

Spektrum

der Wissenschaft

Besucher aus der Ferne

Die ersten interstellaren Objekte im Sonnensystem



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

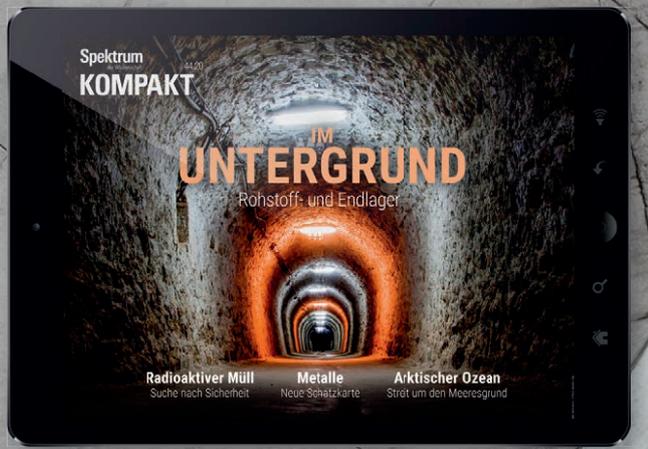
HIRNFORSCHUNG Die verblüffende Intelligenz der Vögel
TURBULENZ Ein verwirrendes physikalisches Problem
ELEKTROMOBILITÄT Was geschieht mit den alten Akkus?



KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

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

€ 4,99
JE DIGITALE
AUSGABE



Bestellmöglichkeit und über 300 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL DIE »ALIENS« KOMMEN!

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► »'Oumuamua« – der Name weckt Assoziationen. Er klingt nach exotischen Inseln und Reisen in die Ferne. Tatsächlich stammt der Begriff aus dem Hawaiianischen und bedeutet »Späher«. Das spielt auf eine besondere Eigenschaft von 1I/'Oumuamua an, wie der Name des Objekts vollständig lautet. Denn es handelt sich bei ihm um den ersten interstellaren Besucher, den Astronomen in unserem Sonnensystem nachweisen konnten: Robert Weryk von der University of Hawaii gelang 2017 diese Sensation.

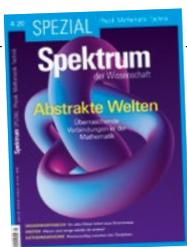
Der Gesteinsbrocken war so etwas wie ein Vorbote. Inzwischen kennt die Wissenschaft noch einen zweiten Reisenden zwischen den Sonnensystemen: Der Amateurastronom Gennadi Borissow entdeckte 2019 den nach ihm benannten Körper 2I/Borissow. Dieser unterscheidet sich in seinem Wesen und Äußeren deutlich von 'Oumuamua, dessen Form manche Forscher zu den wildesten Spekulationen inspirierte – bis hin zu außerirdischen Raumschiffen.

Amaya Moro-Martín und David Jewitt schreiben in unserer Titelgeschichte (ab S. 12) zu den »Besuchern von den Sternen« ganz sachlich, aber trotzdem fesselnd über diese Körper. In meinen Augen handelt es sich dabei sogar um eine der spektakulärsten und interessantesten Entdeckungen, die Astronomen in unserem Sonnensystem in letzter Zeit gelangen – und das in einem an begeisternden neuen Erkenntnissen nicht gerade armen Feld der Forschung.

Mittlerweile haben beide Objekte unser Sonnensystem wieder verlassen. Der Fall Gennadi Borissow zeigt, dass Hobbybeobachter wichtige Entdeckungen machen können: Er spürte »seinen« Fund mit einem selbst gebauten Teleskop auf. Vielleicht gelingt etwas Ähnliches ja schon bald einem anderen aus der großen Gemeinschaft begeisterter Amateurastronomen.

Wie stark persönliche Interessen die Wissenschaft revolutionieren könnten, zeigt auch unser Artikel »Wipfel als Windfabrik« (S. 44) über Wälder, die Winde erzeugen, welche wiederum Regenwolken über ganze Kontinente hinwegtreiben und andernorts für dringend benötigte Niederschläge sorgen. Auf die Idee zu dieser These kam die russische Wissenschaftlerin Anastassia Makariewa während ihrer ausgedehnten Zelturlaube inmitten der Taiga. Wenn sie Recht hat mit ihrer Annahme, gibt es einen weiteren Grund, warum wir aufhören sollten, die großen Urwälder der Erde abzuholzen. Die Folgen für viele landwirtschaftliche »Brotkörbe« der Erde könnten sonst katastrophal sein.

Nachdenklich grüßt



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum SPEZIAL** Physik – Mathematik – Technik 4.20 nimmt Sie mit auf eine abenteuerliche Reise durch die faszinierende Welt der Mathematik.

IN DIESER AUSGABE



DAVID JEWITT, AMAYA MORO-MARTÍN

untersuchen das äußere Sonnensystem sowie Staub um andere Sterne. Ab S. 12 berichten sie von einem erstaunlichen Fund.



MARION BELLE RUB

ONUR GÜNTÜRKÜN

Der Biopsychologe von der Ruhr-Universität Bochum präsentiert ab S. 30 die außerordentlichen Leistungen, zu denen ein »Spatzenhirn« in der Lage ist.



DAMIEN QUERLIOZ, JULIE GROLLIER

Die zwei Physiker von der Université Paris-Saclay entwerfen neuartige Technologien, die Informationen ähnlich wie das menschliche Gehirn verarbeiten und dadurch sehr energieeffizient sind (ab S. 74).

INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM
- 20 FORSCHUNG AKTUELL
Supraleitung
Weltrekord bei 15 Grad
Immunsystem
Wie die Körperabwehr auf Impfungen reagiert
Seismografie
Ruhe durch Corona-Lock-down
- 28 SPRINGERS EINWÜRFE
Ein Plan mit Pferdefüßen
Zahlen andere Weltregionen für den Green Deal der EU?
- 64 SCHLICHTING!
Geheimnisvolle Spuren im Schnee
Manche Abdrücke schmelzen zu kreisrunden Hügeln.
- 73 FREISTETTERS FORMELWELT
Wie man ein Sofa um die Ecke bringt
Die Mathematik des Möbeltransports.
- 87 ZEITREISE
- 88 REZENSIONEN
- 95 LESERBRIEFE
- 96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE
- 97 IMPRESSUM
- 98 VORSCHAU

12 ASTRONOMIE **BESUCHER VON DEN STERNEN**

In den letzten Jahren sind zwei ungewöhnliche Objekte im Vorbeiflug an der Sonne aufgefallen: Sie stammen aus anderen Sternsystemen!

Von David Jewitt und Amaya Moro-Martín

30 VERHALTENSFORSCHUNG **FEDERVIEH MIT KÖPFCHEN**

Vögel sind zu erstaunlichen kognitiven Leistungen in der Lage. Wie schaffen sie das trotz ihres winzigen Gehirns?

Von Onur Güntürkün

38 BILDGEBUNG **MIT DURCHBLICK ZU NEUER ERKENNTNIS**

Ein spezielles Verfahren macht Körpergewebe und komplette Organe durchsichtig. Mit seiner Hilfe lassen sich vollständige Körperteile mikroskopisch untersuchen und vielleicht sogar künstliche Organe züchten.

Von Shan Zhao

44 ÖKOLOGIE **WIPFEL ALS WINDFRABRIK**

Dass Wälder Wolken und Regen hervorbringen, weiß man schon lange. Eine umstrittene Theorie legt allerdings nahe, sie würden auch Winde erzeugen, die Wolken über Kontinente hinweg transportieren.

Von Fred Pearce

50 VULKANOLOGIE **AUF DEM WEG ZUR ERUPTIONSVORHERSAGE**

Wann bricht ein Vulkan das nächste Mal aus? Mit einer Fülle von Überwachungsdaten und künstlicher Intelligenz soll sich diese Frage künftig noch genauer beantworten lassen.

Von Jane Palmer

58 LITHIUM-IONEN-AKKUS **DIE ALTLAST DER ELEKTROMOBILITÄT**

Die Batterien von E-Autos bestehen in der Regel aus ganz unterschiedlichen Materialien, die verschweißt oder verklebt sind. Diese Architektur stellt den Recyclingprozess der Energiespeicher vor große Schwierigkeiten.

Von Christopher Schrader

66 FLUIDDYNAMIK **GEHEIMNISVOLLE TURBULENZ**

Ob Wirbelstürme oder der Blutfluss in Arterien: Wir sind von Turbulenzen umgeben. Und dennoch sind die rätselhaften Phänomene kaum verstanden. Ein neues Laborverfahren könnte nun den Durchbruch bringen.

Von David H. Freedman

74 TECHNIK **SPINTRONIK FÜR NEUROMORPHE COMPUTER**

Indem man die Quantenmechanik nutzt, lassen sich neuartige und extrem energieeffiziente Rechenmaschinen entwickeln, deren Aufbau dem des Gehirns ähnelt.

Von Damien Querlioz und Julie Grollier

82 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **SPIRALPARKETTE**

Die Parkette sind weder periodisch noch unperiodisch im Sinne von Quasikristallen – vielmehr gehen Spiralen von einem definierten Zentrum aus.

Von Christoph Pöppe



12

TITELTHEMA
BESUCHER VON DEN STERNEN

DOTEDIPPO / GETTY IMAGES / ISTOCK



30

VERHALTENS-
FORSCHUNG
**FEDERVIEH
MIT KÖPFCHEN**

ALAMY / AISCAPPE / JEAN-PAUL FERRERO



50

VULKANOLOGIE
**VORHERSAGE VON
ERUPTIONEN**

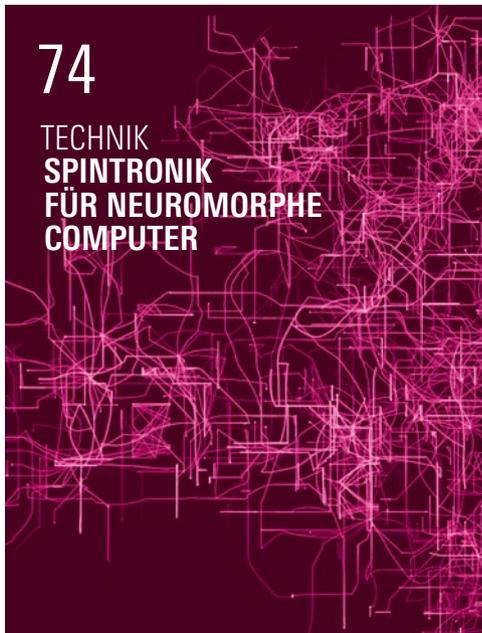
ESA / NEWSOM / PICTURE ALLIANCE



CHEKY_W / GETTY IMAGES / ISTOCK

58

AKKU-RECYCLING
DIE ALTLAST DER E-AUTOS



74

TECHNIK
**SPINTRONIK
FÜR NEUROMORPHE
COMPUTER**

DANIELS / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



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

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

SPEKTROGRAMM

A satellite image of Alaska, showing a large brown dust plume extending from the Copper River delta in the southeast towards the coast. The surrounding land is green and brown, and the ocean is blue. The title 'SPEKTROGRAMM' is at the top.

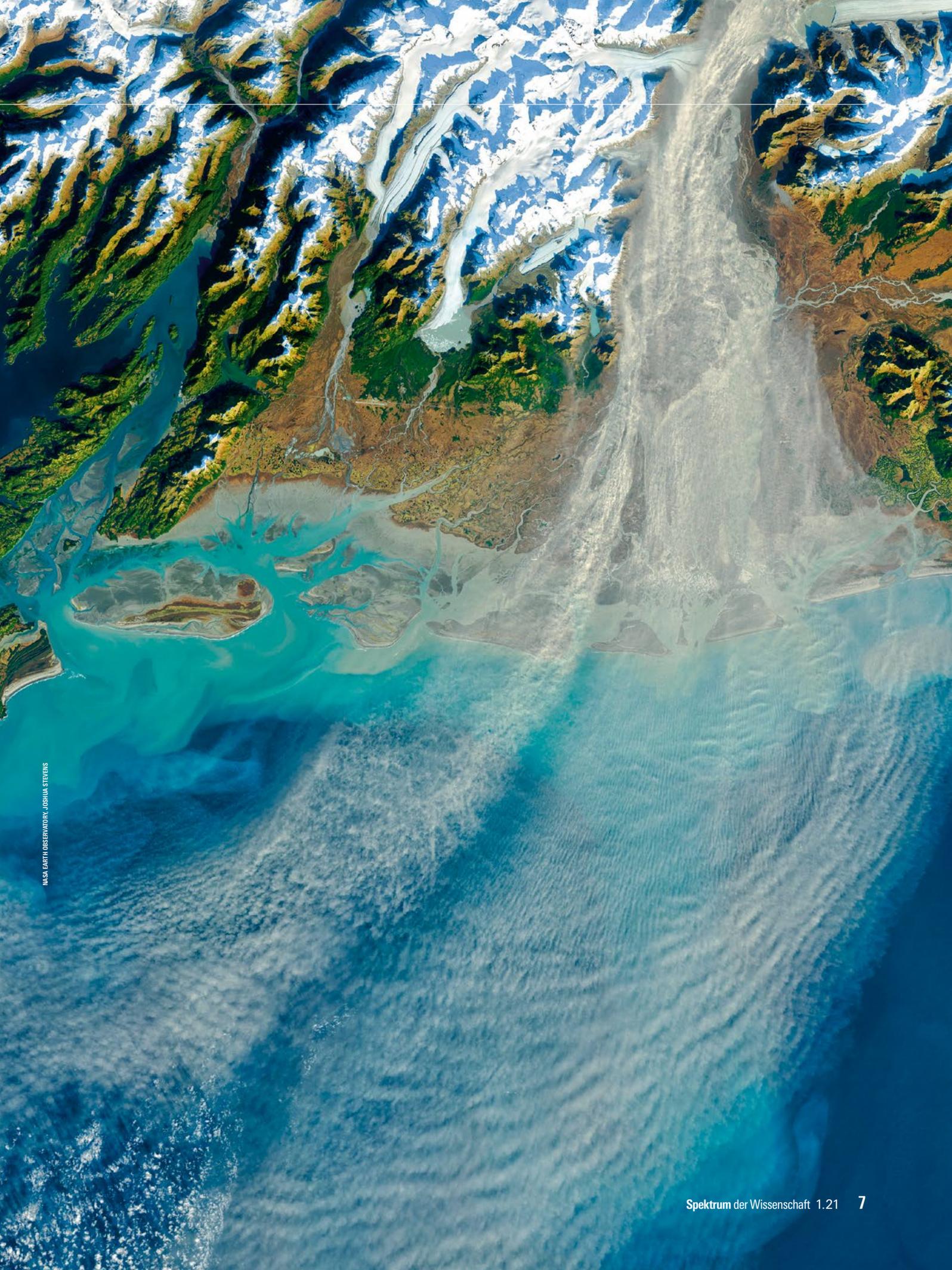
STAUBSTURM IN ALASKA

▶ Nicht nur in der Sahara peitschen Winde feinkörniges Material durch die Lüfte. Auch in Alaska gibt es Staubstürme, wie diese Aufnahme des NASA-Satelliten Landsat-8 zeigt. Auf ihr ist die Flussmündung des Copper River im Südosten des US-Bundesstaats zu sehen, über die braune Wolken hinwegziehen.

Das Material stammt von weiter flussaufwärts, wo Gletscher im Lauf der Zeit Steine zu Silt zermahlen. Wasser transportiert das Material bis an die Flussbänke des Deltas, wo es trocknen kann. Normalerweise bedecken Schnee und Eis das Ufer, doch in den Herbstmonaten liegt es manchmal frei. Starke Nord-Süd-Winde können die extrem feinen Körner dann aufwirbeln und sie aufs Meer hinausblasen.

Forscher vermuten, dass die jährlich wiederkehrenden Staubstürme eine wichtige Rolle im Ökosystem der Küstenregion spielen: Sie transportieren unter anderem Eisen in den Ozean, das Algen als Nährelement benötigen.

Pressemittteilung des Earth Observatory, Oktober 2020



NASA, EARTH OBSERVATORY, JOSHUA STEVENS

SONNENSYSTEM NEUES WASSERRESERVOIR AUF DEM MOND

► Der Mond ist nur auf den ersten Blick staubtrocken: Schon 2009 entdeckte die indische Sonde Chandrayaan-1 Hinweise auf wasserhaltiges Gestein an der Oberfläche des Erdtrabanten. In dauerhaft schattigen Kratern an den Mondpolen sollte es außerdem große Mengen an Wasser-
eis geben. Das amerikanisch-deutsche Sofia-Teleskop (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) hat nun ein weiteres Wasserreservoir entdeckt: den Clavius-Krater nahe dem lunaren Südpol, in dem dauerhaft die Sonne scheint.

Die H₂O-Moleküle sind hier offenbar im Innern von so genanntem Glasgestein gefangen, das sich beim Einschlag von Mikrometeoriten gebildet hat. Solche Einschlüsse gibt es auch in Proben, die Astronauten der Apollo-Missionen zur Erde gebracht haben. Allerdings befinden sich darin deutlich kleinere Mengen Wasser, als die Messungen von Sofia nun für den Clavius-Krater nahelegen. Den Daten



MASA, MOON TREC, USIS UND IFO

Das Mondgestein im 230 Kilometer großen Clavius-Krater enthält geringe Mengen an Wasser.

zufolge besteht das dortige Mondgestein zu etwa 0,02 Prozent aus Wasser.

