, benannt nach dem französischen Gelehrten Joseph Fourier (1768–1830). Mit der Trans-



WÜRFELSPIEL Tatsächlich ist ein Würfel das Paradebeispiel für Zufall. Würde man aber alle Details kennen, ließe sich dann ein Wurf Ergebnis vorhersagen?

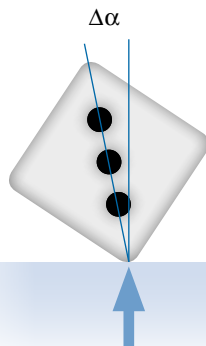
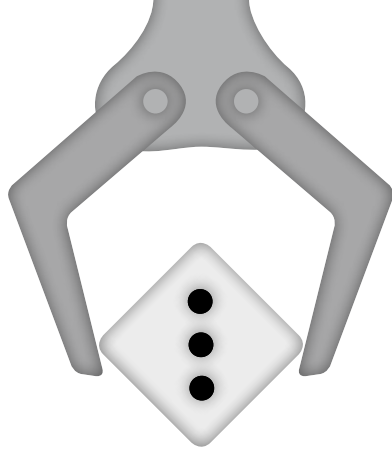
PREIBB / BETTY IMAGES / ISTOCK

formation kann man unter anderem berechnen, wie die Frequenzgenauigkeit mit der Tondauer zusammenhängt: Wieder findet man, dass Δf proportional zu $1/\Delta t$ ist, die Genauigkeit verbessert sich aber auf $\Delta f \cdot \Delta t = 1/4\pi$. Erstaunlicherweise ergibt sich mit Hilfe der Fouriertransformation, dass es nicht nur schwierig ist, die Frequenz eines kurzen Tons zu bestimmen, sondern sogar unmöglich. Denn man kann solchen Tönen keine eindeutige Frequenz zuordnen. Stattdessen setzen sie sich aus mehreren harmonischen Schwingungen zusammen. Experimentell lässt sich das zeigen, indem man ein Tonsignal in seine Bestandteile zerlegt: Je kürzer das Signal, desto breiter das Spektrum Δf , aus dem es sich zusammensetzt – und umso größer wird die Ungenauigkeit von f .

Die Fouriertransformation unterscheidet nicht zwischen periodischen Prozessen in der Zeit oder im Ort. Es gibt daher eine analoge Unschärfebeziehung für die Wellenlänge und die Ausdehnung eines Wellenzugs. Das hat Konse-

quenzen, beispielsweise in der Ultrakurzzeitphysik. Hier setzt man extrem kurze Laserpulse ein, die aus nur wenige Mikrometer langen Wellenzügen bestehen, um quantenphysikalische Prozesse anzustoßen (etwa ein Atom anzuregen). Untersucht man diese Lichtpulse mit einem Prisma, zeigt sich ein breites Spektrum an Farben. Sie stehen im starken Kontrast zu den extrem genau definierten Wellenlängen der so genannten Dauerstrichlaser, die mit gleichbleibender Intensität über einen langen Zeitraum strahlen.

Diese mathematischen Zusammenhänge führten zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu einer unerwarteten Wendung im Hinblick auf den Zufall. Es stellte sich heraus, dass Objekte wie Elektronen, die man üblicherweise als Teilchen bezeichnet, wellenartige Eigenschaften besitzen. Damit lassen sich physikalische Größen wie Geschwindigkeit oder Impuls, die man eigentlich Partikeln zuordnet, auch in die Beschreibung von Wellen übersetzen. Als Vermittler dient dabei das plancksche Wirkungsquantum h , eine winzige



FEHLWINKEL Auf Grund der heisenbergschen Unschärferelation lässt sich der Winkel, unter dem der Würfel auftrifft, nicht genau bestimmen.

Naturkonstante ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joulesekunden). Bereits um 1900 fand Max Planck den Zusammenhang zwischen Energie E und Frequenz eines Photons: $E = h \cdot f$. Etwa 20 Jahre später leitete Louis de Broglie eine entsprechende Korrespondenz für Impuls p und Wellenlänge λ her, $p = h/\lambda$.

Damit erhält die Frequenz-Unschärfe Δf , die unweigerlich mit einer endlichen Dauer Δt verbunden ist, eine weitreichende Bedeutung. Mit Hilfe des Faktors h führt sie zu einer Ungenauigkeit der Energie eines Systems: Aus $\Delta f \cdot \Delta t = 1/4\pi$ wird $\Delta E \cdot \Delta t = 1/4\pi h$, die so genannte Heisenbergsche Unschärferelation. Sie wurde experimentell vielfach nachgewiesen. Doch sie ist nicht die einzige Unschärferelation. Aus der de Broglie-Gleichung $p = h/\lambda$ ergibt sich etwa ein ähnlicher Zusammenhang für Impuls und Position: $\Delta p \cdot \Delta x = 1/4\pi h$.

Warum der Welle-Teilchen-Dualismus zu echtem Zufall führt, lässt sich durch eine verspiegelte Sonnenbrille erklären. Sie reflektiert einen Teil des Lichts, während ein anderer hindurchdringen kann. Im Wellenbild kann man das einfach nachvollziehen: Je eine Welle mit halber Amplitude der Ursprungsschwingung wandert hindurch und wird reflektiert. Das Phänomen kennen wir aus einem anderen alltäglichen Beispiel: Wenn wir zum Schutz gegen Straßenlärm das Fenster schließen, sind wir es gewohnt, dass der größte Teil der Schallwellen reflektiert wird und es nur ein Bruchteil schafft, in die Wohnung zu dringen.

Doch wenn man das Licht als Strom von Teilchen, so genannten Photonen, betrachtet, wird es rätselhaft. Als

unteilbares Elementarteilchen kann ein Photon die Oberfläche entweder passieren oder nicht. Falls 50 Prozent der Strahlung gespiegelt wird, prallen statistisch gesehen 50 von 100 Partikeln zurück. Für ein einzelnes lässt sich jedoch nicht vorhersagen, ob es durch die Schicht dringen wird. Es gibt kein Merkmal, das einem Photon innewohnt und sein Verhalten an der Scheibe vorherbestimmt. Für ein Teilchen ist der Prozess daher vollkommen zufällig.

Beispiele der Art gibt es viele. Aber lassen sich solche Überlegungen aus dem Mikrokosmos überhaupt auf unsere Alltagswelt übertragen? Üblicherweise wird diese Frage verneint. In Wikipedia ist beispielsweise vermerkt »Die Welleneigenschaften von makroskopischen Gegenständen spielen im Alltag keine Rolle«, wobei der Artikel auf den extrem kleinen Wert des planckschen Wirkungsquantums verweist, der die quantenmechanischen Unsicherheiten beispielsweise der Energie so unterdrückt, dass sie hinter allen messbaren Ergebnissen zurücktreten.

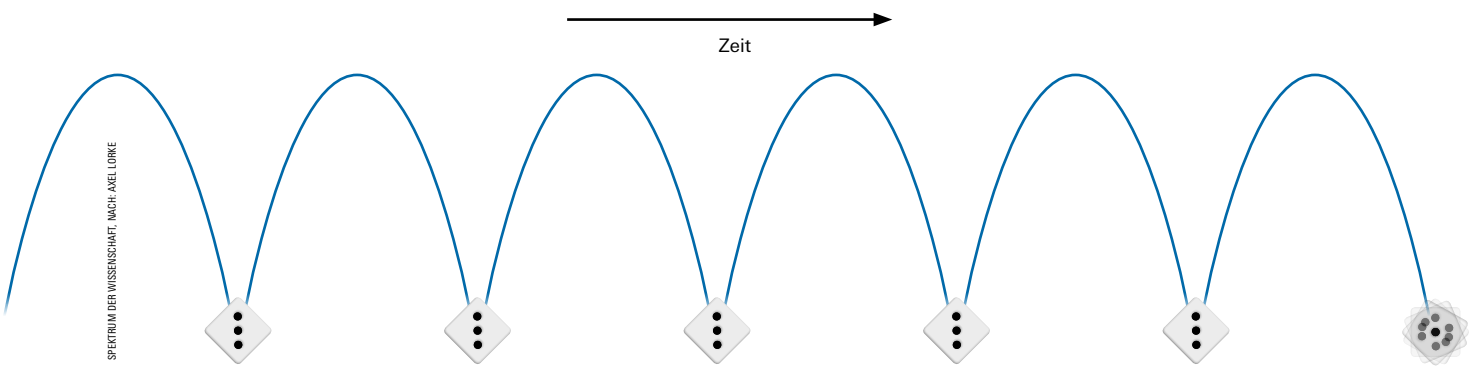
Welchen Einfluss hat die Unschärferelation auf unsere makroskopische Welt?

Ist der Einfluss der Unschärferelation auf die makroskopische Welt wirklich so verschwindend gering? Ab wann sorgen quantenmechanische Effekte dafür, dass die Bewegung eines Alltagsgegenstands nicht mehr vorhersagbar wird? Um der Frage nach dem Zufall in der makroskopischen Welt nachzugehen, nutzen wir eine weitere Unschärferelation, nämlich die zwischen einem Winkel α und dem Drehimpuls L : $\Delta L \cdot \Delta \alpha = 1/4\pi h$. Demnach ist es unmöglich, die Orientierung eines Objekts und dessen Rotationsgeschwindigkeit gleichzeitig genau zu bestimmen.

Als Versuchsobjekt dient der Inbegriff des Zufalls: ein Würfel. Dieser sei perfekt geschnitten und ausbalanciert, und man lässt ihn reibungsfrei auf eine ebene Tischplatte fallen. Um die Rechnung übersichtlicher zu gestalten, wählen wir eine spezielle Situation, in welcher der Würfel genau (zumindest, soweit es die Quantenmechanik erlaubt) zentral auf eine seiner Kanten fällt (siehe »Fehlwinkel«).

Aber schon beim Fallenlassen entstehen die ersten Schwierigkeiten: Der Würfel soll so ausgerichtet sein, dass der Schwerpunkt exakt über der Kante liegt; der Fehlwinkel $\Delta \alpha$ muss daher null sein. Gleichzeitig darf sich der Würfel auf dem Weg nach unten nicht drehen. Die Rotationsgeschwindigkeit und damit der Drehimpuls müssen also ebenfalls feste Werte annehmen, das heißt $\Delta L = 0$.

Aber beides ist nicht möglich. Selbst wenn man sich viel Mühe gibt und mit größtmöglicher Präzision die Ausgangssituation des fallenden Würfels einstellt, macht spätestens die Quantenmechanik einen Strich durch die noch so sorgfältige Rechnung: Die Rotationsunschärferelation besagt, dass bei verschwindender Winkelunsicherheit $\Delta \alpha$ die Unschärfe im Drehimpuls ΔL beliebig groß wird, sich der Würfel also dreht. Umgekehrt gilt: Wenn die Rotationsgeschwindigkeit festgelegt ist, wird $\Delta \alpha$ vollkommen unbestimmt. Keiner der beiden Grenzfälle führt zum Erfolg. Man muss deshalb einen Kompromiss finden, bei dem ΔL und $\Delta \alpha$ die Unschärferelation erfüllen, gleichzeitig aber der Winkel beim Auftreffen auf der Tischplatte möglichst klein wird.



AUFSCHAUKELN Die Winkelunsicherheit ist beim ersten Auftreffen zwar winzig, doch bei jedem weiteren Aufprall vergrößert sie sich um den Faktor 1000 – beim sechsten Aufkommen beträgt sie schließlich 1000 Grad.

Glücklicherweise ist es nicht besonders kompliziert, den minimalen Fehlwinkel zu berechnen. Bei einer Fallhöhe von $H = 50$ Zentimeter und einem Würfel mit einer Kantenlänge von 1,7 Zentimeter und einem Gewicht von etwa 5 Gramm ergibt sich beim Auftreffen auf den Tisch die kleinstmögliche Winkelunsicherheit von 0,000 000 000 001 Grad – ein winziger Wert, der das Wikipedia-Zitat zu bestätigen scheint.