Das in einer umgebauten Boeing 747 installierte Teleskop fängt von der Stratosphäre aus Infrarotlicht aus dem Weltall auf. Mit seinen Instrumenten kann es – anders als die indische Sonde Chandrayaan-1 im Jahr 2009 –

Wasser eindeutig von Gesteinen unterscheiden, die lediglich OH-Verbindungen enthalten. Möglich macht das Strahlung mit einer Wellenlänge von sechs Mikrometern, die nur von vibrierenden Wassermolekülen abgegeben wird.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-020-01222-x, 2020

ERNÄHRUNG GEFÄHRDETE KLIMAZIELE

► Um nicht mehr als 1,5 Grad Celsius soll sich die Erde im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten erwärmen. Das empfiehlt das Pariser Klimaabkommen, auf das sich die Weltgemeinschaft 2015 geeinigt hat. Wie ambitioniert das ist, ruft nun eine Studie von Forschern um Michael Clark von der University of Oxford in Erinnerung: Demnach dürften allein die Treibhausgase aus der Produktion von Nahrungsmitteln dafür sorgen, dass die Menschheit die 1,5-Grad-Latte reißt.

Fast ein Drittel der globalen Emissionen gehen auf den Nahrungsmittelsektor zurück; zwischen 2012 und 2017 setzte er jährlich rund 16 Milliarden Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente frei.

Schuld sind unter anderem die Rodung von Wäldern für Acker- und Weideflächen, die Produktion und der Einsatz von Düngemitteln, die Viehhaltung sowie der Transport von Lebensmitteln.

Für ihre Studie berechneten die Forscher, wie sich diese Emissionen in den kommenden Jahrzehnten entwickeln werden. Folgt der Nahrungsmittelsektor dem Trend der jüngeren Vergangenheit, setzt er demnach bis zum Jahr 2100 insgesamt 1356 Milliarden Tonnen CO₂ frei. Damit würde die Menschheit bereits zwischen 2051 und 2063 jenes Limit überschreiten, bis zu dem das 1,5-Grad-Ziel noch Realität werden könnte. Das ebenfalls im Pariser Vertrag formulierte 2-Grad-Ziel wäre hingegen gerade noch erreichbar – aber nur, wenn alle anderen Sektoren ihren Ausstoß schnell auf null senken.

Laut Clark und seinen Kollegen ließe sich die Herstellung von Nahrung klimafreundlicher gestalten, etwa wenn alle Menschen auf eine pflanzenbasierte Ernährung umstiegen und nur wenige tierische Lebensmittel wie Milch oder Fleisch konsumierten. Auch eine effizientere Produktion und ein gezielter Einsatz von Düngemitteln und Futterzusätzen bei Nutztieren könnten einen Beitrag leisten. Mit weiteren Maßnahmen sei sogar eine fast klimaneutrale Nahrungsmittelproduktion möglich, rechnen die Forscher vor. Dazu dürften Menschen nur noch halb so viel Essen wegwerfen wie heute. Zudem müssten sie ihre Kalorienaufnahme auf das gesundheitlich empfehlenswerte Maß reduzieren und mit gentechnisch veränderten Getreidesorten höhere Erträge erzielen.

Science 10.1126/science.aba7357, 2020

PSYCHOLOGIE

DAS ERFOLGSGEHEIMNIS VON »GAME OF THRONES«

► Ein Team von Physikern, Mathematikern und Psychologen hat sich die Mühe gemacht, im Mammutwerk des Fantasy-Schriftstellers George R. R. Martin die Sozialkontakte aller bekannten Charaktere zu analysieren. Laut ihrer Statistik interagieren die 2000 Figuren im »Lied von Eis und Feuer« rund 41000-mal miteinander. Dabei bewege sich das soziale Geflecht stets im Rahmen dessen, was wir von uns selbst gewöhnt sind: Wie echte Menschen haben die Hauptfiguren der Buchsaga jeweils rund 150 persönliche Beziehungen.

Auch in anderer Hinsicht ist die Geschichte – die die Basis für die populäre TV-Serie »Game of Thrones«

bildete – überraschend realistisch. So ist Martin bekannt dafür, selbst zentrale Figuren unvorhersehbar sterben zu lassen – scheinbar nach dem Zufallsprinzip, was ziemlich unplausibel wäre. Doch bei genauer Betrachtung ist das gar nicht der Fall, berichtet das Team um Thomas Gessey-Jones von der University of Cambridge: Tatsächlich häufen sich die Todesfälle über die drei Jahre, die in den fünf bisher erschienenen Bänden verstrichen sind, zu bestimmten Zeiten. Etwa in Schlachten oder bei groß angelegten, mörderischen Intrigen, so wie man es im echten Mittelalter erwarten würde.

Martin strafft und dehnt die Handlung jedoch so, dass dies nicht so

stark auffällt. So sterben Charaktere mehr oder weniger gleichmäßig verteilt über die 343 Kapitel, und es wirkt fälschlicherweise so, als würde es sie völlig zufällig zu beliebigen Zeitpunkten dahinraffen.

Insgesamt sei es ein Erfolgsrezept der Buchserie, Realismus und Unvorhersehbarkeit auf geistig anregende Weise zu vermischen, schreiben die Forscher. Trotz der gigantischen Ausmaße der fiktiven Welt bleibe die Geschichte für den Leser stets kognitiv beherrschbar – auch weil sie Mustern folgt, die wir aus der echten Welt gewöhnt sind.

PNAS 10.1073/pnas.2006465117, 2020

ANTHROPOLOGIE

STILLZEIT DER NEANDERTALER

► Neandertalerinnen stillten ihre Säuglinge ähnlich lange wie anatomisch moderne Frauen. Das ergab eine Untersuchung von vier Milchzähnen, die zwischen 40000 und 70000 Jahren alt sind. Die Forscher um Alessia Nava von der Universität La Sapienza in Rom widersprechen damit einer verbreiteten Theorie: dass die Neandertaler ausstarben, weil sie ihre Kinder länger stillten und daher durchschnittlich weniger Nachkommen bekamen.

Archäologen haben die Milchzähne in drei verschiedenen Höhlen in Nordostitalien gefunden. Drei stammen von Neandertalern, der vierte von einem anatomisch modernen Menschen. Mit Hilfe eines Massenspektrometers ermittelten die Forscher die Strontium- und Kalziumanteile in den einzelnen Schichten des Zahnschmelzes, die sich täglich während des Wachstums eines Kindes bilden. Da Muttermilch viel Kalzium enthält, kann man aus dem Verhältnis der beiden Isotope schließen, wann die Kleinkinder abgestillt wurden. Bei den untersuchten Milchzähnen war das nach fünf bis sechs

Monaten der Fall. Noch heute bekommen Babys in vielen Gesellschaften nach etwa einem halben Jahr feste Nahrung, da ihr Gehirn zu dieser Zeit mehr Kalorien und Proteine benötigt, als die Muttermilch allein liefern kann.

Der Neandertaler unterschied sich in dieser Hinsicht offenbar nicht von *Homo sapiens*, argumentieren die Forscher. Folglich könne es nicht eine

längere Stillzeit gewesen sein, welche die Gemeinschaften jener Menschenart vor 40000 Jahren immer weiter schrumpfen ließ. Stattdessen habe es wohl andere Gründe für den schrittweisen Niedergang der Neandertaler gegeben: etwa eine höhere Kindersterblichkeit oder eine insgesamt kürzere Lebensspanne.

PNAS 10.1073/pnas.2011765117, 2020

Aus den Milchzähnen von Neandertalern können Forscher rekonstruieren, wann Säuglinge dieser Menschenart abgestillt wurden. Offenbar durften sie ähnlich lange an die Brust wie heutige Babys.



BIOCHEMIE STOFFWECHSELSCHALTER GEGEN PICKEL

► Akne ist die weltweit häufigste Hautkrankheit. Sie tritt vor allem in der Jugend auf und verläuft meist harmlos. Auf der Haut der Betroffenen bilden sich Pickel oder Mitesser, weil die Talgdrüsen Hautsekret nicht mehr ableiten, daraufhin verstopfen und sich schließlich entzünden. Die stärkere Talg- und die oft damit einhergehende Hornproduktion hat unterschiedliche Ursachen und wird daher, wenn nötig, auch unterschiedlich behandelt.

Doch nun stießen Forscher um Fiona Watt vom King's College London bei den zellulären Prozessen, die Akne auslösen, auf eine interessante Gemeinsamkeit: Ein regulatorisches Protein namens GATA6 (GATA-binding protein 6) wird bei den Betroffenen in

der Haut seltener als normal produziert. Ein Vergleich der Hautproben von neun Aknepatienten und fünf Gesunden ergab, dass das Protein bei ganz verschiedenen Schweregraden und Formen der Akne in jeweils auffällig geringen Mengen entsteht.

In Versuchen mit Zellkulturen untersuchten die Wissenschaftler die Aufgabe von GATA6 daraufhin im Detail. Das Regulatorprotein steuert demnach gleich mehrere Stoffwechselprozesse in den Zellen von Haarbalg und Talgdrüse: Unter anderem bremst es die Ausbildung und Reifung von Keratinozyten – jenen Zellen, die bei Akne die Verhornung fördern können. Zudem schaltet sich das Protein in einen zellulären Signalweg ein, der die

Ausbildung von Mitessern verringert. Außerdem produzieren Zellen vermehrt GATA6, wenn man sie mit Retinoiden wie Vitamin-A-Säure behandelt, wie sie in manchen Aknecremes enthalten sind.

Diese Wirkstoffe gelten als etabliertes Mittel gegen die Hautunreinheiten. Man wusste bereits, dass sie im Zellkern der Hautzellen die Expression von Genen verändern, aber es war bislang unbekannt, welche genau davon betroffen sind. Neue Aknemedikamente könnten nach Ansicht der Forscher nun direkt auf GATA6 zielen und so den Hautveränderungen entgegenwirken.

Nature Communications 10.1038/s41467-020-18784-z, 2020

MATERIALWISSENSCHAFT SUPERSTABILER KÄFER

► Der in Nordamerika beheimatete Teufliche Eisenplattenkäfer (*Phloeodes diabolicus*) ist unter Insektenkundlern berüchtigt: Anders als andere Kerbtiere kann man die 2,5 Zentimeter großen Tiere nach dem Einsammeln nicht einfach auf eine Nadel spießen und im Schaukasten ausstellen. Denn ihre extrem harten Flügeldecken bestehen aus verwobenen und dicht geschichteten Chitinfasern.

Doch auch großflächigem Druck können die Teufelskäfer sehr gut standhalten, was sich allein mit den Materialeigenschaften ihres Panzers nicht erklären lässt. Ein Team um David Kisailus von der University of California in Riverside hat das Rätsel jetzt mit CT- und Mikroskopaufnahmen gelöst: Das Exoskelett der Käfer besteht aus verschiedenen Segmenten, die an mehreren Stellen wie Puzzleteile ineinander verhakt sind. Die Verbindungen zwischen den verhärteten Flügeldecken und dem Bauchbereich sind dabei jeweils so gestaltet, dass sie sich unter Druck von oben optimal gegeneinander

verschieben und die Belastung über die Oberfläche verteilen.

Erst bei einer Kraft von 149 Newton reißen die Verknüpfungen. Zum Vergleich: Ein Mensch kann zwischen Daumen und Zeigefinger lediglich maximal 40 Newton aufbringen. Im natürlichen Lebensraum der Käfer ist die Widerstandsfähigkeit offenbar ein großer Vorteil. Die flugunfähigen Tiere verstecken sich gerne in Baumrinden oder unter Steinen. Einmal entdeckt, müssen sie nicht vor den Feinden fliehen, sondern können sich tot stellen und Schläge und Bisse folgenlos über sich ergehen lassen.

Der Teufliche Eisenplattenkäfer (rechts) verdankt seinen stabilen Panzer verhaktene Flügeldecken, wie ein Querschnitt seines Panzers zeigt (unten).

Das Konstruktionsprinzip ihrer Panzer könnte auch für Ingenieure interessant sein, die eine Alternative zum herkömmlichen Zusammenstecken von Bauteilen suchen, meint die Gruppe um Kisailus: Ein 3-D-Nachbau der per Puzzleprinzip verhakten Segmente erwies sich in Tests als zuverlässiger als vergleichbare Verbindungen aus dem Flugzeugbau.

Nature 10.1038/s41586-020-2813-8, 2020



DAVID KISAILUS, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, IRVINE



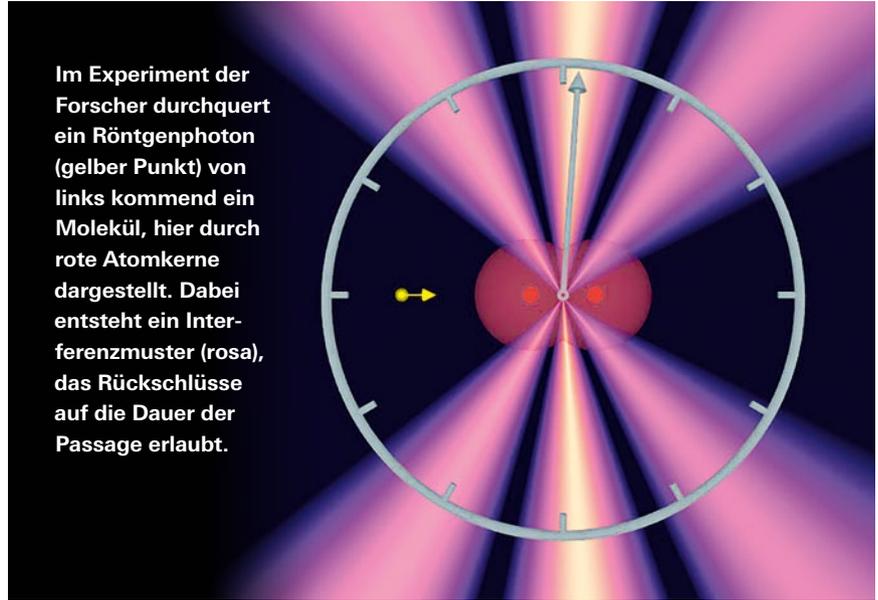
DAVID KISAILUS, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, IRVINE

PHYSIK DIE KÜRZESTE ZEITSPANNE

► Gerade einmal 247 Zeptosekunden benötigt ein Lichtteilchen, um ein Molekül aus zwei Wasserstoffatomen zu durchqueren. Das haben Wissenschaftler um Reinhard Dörner von der Universität Frankfurt ermittelt – und damit nach eigenen Angaben einen Rekord erreicht: Noch nie wurde eine kürzere Zeitspanne vermessen. Eine Zeptosekunde ist der billionste Teil einer milliardstel Sekunde. Sie beträgt anders ausgedrückt 10^{-21} Sekunden.

Die Forscher beschossen das Wasserstoffmolekül (H_2) mit einem Lichtteilchen hoher Energie, einem Röntgenphoton. Auf seinem Weg löste es zuerst das eine, dann das andere Elektron aus dem Molekül heraus. Weil die Elektronen sich sowohl wie ein Teilchen als auch wie eine Welle verhalten, erzeugte jeder der beiden »Treffer« eine eigene Welle. Diese überlagerten sich und produzierten ein Interferenzmuster, das das Team mit Hilfe eines empfindlichen und ultraschnellen Messgeräts abbildete.

Im Experiment der Forscher durchquert ein Röntgenphoton (gelber Punkt) von links kommend ein Molekül, hier durch rote Atomkerne dargestellt. Dabei entsteht ein Interferenzmuster (rosa), das Rückschlüsse auf die Dauer der Passage erlaubt.



SVEN GRUNDWANI, GOETHE-UNIVERSITÄT FRANKFURT

Die Zeit zwischen der Entstehung der beiden Elektronenwellen schlug sich dabei in einer Verzerrung des Musters nieder. Und diese wiederum erlaubte es den Physikern, auf den genauen Ablauf der Ereignisse rückzuschließen: Zwischen den beiden Treffern vergingen demnach 247 Zeptosekunden. Aus Sicht der Forscher zeigt das Experiment, dass selbst in

einem winzigen Molekül die Elektronenhülle nicht überall gleichzeitig auf eintreffendes Licht reagieren kann. Stattdessen breitet sich die Information nur mit Lichtgeschwindigkeit aus, was dann die charakteristische Veränderung im Interferenzmuster hervorruft.

Science 10.1126/science.abb9318, 2020

ASTRONOMIE MILLIONEN LEBENSFREUNDLICHE PLANETEN

► In der Milchstraße könnte es hunderte Millionen erdähnliche Exoplaneten geben. Das ist das Fazit der Kepler-Mission, die zwischen 2009 und 2018 gezielt nach Planeten im Orbit anderer Sterne suchte. Das berühmte Weltraumteleskop startete dazu jahrelang auf gut 150 000 Sterne in einem kleinen Himmelsausschnitt im Sternbild Schwan und hielt nach winzigen, von Exoplaneten hervorgerufenen Verdunklungen Ausschau.

Meist entdeckte Kepler Welten, auf deren Oberfläche es entweder zu kalt oder zu warm ist. Nur ein knappes Dutzend der aufgespürten Felsplaneten treibt in der »habitablen Zone« um ihren Mutterstern, in der lauwarmer Temperaturen vorherrschen müssten –

die Voraussetzung für flüssiges Wasser und Leben, wie wir es von der Erde kennen.

Das Hauptziel der Kepler-Mission war, diese Stichprobe auf die gesamte Milchstraße mit ihren mindestens 100 Milliarden Sternen hochzurechnen. Nun liegt eine Endauswertung vor: Je nachdem, wie weit man die habitable Zone fasse, treibe um 37 bis 88 Prozent der sonnenähnlichen Sterne ein Planet, der grob mit unserer Erde vergleichbar ist. Die statistischen Unsicherheiten der Analyse sind jedoch beträchtlich: So ist ebenfalls eine Häufigkeit von nur sieben Prozent mit den Daten kompatibel. In diesem Fall käme man allerdings immer noch auf mehr als 100 Millionen potenziell lebensfreundlicher Felskugeln im Orbit

von Sonnen der Spektralklassen G und K, schreiben die Wissenschaftler um Steve Bryson vom NASA Ames Research Center.

Eigentlich sollte Kepler die Zahl der habitablen Planeten pro Stern deutlich genauer eingrenzen, doch die Forscher hatten in mehrfacher Hinsicht Pech: Zum einen waren die Sterne im Blickfeld des Teleskops wesentlich unruhiger als gedacht, was es erschwerte, von Planeten ausgelöste Verdunklungen zu identifizieren. Zum anderen gingen binnen der ersten vier Missionsjahre zwei der Steuerräder des Teleskops kaputt, wodurch Kepler die von seinen Planern auserkorene Himmelsregion nicht mehr dauerhaft im Blick behalten konnte.

ArXiv 2010.14812, 2020



ASTRONOMIE BESUCHER VON DEN STERNEN

In den letzten Jahren sind zwei ungewöhnliche Objekte im Vorbeiflug an der Sonne aufgefallen: Sie stammten aus anderen Sternsystemen! Die beiden ersten bekannten interstellaren Boten könnten kaum unterschiedlicher sein.

2017 haben Forscher den ersten interstellaren Eindringling 1I/Oumuamua entdeckt. Die Illustration zeigt nur eine von vielen Hypothesen zu seinem ungewöhnlichen Aussehen.



Am späten Abend des 24. Oktober 2017 erhielt einer von uns (Jewitt) eine E-Mail mit einer geradezu elektrisierenden Nachricht: Davide Farnocchia vom Jet Propulsion Laboratory der NASA beschrieb ein neues Objekt mit einer ganz außergewöhnlichen Flugbahn. Sechs Tage zuvor hatte der Astronom Robert Weryk von der University of Hawaii den Himmelskörper entdeckt. »Wir brauchen noch mehr Daten«, schrieb Farnocchia, »aber die Bahn scheint hyperbolisch zu sein«. Das heißt, das ursprünglich als P10Ee5V bezeichnete kosmische Geschoss bewegte sich derart schnell, dass die Anziehungskraft der Sonne es nicht auf einer elliptischen Umlaufbahn halten konnte. Stattdessen würde es durch das Sonnensystem hindurchfliegen – und niemals zurückkehren. Innerhalb weniger Stunden schrieb Jewitt seiner Kollegin Jane Luu, die Kontakt zum Team des Nordic Optical Telescope in Spanien hatte. Es sollte bei den Beobachtungen des seltsamen Besuchers helfen. Gleichzeitig richteten sich viele weitere Observatorien auf der ganzen Welt in Richtung des kleinen Flecks am Himmel. Das war der Beginn einer neuen Ära in der Astronomie.

Zunächst wurde das Objekt in C/2017 U1 umbenannt (das C steht für Komet), dann in A/2017 U1 (für Asteroid) und schließlich in 1I/Oumuamua. Es erwies sich als der erste je im Sonnensystem beobachtete Himmelskörper, der bei einem anderen Stern entstanden ist. Darauf sollen die Zahl 1 und der große Buchstabe I in seiner offiziellen Bezeichnung hinweisen, und auch der hawaiianische Name »Oumuamua« (so viel wie »erster Bote«) spielt darauf an. Der Vorschlag dazu kam von Weryk und seinen Kollegen, die das Pan-STARRS-Teleskop auf der Insel Maui für die



David Jewitt von der University of California in Los Angeles untersucht die Kleinkörper des Sonnensystems. **Amaya Moro-Martín** beschäftigt sich am Space Telescope Science Institute in Baltimore mit jungen Planetensystemen.

» [spektrum.de/artikel/1795016](https://www.spektrum.de/artikel/1795016)

Entdeckung benutzt hatten. Anfangs erregte das ungewöhnliche Tempo des Objekts die Aufmerksamkeit der Beobachter. Wenn man die beschleunigende Wirkung der Sonne herausrechnet, hatte 'Oumuamua einen Geschwindigkeitsüberschuss von 26 Kilometern pro Sekunde. Keine Wechselwirkung unter Körpern des Sonnensystems würde einen solchen Rückstoß erzeugen, und das Gravitationsfeld der Sonne kann etwas, das sich so schnell bewegt, nicht einfangen. 'Oumuamua muss also von außerhalb einge-drungen sein.

Welche Reise mag der Himmelskörper hinter sich haben? Möglicherweise ist er hunderte Millionen Jahre lang quer durch die Galaxis geflogen. Laut den Beobachtungen könnte er aus der Richtung gekommen sein, in der sich heute der helle Stern Wega im Sternbild der Leier befindet. Als 'Oumuamua vor etwa 300 000 Jahren in der Region war, befand sich Wega allerdings noch nicht dort.

Obwohl Astronomen seit Langem davon überzeugt sind, dass interstellare Körper gelegentlich das Sonnensystem durchqueren, war es eine große Überraschung, tatsächlich einen zu finden. Erst im Jahr zuvor kamen Toni Engelhardt von der University of Hawaii und sein Team in einer umfangreichen Analyse zu dem Schluss, es sei so gut wie aussichtslos, einen solchen Eindringling zu identifizieren. Sie wären einfach zu klein und leuchtschwach.

Doch bei 'Oumuamua war praktisch alles anders als erwartet. Sollte dies ein typischer Bewohner des Weltalls sein, hätten wir noch eine Menge zu lernen.

Beobachtungen mit dem Nordic Optical Telescope und weiteren Instrumenten zeigten bald: 'Oumuamua fehlten die charakteristischen Kennzeichen eines Kometen, ein Schweif und eine umgebende Koma aus Staub und sublimiertem Eis. Das Wasser geht dabei im Sonnenlicht direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über und reißt Oberflächenmaterial mit in die Höhe. Vielmehr wirkte 'Oumuamua, abgesehen von seiner einzigartigen Umlaufbahn, wie ein Asteroid aus Gestein. Da die Durchschnittstemperatur im interstellaren Raum allerdings nur wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt liegt, war die Abwesenheit von Eis völlig überraschend. Schließlich ist Wasser

nach Wasserstoff das häufigste Molekül im Universum. Hinzu kommt eine seltsame Form.

Astronomen verwenden die Helligkeit eines Asteroiden als Maß für seine Größe, weil ausgedehntere Objekte tendenziell mehr Sonnenlicht zur Erde reflektieren. Die durchschnittliche Helligkeit von 'Oumuamua ließ auf einen vergleichsweise geringen Durchmesser von rund 100 Metern schließen. Im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter, in dem sich die meisten Gesteinsbrocken unseres Sonnensystems befinden, hätten wir ihn mit Teleskopen nie gesehen. Aber wir hatten Glück: Er flog in lediglich etwa 60 Millionen Kilometer Abstand vorbei, was 40 Prozent der durchschnittlichen Entfernung zwischen Sonne und Erde entspricht.

Seltsame Reflexionen einer außerordentlichen Form: riesige Gesteinsnadel – oder gar Raumschiff?

Die meisten Asteroiden sind unregelmäßig geformt und erinnern ein wenig an im Weltraum rotierende Kartoffeln. Darum variiert ihre Helligkeit zyklisch, während sie der Erde verschiedene Seiten ihrer klumpigen Oberfläche präsentieren. Die Veränderungen im Lauf der Rotationsperiode erzeugen eine »Lichtkurve« in den Beobachtungsdaten. Daraus lassen sich die Proportionen des Asteroiden schätzen. Im Dezember 2017 veröffentlichten Wissenschaftler die Lichtkurve von 'Oumuamua. Mit etwa acht Stunden war seine Periode im Vergleich zu den Asteroiden des Sonnensystems nicht ungewöhnlich. Doch während bei diesen die Helligkeit im Verlauf einer Drehung meist nur um 10 bis 20 Prozent ab- und zunimmt, schwankte die von 'Oumuamua reflektierte Lichtmenge um einen beispiellosen Faktor zehn! Das deutet auf eine außergewöhnlich lang gestreckte Form hin, die manchmal eine ausgedehnte und helle Oberfläche und manchmal nur eine schmale Spitze von sich zeigt.

Die Ähnlichkeit des Objekts in Größe und Proportionen zu einer Rakete war frappierend – zum Beispiel der Saturn V, die etwa 110 mal 10 Meter misst. Tatsächlich umkreisen ausran-gierte Raketenstufen die Sonne und werden gelegentlich von Astronomen wiederentdeckt, die den Himmel eigentlich nach Asteroiden und Kometen absuchen. Das war wohl bei »2000 SG344« der Fall, vermutlich ein Relikt des Apollo-Programms. Aber die Bahn von 'Oumuamua war zu extrem für eine Rakete aus den Anfängen des Raumfahrtzeitalters. Stammte das Geschoss gar von einer anderen Zivilisation? So unglaublich es klingt, konnten die Wissenschaftler das auf Basis der verfügbaren Daten nicht ganz ausschließen.

Hinzu kam eine weitere Überraschung: Im Juni 2018 entdeckten Astronomen um Marco Micheli von der Europäischen Weltraumorganisation im Rahmen genauerer Messungen der Bahn von 'Oumuamua eine schwache Einwirkung auf den Körper zusätzlich zur Schwerkraft der Sonne und der Planeten. So genannte nichtgravitative Kräfte sind bei Kometen nichts Ungewöhnliches. Sie entstehen durch asymmetrischen Antrieb durch Eis, das von der beleuchteten Seite des Kometenkerns sublimiert. 'Oumuamua sah allerdings nicht aus wie ein Komet und zeigte keine Anzeichen für einen Masseverlust, der die Kraft hätte erklären können.

War es dennoch möglich, dass 'Oumuamua schwer zu detektierendes Gas ausgestoßen hat und sonst nichts? Das

AUF EINEN BLICK KOSMISCHE DURCHREISE

- 1** 2017 haben Astronomen zum ersten Mal einen kleinen Himmelskörper aufgespürt, dessen Weg durchs Sonnensystem hindurchführte – ein interstellares Objekt.
- 2** Wegen seiner völlig unerwarteten Form und Beschaffenheit irritierte der Brocken die Experten. 2019 flog ein zweiter an der Sonne vorbei. Er entsprach eher einem typischen Kometen.
- 3** In der Zukunft dürften mehr solcher Eindringlinge beobachtet werden. Sie könnten viel über ferne Regionen der Galaxis verraten.

2I/Borisov war 2019 der zweite bekannte Besucher von einem anderen Stern. Wie in dieser Illustration gezeigt, wies er typische Eigenschaften eines Kometen auf, etwa einen Schweif, der entstand, als Eis im Sonnenlicht gasförmig wurde.



würde ihn einzigartig machen, denn Astronomen kennen kein anderes kosmisches Objekt, das Gas, aber kein weiteres Material ins All abgibt. Micheli vermutete, 'Oumuamua könne sehr große Staubteilchen verlieren, die für unsere Teleskope unsichtbar sind. Alternativ schlugen Shmuel Bialy und Avi Loeb vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics im November 2018 das Sonnenlicht selbst als mögliche Ursache vor. Photonen üben einen schwachen Druck auf jedes Objekt aus, das ihnen in die Quere kommt. Um jedoch einen messbaren Strahlungsdruck zu erfahren, müsste 'Oumuamua entweder außerordentlich dünn sein (vergleichbar mit einer metallbeschichteten Folie, wie man sie von Rettungsdecken kennt) oder von sehr geringer Dichte. Bialy und Loeb legten darum nahe, bei dem Objekt könne es sich um ein so genanntes Sonnensegel handeln, das mit Hilfe von Sternenlicht durch den Weltraum kreuzt – und dann von einer anderen Zivilisation stamme.

So faszinierend die Idee sein mag, die meisten Astronomen bevorzugen eine natürliche Ursache. Im Februar 2019 berechnete eine von uns (Moro-Martín): 'Oumuamua müsste, um vom Sonnenlicht angetrieben zu werden, 100-mal weniger dicht als Luft sein. Als solches »fraktales Aggregat« könnte eine extrem locker zusammenhaltende Ansammlung von Eis und Staub in den äußeren Teilen der protoplanetaren Scheibe eines anderen Sterns gewachsen sein. Unter irdischen Bedingungen kommt so etwas nicht vor, doch in der Leere des interstellaren Raums würde das Aggregat überdauern.

Wenn man bedenkt, wie merkwürdig 'Oumuamua ist, ist das Unglaublichste vielleicht, wie häufig solche Objekte sein sollten. Schließlich wurde dieser nach kosmischen

Maßstäben winzige Himmelskörper nur entdeckt, weil er dicht an der Erde vorbeiflog. Zudem können Menschen so kleine Körper lediglich seit Kurzem sehen – das Pan-STARRS-Teleskopsystem ist seit 2010 in Betrieb, erreichte aber erst später seine volle Leistungsfähigkeit.

Der Umstand, dass wir bloß seit wenigen Jahren und nur bis zu einem gewissen Abstand um uns herum zu so einer Beobachtung in der Lage sind, erlaubt es, die Anzahl ähnlicher interstellarer Vagabunden pro Volumeneinheit des Weltraums statistisch abzuschätzen: Sie beträgt etwa ein Objekt pro 10 Kubik-AE (eine AE, kurz für astronomische Einheit, ist der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne). In der Region der Planeten unseres Sonnensystems, einer Kugel mit dem Radius der Neptunbahn, sollte es hochgerechnet etwa 10000 ähnliche Objekte geben. Von denen war 'Oumuamua einfach nur das erste, das nahe genug war, um mit Pan-STARRS entdeckt zu werden. Falls solche Himmelskörper rund ein Jahrzehnt brauchen, um die Sphäre unserer Planeten zu durchqueren, haben wir es durchschnittlich mit drei Eindringlingen pro Tag zu tun! Wenn wir unsere Analyse auf die gesamte Milchstraße extrapolieren, dürfte es in unserer Galaxie sogar zwischen 10^{24} und 10^{25} derartige Objekte geben, eine unvorstellbar große Zahl. Außergewöhnliche Behauptungen erfordern bekanntlich außergewöhnlich starke Beweise, und darum halten die meisten Astronomen 'Oumuamua nicht für eine Sonde einer außerirdischen Zivilisation, sondern nur für ein seltsam geformtes, aber natürlicherweise entstandenes Trümmerstück von irgendwo aus der Galaxis.

Angesichts der exotischen Eigenschaften von 'Oumuamua warteten die Astronomen gespannt auf die Entde-

ckung eines zweiten interstellaren Gasts. Würde er genauso merkwürdig sein oder sähe er eher wie ein regulärer Komet oder Asteroid im Sonnensystem aus? Wir sagten damals voraus, das nächste Objekt dürfte innerhalb von ein oder zwei Jahren beobachtet werden.

Tatsächlich spürte der ukrainische Amateurastronom Gennadi Borissow zwei Jahre nach 'Oumuamuas Visite mit einem selbst gebauten Teleskop den Himmelskörper »C/2019 Q4« auf. Er wurde bald entsprechend der englischen Transkription des Entdeckernamens in 2I/Borisov umbenannt – das zweite interstellare Objekt. Seine Bahn war noch extremer als die von 'Oumuamua, aber sonst schien es sich um einen recht gewöhnlichen Kometen zu handeln. Messungen mit dem Weltraumteleskop Hubble zeigten einen größeren Kern als bei 'Oumuamua. Der Radius betrug zwischen 0,2 und 0,5 Kilometer. 2I/Borisovs Lichtkurve war im Gegensatz zu der von 'Oumuamua zudem keinen dramatischen Veränderungen unterworfen; und seine zusätzliche Bewegung auf Grund nichtgravitativer Kräfte war einfach eine Folge der Umwandlung von Eis zu Gas an der Oberfläche, genau wie bei Kometen im Sonnensystem. Im März 2019 flackerte er kurz auf und nahm ein zweigeteiltes Aussehen an, als sich ein kleines Stück des Kerns ablöste. Auch das passiert bei Kometen des Sonnensystems häufig. Mit anderen Worten entsprachen die Eigenschaften ziemlich exakt denen, die wir bei einem interstellaren Himmelskörper vermutet hätten.

Botschafter der chaotischen Entstehungsphase fremder Sternsysteme

Unsere Erwartungen basieren auf Theorien über die Planetenbildung und die zugehörigen Mechanismen, nach denen einzelne Objekte aus den Planetensystemen in die Galaxie geschleudert werden. Untersuchungen zu den Prozessen legen nahe, dass die Entwicklung der Planeten recht geordnet beginnt, aber in einem chaotischen Durcheinander endet (siehe »Spektrum« März 2017, S. 44). Die Sonne zum Beispiel entstand vor etwa 4,6 Milliarden Jahren in einer abgeflachten, rotierenden Scheibe. Sie war aus einer riesigen Molekülwolke hervorgegangen, die unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenstürzte. Die Scheibe aus Gas, Eis und Staub speiste den in ihrem Zentrum aufflammenden Stern und war dicht genug für die Kollisionen winziger Körnchen. Sie hafteten aneinander und verklumpten zu größeren, Planetesimale genannten Körpern, die schließlich das Baumaterial der Planeten wurden. Viele der Planetesimale wurden jedoch in das kalte, äußere Sonnensystem gestreut. Hier bleiben sie gewissermaßen tiefgekühlt und sind seither weitgehend unverändert.

Manchmal werden einzelne Körper allerdings zurück ins innere Planetensystem abgelenkt. Dort sublimiert die Strahlung der Sonne ihr Eis, sie entwickeln Schweife, und wir nennen sie Kometen. Andere Planetesimale werden sogar vollständig aus ihrer kosmischen Heimat hinaus- und in den Raum zwischen den Sternen geschleudert, wo sie fortan ihren Weg fortsetzen. Sobald sich ein solches Objekt in den Weiten der Milchstraße verirrt, hat es praktisch keine Chance mehr, jemals wieder zurück in das System zu gelangen, aus dem es stammt. Die Schwerkraft eines frem-

den Sterns kann es obendrein vom Kurs abbringen. Derlei chaotischen Prozessen waren 'Oumuamua und Borisov auf ihren Pfaden zu uns vermutlich zahlreich unterworfen. Das macht es unwahrscheinlich, herauszufinden, wie lange sie schon umhergetrieben sind oder woher genau sie kamen.