Aber Würfel besitzen eine Eigenschaft, die es selbst in der klassischen Mechanik praktisch unmöglich macht, das Ergebnis eines Wurfs vorherzusagen: Kleine Abweichungen in der Ausgangssituation führen zu großen Unterschieden im Endergebnis. Hat der Würfel beim Auftreffen einen Fehlwinkel $\Delta\alpha_1$, der innerhalb der berechneten minimalen Winkelunsicherheit liegt, wird er unter den idealen Voraussetzungen vom Tisch abprallen und wieder auf seine Ausgangshöhe springen. Physikalisch gesehen handelt es sich um einen perfekt elastischen Stoß. Wegen des Fehlwinkels $\Delta\alpha_1$ ist dieser aber nicht zentral. Der Auftreffpunkt liegt nicht genau unter dem Schwerpunkt des Würfels, sondern leicht daneben. Deshalb kehrt sich die Geschwindigkeit nicht einfach nur um, zusätzlich setzt eine Rotation ein. Mit den bekannten Gleichungen für den dezentralen Stoß kann man berechnen, wie stark sich der Würfel dreht, bevor er ein zweites Mal auf der Tischplatte auftritt. Die Gleichung für diesen Fehlwinkel $\Delta\alpha_2$ lautet:

$$\Delta\alpha_2 = 24 \cdot \frac{H}{r} \cdot \Delta\alpha_1.$$

Mit der Fallhöhe von 50 Zentimetern und dem Abstand zwischen Schwerpunkt und Würfelkante, $r = 1,2$ Zentimeter, ist der Fehlwinkel beim zweiten Kontakt mit dem Tisch $24 \cdot \frac{50}{1,2} = 1000$ -mal größer als beim ersten Aufprall. Genau genommen springt der Würfel nicht exakt auf die Ausgangshöhe von 50 Zentimetern zurück, da ein Teil seiner Energie in die Rotation übergeht. Die Korrektur ist jedoch winzig (kleiner als ein Prozent) und kann daher vernachlässigt werden.

Wenn man den Würfel weiter auf die Tischplatte auftreffen lässt, schmelzen die Nullen in den Nachkommastellen

des Fehlwinkels schnell dahin (siehe »Aufschaukeln«). Bei jedem neuen Hüpfen wird er tausendfach verstärkt. Bereits beim fünften Kontakt wächst die unvermeidbare Unsicherheit auf ein Grad an. Im sechsten Schritt beträgt sie sogar 1000 Grad – ein Mehrfaches einer vollen Umdrehung!

Die Orientierung des Würfels ist also spätestens ab dem sechsten Aufprall mit einer Gesamtzeit von etwa 3,5 Sekunden vollständig unbestimmt. Dort endet die Vorhersagbarkeit der Würfelbewegung – selbst unter idealisierten Bedingungen – allein durch die quantenmechanische Unschärferelation.

Die Form des Objekts spielt dabei eine wichtige Rolle. Bei einer Kugel würde sich die Winkelunsicherheit nicht in gleicher Weise verstärken, da der Auftreffpunkt dabei immer genau unter dem Schwerpunkt liegt. Würfel hingegen verhalten sich besonders »chaotisch« – so heißen Prozesse, bei denen ein kleiner Unterschied in den Anfangsbedingungen exponentiell in der Zeit anwächst. Beim Würfel vergrößert sich mit jedem Auf und Ab die Unsicherheit um den Faktor $F = 1000$, nach dem n -ten Aufsetzen (beziehungsweise Zeitschritt) daher auf das F^n -Fache. Chaotische Dynamik, etwa auch beim Wetter, ist besonders schwer vorherzusagen.

Den Menschen, die vor fast 5000 Jahren den Spielwürfel erfunden haben, waren diese Zusammenhänge natürlich nicht bekannt. Umso bemerkenswerter ist jedoch, dass sie die raffiniert einfache Form ersonnen haben, um eine verlässliche Quelle für Zufallszahlen zu schaffen.

Kehren wir zur Anfangsfrage zurück: Gibt es echten Zufall? Vorausgesetzt, die gängige Interpretation der Quantenmechanik gilt, lautet die Antwort eindeutig ja. Und wie das Würfelbeispiel zeigt, beschränken sich die Effekte nicht auf den Mikrokosmos. Möglicherweise beeinflusst die Unschärferelation unsere makroskopische Welt häufiger, als es uns bewusst ist. Und das ist vermutlich auch gut so. Denn wie langweilig wäre ein Universum, das sich auf einem vorbestimmten Weg entwickelt, ohne irgendwelche Überraschungen bereitzuhalten! Vielleicht ist das der Grund, weshalb selbst »der Alte« gern mal würfelt. ◀

WEBLINK

<http://public.sfb1242.de/Wellenmischen/>

Hier können Sie selbst einmal spielerisch ausprobieren, wie sich verschiedene Frequenzen überlagern und wie sich unterschiedlich lange Impulse formen lassen.

INFORMATIK PROGRAMM MIT KÖPFCHEN

Künstliche neuronale Netze arbeiten mit einem Mechanismus, der dem menschlichen Gehirn nicht zur Verfügung steht. Um die Geheimnisse des Lernens zu lüften, suchen Forscherinnen und Forscher nach biologisch plausiblen Alternativen.



Anil Ananthaswamy arbeitet als Wissenschaftsjournalist und Autor. Seine Texte behandeln vor allem Physik, Astronomie, maschinelles Lernen und Philosophie.

► spektrum.de/artikel/1924942

► Deep Learning ist heute aus Anwendungen künstlicher Intelligenz (KI) kaum wegzudenken: Ihm verdanken wir es, dass Siri gesprochene Befehle versteht oder Computer eigenständig Kunstwerke erschaffen. Doch das war nicht immer so. Als einige Informatiker 2007 bei einer renommierten Konferenz zu künstlicher Intelligenz einen Workshop über tiefe neuronale Netzwerke vorschlugen, lehnten die Veranstalter prompt ab. Man wollte dem damals belächelten Randgebiet nicht zu viel Platz einräumen.

Die Interessenten organisierten daraufhin ein inoffizielles Meeting, an dem unter anderem der kognitive Psychologe und Informatiker Geoffrey Hinton von der University of Toronto teilnahm. Er wirkte an einigen der größten Durchbrüche im Bereich tiefer neuronaler Netze mit. Seinen Vortrag begann er mit einem Scherz: »Vor etwa einem Jahr kam ich zum Abendessen nach Hause und sagte: ›Ich glaube, ich habe endlich herausgefunden, wie das Gehirn funktioniert – woraufhin meine 15-jährige Tochter seufzte: ›Oh, Dad, nicht schon wieder.« Das Publikum lachte. Hinter der Witzelei verbarg sich jedoch ein ernst gemeintes Ziel: Er will mit Hilfe von KI das Gehirn verstehen.

Heute spielen tiefe neuronale Netze eine zentrale Rolle in der KI-Forschung. Zu einem großen Teil verdanken sie das einem bestimmten Algorithmus, genannt »Backpropagation« (was übersetzt etwa »Fehlerrückführung« bedeutet).

Er ermöglicht es Programmen, anhand von Beispieldaten zu lernen. Dank des Berechnungsverfahrens können Computer Bilder klassifizieren, Sprache verstehen und übersetzen, die Umgebung für selbstfahrende Autos erkennen und zahlreiche andere Aufgaben meistern.

Dass unser Gehirn Informationen nach einem ähnlichen Muster wie der Algorithmus verarbeitet, halten Fachleute jedoch für höchst unwahrscheinlich. Yoshua Bengio, Informatiker an der Université de Montréal und einer der Organisatoren des Workshops von 2007, betont, dass das menschliche Gehirn selbst den modernsten KI-Systemen weit überlegen ist: Es verallgemeinert und lernt besser und schneller als jedes Programm. Zudem ist die Backpropagation aus einer Vielzahl von Gründen nicht mit der Anatomie und Physiologie des Gehirns kompatibel. Das gilt insbesondere für die Struktur des Kortex, in dem unsere kognitiven Fähigkeiten verortet sind.

AUF EINEN BLICK VORBILD GEHIRN

- 1** Die ersten künstlichen neuronalen Netze wurden auf Basis der hebbischen Lernregel entwickelt. Sie besagt, dass sich Neurone stärker vernetzen, wenn sie vermehrt gemeinsam feuern.
- 2** Mit ihrer Weiterentwicklung hin zu komplexeren Strukturen, die schwierige Aufgaben lösen konnten, entfernten sich die Computersysteme aber zusehends von ihrem biologischen Vorbild.
- 3** Informatiker tüfteln nun an Algorithmen, die es Computern erlauben sollen, auf ähnliche Weise wie das menschliche Denkorgan zu lernen.

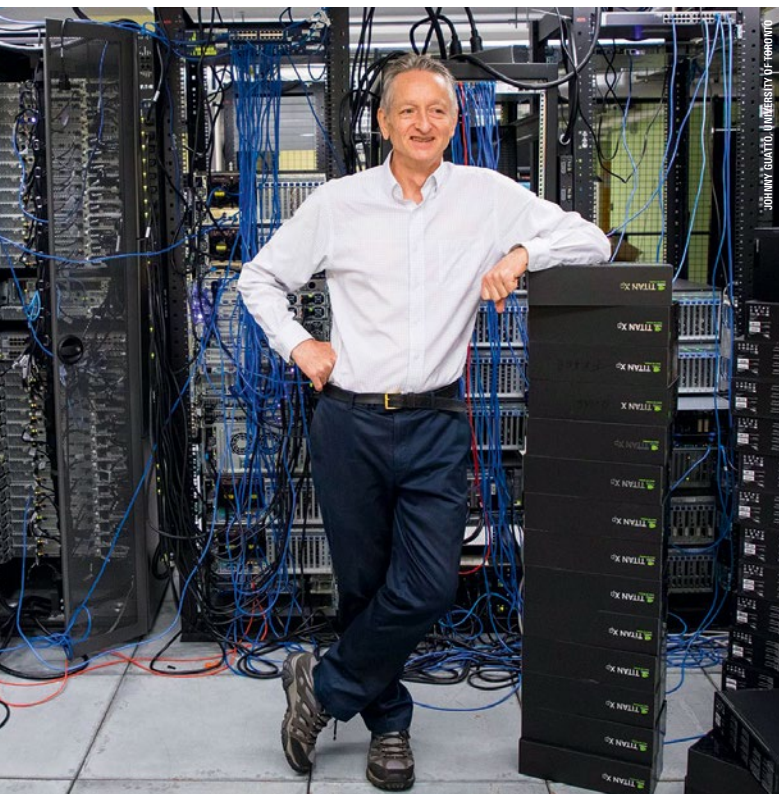
KÜNSTLICHE NEURONALE NETZE Solche Programme modellieren Prozesse im Gehirn. Doch sie müssen dem biologischen Vorbild ähnlicher werden.

Bengio sowie weitere IT-Experten und -Expertinnen tüfteln bereits an aus neurobiologischer Sicht plausibleren Lernmechanismen, die zumindest mit der Backpropagation mithalten können. Drei davon haben sich als sehr viel versprechend erwiesen: Feedback Alignment, Equilibrium Propagation und Predictive Coding. Einige Forschende integrieren sogar Eigenschaften von bestimmten kortikalen Neuronen oder von Prozessen wie Aufmerksamkeit in ihre Modelle. All diese Bemühungen könnten dabei helfen, mehr über die tatsächlich im Gehirn ablaufenden Mechanismen zu lernen.

Ein menschliches Gehirn besteht aus rund 100 Milliarden Neuronen, die über mehr als 100 Billionen Synapsen miteinander vernetzt sind. Seine Komplexität macht es unmöglich, es im Detail durch ein Computerprogramm nachzubilden. Schon früh schlugen Informatiker vor, stattdessen die Struktur des Kortex stark vereinfacht zu simulieren: Sie ordneten Recheneinheiten so wie Neurone in Schichten an und verschalteten sie miteinander. Daten werden zuerst in künstliche Neurone der ersten Schicht eingespeist. Ihre synaptischen Verbindungen besitzen Zahlenwerte, so genannte Gewichte. Die Information pflanzt sich schrittweise im Netzwerk fort, bis sie die letzte Schicht erreicht. Diese generiert dann den Output – eine Bildbeschriftung, die zum Motiv einer Fotodatei passt.

Damit ein solches Programm das richtige Ergebnis liefert, müssen die synaptischen Gewichte passend konfiguriert sein. Anfangs kann man eine zufällige Einstellung wählen und dem Netzwerk anschließend zahlreiche Beispieldaten übermitteln. Der Algorithmus sucht dann die geeigneten Konfigurationen, um eine gewisse Aufgabe zu

DER PIONIER Geoffrey Hinton von der University of Toronto ist für einige der größten Durchbrüche im maschinellen Lernen verantwortlich, etwa der Entwicklung des Backpropagation-Algorithmus.



meistern. Die Schwierigkeit besteht darin, eine Methode zu finden, mit der das Programm effektiv aus den Trainingswerten lernt – also die richtigen Gewichte bestimmt.