Borisov dürfte ein an Eis reiches Planetesimal aus den äußeren Regionen der Planeten bildenden Scheibe eines unbekanntes Sterns sein. Alles, was wir über Borisov in Erfahrung bringen konnten – nicht zuletzt die Tatsache, dass einige interstellare Objekte wirklich so aussehen wie erwartet – lässt die Seltsamkeit von 'Oumuamua umso deutlicher hervortreten. Angesichts der Unterschiede zwischen beiden gibt es jedenfalls keinen Grund zur Annahme, sie hätten einen gemeinsamen Ursprung.

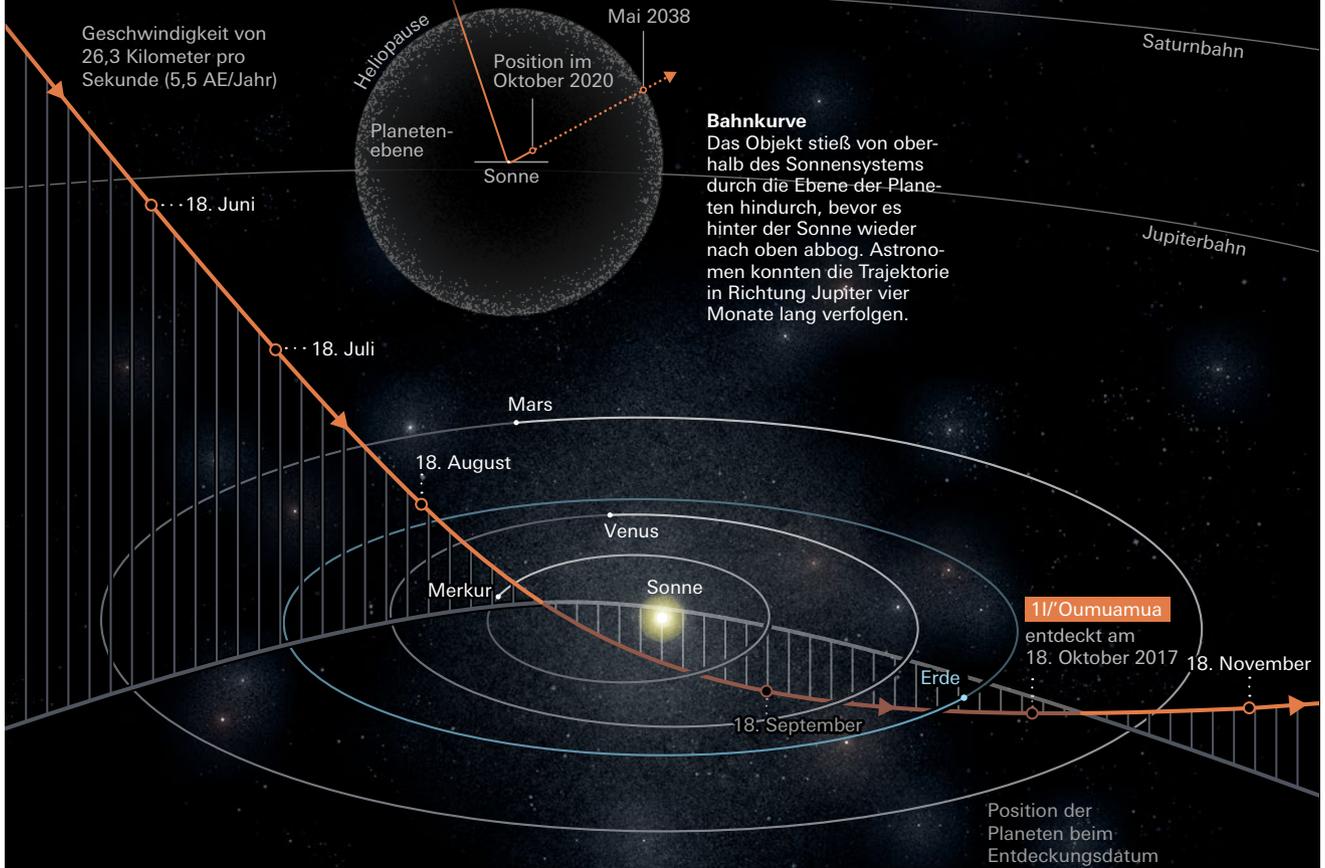
Astronomen versuchen derweil immer noch herauszufinden, was für eine Art Objekt 'Oumuamua überhaupt ist. Ein im Mai 2020 von Darryl Seligman und Gregory Laughlin von der Yale University unterbreiteter Vorschlag lautet etwa, 'Oumuamua sei ein bislang unbekannter Typ Himmelskörper aus festem molekularem Wasserstoff, sozusagen ein kosmischer Eisberg aus den kältesten Regionen einer ehemaligen Molekülwolke. Schon im Monat darauf jedoch argumentierte Avi Loeb gemeinsam mit seinem koreanischen Kollegen Thiem Hoang, molekularer Wasserstoff sei zu flüchtig, als dass ein solcher Körper in einer derartigen Wolke entstanden sein oder eine interstellare Reise überlebt haben könne. Eine weitere Möglichkeit schlugen im April 2020 Yun Zhang von den Nationalen Astronomischen Observatorien der Chinesischen Akademie der Wissenschaften und Douglas N. C. Lin von der University of California in Santa Cruz vor: 'Oumuamua könnte ein Bruchstück eines Planeten oder eines anderen Körpers sein, der zu nah an seinem Mutterstern vorbeigezogen ist. Im Sommer 2020 meinten Jane Luu, Eirik Flekkøy und Renaud Toussaint von der Universität Oslo, der Himmelskörper wäre möglicherweise aus einer Ansammlung von Staubpartikeln in der Koma eines aktiven Kometen entstanden und dann entkommen.

Abgesehen von den umstrittenen Eigenschaften von 'Oumuamua steht bereits die Entdeckung selbst im Widerspruch zu den bisherigen theoretischen Konzepten zur Bildung von Planetensystemen. Ihnen zufolge sollten interstellare Besucher nämlich eigentlich sehr selten sein. Auf der Grundlage der bekannten Anzahl von Sternen und unseres Wissens über deren Entstehung, Entwicklung und Dynamik können wir die Menge interstellarer Planetesimale schätzen, die in einem gewissen Raumvolumen zu erwarten wären. Die Berechnung ist freilich mit diversen Unsicherheiten verbunden, aber eine großzügig gewählte Obergrenze ist mindestens 10- bis 100-mal kleiner als die erwähnte Hochrechnung von 10000 solcher Objekte in der Region unserer Planeten. Kurzum: Derart viel galaktisches Gerümpel können wir nicht erklären.

Wenn wir mehr Eindringlinge entdecken und sie besser verstehen, werden sich die abgeleiteten und die geschätzten Werte ihrer Menge im Weltraum vielleicht allmählich annähern. Ebenso gut könnten wir allerdings eine wichtige Quelle interstellarer Objekte übersehen. Eventuell gibt es ja

11/Oumuamua

Der 2017 entdeckte Himmelskörper entsprach in vielerlei Hinsicht so gar nicht dem, was Astronomen von einem interstellaren Objekt erwartet hatten. Beispielsweise war 'Oumuamuas extrem langgezogene Form überraschend; ebenso schien seine Bahn noch von einer anderen Kraft als der Gravitation beeinflusst zu werden, obwohl es keine Anzeichen dafür gab, dass er Gas ausstieß.



MATTHEW TWOMBLY: BAHNKURVE NACH NASA JPL SMALL-BODY DATABASE BROWSER / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2020



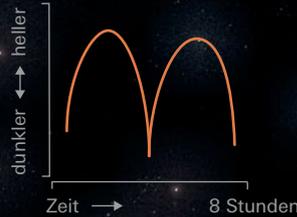
Entdeckung

Robert Weryk von der University of Hawaii hat 'Oumuamua als Erster gesehen – mit Hilfe des 1,6-Meter-Teleskops Pan-STARRS.



Aussehen

Die genauen Abmessungen sind unklar, aber vermutlich ist die längliche Form mit keinem bekannten Objekt aus dem Sonnensystem vergleichbar.



Lichtkurve

Die Form 'Oumuamuas ermittelten Astronomen anhand der Helligkeitsschwankungen im reflektierten Licht. Die extremen Unterschiede müssen von einer Oberfläche stammen, die abwechselnd mit einem großen und einem kleinen Anteil zur Sonne steht.

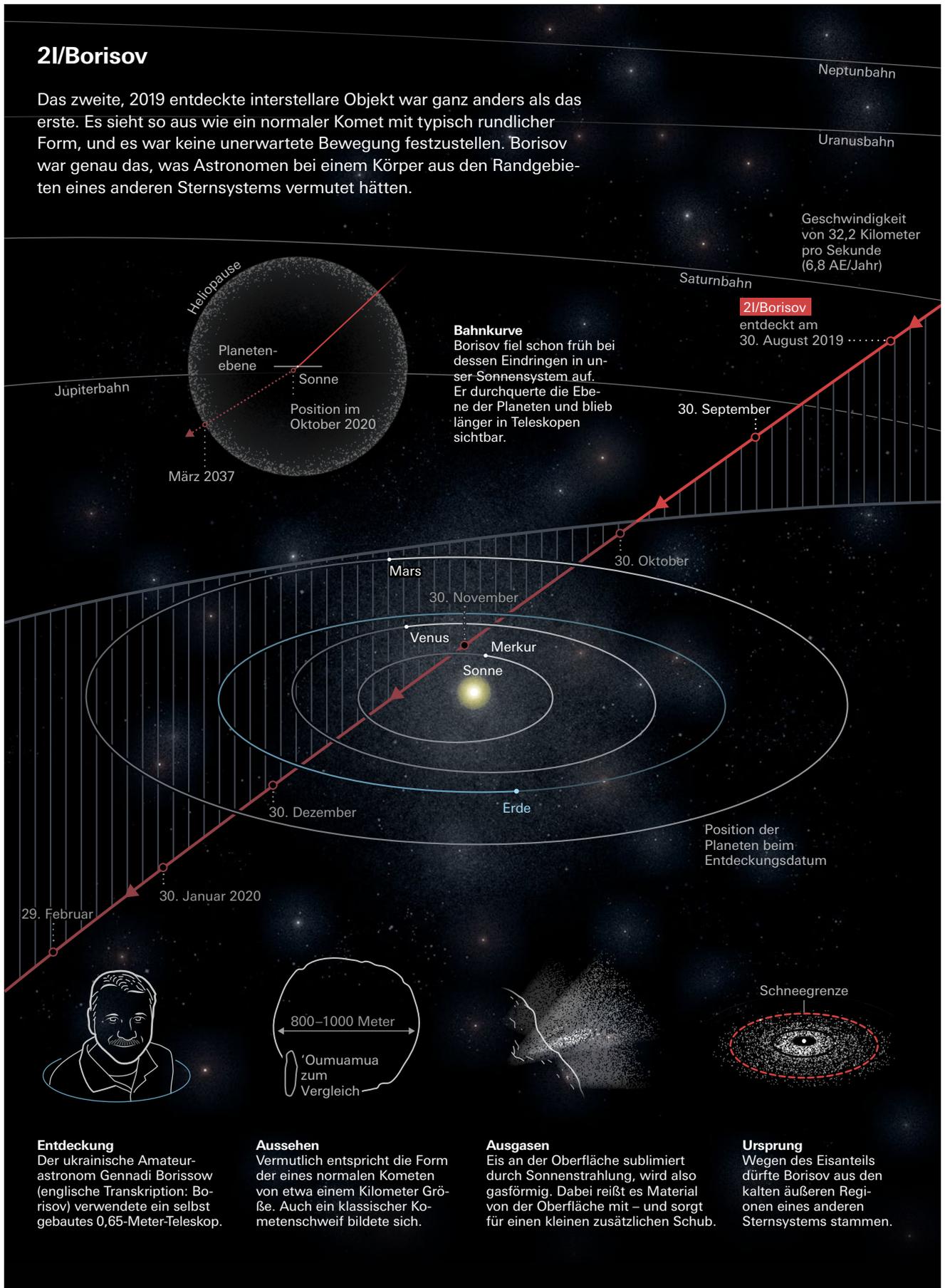


Ursprung

Aller Wahrscheinlichkeit nach wurde das Objekt während der Entstehungsphase eines weit entfernten Planetensystems aus diesem herausgeschleudert.

2I/Borisov

Das zweite, 2019 entdeckte interstellare Objekt war ganz anders als das erste. Es sieht so aus wie ein normaler Komet mit typisch rundlicher Form, und es war keine unerwartete Bewegung festzustellen. Borisov war genau das, was Astronomen bei einem Körper aus den Randgebieten eines anderen Sternsystems vermutet hätten.



Bahnkurve
Borisov fiel schon früh bei dessen Eindringen in unser Sonnensystem auf. Er durchquerte die Ebene der Planeten und blieb länger in Teleskopen sichtbar.

Geschwindigkeit von 32,2 Kilometer pro Sekunde (6,8 AE/Jahr)

2I/Borisov
entdeckt am 30. August 2019

30. September

30. Oktober

30. November

30. Dezember

30. Januar 2020

29. Februar

Position der Planeten beim Entdeckungsdatum



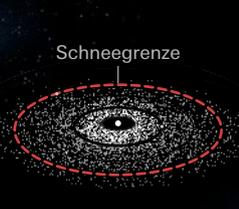
Entdeckung
Der ukrainische Amateurastronom Gennadi Borissov (englische Transkription: Borisov) verwendete ein selbstgebautes 0,65-Meter-Teleskop.



Aussehen
Vermutlich entspricht die Form der eines normalen Kometen von etwa einem Kilometer Größe. Auch ein klassischer Kometenschweif bildete sich.



Ausgasen
Eis an der Oberfläche sublimiert durch Sonnenstrahlung, wird also gasförmig. Dabei reißt es Material von der Oberfläche mit – und sorgt für einen kleinen zusätzlichen Schub.



Ursprung
Wegen des Eisanteils dürfte Borisov aus den kalten äußeren Regionen eines anderen Sternsystems stammen.

MATTHEW TWOMBLY, BAHNKURVE NACH NASA/JPL, SMALL-BODY DATABASE BROWSER / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2020

irgendeinen weiteren, bedeutenden Prozess im Weltall, der solche Himmelskörper erzeugt und auf ihre Reise schickt.

Die künftige Erforschung interstellarer Besucher könnte nicht nur helfen, die Prozesse bei der Bildung von Planetensystemen besser zu verstehen, sondern außerdem neues Licht auf eines der größten Rätsel der Wissenschaft werfen: Wie hat das Leben auf der Erde begonnen? Laut einer als Panspermie bezeichneten Hypothese kamen die Vorläufer der ersten irdischen Organismen als Passagiere auf Himmelskörpern aus anderen Systemen. Wenn diese in unser Sonnensystem eindringen, dürften sie gelegentlich auch unseren Planeten treffen. Bei einem Brocken pro zehn Kubik-AE würden Objekte wie 'Oumuamua und Borisov schätzungsweise etwa einmal alle 100 bis 200 Millionen Jahre einschlagen. Das ist tausendmal seltener als bei Asteroiden vergleichbarer Größe. Die meisten würden wahrscheinlich in der Atmosphäre zerbrechen und sich dort verstreuen; einige wenige könnten den Boden erreichen. Im Lauf der Äonen dürften so insgesamt mehrere Milliarden Tonnen interstellares Material auf die Erde gelangt sein.

Überraschenderweise hätten Lebensformen auf Asteroiden und Kometen durchaus Überlebenschancen. Die zerstörerische kosmische Strahlung dringt nur wenige Meter in festes Material ein. Verborgen im Gestein und tiefgefroren könnten Zellen die Reise durchs All überstehen. Sogar dem Einschlag auf einem Planeten halten sie vielleicht stand – das haben zumindest Experimente mit irdischen Bakterien gezeigt. Somit lässt sich die Möglichkeit einer Panspermie nicht ausschließen.

Neue Teleskope und Himmelsdurchmusterungen werden bald mehr solcher Brocken enthüllen

Für ein besseres Verständnis der interstellaren Objekte müssen wir in Zukunft weitere Vertreter aufspüren. Glücklicherweise ist es auf Grund der gegenwärtigen Entwicklungen in der Astronomie wahrscheinlich, mit immer leistungsfähigeren Detektoren bald Dutzende ähnlicher Objekte zu erkennen. Die meisten professionellen Teleskope decken nur sehr kleine Bereiche des Himmels ab, oft bloß einige Tausendstel der Fläche des Vollmonds. Aber besondere Optiken und Kamerasysteme können heute in einer einzigen Aufnahme bereits den ganzen Mond und mehr erfassen, und mit kontinuierlicher Abtastung in ein oder zwei Nächten den gesamten Himmel. Leistungsfähige Computer vergleichen Bilder von aufeinanderfolgenden Durchmusterungen miteinander und finden sich bewegende Objekte.

Wie viele von ihnen sind eisfreie und seltsam geformte Exemplare wie 'Oumuamua, und wie viele ähneln Kometen wie Borisov? Gibt es noch größere oder kleinere? Woraus bestehen sie? Sind einige wirklich so leicht gebaut, dass sie sich allein vom Druck des Sonnenlichts von ihrer Bahn abbringen lassen? Eine größere Stichprobe mit weiteren Boten von anderen Sternen dürfte einige Antworten liefern.

Derzeit befindet sich auf einem chilenischen Berggipfel das Vera C. Rubin Observatory im Bau, das vor seiner endgültigen Namensgebung als Large Synoptic Survey Telescope bezeichnet wurde. Das Teleskop sammelt Licht mit einem Hauptspiegel von 8,4 Meter Durchmesser und einem Sensor mit drei Milliarden Pixeln. So eine gigantische

Kamera wäre noch vor einem Jahrzehnt undenkbar gewesen. Jedes ihrer Bilder wird eine Fläche abdecken, die 40-mal so groß ist, wie uns der Mond erscheint. Die neue Anlage wird den Himmel systematisch vermessen und vermutlich etliche interstellare Besucher identifizieren, zusammen mit einer Unmenge von Asteroiden und Kometen aus unserem Sonnensystem.

Schließlich könnten wir, um ein bestimmtes Objekt eingehend zu untersuchen, eine Raumsonde zu ihm schicken und es aus der Nähe betrachten – oder sogar auf ihm landen. Weil sich die kosmischen Geschosse so schnell bewegen, bleibt leider nie viel Zeit. 'Oumuamua wurde

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/asteroiden-und-kometen



NASA/JPL-CALTECH/UCLA/MPSS/DIR/IDA

innerhalb weniger Monate nach seiner Entdeckung zu dunkel für eine weitere Verfolgung, selbst mit den größten Teleskopen. Borisov war nur ein Jahr lang gut sichtbar. Doch Weltraummissionen benötigen von ihrer Konzipierung über die Genehmigung und die Konstruktion bis zum Start leicht ein Jahrzehnt. Darum ist es unmöglich, eine neue Mission auf ein konkretes Objekt hin zu planen.

Eine Lösung könnte darin bestehen, eine Sonde in eine Umlaufbahn ins All zu schicken und dort gewissermaßen zu parken, bevor überhaupt bekannt ist, wohin die weitere Reise gehen soll. Das ist die Idee hinter dem Comet Interceptor der Europäischen Weltraumorganisation ESA, der 2028 starten soll. Er wird sich am 1,5 Millionen Kilometer entfernten so genannten Lagrange-Punkt L2 des Erde-Sonne-Systems in Wartestellung begeben. Hier bleibt die Raumsonde in einer stabilen Position und harret dem Vorbeiflug eines interessanten Objekts. Selbst mit diesen Vorbereitungen wird ein Besuch beim Eindringling aber nur dann möglich, wenn dessen Bahn zufällig sehr nahe an L2 entlangführt.

Leistungsfähigere Raumsonden, die einen solchen Himmelskörper eingehender untersuchen und vielleicht sogar eine Probe nehmen könnten, bräuchten einen Start mit einer schweren und teuren Rakete, die sie auf die passende hyperbolische Geschwindigkeit befördern könnte. So ein Unterfangen wäre alles andere als einfach. Auch neuartige Antriebsmethoden für Raumfahrzeuge – beispielsweise die erwähnten Sonnensegel, die von Lasern oder der Sonne beschleunigt werden – wären denkbar, bringen allerdings ganz eigene technische Schwierigkeiten mit sich. So dürfte die Aussicht darauf, ein Objekt von außerhalb unseres Sonnensystems aus der Nähe zu betrachten, weiterhin viele originelle Herangehensweisen inspirieren. Auf die eine oder andere Weise werden wir den interstellaren Besuchern schon noch ihre Geheimnisse entlocken. ◀

SUPRALEITUNG WELTREKORD BEI 15 GRAD

US-Wissenschaftlern gelingt der verlustfreie Stromtransport bei Plusgraden – ein Meilenstein. Wichtige Fragen zu dem Experiment bleiben allerdings offen.

Der Versuchsaufbau der Forscher passt auf einen geräumigen Labortisch.

Wasserstoff, Kohlenstoff und Schwefel – mehr braucht es nicht. Erst mixt man die drei Elemente in einer sandkorngroßen Senke, dann drückt man ganz fest zu. Beim 2600000-Fachen des normalen Atmosphärendrucks ordnen sich die Atome so an, dass Elektronen mühelos zwischen ihnen hindurchschlüpfen können. Fertig ist der Supraleiter, der auch bei 15 Grad Celsius noch funktioniert – ein Weltrekord.

Gelungen ist diese Messung einem Forscherteam um Ranga Dias von der University of Rochester im US-Bundesstaat New York. Sie markiert aus Sicht von Experten eine wichtige symbolische Wegmarke: »Es ist schwer, die Bedeutung überzubewerten«, sagt etwa Alexander Goncharov von der Carnegie Institution for Science, der nicht an den Experimenten beteiligt war. Auch seine Kollegin Lilia Boeri von der Universität La Sapienza in Rom ist angetan: »Das ist großartig.«

Seit mehr als 100 Jahren ist die Supraleitung eine Verheißung. Sie stellt Kabel ohne elektrischen Widerstand in Aussicht. Mit ihnen ließe sich Strom verlustfrei über weite Strecken übertragen, auch sparsamere Mikro-

chips und kleinere Kernspintomografen sind denkbar. Und da Supraleiter starke Magnetfelder abgeben, würde manche Straßenbahn wohl einem Transrapid weichen.

Die Physik fester Stoffe stellte solchen Träumen bisher große praktische Schwierigkeiten in den Weg: Die allermeisten Materialien verlieren ihren elektrischen Widerstand nur nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273 Grad Celsius. Und selbst »unkonventionelle« Hochtemperatur-Supraleiter wie die kupferhaltigen Cuprate brauchen noch flüssigen, minus 200 Grad kalten Stickstoff als Kühlmittel. Dazu sind sie sehr brüchig, was eine technische Anwendung bis heute erschwert.

Mit einem Trick werden indes auch einfachere Verbindungen bei hohen Temperaturen supraleitend: Übt man einen großen Druck auf ihre Oberfläche aus, verändert sich ihr Atomgitter. Elektronen können dadurch über zielgerichtete Gitterschwingungen kommunizieren. Sie finden sich zu »Cooper-Paaren« zusammen, die sich ohne Energieverlust durch den Festkörper bewegen – jene »konventionelle« Supraleitung, die man lange nur von ultrakalten Materialien kannte.

Ein Mainzer Team um Mikhail Eremets vom Max-Planck-Institut für Chemie hat den Forschungszweig der Hochdruck-Supraleitung vor fünf Jahren populär gemacht. Die Wissenschaftler packten damals eine winzige Probe aus Schwefel und Wasserstoff zwischen die Spitzen einer Diamantpresse. Bei 100 Gigapascal, dem Millionenfachen des Luftdrucks auf der Erde, wurde die dabei entstehende Verbindung (H_3S) zum Supraleiter, trotz einer vergleichsweise hohen Temperatur von minus 70 Grad.

In der Diamantpresse

»Das war der eigentliche Meilenstein«, sagt Lilia Boeri. »Alles, was seitdem passiert ist, ist eine logische Folge davon.« 2018 stellten die Mainzer Forscher gleich den nächsten Rekord auf: Auch die Metallverbindung Lanthan-Decahydrid (LaH_{10}) ist ein perfekter Leiter, wenn man sie extrem stark komprimiert. Und das bei vergleichsweise milden 13 Grad unter null.

Das Bemerkenswerte an den Mainzer Ergebnissen mit H_3S und LaH_{10} : Theoretiker hatten jeweils im Vorfeld berechnet, dass die Verbindungen unter hohem Druck supraleitend

werden müssten. Bei den chemisch vertrackten Hochtemperatur-Supraleitern aus der Familie der Cuprate oder den eisenbasierten Pnictiden war solch eine Prognose praktisch nie gelungen (siehe »Spektrum« Januar 2020, S. 12).

Die Diamantpressen-Versuche ließen Forscher daher vom ultimativen Ziel ihrer Disziplin träumen: einem maßgeschneiderten Material, das auch bei Zimmertemperatur noch ein Supraleiter ist. Tatsächlich haben Theoretiker mit Computerunterstützung eine ganze Reihe von Kombinationen zweier Elemente identifiziert, deren »Sprungtemperatur« in diesem Bereich liegen müsste. Mehrere um den Globus verteilte Labore sind seitdem damit beschäftigt, die Vorhersagen in die Wirklichkeit umzusetzen.

Ranga Dias und seinem Team scheint hierbei nun in zweifacher Hinsicht ein Coup gelungen zu sein. Nicht nur fällt ihr 15-Grad-Rekord ziemlich eindeutig in den unter Physikern eher großzügig definierten Bereich der Raumtemperatur. Die US-Forscher haben mit ihrer Messung auch das Reich der Drei-Elemente-Verbindungen betreten. Konkret mischten sie Methan (CH_4) in ihren mit Schwefelwasserstoff gefüllten Probenbehälter – und streuten so etwas Kohlenstoff in den Mix. Durch das Zusammendrücken in der Diamantpresse verwandelte sich das Gasgemisch dann in ein supraleitendes Metall.

»Ich habe erst selbst nicht an das Ergebnis geglaubt«, erzählt Dias. Um sicherzugehen, führte der junge Assistenzprofessor das Experiment mehr als 30-mal durch und maß dabei jeweils den elektrischen Widerstand sowie den Magnetsinn der Probe. Damit wollte er wohl auch verhindern, dass sich eine Erfahrung aus dem Jahr 2017 wiederholt: Damals hatte Dias zusammen mit seinem älteren Kollegen Isaac Silvera etwas überhastet Hinweise auf eine metallische Phase von reinem Wasserstoff veröffentlicht, die so etwas wie der ultimative Supraleiter wäre. Bis heute haben sich die Messungen von damals jedoch nicht reproduzieren lassen, was Dias und Silvera viel Kritik eingebracht hat.

Diesmal sieht die Sache einerseits besser aus: Konkurrierende Forscher konnten auf den ersten Blick keine groben Unstimmigkeiten in der Veröffentlichung entdecken. Andererseits musste es auch bei der jetzigen Veröffentlichung schnell gehen: Wegen der großen Konkurrenz auf dem Gebiet habe er beim Fachmagazin »Nature« eine Expressbegutachtung erbeten, erzählt Dias. Ende August 2020 reichte er das Manuskript ein. Danach vergingen gerade mal sechs Wochen bis zur Veröffentlichung der Arbeit – ein ungewöhnlich kurzer Zeitraum.

»Es ist schwer vorstellbar, dass in dieser Zeit ein gründliches Peer-Review stattgefunden hat«, kritisiert Graeme Ackland von der University of Edinburgh. So bliebe im Detail manche wichtige Frage offen. Bernhard Keimer, Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart, sieht das ähnlich. »Man weiß eigentlich gar nicht, um was für ein Material es sich handelt«, sagt er.

So ist bislang unklar, welche Gitterstruktur die Schwefel-, Wasserstoff-

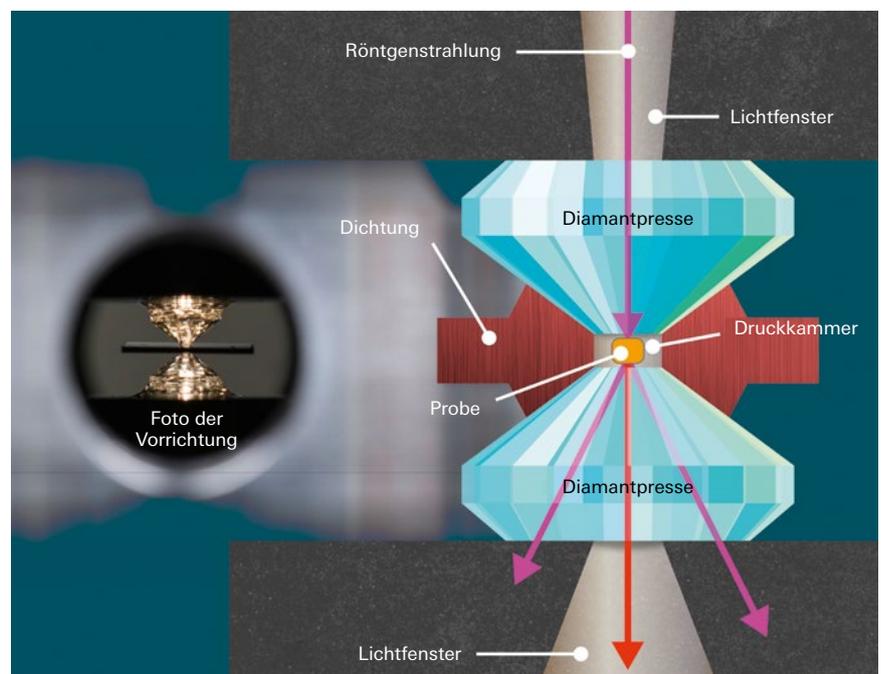
und Kohlenstoffatome zwischen den Ambossen der Diamantpresse von Dias und seinem Team bilden. Beim bisherigen Rekordhalter LaH_{10} war das anders: Hier zeigten Berechnungen, dass die Wasserstoffatome eine Art Käfig um das schwerere Fremdatom bilden. Dadurch entsteht ein symmetrisches Gitter, das dem von metallischem Wasserstoff ähnelt.

Auf der Spur der Cooper-Paare

Bei dem Komplex aus C-, S- und H-Atomen aus Dias' Experiment dürfte dagegen eher etwas anderes die Supraleitung begünstigen: Möglicherweise bilden die drei Elemente unter Druck extrem stabile kovalente Bindungen aus, die das Atomgitter sehr starr machen. Dadurch könnten sich Schwingungen leicht in dem Material ausbreiten, was Elektronen zu Cooper-Paaren zusammenführt. So geschieht es jedenfalls bei H_3S , das 2015 den Temperaturbestwert aufstellte.

Ob sich damit auch die Supraleitung des neuen Rekordhalters erklä-

Ranga Dias und sein Team packten eine winzige Kapsel zwischen die Stempel einer Diamantpresse. Beim Zusammendrücken verwandelte sich das Material in einen Supraleiter, dessen Struktur man mit Röntgenstrahlen untersuchen könnte.



Zwei Typen von Supraleitung

Bei Zimmertemperatur zappeln Atome ständig herum. Elektronen, die sich durch einen Festkörper bewegen, werden daher laufend abgebremst und verlieren an Energie. Je mehr Schwung sie einbüßen, desto größer ist der elektrische Widerstand eines Materials. Erst in der Nähe des absoluten Temperaturnullpunkts bei minus 273,15 Grad Celsius kommen Atomgitter zur Ruhe. Das elektrische Feld, das von Leitungselektronen ausgeht, verformt den Festkörper in diesem Fall leicht. So können sich Schwingungen im Gitter ausbreiten, die anderen Elektronen die Bahn bereiten. Laut der 1957 formulierten BCS-Theorie schließen sich die Ladungsträger zu »Cooper-Paaren« zusammen, die ohne elektrischen Widerstand durch den Festkörper flitzen.

Im untersten Geschoss der Temperaturskala passiert das bei vielen Elementen des Periodensystems ganz von selbst, bei Blei genauso wie bei Quecksilber. 1986 erkannten Physiker, dass die Supraleitung in manchen chemischen Verbindungen auch bei deutlich höheren Temperaturen Bestand hat. Diese Cuprate bestehen aus bis zu sechs verschiedenen Atomsorten, deren quantenphysikalische Einflüsse sich gerade so addieren, dass sie Elektronen durch das Gitter lotsen.

Die genauen Mechanismen dieser »unkonventionellen« Supraleitung sind bis heute unbekannt; Forscher gehen von einem komplexen Zusammenspiel von Ladung, Spin, Bahnbewegung und Gitterschwingungen aus. Sie suchen daher nach einfacheren Materialien, die bei hohen Temperaturen supraleitend bleiben. Seit 2015 setzen Physiker dafür verstärkt auf Diamantpressen, die wasserstoffhaltige Materialproben enorm stark zusammendrücken. Das verändert die Eigenschaften der Atomgitter – und führt in manchen Fällen zur klassischen BCS-Supraleitung, die man sonst nur aus extrem kalten Körpern kennt.

ren lässt, ist offen. Aufschluss hätten hier Messungen bringen können, bei denen Röntgenstrahlen von der Probe gestreut werden, sagt der Mainzer Konkurrent Mikhail Erements. »Es ist ein Rätsel, wieso das Team keine solchen Daten veröffentlicht hat.«

Ranga Dias rechtfertigt das damit, dass solche Messungen bei C-S-H-Verbindungen nicht aussagekräftig seien und bei Diamantpressen-Experimenten generell überschätzt würden. Er und sein Team arbeiten laut eigener Aussage an einem anderen Röntgenverfahren, das Rückschlüsse auf die atomare Struktur der Probe erlauben soll.

So oder so dürften sich nun Theoretiker an die Arbeit machen. Sie werden in den nächsten Monaten verschiedene Atomgitter-Konfigurationen durch ihre Computer jagen und schauen, welche von ihnen die Ergebnisse des Experiments aus Rochester reprodu-

zieren kann. »Das ist das nächste Rennen«, sagt Lilia Boeri.

Sie glaubt, dass in den nächsten Jahren immer weitere Rekorde in Sachen Raumtemperatur-Supraleitung folgen werden. Denn bei Hybridverbindungen aus drei Elementen stünden die Forscher bisher erst ganz am Anfang. Insgesamt bietet das Periodensystem hier 1770 Kombinationsmöglichkeiten.

Eine von ihnen, das aus Bor, Wasserstoff und Stickstoff aufgebaute NH_3BH_3 , könnte beispielsweise noch bei unglaublichen 280 Grad Celsius ein Supraleiter sein. Das ergab zumindest eine Messung, die einer anderen US-Gruppe im Sommer 2020 gelungen sein will. Da das Team die Messungen wegen des Covid-19-Lockdowns abbrechen musste, gilt das Ergebnis allerdings als vorläufig. Aus Sicht von Experten zeigt es aber das Potenzial

des Forschungsfelds. Generell hoffen die Fachleute, dass sich einige der Drei-Elemente-Verbindungen als Raumtemperatur-Supraleiter entpuppen, die auch bei geringen Drücken die besondere Eigenschaft behalten. »In der jetzigen Form, in eine Diamantpresse eingespannt, eignen sich die Materialien jedenfalls nicht für irgendeine Anwendung«, betont Keimer.