Jahrzehntelang orientierten sich die Fachleute dabei vor allem an einer Theorie zur Funktionsweise des Gehirns, die der kanadische Psychologe Donald Olding Hebb 1949 formulierte. Sie wird oft als »Cells that fire together wire together« zusammengefasst: Je synchroner Neurone aktiv sind, desto stärker sind sie nach der These miteinander verdrahtet. Die ersten künstlichen neuronalen Netze in den späten 1950er Jahren bauten auf diesem Prinzip auf. Die Programme bestanden lediglich aus zwei Schichten, eine für die Eingabe und eine für die Ausgabe. Allerdings war damals schon klar, dass man zum Lösen komplizierter Probleme mehrere Zwischenschichten brauchen würde. Doch niemand wusste, wie man solche Strukturen effektiv trainieren sollte: Nach der hebbischen Lernregel hatten Recheneinheiten in derartigen tieferen Schichten keine direkte Möglichkeit, aus ihren Fehlern zu lernen und ihre synaptischen Verbindungen anzupassen.

Wie in einer Landschaft mit Hügeln und Tälern

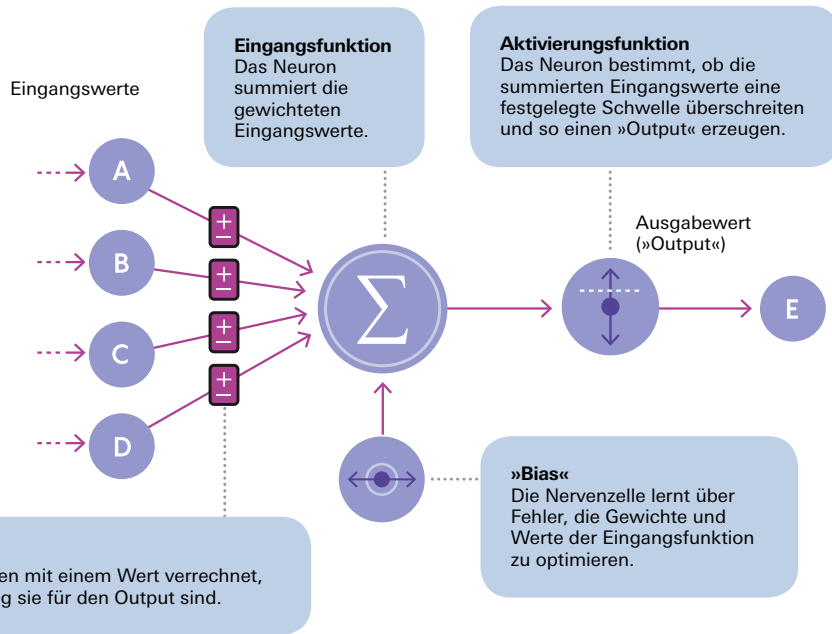
Der Durchbruch kam 1986, als Geoffrey Hinton zusammen mit Ronald Williams und dem inzwischen verstorbenen David Rumelhart die Backpropagation entwickelte. Der Algorithmus arbeitet in zwei Phasen: einer vorwärts- und einer rückwärtsgerichteten. In der ersten erhält das Netzwerk eine Eingabe, die es Schicht für Schicht verarbeitet und daraus ein mehr oder weniger fehlerhaftes Ergebnis liefert. In der folgenden Phase aktualisiert das Programm die Gewichte, damit die Ausgabe besser mit dem Zielwert übereinstimmt.

Dazu bestimmt der Algorithmus die Unterschiede zwischen den produzierten und den gewünschten Resultaten, die sich wie in einer Landschaft mit Hügeln und Tälern darstellen lassen. In Letzteren liegt der Zielwert. Wenn ein Netzwerk in der Vorwärtsphase zu einem Ergebnis kommt, landet es an einem bestimmten, meist höheren Punkt in der Karte. Um zu lernen, muss sich die Ausgabe des Programms abwärts in ein Tal bewegen, wo die Abweichung zum Zielwert möglichst klein ist. Hier setzt die Backpropagation an. Sie ermittelt in der rückwärtsgerichteten Phase, welche der eingestellten Parameter wie sehr zum Fehler beigetragen haben, und verändert sie entsprechend. Dieser Prozess durchläuft das Netzwerk von der Ausgabe zur Eingabeschicht, also rückwärts. Wiederholt man den Vorgang oft genug, landet man schließlich bei einem akzeptablen Satz synaptischer Gewichte.

Mit dieser Methode wurden bei KIs zwar beeindruckende Ergebnisse erzielt. Doch Neurowissenschaftler, darunter der Nobelpreisträger Francis Crick, bemängelten, dass echte Gehirne niemals so funktionieren könnten. Tatsächlich sprechen gleich mehrere Gründe gegen eine biologische Form der Backpropagation. Während man einen Algorithmus leicht in zwei Abschnitte aufspalten kann, ist das für Nervensysteme alles andere als trivial. Zudem werden Informationen über alle am Fehler beteiligten synaptischen Gewichte an die Recheneinheiten im Netz transportiert. Im Gehirn erhalten Neurone aber nur die

Simulierte Nervenzellen

Die einzelnen Elemente eines künstlichen neuronalen Netzwerks funktionieren ähnlich wie echte Hirnzellen: Die Eingangswerte – also Informationen von vorgeschalteten Neuronen – werden nach ihrer Relevanz gewichtet, dann summiert und schließlich in einen Ausgabewert (»Output«) übersetzt.



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ausgaben anderer Nervenzellen und keine Information über die Gewichtung oder andere interne Prozesse. Darüber hinaus können die biologischen Zellen allein auf Signale ihrer direkten Kontakte zugreifen, während sich die Backpropagation über das ganze System erstrecken kann.

Hinton und einige Kollegen begannen früh damit, nach biologisch plausibleren Lernvarianten zu suchen. Durch das gesteigerte Interesse an neuronalen Netzwerken schlossen sich in den letzten zehn Jahren immer mehr Forscherinnen und Forscher den Bemühungen an.

Timothy Lillicrap von Google DeepMind in London entwickelte 2016 mit seinen Kollegen einen der wohl seltsamsten Ansätze. In der vorwärtsgerichteten Phase speichert das Programm normalerweise alle synaptischen Gewichte in einer riesigen Matrix (also einer zweidimensionalen Liste) und aktualisiert deren Werte in jedem rückwärtsgerichteten Durchlauf, um Fehler zu minimieren. Die veränderten Parameter orientieren sich dabei an den ursprünglichen. Lillicraps Algorithmus verwendet dagegen in der rückwärtigen Phase eine Matrix mit zufälligen Einträgen, die sich nicht mehr verändern. Beim Rückwärtsdurchlauf müssen also keine Informationen über Gewichte transportiert werden.

Zunächst erhofften sich die Entwickler nicht allzu viel von einem solchen Programm. Doch überrascht stellten sie fest, dass der Algorithmus durchaus in der Lage ist, zu lernen. Indem sich die fehlerhaften Parameter in jedem Rückwärtsdurchlauf allmählich an die zufälligen Werte anpassen, steigt das Netzwerk in die symbolischen Täler der Landkarte ab – allerdings auf einem anderen Weg als bei der Backpropagation.

»Tatsächlich funktioniert das gar nicht so schlecht, wie man vielleicht annehmen würde«, erläutert der Informati-

ker Daniel Yamins von der Stanford University – zumindest bei einfachen Aufgaben. Für umfangreichere Probleme erweist sich die Methode jedoch als der Backpropagation unterlegen. Da der Ansatz weniger zielgerichtet ist, benötigt man nämlich wesentlich mehr Daten, um ein Netzwerk zu trainieren.

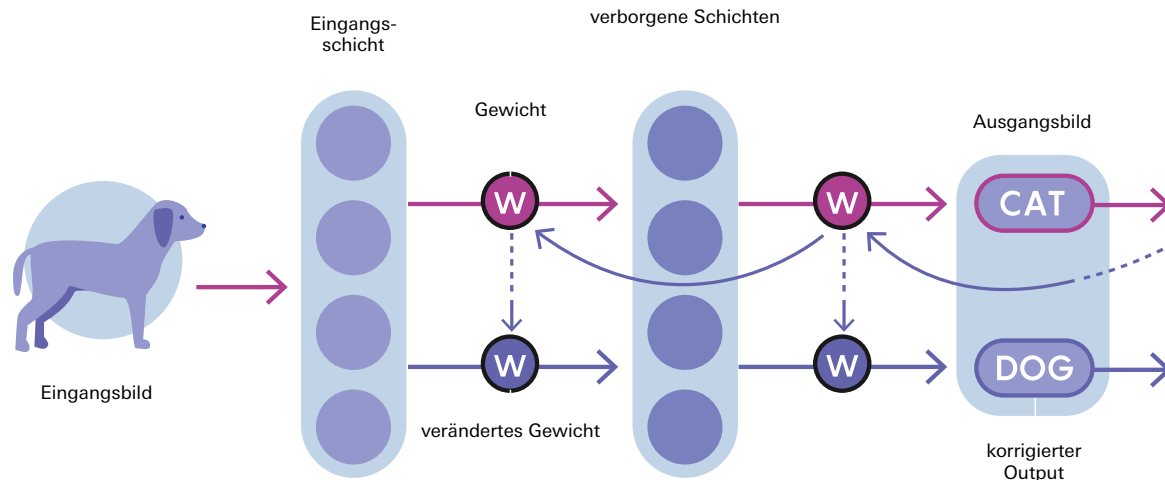
Ein anderer Ansatz ist die so genannte Equilibrium Propagation, die ähnlich effizient wie die Backpropagation ist und zudem die hebbische Regel befolgt, wonach Neurone nur ihre unmittelbaren Nachbarn beeinflussen. Das Programm besteht dabei aus rückgekoppelten (so genannten »rekurrenten«) Verbindungen, das heißt: Wenn Neuron A Neuron B aktiviert, dann aktiviert B wiederum A. Durch eine Eingabe wird das System in eine Art Schwingung versetzt, jede Recheneinheit reagiert auf die Signale ihrer Nachbarn. Irgendwann erreicht das Netzwerk einen Gleichgewichtszustand mit einer Ausgabe, die jedoch fehlerhaft sein kann. In diesem Fall verändert der Algorithmus die Neurone der letzten Schicht in Richtung des gewünschten Ergebnisses, was ein erneutes Signal in Gang setzt, das sich rückwärtsgerichtet ausbreitet. So entsteht eine ähnliche Dynamik wie bei der Eingabe – bis das System wieder im Gleichgewicht landet.

Predictive Coding korrigiert per Fehlerwelle

Dass Neurone nur auf ihre lokale Umgebung reagieren, setzen auch neuere neurowissenschaftliche Modelle voraus, die sich mit Wahrnehmung beschäftigen, unter anderem das Predictive Coding. Der Doktorand Beren Millidge von der University of Edinburgh und seine Arbeitsgruppe haben diese Modelle mit den Anforderungen der Backpropagation in Einklang gebracht und daraus eine computerwissenschaftliche Lernmethode entwickelt.

Backpropagation

Bei der Backpropagation oder Fehlerrückführung lernt der Algorithmus aus seinen Fehlern. Identifiziert das System auf einem Bild zum Beispiel eine Katze, obwohl ein Hund zu sehen ist, korrigiert es anschließend die Gewichte zwischen den Neuronenschichten. Das tut es so lange, bis es tatsächlich einen Hund erkennt.



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Gemäß dem Predictive Coding trifft das Gehirn ständig Vorhersagen über die Umgebung und aktualisiert unser entstehendes Weltbild. Der Prozess verläuft dabei hierarchisch: Um eine bestimmte Ausgabe zu erzeugen, muss jede Schicht die neuronale Aktivität der vorangehenden vorhersagen. Wenn die letzte Ebene beispielsweise ein Gesicht vermutet, sagt sie die dazugehörige Aktivität der vorigen Schicht voraus und diese wiederum die der davorliegenden und so weiter. Am Ende dieser Kette antizipieren Neurone der ersten Ebene eine bestimmte sensorische Eingabe, das sich aus den Vorhersagen der dahinterliegenden Schichten ableitet.

Unterscheidet sich diese Vorhersage von dem tatsächlichen Signal, passt die erste Schicht ihre synaptischen Gewichte entsprechend an. Das führt automatisch zu einem Mismatch zwischen dieser und der nachfolgenden Ebene, wodurch auch die zweite Schicht ihre Parameter anpasst. Auf diese Weise breiten sich die Fehlersignale und ihre Korrekturen von vorn nach hinten aus. Das wiederholt sich so lange, bis der Vorhersagefehler minimal ist. Millidge konnte zeigen, dass das Verfahren fast so effektiv sein kann wie die Backpropagation.

Jeder Rückwärtsdurchlauf der Backpropagation entspricht jedoch mehreren Aktualisierungsrunden beim Predictive Coding. Demnach stellt sich die Frage, wie lange ein solcher Prozess im Gehirn dauern würde – davon hängt es ab, ob Millidges Methode biologisch plausibel ist.

Andere Informatikerinnen und Informatiker orientieren sich stärker an bekannten biologischen Eigenschaften von Nervenzellen. Diese besitzen nämlich im Unterschied zu ihren digitalen Pendanten eine innere Struktur: Gewöhnliche Neurone haben zahlreiche Dendriten, die Informationen

von den Axonen anderer Zellen empfangen. Von hier aus gelangen Signale in den Zellkörper des Neurons, wo sie verarbeitet werden. Das kann zu einem Aktionspotenzial führen, welches dann über das Axon zum nächsten Neuron wandert.

Doch nicht alle Nervenzellen sind so aufgebaut: Zum Beispiel weisen Pyramidenzellen – die am meisten verbreiteten Neurone im Kortex – eine baumartige Struktur mit zwei unterschiedlichen Dendritentypen auf. Der »Stamm« reicht nach oben und mündet in so genannte apikale Dendriten, während sich die »Wurzel« in basale Dendriten verzweigt.

Ein neuronales Netz aus Pyramidenzellen

Netzwerke künstlicher Neurone nach dem Vorbild von Pyramidenzellen entwickelten etwa Konrad Kording von der University of Pennsylvania und später Blake Richards von der McGill University. Sie zeigten, dass Pyramidenzellen in einem Deep-Learning-Netzwerk zugleich vorwärts- und rückwärtsgerichtete Berechnungen ausführen können. Der Schlüssel dazu war die Aufteilung der vorwärtsgerichteten Ausgabe und der rückwärtsgerichteten Fehleranalyse auf Substrukturen der Neurone: Basale Dendriten verrichten ersteren Vorgang, apikale letzteren. Die zugehörigen Informationen lassen sich in die Aktionspotenziale encodieren, die das Neuron über sein Axon aussendet.

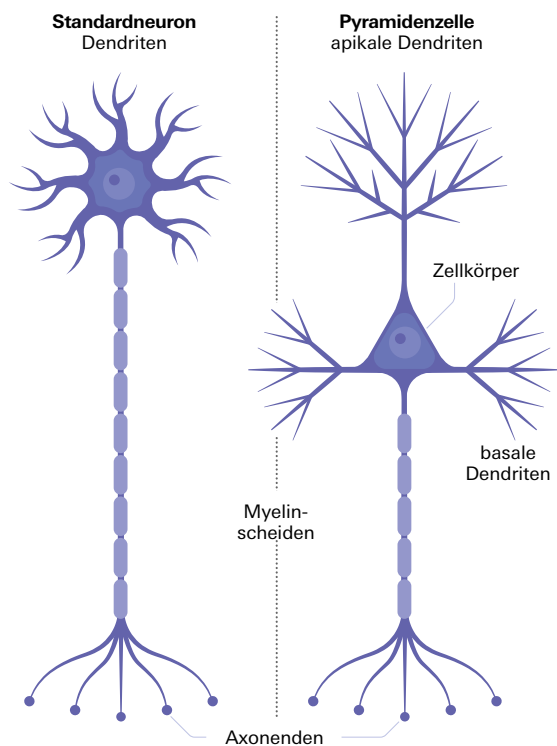
In realistischen Simulationen der Neurone konnte Richards' Team zeigen, dass aus ihnen zusammengesetzte Netzwerke nach einem Training verschiedene Aufgaben bewältigen können. »Mit etwas abstrakteren Versionen dieser Modelle können wir Netzwerke von Pyramidenzellen dazu bringen, sogar schwierige Aufgaben maschinellen Lernens zu lösen.«

Ein weiterer Nachteil der Backpropagation ist, dass es sich dabei um einen überwachten Lernmechanismus handelt: Man braucht eine Art Lehrer, der den Fehler berechnet. Im Gehirn fehlt jedoch eine derartige Instanz, betont Pieter Roelfsema vom Netherlands Institute for Neuroscience in Amsterdam. Ihm zufolge löst es dieses Problem durch Aufmerksamkeit.

In den späten 1990er Jahren untersuchte er mit seinem Team per Hirnschan Affen, die ein Objekt anstarrten. Wie sich herausstellte, stieg die Aktivität in jenen Neuronengruppen im Kortex der Tiere, die dieses Objekt verarbeiten. Die Fokussierung scheint ein Rückkopplungssignal für die zuständigen Nervenzellen zu erzeugen. »Es ist ein sehr selektives Feedback-Signal«, so Roelfsema. »Es sagt den Neuronen: Du wirst für eine Handlung verantwortlich gemacht.«

Neurone mit besonderer Architektur

Pyramidenzellen sind die häufigsten Neurone im menschlichen Kortex. Anders als die meisten Nervenzelltypen besitzen sie zwei unterschiedliche Gruppen von Dendriten: basale und apikale. Modellen zufolge können sie mit der einen Gruppe Signale aus Richtung der Eingangsschicht empfangen und gleichzeitig mit der anderen Gruppe Informationen über Fehler von der Ausgangsschicht erhalten.



SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Nach Roelfsemas Auffassung könnte dies ein Lernen ermöglichen, das der Backpropagation ähnelt – zumindest, wenn man das Rückkopplungssignal mit Prozessen kombiniert, die Neurowissenschaftler in anderen Studien entdeckten. Wie Wolfram Schultz, damals an der Universität de Fribourg, und andere zeigten, wird das Dopaminsystem von Tieren aktiv, sobald eine Handlung zu besseren Ergebnissen führt als erwartet. »Es überflutet das ganze Gehirn mit neuronalen Modulatoren«, erläutert Roelfsema; das wirkt wie ein globales Verstärkungssignal.

Theoretisch könnte das Rückkopplungssignal die am Prozess beteiligten Neurone dazu bringen, auf das globale Verstärkungssignal zu reagieren, indem sie ihre synaptischen Gewichte entsprechend verändern, glaubt Roelfsema. Er und seine Kollegen haben anhand dieser Idee ein neuronales Netzwerk entwickelt. In diesem finde ebenfalls eine Fehlerrückführung statt, sagt er und fügt hinzu: »Es ist im Grunde dieselbe Gleichung. Aber jetzt macht es aus biologischer Sicht Sinn.«

Das Team stellte die Arbeit 2020 auf einer Fachkonferenz vor. Auf dem Prinzip basierende tiefe Netze sind im Training nur um den Faktor zwei bis drei langsamer als solche mit Backpropagation. Damit, so Roelfsema, schlagen sie sich besser als alle bisherigen Algorithmen, die als biologisch plausibel angesehen werden.

Bisher gibt es zwar keinerlei empirische Beweise dafür, dass das Gehirn überhaupt einen der vorgestellten Lernmechanismen nutzt. Doch das könnte sich bald ändern: Yamins und seine Kollegen analysierten 1056 künstliche neuronale Netze, die verschiedenste Lernmethoden nutzten. Dabei bemerkten sie, dass man die jeweils angewandte Lernregel an der Aktivität bestimmter Recheneinheiten erkennt. Solche Informationen könnte man womöglich auch in Affenhirnen aufzeichnen. »Mit den richtigen Beobachtungsdaten ließe sich vielleicht ein relativ einfaches Schema entwickeln, das es erlaubt, die zu Grunde liegenden Lernregeln zu identifizieren«, hofft Yamins. ◀

QUELLEN

Lillicrap, T.P. et al.: Random synaptic feedback weights support error backpropagation for deep learning. *Nature Communications* 7, 2016

Millidge, B. et al.: Predictive coding approximates backpropagation along arbitrary computation graphs. *ArXiv* 2006.04182, 2020

Nayebi, A. et al.: Identifying learning rules from neural network observables. *ArXiv* 2010.11765v2, 2020

Scellier, B., Bengio, Y.: Equilibrium propagation: Bridging the gap between energy-based models and backpropagation. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2017

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Artificial Neural Nets Finally Yield Clues to How Brains Learn« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

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

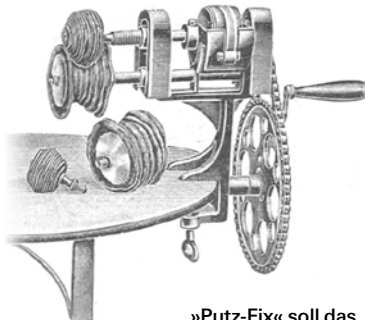
WIE SICH ROTE BLUTKÖRPERCHEN BEUGEN UND BIEGEN

1921

»Die roten Blutkörperchen, die etwa 50% der Gesamtmasse des Blutes betragen, bei einer Oberfläche von 2816 qm beim Erwachsenen, sind im lebenden Zustande nach neuesten Untersuchungen eigentlich mehr eiförmig. Die beiderseits eingedellte Form zeigt sich nur außerhalb der Blutgefäße. Sie sind so weich und biegsam, daß sie ohne dauernde Aenderung ihrer Form durch die engsten Kapillaren durchkommen. Princes-Jones [hat] ein tägliches Schwanken ihres Durchmessers innerhalb der Zirkulation festgestellt: Zunahme tagsüber, Verminderung im Schlafe. Die Differenz beträgt bis zu 0,6 μ (Durchmesser der Blutkörperchen 7 bis 8 μ) und ist besonders stark bei großen körperlichen Anstrengungen.« *Die Umschau 48, S. 718*

ENDLICH GIBT ES EINE BESTECK-PUTZMASCHINE!

»Die abgebildete Maschine [der] Federachs-Gesellschaft m. b. H. [besorgt] das lästige und zeitraubende Putzen der Löffel, Messer und Gabeln auf maschinellem Wege. Die Schwierigkeiten, die die vertieften



»Putz-Fix« soll das Polieren von Besteck erleichtern.

Teile dem Maschinenputzen bisher in den Weg stellen, werden durch die sinnreiche Konstruktion behoben. Dabei erhalten die Gegenstände infolge der hohen Tourenzahl einen Hochglanz, wie er beim Fingerputzen wohl niemals erreicht wird. Zu jeder Maschine gehören vier Lappenputzscheiben. Von den beiden Wellen, die die Scheiben tragen, ist die obere gefedert. [Dadurch] schmiegen sich die Scheiben den vertieften Teilen mühelos und innig an.«

Die Umschau 48, S. 676

EINE HARTE LEGIERUNG AUS ALUMINIUM

»Zwar besitzt Aluminium nur etwa ein Drittel des Gewichtes von Stahl, allein es weist auch nur Festigkeitswerte auf, die etwa ein Drittel derjenigen des Stahls betragen. Versuche haben nun zu der Erkenntnis geführt, daß Aluminium durch Zusatz geringer Mengen anderer Metalle oder Metalloide seine Eigenschaften ändert. Nun ist es gelungen, Aluminium mit Silizium zu legieren und so eine Leichtlegierung zu erzielen, welche die Festigkeitseigenschaften von Gußeisen aufweist.« *Technische Monatshefte 11, S. 264*

SPEISEPILZE ABSORBIEREN RADIOAKTIVES CÄSIUM

1971

»Wenn auch eine Gefährdung menschlicher Gesundheit unwahrscheinlich ist, so kommt doch der Tatsache, daß wildwachsende Pilzarten das radioaktive Spaltprodukt ^{137}Cs anreichern, erhebliche Bedeutung zu. Dies ist wahrscheinlich damit zu erklären, daß Pilze eine Präferenz für das chemisch sehr ähnliche Kalium zeigen. In der Hauptsache wird das von Kernwaffenversuchen stammende ^{137}Cs mit Milchprodukten und Fleisch aufgenommen. Untersuchungen haben gezeigt, daß die ^{137}Cs -Konzentration in Speisepilzen z. T. mehr als hundertfach höher liegt, als in den obigen Nahrungsmitteln. Eine Pilzmahlzeit kann daher vorübergehend die künstliche Radioaktivität im Menschen wesentlich erhöhen.« *Die Umschau 23, S. 855*

RÖNTGENBILD ALS HOLOGRAMM

»Im Philips-Zentrallaboratorium ist ein Verfahren entwickelt worden, mit dessen Hilfe aus dreißig bis fünfzig Röntgenbildern von einem Gegenstand ein Hologramm entsteht. Man erhält die Serie dadurch, daß die Strahlungsquelle zwischen den Aufnahmen um einen Winkel von 0,5° schrittweise um das Objekt und den Bildschirm geändert wird. Die Röntgenbilder werden anschließend unter kohärentem Licht auf einen Schirm projiziert. Wenn man nun eine zum Schirm angeordnete Photoplatte über eine Lochmaske belichtet, entsteht [darauf] das Hologramm.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 11, S. 493*

VERBESSERTE ELEKTRONENMIKROSKOPE

»Höhere Auflösungen bei der Abbildung von Objekten mit dem Elektronenmikroskop erreicht man durch Erhöhung der Spannung. Bei einer Strahlspannung von 100 kV, mit der heutige Elektronenmikroskope arbeiten, kann man noch Präparatdetails abbilden, deren Abstand 20 bis 30 Å beträgt. Die Anwendung höherer Spannungen bringt Schwierigkeiten mit sich. So müssen die Mikroskope gegen magnetische Streufelder abgeschirmt und erschütterungsfrei aufgestellt sein. [Dann] lassen sich Details unterscheiden, die nur wenige Angström Abstand haben.« *Die Umschau 23, S. 857*



Abschnitt eines DNA-Moleküls mit Doppelhelix, Vergrößerung 1700000 : 1.