Das gesteht auch Ranga Dias ein. Er hat dennoch kürzlich ein Unternehmen gegründet, um mit seiner Entdeckung Geld zu verdienen. Einen Business-Plan gebe es zwar noch nicht, sagt er. Aber das könne sich ja noch ändern, wenn er und sein Team weiter experimentieren.

Nach dem Rekord ist vor dem Rekord

Andererseits ist die Geschichte der Supraleitung eine Geschichte der enttäuschten Erwartungen. Schon bei der Entdeckung der Cuprate Ende der 1980er Jahre war mancher Forscher davon überzeugt, das Zeitalter der schwebenden Straßenbahnen stehe bevor. Am Ende war alles viel komplizierter als gedacht – bis heute sind die Hochtemperatur-Supraleiter allenfalls ein Nischenprodukt.

Und so sind viele Forscher eher skeptisch, wenn es um einen Supraleiter geht, der auch bei Zimmertemperatur und ohne zusätzlichen äußeren Druck reibungslos funktioniert. »Ich glaube, wir werden irgendwann ein Material finden, das sich bei Normaldruck und minus 100 Grad gut einsetzen lässt«, sagt Lilia Boeri. Das wäre dann genug für manche Spezialanwendung – aber wohl zu wenig für die große Materialrevolution.

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum«.

QUELLEN

Dias, R. et al.: Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride. *Nature* 586, 2020

Drozdov, A. P. et al.: Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system. *Nature* 525, 2020

Grockowiak, A. D.: Hot hydride superconductivity above 550 K. arXiv 2006.03004, 2020

MEDIZIN

VERWICKELTE IMMUNANTWORT

Neue Untersuchungen enthüllen, wie die Körperabwehr auf Impfungen reagiert. Die Erkenntnisse könnten helfen, bessere Vakzinen zu entwickeln.

Ärzte empfehlen Schwangeren und Älteren, chronisch Kranken und medizinischem Personal in der Regel die saisonale Gripeschutzimpfung. Diese wird jedes Jahr neu angepasst, damit der Organismus aktuell grassierende Virenstämme bestmöglich bekämpfen kann. Hierfür müssen Forscher verstehen, auf welche Weise wiederholte Impfungen das Immungedächtnis des Körpers prägen. Ein Team um Jackson Turner von der Washington University School of Medicine in St. Louis hat nun detailliert untersucht, wie die menschliche Körperabwehr auf saisonale Gripeschutzimpfungen reagiert. Dabei ging es speziell um den Beitrag der so genannten B-Lymphozyten – das sind Immunzellen aus der Gruppe der weißen Blutkörperchen.

B-Zellen bilden im Körper mikroskopisch sichtbare, kugelförmige Ansammlungen namens Lymphfollikel. Diese werden während einer Infektion zu so genannten Keimzentren, in denen sich Immunzellen vermehren und ausreifen. In der Folge entstehen

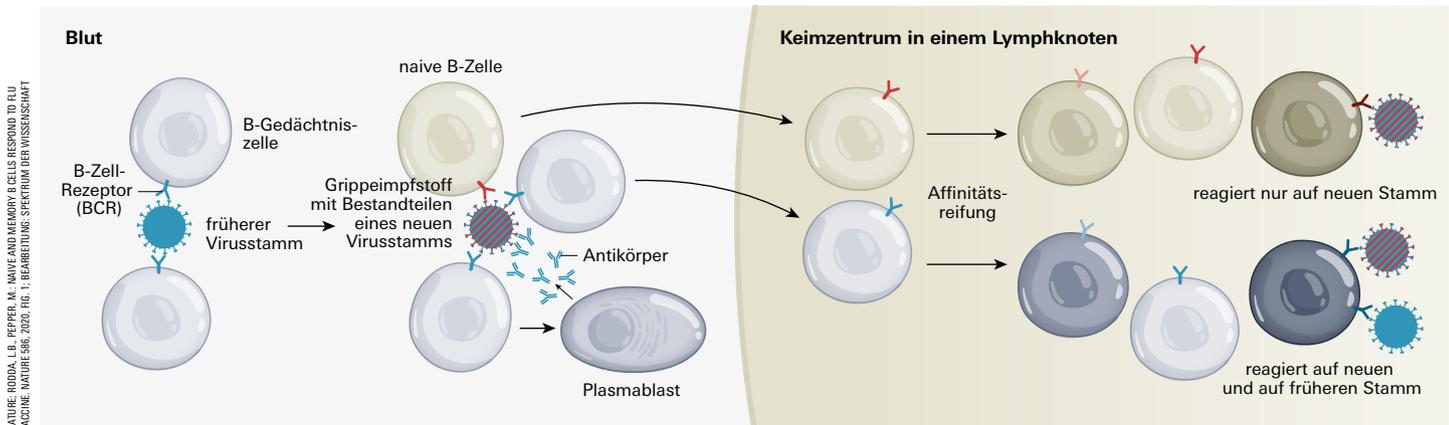
unter anderem B-Gedächtniszellen, die es dem Organismus erlauben, jederzeit rasch Antikörper gegen Krankheitserreger zu bilden, die er schon einmal erfolgreich bekämpft hat. Die Vorgänge in den Keimzentren sind immens wichtig für das Immungedächtnis.

Die von den B-Lymphozyten hergestellten Antikörper liefern den bedeutendsten Beitrag zu einer Immunität gegenüber Grippeviren. Jede B-Zelle produziert zunächst einen bestimmten B-Zell-Rezeptor (BCR), der in der Zellmembran sitzt. Mit dessen Hilfe erkennt die Zelle jeweils ein ganz spezielles Antigen, etwa einen Bestandteil eines Virusproteins. Die enorme Vielfalt der B-Lymphozyten im Körper mit ihren individuell verschiedenen BCR-Molekülen sorgt dafür, dass der Organismus auf ein äußerst breites Spektrum von Krankheitserregern reagieren kann. B-Lymphozyten, die noch keinen Kontakt mit ihrem Antigen hatten, heißen naive B-Zellen. Koppeln sie über ihren BCR erstmals an das Antigen, wandern sie zu einem Keimzentrum in den Lymphknoten

oder der Milz und vervielfältigen sich dort. Die Abkömmlinge erzeugen Antikörper, welche die gleiche Zielstruktur erkennen wie zuvor der BCR.

Im Keimzentrum teilt sich eine eingewanderte B-Zelle viele Male, wobei ihre Antikörper-Gene immer wieder Mutationen erfahren – ein Prozess, den Fachleute als »somatische Hypermutation« bezeichnen. Dabei entsteht eine Population verwandter Zellen, deren Antikörper unterschiedlich stark an das Antigen koppeln. Diese Zellen stehen damit in Konkurrenz zueinander, und nur die Gewinner mit der besten Bindung überleben, womit eine Runde der so genannten Affinitätsreifung abgeschlossen ist. Die Sieger können anschließend entweder weiterreifen oder das Keimzentrum verlassen. Tun sie Letzteres, entwickeln sie sich mitunter zu langlebigen Plasmazellen, die vom Knochenmark aus ständig antigenspezifische Antikörper ins Blut abgeben. Oder sie werden zu langlebigen B-Gedächtniszellen, die in Blut und Gewebe zirkulieren und bei erneu-

Gelangen Virusbestandteile ins Blut, reagiert die Immunabwehr darauf (links). Einige Bestandteile werden von B-Gedächtniszellen wiedererkannt, die daraufhin Antikörper ausschüttende Plasmablasten hervorbringen. Andere geraten ins Visier naiver B-Zellen. Sowohl Gedächtnis- als auch naive Zellen vermehren sich in so genannten Keimzentren (rechts) und durchlaufen dabei einen Reifeprozess, der die Erkennung ihrer jeweiligen Zielstruktur verbessert.



tem Kontakt mit dem Antigen rasch Plasmablasten hervorbringen (Vorstufen von Plasmazellen), die entsprechende Antikörper ausschütten.

Grippeimpfstoffe müssen, um wirksam zu sein, die B-Lymphozyten dazu bringen, sich an den Vorgängen in den Keimzentren zu beteiligen, und zwar so, dass langlebige B-Gedächtniszellen entstehen. Dieser Mechanismus ist beim Menschen aber noch nicht im Detail analysiert worden.

Obwohl Grippeviren rasch mutieren und jedes Jahr neue Varianten hervorbringen, haben Stämme aus verschiedenen Jahren häufig diverse Antigene gemeinsam. Studien deuten darauf hin, dass influenzaspezifische B-Gedächtniszellen, die der Organismus nach einer Auseinandersetzung mit früheren Grippeerregern gebildet hat, für schnelle Plasmablasten-Reaktionen auf eine Impfung sorgen. Es ist aber unbekannt, ob diese B-Gedächtniszellen auch maßgeblich an jenen Abwehrreaktionen mitwirken, die über die Keimzentren laufen.

In Versuchen an Mäusen haben Forscher verfolgt, was mit den B-Gedächtniszellen geschieht, wenn die Tiere wiederholt mit dem gleichen Antigen geimpft werden. Es zeigte sich: Gedächtniszellen, die schon einmal eine Affinitätsreifung im Keimzentrum durchlaufen hatten, stoßen dann vor allem eine rasche Plasmablasten-Reaktion an. Naive B-Lymphozyten hingegen, die keine solche Vorgeschichte besitzen, forcieren die Bildung neuer Keimzentren.

Die Wissenschaftler prüften in diesen Studien aber nicht, was passiert, wenn eine wiederholte Vakzinierung mit einem leicht abgewandelten Antigen erfolgt, was dem Vorgehen bei der jährlichen Gripeschutzimpfung näher käme. Derartige Untersuchungen sind technisch ziemlich anspruchsvoll, da sich Immunzellen aus Keimzentren in Lymphknoten viel schwerer gewinnen lassen als solche aus dem Blut. Dennoch ist es notwendig, sie an Menschen vorzunehmen, weil es den Effekt einer Impfung beeinflusst, mit welchen Influenzaviren man früher bereits konfrontiert war – und weil sich das nicht ohne

Weiteres in Tierversuchen klären lässt.

Turner und sein Team haben wiederholt B-Lymphozyten aus dem Blut und den Lymphknoten von acht Personen entnommen, die den Grippeimpfstoff von 2018/2019 gespritzt bekommen hatten. Die Autoren untersuchten hierfür jeweils Lymphknoten nahe der Einstichstelle und stellten fest, dass alle Probanden eine schnelle Plasmablasten-Reaktion auf den Impfstoff entwickelten und bei allen weiterhin B-Lymphozyten in den Keimzentren nachweisbar waren.

Bei fünf Personen stieg der Anteil der B-Zellen in Lymphknoten-Keimzentren nach dem Impfen an. Zudem enthielten die Keimzentren von drei dieser fünf Menschen influenzaspezifische B-Lymphozyten. Turners Methode scheint es somit zu ermöglichen, menschliche Immunreaktionen auf eine Gripeschutzimpfung zu verfolgen, die mit B-Zellen in Keimzentren zusammenhängen. Allerdings ist nicht ganz klar, woher die Unterschiede zwischen den Teilnehmern beim Nachweis influenzaspezifischer B-Lymphozyten rührten. Möglicherweise waren die Proben auf etwas ungleiche Weise entnommen worden, oder es lagen tatsächlich individuell verschiedene Immunantworten zu Grunde. Tests mit mehr Probanden sollten das klären helfen.

Auf dem Weg hin zu langlebigen Gedächtniszellen

Die Forscher um Turner untersuchten zudem, welche Typen influenzaspezifischer B-Zellen der Impfstoff dazu anregte, ein Keimzentrum zu bilden und somit potenziell den Entwicklungspfad hin zu langlebigen B-Gedächtniszellen einzuschlagen. Die BCR-Moleküle der naiven B-Lymphozyten unterscheiden sich hinreichend stark voneinander, um die Nachkommen einer B-Zelle erkennbar zu markieren, während diese sich im Keimzentrum vervielfältigt und mutiert. Bei den drei Versuchsteilnehmern mit influenzaspezifischen B-Zellen stellten Turner und sein Team fest: Die B-Lymphozyten in den Keimzentren hatten viele BCR-Moleküle mit Plasmablasten

gemein, die von B-Gedächtniszellen abstammten. Das ist ein Hinweis darauf, dass jene Gedächtniszellen – gebildet als Reaktion auf die Antigene eines anderen, früheren Grippevirenstamms – sich infolge der neuen Impfung vermehrten und einige ihrer Abkömmlinge zu Plasmablasten wurden, während andere in Keimzentren einwanderten.

Das Team wies bei den besagten drei Probanden aber auch B-Zellen in Keimzentren nach, die keine BCR-Moleküle mit Plasmablasten teilten. Um zu ermitteln, ob diese Zellen von naiven B-Lymphozyten abstammten oder von B-Gedächtniszellen, untersuchten die Autoren die BCR-Moleküle auf Mutationen. Bei naiven B-Lymphozyten sind solche Mutationen ungewöhnlich, da sie keine somatische Hypermutation in einem Keimzentrum durchlaufen haben. In der Tat wiesen jene B-Zellen weniger BCR-Mutationen auf als die mutmaßlichen Abkömmlinge der B-Gedächtniszellen. Daher stammen sie wahrscheinlich von naiven Zellen ab. Es ist aber auch denkbar, dass sie Nachkommen von Gedächtniszellen sind, die noch kein Keimzentrum durchlaufen haben, weil diese ebenfalls nur wenige BCR-Mutationen tragen und auf Antigene nicht mit einer schnellen Plasmablasten-Antwort reagieren. Tierversuche können vielleicht helfen, dieses Rätsel zu lösen.

Obwohl die von Turner und seinen Kollegen vorgestellten Daten von nur wenigen Probanden stammen, legen sie nahe: Wenn der Organismus auf eine Gripeschutzimpfung reagiert, beteiligen sich sowohl naive B-Lymphozyten als auch B-Gedächtniszellen an den Vorgängen in den Keimzentren. Künftige Untersuchungen könnten noch weiter gehen und prüfen, wie ein bestimmter Impfstoff und seine Ähnlichkeit zu aktuellen wie früheren Grippevirenstämmen den relativen Beitrag der naiven beziehungsweise der Gedächtniszellen beeinflusst.

Das Ziel der Gripeschutzimpfung lautet, ein Abwehrpotenzial hervorzu-rufen, das möglichst viele Virenstämme bekämpfen kann. Hierfür geeignete Antikörper stammen am ehesten

von influenzaspezifischen B-Gedächtniszellen, die erneut in Keimzentren einwandern und dort – über die Affinitätsreifung – Nachkommen hervorbringen, welche Antikörper mit breitem Wirkungsspektrum produzieren. Ein naiver B-Lymphozyt hingegen, der erstmals in Kontakt mit dem Antigen einer Grippeimpfung kommt, wird wahrscheinlich nur auf dieses eine Antigen ansprechen, da er noch nicht mit anderen konfrontiert wurde.

Breit wirksam oder spezialisiert?

Um festzustellen, inwieweit eine Impfung entweder eher breit oder eher spezifisch wirksame Antikörper hervorbringt, testete das Team die influenzaspezifischen B-Zellen in den Keimzentren daraufhin, wie viele verschiedene Virenstämme die von ihnen produzierten Antikörper bekämpfen konnten. Erwartungsgemäß bildeten die Zellen, die mutmaßlich von naiven B-Lymphozyten abstammten, sehr spezifische Antikörper, die jeweils lediglich einen Stamm bekämpften.

Jene Zellen hingegen, bei denen es sich wahrscheinlich um Abkömmlinge von Gedächtniszellen handelte, erzeugten kreuzreaktive Antikörper, die auf mehrere Stämme ansprachen. Offen ist, ob nur die Nachkommen von naiven, die von Gedächtniszellen oder die von beiden die Keimzentren verlassen und zu langlebigen B-Gedächtniszellen werden.

Die Studie von Turner und seinen Kollegen zeigt beispielhaft, welche Anstrengungen nötig sind, um die Komplexität der Immunantwort zu entschlüsseln. Sie ist von besonderer Bedeutung im Hinblick auf universelle Grippeimpfstoffe, die Schutz vor zahlreichen Virenstämmen bieten sollen – sowie auf Malaria-Vakzinen, da diese für wiederholte Immunisierungen genutzt werden und auch Patienten helfen sollen, die früher schon einmal Kontakt zu Erregern hatten. Solche Untersuchungen könnten zudem für Sars-CoV-2-Impfstoffe wichtig sein, falls das Virus – ähnlich wie die Grippe – in saisonalen Varianten

auftritt. Zu verstehen, wie sich sowohl naive als auch vorgeprägte Lymphozyten in langlebige Gedächtniszellen überführen lassen, dürfte sich für die Entwicklung entsprechender Vakzinen als sehr nützlich erweisen.

Lauren B. Rodda und **Marion Pepper** arbeiten als Immunologinnen an der University of Washington School of Medicine.