10 Jahre

AcademiaNet

Sie möchten Lehrstühle oder Gremien mit Frauen besetzen? Sie suchen Expertinnen, Gutachterinnen oder Rednerinnen?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.200 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

REZENSIONEN



ALLES HIRN Jeder Saugnapf oder Tentakel kann ohne Rückmeldung entscheiden, was er tut.



ZOOLOGIE WENN EIN KRAKE FAHRRAD FÄHRT

Liebenswerte Geschichten rund um die ältesten intelligenten Lebewesen unseres Planeten, bei denen nicht nur Kinder aus dem Alltag abtauchen können.



► Kraken erlangen selten Weltruhm, und wenn, dann sind es meist bedrohliche Szenarien. So wie der Riesenkrake im Film »Fluch der Karibik«, der nicht nur Schiffe, sondern auch den Piratenkapitän Jack Sparrow, gespielt von Johnny Depp, verschlingt. Ganz anders Krake Paul, der ein positives Medienecho auslöste, als er 2010 die Ergebnisse der Fußball-Weltmeisterschaft voraussagte, wobei er häufig richtig lag. Auch wenn das purer Zufall war, haben die Lebewesen erstaunliche Fähigkeiten.

Der Autor Michael Stavarič dringt tief in die Welt der Tiere mit den acht Tentakeln ein. Zusammen mit der Illustratorin Michèle Ganser verwandelt er das Werk in einen schönen Bildband. Das Sachbuch ist für Kinder verfasst, die er ab und an direkt anspricht und auffordert, sich eigene Geschichten auszudenken. Stavarič ist ein echter Erzählkünstler, der amüsant schreibt und auch mal Schlenker unternimmt und darüber nachdenkt, was Ozean und Weltall gemeinsam haben oder wie Menschen und Kraken wohl entstanden sind.

Doch es geht ja eigentlich um die Tiere, wie der Autor sich an diesen Stellen zur Ordnung rufen muss. Er schildert, welche erstaunlichen Eigen-

schaften sie haben: Sie öffnen nicht nur Schraubgläser mit Leckerbissen, schießen kräftige Wasserstrahlen auf Plastikdosen oder Steine gegen die Scheiben eines Aquariums. Einige richten den Strahl sogar gezielt auf Lampen und lösen dadurch regelmäßig Kurzschlüsse aus. Vielleicht, denkt sich Stavarič, machen sie das, weil die Meeresbewohner grelles Licht nicht mögen. Dieser Beschuss trifft auch schon mal unerwünschte Artgenossen, wie ein Forscherteam kürzlich herausgefunden hat. Ein ungewöhnliches Verhalten, das sonst nur von Affen bekannt ist.

Bei diesen Meereswesen ist der ganze Körper Gehirn, selbst die Tentakel. Jeder Saugnapf kann ohne Rückmeldung entscheiden, was er tut. Ihre Eigentümlichkeit zeigt sich in den Varianten ihrer Bezeichnung. So werden sie nach ihrem Aussehen als entwurzelte Bäume, Aliens oder Kopffüßer beschrieben, die sich wie nasse Badeschwämme anfühlen.

Stavarič erzählt nicht nur meisterhaft Geschichten, sondern spricht die Leserinnen und Leser auch direkt an. Er fragt nach ihrer Meinung und fordert sie auf, selbst nachzudenken, zu träumen: Was würde Sie tun, wenn Sie acht Arme hätten? Nun, beim Fahrradfahren kann man zumindest zwei auf den Lenker legen, zwei weitere auf die Pedale, und da bleiben immer noch vier zur freien Verfügung. Fast könnte man meinen, Stavaričs Stimme beim Lesen aus dem Buch zu vernehmen.

Der Autor schreibt zwar für Kinder, doch auch Erwachsene schnappen sicherlich noch etwas Wissen auf, wenn er komplexe Sachverhalte wie Bionik, Galaxien oder die Evolution so

Schöner kann ein Buch in der digitalen Zeit gar nicht gestaltet werden

wunderbar einfach erklärt. Kinder dürfen sogar Stifte in die Hand nehmen und die ansprechenden, schwarz-weiß gezeichneten Unterwasserwelten bunt bemalen.

Schöner kann ein Buch in der digitalen Zeit gar nicht gestaltet werden. Die hochwertige Aufmachung mit Golddruck, dem Druck auf glänzendem Papier und den wunderbaren Zeichnungen vom Lebensraum der Kraken zeigt, dass Kinder wichtig sind und ein solches Buch verdienen.

Wie Stavarič berichtet, haben Kraken drei Herzen. Wenn man liest, wie liebevoll er diese Wesen beschreibt, scheint es fast so, als habe der Autor ebenfalls drei. Eins schlägt für seinen Kreislauf, eins für Kinder und das dritte für die ältesten intelligenten Lebewesen unseres Planeten.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

KULTUR FÜR EIN BEWOHNBARES RAUMSCHIFF ERDE

Kulturwissenschaftler wagen die Skizze eines menschenfreundlichen Planeten aus der Vogelperspektive.

► Angesichts unübersehbarer Umweltkatastrophen gebärden sich selbst Banker neuerdings, als seien sie bei »Fridays for Future« in die Schule gegangen. Politiker überschlagen sich in Versprechungen einer umweltgerechten und nachhaltigen Zukunft. Das ist zunächst ein Fortschritt, doch inwieweit den großen Worten entsprechende Taten folgen, muss sich noch zeigen.

Während die Naturforschung unentwegt stärkere Belege für den menschengemachten Klimawandel vorlegt und mit immer verlässlicheren Szenarien vor einem Weitermachen wie bisher warnt, stimmen auch Kulturwissenschaftler in den vielstimmigen Chor ein. An der Justus-Liebig-Universität Gießen hat sich ein »Panel for Planetary Thinking« konstituiert,

REZENSIONEN

das auf das große Ganze der aktuellen Umweltprobleme abzielt. In einem interdisziplinären Ansatz wollen Fachleute aus der Soziologie und Politologie die naturwissenschaftlichen Befunde in einen kulturellen Rahmen stellen, der unseren Lebensraum so in den Blick nehmen soll, wie er sich den ersten Raumfahrern präsentierte: als den seltenen Fall eines bewohnbaren Planeten. Mit dem vorliegenden Buch legt die Gießener Gruppe, welcher der prominente Politologe Claus Leggewie angehört, ihre Arbeitsergebnisse vor.



Nachdem der erste Abschnitt eine kurze Vorgeschichte planetaren Denkens von Mythos und Magie bis zu politischer Philosophie präsentiert, versucht das Kapitel »Engführung« eine umständliche »Begriffsbestimmung der Planet-Mensch-Beziehungen«. Allerdings handelt es sich eher um eine mit Soziologensprache aufgeladene Anekdotensammlung, in der Wasserstoffbomben, Wirbelstürme sowie die »Biosphere«-Experimente – verborgene Versuche, künstliche Biotope dauerhaft bewohnbar zu machen – unsere prekäre Existenz auf dem Heimatplaneten illustrieren sollen.

Das Kapitel »Durchführung« widmet sich der Frage, was angesichts der skizzierten Schwierigkeiten zu tun sei, und will eine »planetare Politik« entwerfen. Zunächst wird der konservative Pessimist Panajotis Kondylis (1943–1998) vorgestellt, der wegen globaler Probleme den Niedergang demokratischer Systeme postulierte. Als Gegentyp dient der Soziologe Nikolaus Sombart (1923–2008); er sah die Lösung in planetarer Planung mit den Methoden der Kybernetik.

In diese Spannweite zwischen Apokalyptik und Utopie ordnen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Panels die aktuellen Ansätze der Umweltpolitik ein. Sie selbst plädieren optimistisch für eine »planetare Umweltverfassung, die nichtmenschliche Akteure als Wirkmächtige und Mitwirkende einbezieht«.

Im Schlusskapitel »Down to Earth« geht es anlässlich der Corona-Pandemie um den Aspekt der »planetaren Gesundheit«. In diesem Zusammenhang stellen die Autoren den Kulturwissenschaften die Aufgabe, eine ganzheitliche Perspektive fachübergreifend zu vermitteln und insbesondere in die verschiedenen Bildungssysteme einzuspeisen.

Kann das vorliegende Buch als erster Schritt in diese Richtung gelten? Positiv ist anzumerken, dass die Autoren sich sichtlich Mühe geben, akademischen Begriffsschwulst zu meiden, und dass sie dabei zumindest Teilerfolge erzielen. Dennoch werden naturwissenschaftliche Fakten meist nur angeführt, um sie mit Gewalt in einen Zusammenhang mit ausführlich herbeizitierten kulturellen Meinungen zu bringen.

Ganz unbehandelt bleibt die entscheidende Frage, wie die enormen Hindernisse, die der Utopie einer planetaren Politik entgegenstehen, konkret anzugehen wären. Da sollten Fachleute für Politik und Gesellschaft schon mehr Farbe bekennen.

Apropos Farbe. Das Buch ist reich bebildert mit Fließdiagrammen, Schemazeichnungen und Fotos. An sich wäre es eine ausgezeichnete Idee, so etwas wie ein planetares Bilderbuch zu kreieren – viele die Ausführung nicht so miserabel aus.

Die meisten Reproduktionen sind so klein geraten, dass die Details und Beschriftungen der Diagramme nicht einmal mit der Lupe zu entziffern sind. Und selbst der mühsame Ausweg, anhand der Bildnachweise eine leserliche Vorlage im Internet zu suchen, führt nicht immer zum Ziel.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Seit 2005 betreut er die Kolumne »Springers Einwürf« in »Spektrum der Wissenschaft«.

WISSENSCHAFTSFREIHEIT WESSEN STIMME DARF MAN ANHÖREN?

Die Debatte darum, wen man sich äußern lässt und ab wann man die wissenschaftliche Freiheit beschneidet, ist aktueller denn je.

»Schließlich ist die Freiheit der Wissenschaft ein Ideal, welches sich erst im Rahmen einer institutionalisierten Praxis konkretisiert und bewährt«, so die Philosophieprofessorin Elif Özmen (Gießen) in dem von ihr herausgegebenen Band »Wissenschaftsfreiheit im Konflikt. Grundlagen, Herausforderungen und Grenzen«. In neun Beiträgen diskutieren Fachleute, vornehmlich aus der Philosophie, aber auch Psychologie und den Rechtswissenschaften, ein aktuelles und brisantes Thema: die Anfechtungen, gegen die sich Wissenschaft wehren muss.

In dem einleitenden Aufsatz ordnet der Jurist Thomas Gutmann (Münster) Wissenschaftsfreiheit und die Garantien des Staats verfassungsrechtlich ein. Nach Urteilen des Bundesverfassungsgerichts von 1973 und 1994 sichert sie jedem wissenschaftlich Tätigen die »Freiheit von staatlicher Beschränkung und vermittelt Schutz vor staatlichen Einwirkungen auf den Prozess der Gewinnung und Vermittlung wissenschaftlicher Erkenntnisse«. Konstitutiv für Wissenschaft sei der »Wahrheitsbezug«. Erst seit 1949 gilt die Freiheit der Wissenschaft als ein Grundrecht in Deutschland.

Wahrheitsbezug kommt in den folgenden Beiträgen aber nicht vor. Sie handeln vom Epistemischen, einem

Erst seit 1949 gilt die Freiheit der Wissenschaft als ein Grundrecht in Deutschland

aus der griechischen Philosophie abgeleiteten Synonym für Erkenntnisgewinn. Es fällt auf, dass die Texte stets um die gleichen Verletzungen der Wissenschaftsfreiheit kreisen. So geht es mal um den Versuch einer islamischen Minderheit, die »Kopftuchta-gung« in Frankfurt zu verhindern, dann um Kontroversen, welche Sprecher man einladen darf, diskutiert an Bei-spielen wie Peter Singer, Thilo Sarrazin oder Marc de Jong.

Elif Özmen plädiert für »epistemi-sche Offenheit«, beschränkt sie aber auf Personen, die innerhalb der Wis-senschaft arbeiten. »Für Nicht-Wissenschaftler*innen gibt es (...) andere und weit mehr Möglichkeiten der Grenzziehung, die allerdings von Fall zu Fall bestimmt und kommuni-ziert werden müssen (...) insbesondere bei Positionen und Provokationen, die dem akademischen Geist und der freiheitlich-liberalen Grundordnung nicht gerecht werden.« Anders argu-mentiert Jan F. Müller, der einen »Cordon sanitaire« um die Wissen-schaft ziehen möchte. Es sei wichtig zu signalisieren, »dass innerhalb der Hallen der Universität das Primat des Erkenntnisfortschritts gilt und dass politische Erwägungen im Ringen um Erkenntnis keine Rolle spielen.«

Versöhnlicher stellt sich Sabine Döring (Tübingen) auf. Für sie krankt der Diskurs daran, dass die Kontrahen-ten die zwei Begriffe von Meinungs-freiheit nicht sauber trennten, die »isegoria als der gleichen Freiheit aller, an der Debatte teilzunehmen« und die »parrhesia als die Freiheit zu äußern, was, wann und zu wem man mag, ohne Sanktionen fürchten zu müssen«. Sie verurteilt dabei die Ausladung Singers, da sie nicht aus epistemi-schen, sondern aus sozialen, politi-schen und moralischen Gründen erfolgt sei. Dagegen soll Thilo Sarrazin nicht eingeladen werden, weil dieser »ohne Analyse dichte Begriffe« benut-ze, die »Evaluation und Beschreibung unauflöslich miteinander verweben«, um rechtspopulistische Thesen zu verbreiten.

Romy Jasper und Geert Keil (HU-Berlin) suchen nach »philosophischen Diskurstugenden« für Ein- oder Ausla-

dungen. »Teilnehmen können nur Personen, die sich auf die Minimalbe-dingungen der intellektuellen Redlich-keit verpflichten«. Vier Tugenden nennen sie: Beim Punkt bleiben, nicht bei Gegenargumenten dem Thema ausweichen, wohlwollend das Gesagte interpretieren und Gegen Gründe in Betracht ziehen.

Unter den Autoren herrscht aber auch Konsens: Wissenschaft suche Wahrheit. Dabei hätte es den Band gut ergänzt, diese Prämisse zur Diskussion zu stellen. Im bunten Strauß der aner-kannten Disziplinen gibt es auch sol-che, bei denen sich bezweifeln lässt, ob sie wirklich Wahrheit suchen. Das gilt für den philosophischen radikalen Konstruktivismus, der den Wahrheits-begriff in das Subjekt verlagert und Intersubjektivität aufgibt. Zudem stellt sich die Frage, welche Wahrheit etwa die Debatte in der Linguistik über das generische Maskulinum anstrebt, wenn Interessengruppen und Akti-visten ihre Ansicht durchzusetzen suchen.



Zwischen dem Wahrheitsbegriff der Naturwissenschaften, der nur vorder-gründig »hart« ist, und der eher auf Plausibilität zielenden Bezeichnung in den Geisteswissenschaften klafft eine breite Lücke. Diese ist zwar nicht zu schließen, man sollte sie aber dennoch analytisch diskutieren. Das gilt ebenso für Geldflüsse aus Staat und Wirt-schaft in die Universitäten. Insgesamt liefert der Band aber eine gute Grund-lage für die aktuelle Diskussion.

Josef König ist Germanist und Philosoph, ehe-maliger Leiter der Pressestelle der Ruhr-Universität Bochum und hat den Informati-onsdienst Wissenschaft mitbegründet.

ASTRONOMIE UNHEIMLICHE ZUKUNFT

Welches Schicksal ereilt unseren Kosmos auf lange Sicht? Dieser Frage widmet sich die Astrophysikerin Katie Mack in ihrem neuen Buch.

► Wer gerne populärwissenschaftliche Vorträge zu astronomischen Themen besucht, kennt die häufigsten Fragen der Zuhörer während der sich meist anschließenden Diskussionsrunde: Was passiert im Innern eines Schwarzen Lochs? Was war vor dem Urknall? Und: Was ist die Zukunft des Univer-sums auf lange Sicht? Zu dieser letzten Frage legt nun die Astrophysikerin Katie Mack von der North Carolina State University in den USA ein lesens-wertes Buch vor. »Das Ende von allem« beschreibt, was die moderne Kosmolo-gie über das Schicksal des Alls weiß – und was nicht.

Katie Mack beginnt ihr Werk mit einer »Einführung in den Kosmos« und einem Kapitel zum Standardurknallmo-dell. Dann folgen fünf Abschnitte, die jeweils einen anderen Tod des Univer-sums beschreiben – so viele Grundszena-rien kann sich die moderne Physik im Moment also vorstellen. Am Ende lässt sie schließlich einige aktive Kosmolo-gen, Astro- und Teilchenphysiker zu Wort kommen, die erklären, was sie für das wahrscheinlichste Szenario halten und wie die Forschergemeinde in den nächsten Jahren Fortschritte zu der Frage erzielen kann.

In einem Szenario ebbt der Schwung des Urknalls irgendwann durch die Schwerkraft der Masse im Universum ab, dann zieht sich der Raum wieder zusammen und endet so in einem »Big Crunch«, einem umgekehrten Urknall. Doch die Dunkle Energie könnte das All auch stetig schneller aufblähen, wo-durch sich die Galaxien zunehmend voneinander entfernen. Letztendlich wächst die Entropie immer weiter, bis es kein Energiegefälle mehr gibt – das Universum ereilt ein stiller Tod. Die Dunkle Energie könnte aber noch brutaler sein und den Kosmos be-schleunigt zerreißen, in einem »Big Rip«. Ebenso unheimlich ist die Vorstel-lung, das Vakuum sei nicht in seinem

REZENSIONEN

teilchenphysikalisch energieärmsten Zustand, so dass sich die gesamte Physik jederzeit ändern könne, wenn es spontan zu einem so genannten Vakuumzerfall kommt. Die letzte Option schließt zahlreiche und womöglich wiederkehrende Universen ein, womit es zu »Urprälen« käme.

Die meisten Fachleute halten zurzeit die zweite Variante der ewigen Ausdehnung für die wahrscheinlichste, doch die Frage ist keineswegs abschließend beantwortet. Was die Dunkle Energie eigentlich ist und wie sie wirkt, sind heiß diskutierte Themen. Ebenso streiten sich die beobachtenden Kosmologinnen und Kosmologen darüber, wie schnell sich das All genau ausdehnt. Macks Buch gibt dem Leser einen Einblick in diese moderne Wissenschaft.



Katie Mack
DAS ENDE VON ALLEM*
*astrophysikalisch betrachtet
Piper, München
2021
272 S., € 22,-

Leider geht es im Text etwas drunter und drüber. Schon im ersten Kapitel vermischt die Autorin die eigentlich versprochene Bestandsaufnahme darüber, wie das Universum beschaffen ist, mit ihrem eigenen Werdegang. In den folgenden Kapiteln gelingt es ihr nicht, die zahlreichen Befunde in einer klaren und aufeinander aufbauenden Reihenfolge aufzuarbeiten. Der Gedankenfluss wird immer wieder unterbrochen, um hier und da noch schnell etwas zu erklären. Beispielsweise wird die Hawking-Strahlung vor den Schwarzen Löchern, welche die Strahlung emittieren, thematisiert. Für Leserinnen und Leser mit entsprechendem Hintergrundwissen kein ernsthaftes Problem, aber man hätte es besser machen können. Ebenso ist es schade, dass die eigentlichen

Beschreibungen der fünf Szenarien relativ kurz ausfallen. Zum Beispiel fehlt eine übersichtliche Darstellung der Zeitskalen für die einzelnen Ereignisse, um die Abfolge deutlicher vor Augen zu haben. Die Geschichte seit dem Urknall bis heute hat die Autorin dagegen klar präsentiert.

Macks Schreibstil ist betont locker. So finden sich hinter manchen Sätzen, die etwas Erstaunliches beschreiben, Einwortsätze wie »Cool« oder »Faszinierend«. Ob das den Text besser macht, sei dahingestellt. Wenn sie einmal Details überspringen muss – und das muss man ja immer –, findet sich beispielsweise die Aussage: »Die Mathematik erspare ich Ihnen, aber ich versichere Ihnen, wenn Sie sie verstehen würden, wäre sie cool.« Das erzeugt kein Verständnis, sondern eher Skepsis gegenüber der Autorin auf Grund der durchschimmernden Arroganz.

Etwas kurios sind die Akronyme im Text, also die Abkürzungen, die Wissenschaftler immer gerne verwenden. Jens Hagedstedt hat sich die Mühe gemacht, sie zu übersetzen. So steht KMH nicht für Kilometer pro Stunde, sondern den kosmischen Mikrowellenhintergrund. CMB für Cosmic Microwave Background wäre das international geläufige Kürzel gewesen. Und kommen Sie darauf, was GHS ist? Nicht Grund- und Hauptschule, aber der Große Hadronen-Speicherring. Also der LHC beim CERN in Genf.

Es ist wie so oft: Die Idee für das Buch ist einleuchtend und deckt einen bislang wenig beschriebenen Aspekt ab. Bei der Ausführung hapert es aber. Wer sich daran nicht stört, bekommt eine kompetente Antwort auf eine der drängendsten Fragen der Kosmologie.

Stefan Gillessen ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

UMWELT MISSION IMPOSSIBLE?

Der Journalist Bernhard Pötter liefert einen fundierten Bericht über das Versagen, die Klimakrise abzuwehren, und erläutert, wie es vielleicht doch noch klappen kann.



► Eigentlich hat der Konzern Thyssenkrupp einen richtigen Weg eingeschlagen: Er plant, in Duisburg »grünen« Stahl herzustellen – mit Wasserstoff statt Kohle. Wäre da nicht der Handy-Klingelton der Pressesprecherin, den der Journalist Bernhard Pötter bei seinem Besuch mit der Filmmusik des Actionthrillers »Mission Impossible« ertönen hört. Dieses Detail zeigt: Pötter sieht und hört genau hin. Auch als er das VW-Werk in Zwickau besucht, wo nur noch E-Autos produziert werden, fällt ihm auf, dass vor den Hallen »die Parkplätze derzeit von Passats, Golfs und Polos vollgeparkt sind. Alle mit Verbrennungsmotoren«.

Doch abseits von solchen ironischen Details, die zum Schmunzeln einladen, dominiert beim Verfasser eine fachlich fundierte Analyse des Scheiterns und der Maßnahmen im Kampf gegen den Klimawandel. Pötter ist Journalist bei der »tageszeitung« (taz), weshalb er nicht nur Fakten liefert, sondern auch Gespräche und Menschen vorstellt, die ihre Einschätzung geben. Er merkt an, dass VW gerade jetzt nach dem Dieselskandal Vorreiter bei der E-Mobilität ist. Und mahnt: Elektrische Autos machen allein noch keine klimaneutrale Zukunft. Städte müssten grundlegend neu gedacht werden, es brauche ein neuartiges Baurecht, Geld für den öffentlichen Nahverkehr, und man müsse den Bundesverkehrsplan entrümpeln.