QUELLEN

Knight, M. et al.: Imprinting, immunodominance, and other impediments to generating broad influenza immunity. *Immunological Reviews* 296, 2020

Turner, J.S. et al.: Human germinal centres engage memory and naive B cells after influenza vaccination. *Nature* 586, 2020

Weisel, F., Shlomchik, M.: Memory B cells of mice and humans. *Annual Review of Immunology* 35, 2017

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 586, S. 34, 2020

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

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

- ▶ Ermäßigter Teilnehmerbeitrag für die **Spektrum LIVE**-Veranstaltung »Weltraumsimulator & Vortrag« am 30. Januar 2021 in Zürich
- ▶ Digitaler Redaktionsbesuch **Spektrum** der Wissenschaft am 9. Februar 2021
- ▶ Verlosungen von Büchern und **Spektrum Kompakt**
- ▶ Rabatt für den Onlinekurs: **Spektrum** Schreibwerkstatt
- ▶ Preisnachlass auf diverse Leserreisen
- ▶ Kostenlose und ermäßigte digitale Produkte und weitere Vorteile:

kostenfreier Download des Monats im Dezember: **Spektrum Kompakt** »Wikinger« reduzierte Digitalpakete »PMT 2020«, »Kinder, Kinder« und »Fakt und Fiktion« Englischkurs von Gymglish zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

SEISMOGRAFIE AUF ALLEN GIPFELN WAR RUH'

Der weit gehende Stillstand des öffentlichen Lebens durch den Corona-Lockdown im Frühjahr 2020 bot Seismologen die Gelegenheit, störendes Hintergrundrauschen auf Grund menschlicher Aktivitäten bei ihren Messungen besser zu verstehen. So können sie es künftig genauer berücksichtigen – aber auch nutzen.

► Drei Gletscher, ein weiter Blick auf Alpengipfel in vier Ländern, Möglichkeiten zum Bergsteigen und ein großes Skigebiet in unmittelbarer Nähe: Die Zugspitze ist ein attraktives Tourismusziel, das jedes Jahr hunderttausende Menschen anlockt. Doch am 16. März 2020 brach der Besucherstrom jäh ab. Im Zuge der Corona-Schutzmaßnahmen wurde der Betrieb der beiden Seilbahnen und der Zahnradbahn eingestellt. Auf der Zugspitze herrschte plötzlich ungewohnte Ruhe.

Was nicht nur für die Seilbahnbetreiber auf Deutschlands höchstem Berg eine enorme wirtschaftliche Einbuße darstellte, bot anderen unverhoffte Möglichkeiten: Weltweit verzeichneten Seismologen einen plötzlichen Abfall des durch menschliche Aktivität verursachten »seismischen Hintergrundrauschens«. Störgeräusche, welche die Aufzeichnungen ihrer hochempfindlichen Messgeräte normalerweise überlagern, waren deutlich abgeschwächt. Die Auswirkungen untersuchte nun ein 76-köpfiges internationales Forschungsteam, das

auch die Daten der Messstation auf der Zugspitze auswertete und die Ergebnisse der Studie in »Science« veröffentlichte.

Ein Tweet und die Folgen

Stefanie Donner, Seismologin an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, in deren Zuständigkeitsbereich die Station auf der Zugspitze fällt, erzählt von der ungewöhnlichen Entstehungsgeschichte der Studie: »Unser Kollege Thomas Lecocq vom Royal Observatory in Belgien ist sehr aktiv auf Twitter. Bereits im März hatte er einen Tweet mit einer Abbildung verschickt, die zeigte, dass das Hintergrundrauschen reduziert war, und als Grund den Lockdown vermutet. Am 1. April postete er dann noch einen Tweet mit der Frage, ob nicht jemand Lust hätte, dem weiter auf den Grund zu gehen. Darauf meldeten sich weit mehr als 100 Personen!«

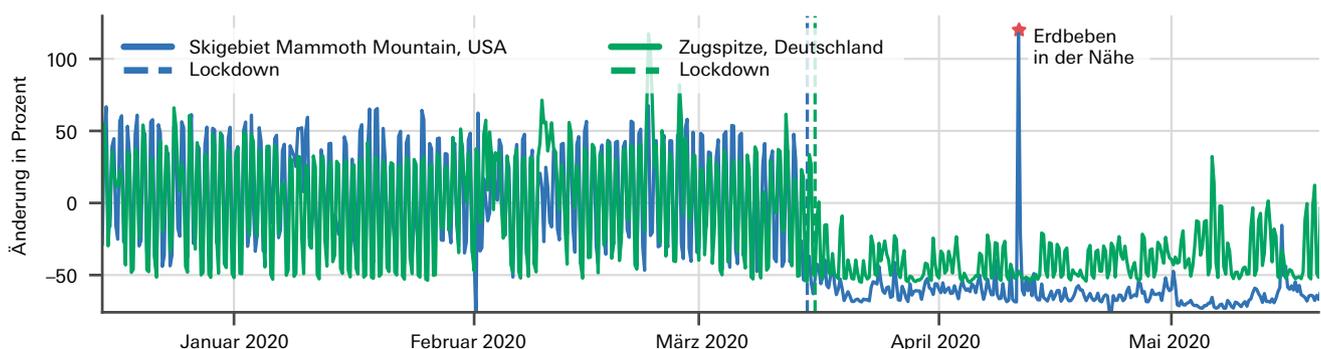
Auf einer Onlineplattform richtete Lecocq daraufhin einen Bereich ein, den alle zur Diskussion nutzen konnten – rund um den Globus und rund

um die Uhr. Von deutscher Seite haben es beispielhaft die Daten von vier Stationen in die Veröffentlichung geschafft: aus Bochum, Stuttgart, München und von der Zugspitze.

Am stärksten war der Effekt nach Aussage der Seismologin auf der Zugspitze. Dort nahm das seismische Rauschen um bis zu 70 Prozent ab (siehe Diagramm unten). Bei der Mehrzahl der deutschen Stationen fiel der Rückgang dagegen moderater aus. In Rüdersdorf bei Berlin verringerte sich der menschengemachte Teil des seismischen Hintergrundrauschens, der ungefähr im Frequenzbereich zwischen 4 und 14 Hertz liegt, sogar überhaupt nicht. Er wird dort nämlich vor allem durch ein nahe gelegenes großes Zementwerk verursacht, das den Betrieb trotz Lockdown nicht einstellen musste.

Generell waren es überwiegend die touristischen Orte, an denen Stille eintrat: außer der Zugspitze etwa die Burg Ranis in Thüringen oder – fast synchron – das über 9000 Kilometer entfernte Skigebiet Mammoth Mountain in Kalifornien.

Durch die coronabedingte Schließung von Liften sowie Zahnrad- und Seilbahnen in Skigebieten ging auf der Zugspitze ebenso wie auf dem Mommoth Mountain im mehr als 9000 Kilometer entfernten Kalifornien das seismische Hintergrundrauschen um bis zu 70 Prozent zurück.



LECOQC, T. ET AL.: GLOBAL QUIETING OF HIGH-FREQUENCY SEISMIC NOISE DUE TO COVID-19 PANDEMIC LOCKDOWN MEASURES. SCIENCE 369, 2020. FIG. 55. MIT FRIEDR. GERH. VON THOMAS LECOQC. NUTZUNG GEBENMÜGIG VON AAAS / CC-BY. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Es ist nicht das erste Mal, dass Seismologen einen solchen Effekt beobachten. »Jedes Jahr um die Weihnachtstage herum kehrt seismische Ruhe ein, ebenso an Neujahr«, berichtet Stefanie Donner. Dennoch hob sich die »Corona-Lücke« von der »Weihnachtslücke« ab, denn zum einen war der Zeitraum deutlich länger, zum anderen ließ sich das Phänomen tatsächlich global beobachten, während sich Weihnachten und Neujahr etwa im asiatischen Raum weniger stark bemerkbar machen.

Für die Seismologen war der Lockdown also ein Glücksfall – denn wo es ruhig wird, hört man die leisen Töne besser. So zeichnete laut der aktuellen Studie eine seismische Station in Mexiko ein mittelstarkes Erdbeben der Magnitude 5 in 380 Kilometer Entfernung auf. Das Signal zeigte sich klar, ohne dass Störgeräusche herausgefiltert werden mussten. Unter normalen Bedingungen wäre es wahrscheinlich unentdeckt geblieben. Dabei ist es wichtig, auch kleinere Erdbeben zu registrieren, da sie Aufschluss über das dynamische Verhalten von Bruchzonen geben können und zu verstehen helfen, wie heftigere seismische Erschütterungen entstehen.

Erkenntnisgewinn für die Zeit nach der Corona-Pandemie

Vom Rückgang des Hintergrundrauschens versprechen sich die Fachleute aber auch einen Erkenntnisgewinn für die Zeit nach der Corona-Pandemie. »Der Lockdown hat uns die Gelegenheit gegeben, den anthropogenen Anteil des Rauschens besser zu charakterisieren, um ihn später auf das normale Monitoring anzuwenden«, erklärt Stefanie Donner. »Damit haben wir nun Blaupausen, die wir künftig von verrauschten Signalen abziehen können.«

Das bekommt zunehmend Relevanz. So hilft es nicht nur beim Entdecken schwacher Erdbeben, sondern hat auch große Bedeutung für Geothermiekraftwerke. Diese sind verpflichtet, die Seismizität in ihrem Umfeld zu überwachen. Allein: Bisher war das mitunter eine müßige Übung – so etwa im Umfeld des größten ge-

planten deutschen Geothermiekraftwerks in München, das unmittelbar auf dem Stadtgebiet liegt. Ein Seismometer dort würde nur menschliche Aktivität messen. »Wir brauchen daher neue Werkzeuge, um das anthropogene Rauschen exakter zu spezifizieren. Unsere Hoffnung ist, dass wir mit dem unverhofften Datensatz aus der Zeit des Lockdowns in dieser Hinsicht weiterkommen«, erklärt Stefanie Donner.

Glücksfall für Seismologen: Im Lockdown wurden auch schwache Signale wahrnehmbar

Doch selbst wenn es nach dem Ende der Corona-Krise auf der Welt wieder lauter wird, ist das für die Arbeit der Seismologen nicht nur schlecht. Den Grund nennt Adrien Oth vom European Center for Geodynamics and Seismology in Luxemburg, der als einer der Autoren an der Studie beteiligt war: »Früher hat man das seismische Rauschen nur als Störsignal empfunden, da es ausschließlich darum ging, Erdbeben aufzuzeichnen. Alle anderen Daten wurden – unter anderem aus Mangel an Speichermöglichkeiten – schlicht verworfen. Seit gut zwei Jahrzehnten nutzt man das Rauschen aber mehr und mehr als eigenständiges Signal. Zum Beispiel lassen sich anhand von Korrelationen zwischen mehreren Stationen wertvolle Erkenntnisse über den Untergrund gewinnen.« Und wenn die Forscher jetzt besser wissen, wonach sie suchen müssen, können sie aus ihren verrauschten Aufzeichnungen

künftig auch die Signale schwächerer Erdbeben herauslesen.

Ohnehin gibt es eine Rauschquelle, die selbst der strikteste Lockdown nicht abstellen kann, und die zeigt sich jederzeit fast überall in den Seismogrammen: das Meer. Gemeint ist nicht das Geräusch der Brandung am Strand, sondern jene stetigen Druckschwankungen, die sich von den Wellen der Ozeane auf den Untergrund übertragen und – in einem tieferen Frequenzbereich – dort fortpflanzen.

Wo mehr Rauschen von Vorteil ist

Solche winzigen seismischen Vibrationen nutzt etwa Emanuel Kästle von der Freien Universität Berlin. Für ihn ist mehr Rauschen eher von Vorteil, weil es seine Messzeiten verkürzt. Allerdings interessiert er sich für einen tieferen Frequenzbereich als den von menschengemachten Erschütterungen. Die Signale dort – unter anderem vom Meeresrauschen – erlauben einen Blick ins Erdinnere bis zu 200 Kilometer hinab.

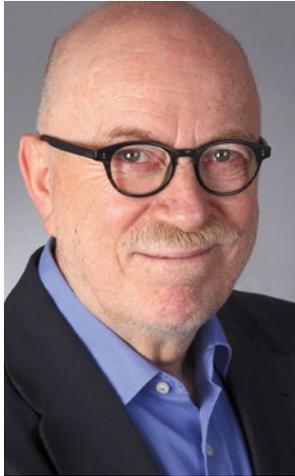
»Bei der klassischen Erdbeben-tomografie ist dieser Bereich zwischen Kruste und Mantel nicht gut aufgelöst«, erläutert Kästle den Vorteil seiner Methode. »Mit Hilfe des natürlichen Hintergrundrauschens können wir hingegen sehr gut dort hineinblicken. So wird erkennbar, dass die subduzierenden Lithosphärenplatten nicht einfach Bretter sind, die untertauchen, sondern dass die Mechanik in der tiefen Erde eine ganz andere ist und die Vorgänge weit komplexer sind, als wir uns das bisher vorgestellt haben.«

Ob Rauschen oder Stille – am Ende kommt es offensichtlich vor allem darauf an, gut hinzuhören. Dann erschließen sich Erkenntnisse, die zuvor nicht zugänglich waren – auf und unter den Gipfeln.

Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

QUELLE

Lecocq, T. et al.: Global quieting of high-frequency seismic noise due to Covid-19 pandemic lockdown measures. *Science* 369, 2020



SPRINGER'S EINWÜRFE EIN PLAN MIT PFERDEFÜSSEN

Der europäische Green Deal verspricht, die EU in den kommenden Jahrzehnten klimaneutral zu gestalten. Werden andere Weltregionen dafür die Zeche zahlen?

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

» spektrum.de/artikel/1795046

Mit beträchtlichem Pathos präsentierte Ursula von der Leyen als Präsidentin der Europäischen Kommission im Dezember 2019 den European Green Deal. Dieser Maßnahmenplan stellt der Europäischen Union die ehrgeizige Aufgabe, bis 2050 ihre Umweltbelastung durch Treibhausgase auf null zu senken.

Während nun der Streit losgeht, ob – und wenn ja, wie – das Ziel zum angepeilten Zeitpunkt erreichbar sei, machen Kritiker auf prinzipielle Schwachstellen des Deals aufmerksam. Sie erinnern an die Tatsache, dass Europa keine grüne Insel ist, sondern auf vielfältige Weise mit Nicht-EU-Ländern Handel treibt und dadurch fremde Umweltbilanzen beeinflusst – selten zu deren Vorteil.

Die EU importiert in großem Stil landwirtschaftliche Güter und beabsichtigt, die Mengen der aus dem Ausland bezogenen pflanzlichen und tierischen Güter wie Getreide, Gemüse, Obst, Fleisch und Milchprodukte in naher Zukunft weiter zu steigern. In vielen Lieferländern gelten laxere Regeln. Die Folge: Europa vermehrt jenseits seiner Grenzen die ökologischen Schäden und kann sich gleichzeitig daheim umweltfreundlicher Maßnahmen brüsten.

So betreibt die EU erfolgreiche Aufforstungsprogramme, während anderswo Wälder abgeholzt werden, um Anbauflächen für Exporte zu schaffen. Vor allem Brasilien und Indonesien roden riesige ökologisch wertvolle Waldgebiete für die Produktion von Ölsaaten, die dann hier zu Lande unter anderem als Biokraftstoff dienen.

Ein anderes Beispiel bietet der Einsatz von Pestiziden und gentechnisch veränderten Pflanzen. Beides ist in der EU restriktiv geregelt beziehungsweise verboten. Dennoch bezieht Europa große Mengen transgener Maispflanzen und Sojabohnen vom amerikanischen Kontinent. Auch wird dort der Gebrauch etwa von Glyphosat und Neonicotinoiden – Letztere werden für

das Bienensterben verantwortlich gemacht – viel lässiger gehandhabt.

Angesichts des europäischen Outsourcens von ökologischen Belastungen plädieren die Umwelforscher Richard Fuchs, Calum Brown und Mark Rounsevell vom Karlsruher Institut für Technologie dafür, den Green Deal in wichtigen Punkten zu ergänzen (*Nature* 586, S. 671–673, 2020).

Vor allem sollten europäische Standards hinsichtlich Nachhaltigkeit genauso für Importe gelten. Das könnte durch Zollkontrollen an den EU-Grenzen durchgesetzt werden, wenn diese nur noch zertifizierte Produkte passieren lassen. Das böte einen Anreiz für die Herkunftsländer, ihre Produktion entsprechend anzupassen. Zugleich müsste die EU-Ökobilanz nicht nur die innerhalb Europas erzeugten Emissionen enthalten, sondern auch die anderswohin ausgelagerten Umweltbelastungen.

Schließlich meinen die Karlsruher Forscher, Europa solle aufhören, heimisches Ackerland zu Gunsten billiger Nahrungsimporte brach liegen zu lassen: Der tendenzielle Übergang zu einer halbwegs autarken europäischen Landwirtschaft würde den schädlichen Produktionsdruck auf tropische Biotope lindern.

Natürlich stieße eine solche Strategie auf so erhebliche Widerstände, dass sie fast schon utopisch anmutet. Im Endeffekt hieße das ja, bisher in weiter Ferne gut versteckte Probleme freiwillig nach Hause zu holen. Unter anderem gewännen Fleisch und Milch einen fairen Preis; das heißt, sie würden teurer.

Es wäre gewiss politisch heikel – wenngleich ökologisch erwünscht –, auf diese Weise den Konsum tierischer Produkte zu hemmen. Doch ein fairer Green Deal, der das nachhaltige Wohlbefinden der Europäer nicht auf dem Rücken anderer Weltregionen organisiert, ist nun einmal nicht umsonst zu haben.