Unter anderem besucht Pötter einen engagierten Vogelschützer, der mit großem Einsatz für den Erhalt von Kormoranen, Graureihern und Bussar-

den gegen einen geplanten Windpark kämpft. Wie sich zeigt, ähneln seine Argumente denen von AfD-nahen Anti-Windkraft-Aktivistinnen. Wie sich herausstellt, wird er von ebenjenseitigen Beratern beraten. Damit verdeutlicht der Autor, wie eine Vielzahl von Stiftungen und Vereinen, die teilweise für den Erhalt der Natur kämpfen, die Energiewende ausbremsen.

Zudem zerlegt Pötter den Wasserstoffhype und schildert, dass immer weniger Windräder aufgestellt werden, während die Totholzzone in Wäldern zunimmt. Er hinterfragt kritisch die Maßnahmen, mit denen Kohlendioxid wieder aus der Luft gefischt werden soll, und zeigt, wer neben innovativen Firmen Interesse an genau diesen umstrittenen Techniken hat. Wenn man das aufgefangene Gas vergraben würde, könnten große Ölkonzerne profitieren, die damit noch das letzte Öl aus den Bohrungen pressen können. Pötter lässt dabei auch Experten und Expertinnen zu Wort kommen, die diskutieren, ob Klimarettung im Kapitalismus überhaupt möglich ist, ob die These vom »gerechten Übergang« haltbar ist, und berichtet, wie die Justiz immer häufiger für den Umweltschutz einsteht und damit politische Entscheidungen zurückdreht.

Das Buch dreht sich aber nicht nur um Versäumnisse, sondern präsentiert auch vorbildliche Aktionen einzelner Städte. Denn die Zukunft werde sich nicht nur in der »Hauptstadtblase der Berliner Politik« entscheiden, so Pötter. Vielmehr sei wichtig, was in Ländern, Städten und Gemeinden getan werde. Die Klimarettung sei »vor allem eine Frage des Bodenpersonals – BürgermeisterInnen« und anderer engagierten Menschen. So wie in Tübingen, wo der grüne Oberbürgermeister Boris Palmer in zehn Jahren die Stadt klimaneutral machen will, mit einem einstimmigen Beschluss des Gemeinderats.

Das Buch »Die Grüne Null« ist eine gelungene Hintergrundanalyse, die aufdeckt, welche Akteure in der Klimakrise bremsen und wie einzelne Maßnahmen zu bewerten sind. Dabei beachtet der Autor auch kleinere

Veränderungen. Obwohl Energiekonzerne, Schwerindustrie und Autohersteller bislang Fortschritt meist blockierten und selbst jetzt einige Schritte verhindern, sieht er deren klimafeindliche Front geschwächt: durch Umweltkatastrophen und populäre Bewegungen wie »Fridays for Future«.

Das Buch stimmt dennoch nicht wirklich hoffnungsvoll. Schon im Vorwort resümiert Pötter: »Es wird deutlich, dass all das nicht genügt, um den Anforderungen des Pariser Abkommens, den Warnungen der Wissenschaft oder dem Protest der Gesellschaft zu genügen.« Auch Carola Rakete, Aktivistin bei »Fridays for Future« und Kapitänin eines Rettungsschiffs, sagte: »Hoffen heißt: passiv sein, keine Macht haben. Entweder man hofft oder man macht was.« Pötter hat etwas gemacht, indem er dieses sehr empfehlenswerte Werk verfasst hat. »Denn aufgeben ist keine Option«, wie er betont.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.



NEUROWISSENSCHAFTEN DER WEITE WEG ZUR ANWENDUNG

Die Gedankenwelt des Gehirns verstehen: Davon träumt die Menschheit schon lange. In dem neuen Buch stellen ein Neurowissenschaftler und ein Schriftsteller den aktuellen Forschungsstand des Gebiets vor.

Der Traum vom Gedankenlesen ist in der Hirnforschung weit verbreitet. Bereits Hans Berger (1873–1941), der Entdecker der Elektroenzephalografie (EEG), arbeitete vor mehr als 100 Jahren daran, die von ihm als psychische Energie des Gehirns bezeichneten mentalen Vorgänge zu bestimmen – zunächst mit wenig erfolgreichen Messungen der Wärmeproduktion des Denkkorgans und später mit der Ableitung der Hirnströme des Menschen.

»Fenster ins Gehirn« verbindet ebenfalls Erkenntnisse über psychische Prozesse mit der begleitenden Hirnaktivität. Der ehrgeizige Titel verspricht zu erklären, »wie unsere Gedanken entstehen und wie man sie lesen kann«. Der thematische Schwerpunkt liegt auf dem Gedankenlesen, über die Entstehung von Gedanken erfährt man nicht sonderlich viel.

Der Neurophysiologe John-Dylan Haynes vom Berlin Center for Advanced Neuroimaging und der Schriftsteller Matthias Eckoldt fassen in diesem Buch den Stand der modernen Hirnforschung mit ihrem Bezug zu unserem inneren Erleben zusammen. Für Laien vermitteln sie erfolgreich die Grundlagen der aktuellen Forschungsansätze: Neurowissenschaftliche Methoden der Bildgebung wie EEG oder funktionelle Kernspintomografie (fMRT) sowie Teile der komplexen Neuroanatomie werden verständlich erklärt.

Zu dem Thema des neurophysiologischen Gedankenlesens schildern die Autoren bildhaft zahlreiche experimentelle Studien. Man erfährt viel über den Ablauf solcher Untersuchungen sowie über die komplexe Analyse der Daten. Dabei versuchen Fachleute durch mathematische Algorithmen Muster in den Hirnaktivitäten zu erkennen: Zunächst definiert man anhand bekannter Gedankeninhalte die Struktur der ausgelösten Signale; beispielsweise indem man einem Probanden verschiedene Bilder zeigt.

Das »Lesen« des Gedachten geschieht bei der anschließenden Darstellung derselben Bilder. Die ausgelöste Hirnaktivität wird mit den vorher gelernten Mustern verglichen. Aus der Ähnlichkeit schließt man dann, woran der Proband dachte. Der Erfolg der

Methode liegt meist zwischen 50 und 70 Prozent. Das ist sicherlich ein beeindruckendes Ergebnis, doch jeder muss für sich entscheiden, ob es damit wirklich möglich ist, Gedanken zu lesen. Illustriert das Verfahren nicht vielmehr das Wiedererkennen einer begrenzten Anzahl von Mustern der Hirnsignale?

Die Autoren illustrieren ein weites Spektrum wissenschaftlicher Untersuchungen und Fragen: von grundlegenden Überlegungen, wie geistige Prozesse mit der Gehirnaktivität zusammenhängen, über das Erkennen von Wahrnehmungsinhalten oder Emotionen bis zu der Möglichkeit, die geschilderten Verfahren als Lügendetektor einzusetzen. Die Autoren beleuchten darüber hinaus kritisch die Anwendung solcher neurophysiologischen Techniken, beispielsweise im Bereich des Neuromarketings. Dabei scheint es sich meist eher um des Kaisers neue Kleider zu handeln als um abgesicherte wissenschaftliche Analysen. Haynes und Eckoldt betonen außerdem, dass viele Medien die Befunde der Bildgebung spektakulär, aber oft verkürzt und nicht korrekt darstellen.

Auch das Thema »freier Wille«, das in den letzten Jahrzehnten viele populärwissenschaftliche Inhalte der modernen Hirnforschung dominiert hat, greift das Duo auf. Nicht jede Idee hierzu erscheint neu. Dennoch bietet das Buch vor allem Laien eine gute Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung und viele Anregungen, sich mit den genannten Themen weiter auseinanderzusetzen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass es interessante Ansätze in der Grundlagenforschung gibt, die Anwendung dieser Methoden im Alltag jedoch weit entfernt ist. Die statistischen Unsicherheiten, mit denen die Ergebnisse verbunden sind, schließen derzeit eine praktische Umsetzung aus. Auch die künstlichen und oft sehr unangenehmen Bedingungen in einem MRT-Scanner sind praxisfern und für den alltäglichen Einsatz untauglich. Das Lesen von Gedanken im eigentlichen Wortsinn wird wohl noch lange ein Traum bleiben.

Das Buch ist verständlich und gut lesbar, allerdings sind zwei Punkte etwas irritierend: Obwohl es von zwei Autoren stammt, sind weite Teile in der ersten Person Singular verfasst, und statt wissenschaftlicher Abbildungen tauchen eher wenig anschauliche cartoonartige Zeichnungen auf. Dennoch ist der Titel empfehlenswert für alle, die an den Fortschritten der Hirnforschung interessiert sind.

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



LINGUISTIK GERATEN SIE AUF DEN HOLZWEG?

Warum packt man die Gelegenheit beim Schopf? Die Herkunft solcher Redewendungen ist nicht immer offensichtlich.

► Ist das Heft, das man möglicherweise in der Hand hat, kariert oder liniert? Besteht der alte Zopf aus Haar oder aus Hefeteig? Und wie schafft man es ohne abenteuerliche Verrenkungen, jemandem auf den Schlips zu treten? Wir verwenden diese und ähnliche Redewendungen mit der größten Selbstverständlichkeit, doch auf die Frage, wie sie entstanden sind und was sie früher bedeutet haben, können wir nur selten antworten. Kein Wunder, denn solche Redensarten greifen oft auf längst vergangene und vergessene Verhältnisse zurück – das macht sie zu kleinen, feinen Zeugnissen der Kulturgeschichte.

Die Entstehungsgeschichte von 35 dieser Sprichwörter zeichnen nun die Autorin und Kabarettistin Andrea Schomburg und die Illustratorin Irmela

Schautz nach, mit einem originellen und amüsanten Dreh: Zu jeder Wendung werden – wie im vermutlich bislang erfolgreichsten Quiz der Fernsehgeschichte – vier mögliche Erklärungen angeboten, und die Leserschaft darf raten, welche die richtige ist. Die Auflösungen finden sich im hinteren Teil des Buchs.

Das hört sich leichter an, als es ist! Manche Herleitungen klingen völlig abstrus und sind trotzdem die reinste Wahrheit, dafür kommt die eine oder andere Schwindelei hochseriös daher. Dass der Schopf, bei dem man die Gelegenheit ergreift, auf den Lügenbaron Münchhausen zurückgeht, der sich daran angeblich selbst aus dem Sumpf zog, hätte man sich gut vorstellen können. Aber nein, auf ihn lässt sich der Ausspruch nicht zurückführen (auf wen stattdessen, darf hier natürlich nicht ausgeplaudert werden).

Wem gehörte der Ärmel, aus dem erstmals etwas geschüttelt wurde? Dem Magier Houdini, einer Hofdame aus dem mittelalterlichen Burgund, einem Falschspieler oder gar der römischen Göttin Fortuna? Ein besonderer Reiz liegt eben darin, dass in den frei erfundenen Erklärungen echte Gelehrsamkeit und hanebüchener Unsinn zu einer höchst vergnüglichen Mixtur verquirlt werden. Man kann erahnen, wie viel Spaß die Autorinnen hatten, ihre Leser auf den Holzweg zu führen. Und was es mit diesem Holzweg auf sich hat, erfährt man natürlich auch.

Solche Bücher sind keine epochalen Werke, die den Lauf der Welt verändern, sondern eher ein literarischer Snack für einen verregneten Nachmittag. Aber auch derartige Sammlungen kann man schludrig und dröge schreiben oder – wie hier – mit Respekt vor dem Detail und einer großzügigen Portion Humor. Man kann sie lieblos aufmachen oder ihnen wie in diesem Fall zauberhafte Illustrationen gönnen. »Der geheime Ursprung der Redensarten« zählt eindeutig zu den gelungenen Vertretern seiner Gattung.

Vera Binder hat Sprachwissenschaft und Philologie in Tübingen studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.

Die Spektrum eLearningFlat



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

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

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

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



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

Die Spektrum eBookFlat



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

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

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



ROUDESIGN / BETTY IMAGES / ISTOCK

Ein Freund, ein guter Freund

Auch morgen geht eine Sonne unter. Eine Kurzgeschichte von Jeremy Szal

»W o bleibst du denn? Das kannst du besser!« Benns Stimme dröhnt in meinem Helm, als stünde er direkt neben mir, aber in Wirklichkeit trabe ich 20 Meter hinter ihm. Ich war nie ein guter Läufer, und in der niedrigen Schwerkraft komme ich noch langsamer voran. »Hopp hopp, lahme Ente!«

Früher hätte ich ihm zugerufen, er solle die Klappe halten, und wäre bei meinem gewohnten Tempo geblieben. Wir werden noch genug bewundern können, wie der Sonnenuntergang auf Dzilt den silbrigen Horizont des Planeten in ein mildes Blau taucht – genau wie jeden Abend. Doch jetzt beginne ich schneller zu rennen. Der große Kerl grinst hinter seiner durchsichtigen Helmscheibe, als ich den Hügelkamm erreiche. Ich bin außer Atem und in meinem hautengen Schutzanzug schweißgebadet. Ich ringe nach Luft. »Du hast gewonnen«, keuche ich.

»Ich werde zuerst oben sein!«, äfft Benn mich mit verstellter Stimme nach. Er grinst noch immer, während er mir mit einer großen behandschuhten Pranke sanft auf den Rücken klopfte. Das liebe ich an ihm: wie er sich Mühe gibt, mit seiner überlegenen Kraft sorgsam umzugehen.

Wir wandern Schulter an Schulter über die silbrigen Ebenen, und sein Atmen dringt als beruhigendes Echo an mein Ohr. Er ist im Unterschied zu mir hellhäutig und einen Kopf größer. Die klobigen Anzüge wurden zwar individuell auf unsere Pheromone abgestimmt, bieten aber die gleiche unförmige Außenansicht – wegen der dicken Panzerung, die den gelegentlichen Metallstürmen widerstehen soll. Als Mann trägt Benn einen zitronengrünen Panzer, während mich weibliches Dunkellila zierte. Ich kann mich nie ganz an das fortwährende leise Kitzeln gewöhnen, mit dem die weichen, mit Gel überzogenen Fühler auf der Innenseite des Anzugs meine Biorhythmen kontrollieren. Eilig krabbeln die künstlich-intelligenten Mikrobots, die für Forschung und Entwicklung auf Dzilt eingesetzt werden, über die pocken-narbige Oberfläche des Planeten; sie suchen nach Biodiversität, um alles Lebendige in ihre winzigen Körper zu absorbieren. Der Außenposten, in dem wir stationiert sind, liegt wie ein unförmiger Klumpen aus Wellblech ein gutes Stück hinter uns. Es ist der Einzige weit und breit.

Wir halten an, damit Benn die braunen Gurte meines Lebenserhaltungsrucksacks strammziehen kann, die kreuzförmig über Brust und Rücken laufen. Er besteht darauf, das jetzt zu tun. Auf einem Planeten, wo einen das Einatmen des Metallstaubs umbringen würde, ganz zu schweigen von der giftigen Atmosphäre, kann man mit der Kontrolle der Geräte gar nicht pedantisch genug sein. Daheim haben uns die Leute für verrückt erklärt, weil wir Coloven verlassen wollten und ausgerechnet hierher aufbrachen, noch dazu, da wir so jung waren ... Aber was geht über den Nervenkit-

zel, als einer der ersten Menschen den Fuß auf einen neuen Planeten zu setzen?

»Ich hoffe, es macht dir nichts aus, noch ein Stück zu gehen«, frage ich selbstironisch über die Schulter.

»Ich bin gern mit dir unterwegs, Sola«, antwortet er. Obwohl wir einen weiteren steilen Hügel hinaufsteigen, bleibt sein Atem ruhig und gleichmäßig. Unter meinen Achseln sammelt sich Schweiß und rinnt an meinem Rückgrat entlang, als wir den Gipfel erreichen. »Also, wenn das keine Aussicht ist!« sagt Benn.

Unsere Sichtscheiben verdunkeln sich automatisch, während wir zum Horizont blicken. Die ferne Sonne sinkt langsam hinter rasiermesserscharfen Felsrücken und verschlungenen Bergkämmen, die im Lauf der Jahrtausende, in denen sie den Metallstürmen ausgesetzt waren, geschliffen und zugespitzt wurden. Zacken und Schneiden streuen das Licht und erzeugen silbrig-blaue Bögen, die sich hoch über die gewellten Ebenen spannen.

Wir stehen Rücken an Rücken mit aneinander geschmiegteten Köpfen, drehen uns langsam und verschaffen uns so einen Eindruck von dem gesamten Panorama. Außerirdische Ebenen und wettergegerbtes Grasland, so weit das Auge reicht. Die urchümliche Wildnis ist atemberaubend. Sie ist unberührt. Unzivilisiert, nicht kolonisiert. Ihre Härte wunderschön.

Und gefährlich.

Ich schlucke und konzentriere mich auf Benns nun von freudiger Erregung beschleunigte Atemzüge, während wir gemeinsam die Aussicht genießen. Sein Körper beruhigt mich wie eine Säule, deren Masse festen Schutz bietet. Wir sitzen nebeneinander und lassen die Beine über den Abgrund baumeln. Mikrobots huschen um uns herum. Sie wirbeln am Arm von Benns Anzug empor. Ich bemerke das. Er nicht.

»Auf Coloven hätten wir nichts dergleichen je zu Gesicht bekommen«, bemerkt Benn und schubst seine dicke Schulter so fest gegen meine, dass meine Lebenserhaltungsgurte knirschen. Dann schweigt er – und hört nicht auf zu schweigen. Er will den Augenblick nicht zerstören, aber gerade wegen der langen Pause weiß ich, dass es gleich passieren wird. »Sie wissen noch nichts davon, nicht wahr?«

Ich schließe die Augen, um die Wirklichkeit noch eine Sekunde länger auszublenden. »Nein.« Ich möchte ihm nicht ins Gesicht blicken, aber dann tue ich es doch. »Sie wissen noch nicht, dass du tot bist.«

Die Basis hat keine Ahnung, dass meine Helmdichtung brach, als wir auf unserem Weg zu genau diesem Ort waren. Sie wissen nicht, dass Benns letzte Handlung darin bestand, mir seinen Helm zu geben und mir damit das Leben zu retten, bevor die giftigen Gase seine inneren Organe zerfraßen und

der Metallstaub seine Atemwege verstopfte. Und sie wissen nicht, dass ich jedem Mikrobot, den ich finden konnte, befahl, Benns Körper zu verzehren. Sie sollten sein Fleisch, sein Blut und seine Knochen absorbieren und alles wieder zu seiner exakten Körperform zusammensetzen, haargenau bis zu seinen roten Bartstopplern. Und die Basis weiß nicht, dass ich die Mikrobots mit einer künstlich-intelligenten Kopie seiner Person aus der Datenbank programmierte, damit er wieder so wurde wie in meiner Erinnerung.

Das alles dürfen sie nicht wissen, sonst ziehen sie uns von dem Planeten ab, beschlagnahmen die Mikrobots, die ich aus ihrer Forschungsabteilung gestohlen habe, und löschen Benn dadurch für immer aus. Für sie ist er nur eine Nummer. Sie werden nicht zögern, das Besiedelungsprojekt zu beenden, bloß damit von dem Unfall nichts nach außen dringt. Aber vorläufig bleiben wir zwei noch ein Weilchen beisammen. So können wir weiter um die Wette laufen, um den Sonnenuntergang zu bewundern – wie jeden Tag, als Benn noch am Leben war. Wie lange es dauern wird, bis sie die Wahrheit herausfinden? Wer weiß.

Benn wendet sich wieder der silbrigen Sonne zu, die gerade versinkt und über die grasbewachsenen Ebenen langsam eine dunkle Decke ausbreitet. »Ich könnte mir das ewig anschauen«, flüstert er und legt einen Arm um meine Schultern.

»Ich weiß«, antworte ich. Er ahnt ja gar nicht, wie recht er hat.

»Es wird natürlich auch morgen wieder da sein.«

»Ich weiß.«

Unvermittelt nimmt er seinen Helm ab, ohne auf das warnende Gezwitscher des Schutzanzugs zu achten. Eigentlich braucht er ihn ja auch nicht. Sein Kopf zerfließt in eine Wolke glitzernder Mikrobots, wie eine gekräuselte Fontäne aus schwarzen Kieselsteinen, und setzt sich wieder zu der Fassade eines menschlichen Gesichts zusammen. Vermutlich geht es mit Benn nun doch allmählich zu Ende.

Dann wirft er mich plötzlich flach auf den Rücken und steht mit breitem Grinsen über mir. »Zurück um die Wette, Sola!«, ruft er und sprintet den Hang hinab.

Ich raffe mich auf und muss ein paarmal schlucken. Dann setze ich mein gewohntes Lächeln auf und laufe hinter Benn hinunter in die brausende Finsternis. ◀

DER AUTOR

Jeremy Szal hat neben vielen Kurzgeschichten die Romane »Stormblood« (2020) und »Blindspace« (2021) publiziert. Er lebt in Sydney, Australien.

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 565, S. 260, 2019

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Lt.), 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 (Lt.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Katja Mellenthin, Dr. Michael Springer

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



VORSCHAU



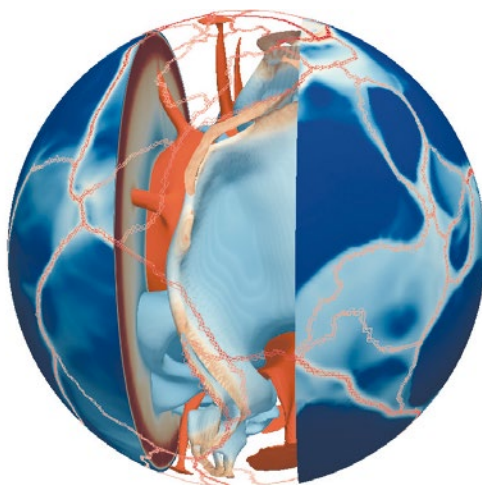
IAN C. HAYDON, INSTITUTE FOR PROTEIN DESIGN, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

MOLEKÜLE VOM REISSBRETT

Bisher war es nur mit Hilfe aufwändiger Laborarbeiten möglich, die räumliche Struktur von Proteinen präzise zu ermitteln. Nun gelingt das auch mit KI. Rasante Fortschritte auf dem Gebiet erlauben es, künstliche Eiweiße als Medikamente herzustellen, die erheblich wirksamer sind als natürliche Moleküle. Das könnte schon bald im Kampf gegen Viruserkrankungen wie Covid-19 helfen.

EIN NEUES MODELL DER ERDE

Ein Team hat erstmals realistisch simuliert, wie Vorgänge auf der Erdoberfläche und im Innern zusammenspielen. Vielleicht wird das Modell klären, wie die Plattentektonik entstanden ist.



CLAIRE MALLARD, NICOLAS CODICE ET AL.



NASA / JPL

DIE WIEDERENTDECKUNG DER VENUS

In letzter Zeit verlief die Erforschung des Planeten zäh. Jetzt sollen gleich drei Sonden zu der unwirtlichen Nachbarwelt fliegen und die Frage beantworten, warum sich Erde und Venus derart verschieden entwickelt haben.



WINHOISE / GETTY IMAGES / ISTOCK

MATHEMATIK VERBINDET

Ursprünglich in der Chemie angesiedelt beleuchtet die Perkolationstheorie das Verhalten verschiedenster Netzwerke: von der Übertragung von Krankheiten bis zu Mobilfunkverbindungen zwischen Demonstranten, die repressive Regierungen fürchten.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren
und keine Ausgabe mehr verpassen!



Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten
von **Spektrum PLUS** – wie kostenlosen Downloads,
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

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

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **38** 23.09.2021

- > Zahl der Koalas sinkt rapide
- > Menschen lassen sich nicht zu etwas verleiten, was sie nicht wollen
- > Eine Pyramide für den Katastrophenschutz

TITELTHEMA: KÖRPERSPRACHE

Was Gesten verraten

Die Körpersprache ist reich an versteckten Botschaften: Mit Armen und Beinen, Händen und Füßen geben Menschen so manches über sich preis. Ausladende Gesten und Selbstberührungen sind besonders viel sagend.

BLICKKONTAKT
Die Augen sagen mehr als tausend Worte

GOLDRAUSCH AM AMAZONAS
Der wahre Preis des Goldes

RÄTSELHAFTE EXPANSION
Gab es einst eine zweite dunkle Energie?

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