Neues aus unserem Shop

Alle Sonderhefte auch im PDF-Format



Denisovaner: Alles begann mit einem Fingerknöchelchen • Soziobiologie: Der Siegeszug des *Homo sapiens* • Ernährung: Die wahre Steinzeitdiät • Diversität: Der Vorteil sozialer Vielfalt • Sapiezöikum: Apokalypse oder Aufbruch? • € 12,90



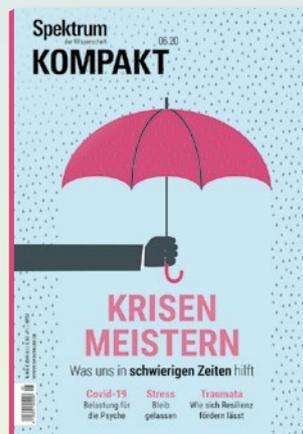
Spielend schlau: Was die Konzentration bei Kindern stärkt • Wohlgemerkt im Schlaf: Wie sich nachts die Erinnerung festigt • Warum die Tagesform unserer Intelligenz schwankt • Gehirn: Nur 10 Prozent Nutzung? • € 8,90



Bewegungen: Das Dreikörperproblem • Stabilität: Welcher Knoten hält am besten? • Tropische Geometrie: Das Skelett der Amöbe • Kurven: Rechtecke im Kreis • Informatik: Wie komplex darf es sein? • € 8,90



Die Facetten unserer Persönlichkeit • Mentale Zeitreisen: Wie wir uns die Zukunft ausmalen • Selbstbild: Worin wir uns selbst überschätzen • Hormone und psychische Gesundheit • Homeoffice: Der Arbeit Grenzen setzen • € 5,90; ab 18. 12. 2020



Covid-19: Psyche in der Krise • Wirtschaftskrise: Was uns Angst macht • Sinnerleben: Warum wir extreme Erfahrungen brauchen • Traumata: Resilienz fördern – wie geht das? • Positive Psychologie: Sei dankbar! • € 5,90



Europas erste Metropolen vor 6000 Jahren • Pest: Selbstgeißelung aus Verzweiflung • Eiszeitpioniere: Erste Siedler in Amerika? • Graf Cagliostro: Wie ein Hochstapler ganz Europa narrete • € 5,90; ab 19. 12. 2020

Hier bestellen:

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

VERHALTENSFORSCHUNG FEDERVIEH MIT KÖPFCHEN

Manche von ihnen gebrauchen Werkzeuge, andere können sich im Spiegel erkennen – Vögel sind zu beeindruckenden geistigen Leistungen in der Lage. Wie schaffen sie das trotz ihres winzigen Gehirns?

MARION WELLE RIB



Onur Güntürkün ist Professor für Biopsychologie an der Ruhr-Universität Bochum. Sein Forschungsinteresse gilt den kognitiven Prozessen bei Mensch und Tier.

» spektrum.de/artikel/1795019

Als Nächstes stand Gerti auf dem Experimentierplan. Nachdem meine Mitarbeiter und ich die Elster (*Pica pica*) in meinem Labor an der Ruhr-Universität Bochum aus ihrem Käfig geholt und ihren Kopf mit einem Tuch bedeckt hatten, befestigten wir an ihren schwarzen Federn an der Kehle einen kleinen gelben Papiersticker. Dann setzten wir sie in einen anderen Käfig mit einem großen Spiegel (siehe Foto S. 32). Wir ließen nun Gerti allein und gingen in einen benachbarten Raum, um sie über einen Monitor zu beobachten. Gerti schaute in den Spiegel und versuchte sofort, den Sticker loszuwerden, indem sie sich am Hals kratzte oder auf dem Boden rieb. Nachdem sie erfolgreich das störende Etwas beseitigt hatte, warf sie einen abschließenden Blick in den Spiegel und beruhigte sich wieder. Bei Menschenaffen gilt ein derartiges Verhalten als Beweis für Selbsterkennung. Bei einem Vogel hatte man so etwas bislang noch nie beobachtet.

An diesem Tag im Jahr 2006 waren wir alle wie elektrisiert, doch gleichzeitig drängte sich uns die naheliegende Frage auf: Was ist, wenn wir uns irrten? Könnte Gerti den Sticker nicht einfach deshalb entfernt haben, weil sie bloß etwas Störendes an ihrem Gefieder gespürt hatte? Unser Team, zu dem neben mir noch Helmut Prior und Ariane Schwarz gehörten, testete Gerti erneut. Dabei tauschten wir den gelben Sticker gegen einen schwarzen aus, der auf ihrem dunklen Federkleid kaum

Eine auf Neukaledonien beheimatete Geradschnabelkrähe fischt mit einem Stöckchen nach Larven.



sichtbar war. In einem weiteren Kontrollversuch erhielt sie den gelben Sticker, aber keinen Spiegel. In beiden Fällen machte Gerti keine Anstalten, das Papier abzustreifen. Es störte sie nur, wenn sie an ihrem Gefieder eine auffällige Farbmarkierung im Spiegel sah. Andere Elstern, die wir gleichermaßen testeten, verhielten sich ähnlich. Demzufolge scheinen diese Vögel tatsächlich ihr eigenes Spiegelbild zu erkennen.

Vom Menschen abgesehen, war die Fähigkeit zur Selbsterkennung bislang lediglich von einigen wenigen Säugetieren mit großem Gehirn wie Schimpansen, Orang-Utans, Indischen Elefanten oder Delfinen bekannt. Dass auch Elstern zu diesem erlauchten Kreis zählen, ist nur eines von vielen Beispielen für höhere kognitive Leistungen, wie man sie erst in den letzten Jahren bei Rabenvögeln und Papageien entdeckt hat. Diese Erkenntnis bringt eine seit mehr als 100 Jahren vorherrschende Theorie ins Wanken. Demnach erforderten solche Fähigkeiten eine gut entwickelte Großhirnrinde, wie sie Säugetiere haben. Ein derartiger Kortex

fehlt aber den Vögeln, weshalb sie eigentlich keine herausragenden kognitiven Leistungen zeigen sollten. In den letzten zwei Jahrzehnten haben entsprechende Untersuchungen jedoch offenbart, wie im Verlauf von hunderten Millionen von Jahren die Gehirne von Vögeln und Menschen trotz großer anatomischer und physiologischer Unterschiede ein erstaunlich ähnliches Leistungsvermögen entwickelten, was wiederum Lernen, Selbstwahrnehmung und Entscheidungsfindung auf hohem Niveau ermöglicht.

Um zu verstehen, warum Biologen lange Zeit glaubten, dass Vögeln solche hoch entwickelten Fähigkeiten fehlen, müssen wir zurück ins 19. Jahrhundert gehen. An der Frankfurter Universität widmete der Neuroanatom Ludwig Edinger (1855–1918) sein ganzes Forscherleben der Frage, wie sich das Gehirn und das Denkvermögen von Wirbeltieren während der Evolution herausgebildet haben könnten. Er war fest davon überzeugt, dass dies schrittweise geschehen sein muss – angefangen mit einfachen Formen bei Fischen über Amphibien, Reptilien und Vögel, bis sie bei



AUF EINEN BLICK SCHLAUE VÖGEL

- 1** Raben, Papageien und andere Vögel zeigen erstaunliche kognitive Fähigkeiten. Manche erkennen Kausalzusammenhänge, planen die Zukunft oder schmieden Bündnisse mit Artgenossen.
- 2** Vögel besitzen jedoch nur ein kleines und anders organisiertes Gehirn. Von daher wurde ihre Intelligenz lange unterschätzt.
- 3** Unabhängig von den Säugetieren entwickelten die Vögel leistungsfähige Hirnareale, die mit den komplexen Schaltplänen im Säugergehirn vergleichbar sind.



Die Elster Gerti sieht in ihrem Spiegelbild einen störenden Fleck an der Kehle.

den Säugetieren ihren Zenit erreichen sollten. Wie er zusätzlich entdeckte, besaßen alle Wirbeltiere von Anfang an bereits den Hirnstamm und weitere basale Komponenten des Gehirns.

Allerdings schien sich im Lauf der Evolution ein wesentlicher Bereich, das Großhirn oder Zerebrum, besonders stark verändert zu haben. Hier könnte der Schlüssel für die Explosion kognitiver Fähigkeiten liegen. Das Zerebrum lässt sich in zwei Hauptteile untergliedern: zuoberst das Pallium (lateinisch: Mantel) sowie das darunterliegende Subpallium. Das Pallium der Säugetiere besteht wiederum zum Großteil aus dem Kortex, der sich aus sechs Schichten aufbaut und höhere kognitive Leistungen ermöglicht; das Pallium enthält jedoch auch kleinere Bereiche wie die Amygdala (Mandelkern) und den Hippocampus. Im Gegensatz dazu erscheint das Subpallium wie ein homogener Klumpen von Neuronen, der erlernte Bewegungsmuster abspeichert und später wieder abrufen. Bei Vögeln sieht das Ganze völlig anders aus. Legt man Edingers anatomisches Schema zu Grunde, dann ähnelt das Vogelpallium stark dem Subpallium der Säugetiere. Edinger glaubte daher, die Vögel besäßen ein riesiges Subpallium, aber nur ein winziges Pallium, weshalb er ihnen lediglich beschränkte kognitive Fähigkeiten zuschrieb (siehe »Mehr als ein ›Spatzenhirn««, S. 34/35).

Was für ein Irrtum! Edinger war ein hoch angesehener Wissenschaftler seiner Zeit, und seine Theorie schien überzeugend zu erklären, warum wir Säuger in Sachen Kognition alle anderen Tiere übertreffen. Deshalb hatte seine falsche These mehr als ein Jahrhundert Bestand und beeinflusste maßgeblich das neurowissenschaftliche Denken bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts.

Es gab noch einen anderen Grund, warum das Gehirn von Vögeln als minderwertig betrachtet wurde. Das Vogel- und das Säugerhirn unterscheiden sich auch in der

Größe. Mit einem Gewicht von 25 Gramm besitzt der Strauß unter den Vögeln das größte Denkorgan. Das Gehirn eines Schimpansen bringt es dagegen auf rund 400 Gramm, das des Menschen auf 1300 Gramm und das des Pottwals auf stattliche 9000 Gramm. Zumindest bei Primaten korreliert die Hirngröße mit dem kognitiven Niveau. Folglich galten die Vögel sowohl wegen des fehlenden Palliums mit seiner ausgeprägten Großhirnrinde als auch wegen der geringen Hirngröße als kognitiv minderbemittelt. Aber wie konnte dann Gerti den Sticker-Spiegel-Test mit Bravour bestehen und dabei die meisten Säugetiere übertrumpfen? Entweder sind Elstern unter den Vögeln eine Ausnahme, oder es stimmt etwas nicht mit unserer jahrhundertalten Ansicht, Kognition erfordere einen stark ausgebildeten Kortex.

Die klugen Krähen von Neukaledonien

Aufschluss hierüber lieferte die am Südpazifik beheimatete Geradschnabelkrähe (*Corvus moneduloides*), auch Neukaledonienkrähe genannt. Sie ernährt sich überwiegend von Larven, die sie aus Spalten in Baumrinden herauszieht (siehe Foto S. 30/31). 1996 berichtete Gavin Hunt, damals an der Massey University in Neuseeland tätig, dass Geradschnabelkrähen zwei unterschiedliche Werkzeugtypen herstellen, mit denen sie an ihre Beute gelangen. Der Herstellungsprozess dieser Werkzeuge erschien so komplex, dass Hunt ihn mit der Produktion von Steinwerkzeugen durch den Menschen im Mittelpaläolithikum von vor 300000 bis vor 40000 Jahren verglich.

Zahlreiche Tierarten verwenden Werkzeuge. Schaut man jedoch mit Hilfe einschlägiger Tests genauer hin, offenbart sich dieses Verhalten größtenteils als angeborene programmierte Reaktionsabfolge, die nicht auf der kognitiven Beurteilung eines Problems basiert. Alexander Taylor von der

neuseeländischen University of Auckland und seine Kollegen untersuchen die mentale Basis des Werkzeuggebrauchs bei Geradschnabelkrähen. Wie ihre Experimente zeigten, können die Krähen verschiedene Probleme lösen, indem sie auf Grund kausaler Zusammenhänge vernünftig handeln. Die Vögel planen vorausschauend mittels mentaler Repräsentationen von nicht sichtbaren Objekten und ziehen auf Ursache und Wirkung beruhende Rückschlüsse.

Die Geradschnabelkrähen stoßen jedoch an ihre Grenzen, wenn es darum geht, physikalische Zusammenhänge bei ihren Aktionen zu verstehen. Obwohl sie durchaus das Gewicht von Objekten daran abschätzen können, wie diese im Wind schwingen, mangelt es ihnen mitunter an der Einsicht, dass fallende schwere Gegenstände stärker aufprallen als leichte. Dennoch legen die Tiere in vielerlei Hinsicht ein erstaunliches Können beim intelligenten Umgang mit Objekten an den Tag.

Wie sieht es mit der sozialen Intelligenz aus? Die Krähen können zwar ein Team bilden, verstehen aber nicht, dass sie durch Kooperation mit ihrem Partner eine Art soziales Werkzeug darstellen könnten, um gemeinsam ein besseres Ergebnis zu erzielen. Sie schauen auf Objekte, die andere manipulieren, nehmen jedoch entscheidende Einzelheiten im Verhalten des Artgenossen nicht wahr, mit denen sie die relevanten Handlungsfolgen nachvollziehen könnten. Statt direkt voneinander zu lernen, visualisieren sie offenbar, wie ein Werkzeug funktioniert, und rekonstruieren es aus dem Gedächtnis. Obwohl die Krähen somit ein außerordentlich hohes kognitives Niveau beim Umgang mit Dingen entwickelt haben, trifft dies nicht für die sozialen Beziehungen untereinander zu. Ist eine solche Einschränkung spezifisch für Geradschnabelkrähen, oder gilt sie auch für andere Vögel? Eine Antwort liefern Kolkkraben (*Corvus corax*).

Junge Raben, die weder einen Partner noch ein Territorium haben, rotten sich zeitweise zu Scharen zusammen. Diese tauchen dort auf, wo es etwas zu fressen gibt, wie bei einem Tierkadaver. Verteidigt ein großes Raubtier seine Beute, rufen die Raben andere Mitglieder der Schar herbei, um durch Ablenkungsmanöver Zugang zur Nahrungsquelle zu erlangen. Um nicht selbst Opfer von Nahrungsdieben zu werden, verhindern sie durch raffinierte Strategien, dass ihre Artgenossen beobachten, wo sie ihr Futter deponieren. Umgekehrt beobachten Raben andere Vögel, um deren versteckte Schätze zu plündern. Brutpaare verteidigen ebenfalls ihr Territorium gegen andere Raben. Bei solchen Auseinandersetzungen schneiden sowohl Fortpflanzungspartner als auch nicht brütende Individuen, die ein gutes soziales Netz aufgebaut haben, deutlich besser ab und schaffen es so, ihre Futtermittel zu sichern. Diese ausgefeilten sozialen Strategien der Raben haben vor allem die Arbeitsgruppen von Thomas Bugnyar von der Universität Wien und Bernd Heinrich von der University of Vermont aufgespürt (siehe »Spektrum« Juli 2007, S. 24).

Voraussetzung für dieses Verhalten ist die Fähigkeit, intuitiv die Netzwerke anderer Vögel zu erfassen und die Absichten eines jeden Individuums zu erkennen, auf das sie bei ihren täglichen Streifzügen stoßen. Raben achten genau auf Rufe, die eine Änderung in der Rangordnung anzeigen. Außerdem nutzen sie ihr Wissen über soziale Netzwerke,

wenn sie von einem dominanten Artgenossen angegriffen werden: Sind nahe Verwandte anwesend, alarmieren sie diese lautstark. Befindet sich der Fortpflanzungspartner des Angreifers in der Nähe, bleiben sie dagegen eher ruhig. Weil eine vollzogene Paarung zu einem höheren Rang in der Dominanzhierarchie führt, verfolgen die Vögel genau die Paarungsbereitschaft anderer und intervenieren aggressiv, um den Vollzug zu stören. Auf diese Weise verhindern sie, dass Artgenossen neue Koalitionen eingehen, und unterbinden den Aufstieg konkurrierender Individuen.

Soziale Kompetenz ist auch in anderer Hinsicht von Nutzen. Ein Rabe spürt es, wenn er beobachtet wird und ein anderer Vogel sein Nahrungsdepot ausgespäht haben könnte. Kolkkraben begreifen offenbar, was andere sehen oder nicht sehen können, und schätzen den Kenntnisstand ihres Konkurrenten ein – eine Fähigkeit, die als »Theory of Mind« bezeichnet wird. Wenn nötig, führen Raben potenzielle Nahrungsdiebe sogar in die Irre und locken diese zu einem Platz, wo sie vorgeben, Futter gehortet zu haben.

Diese sozialen Fertigkeiten werden ergänzt durch ein hohes Maß an Selbstkontrolle sowie ein gutes Gespür dafür, ob es sich lohnt, bei Konkurrenten Gewalt anzuwenden oder sich besser zurückzuziehen. Wie Can Kabadayi und Mathias Osvath, beide an der schwedischen Universität Lund tätig, 2017 beobachtet haben, können Kolkkraben vorausplanen. So ziehen die Vögel ein Objekt wie zum Beispiel einen Stein einer sofort verfügbaren kleinen Futterbelohnung vor. Denn mit diesem Hilfsmittel können sie am nächsten Tag eine größere Belohnung ergattern – entweder indem sie es dagegen eintauschen oder es direkt als Werkzeug einsetzen. Mit ihrem winzigen Gehirn von gerade einmal 14 Gramm sind Kolkkraben somit in der Lage, komplexe kognitive Prozesse zu bewältigen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / PONG6400

Kolkkraben und Geradschnabelkrähen liefern nur zwei Beispiele für das hohe kognitive Leistungsvermögen von Rabenvögeln. Wie Nicola Clayton von der University of Cambridge in zwei Jahrzehnten Forschungsarbeit gezeigt hat, erwiesen sich Buschhäher als die wahren mentalen Überflieger in dieser Familie. Der Florida-Buschhäher (*Aphelocoma coerulescens*) war die erste Tierart überhaupt, bei der sich ein episodisches Gedächtnis nachweisen ließ. Damit kann sich ein Individuum an Ereignisse aus der Vergangenheit erinnern und zukünftige Handlungen planen.

Einige Papageienarten erreichen sogar das Niveau von Menschenaffen. Das Paradebeispiel verkörpert Alex, ein Graupapagei (*Psittacus erithacus*). Irene Pepperberg von der Harvard University, die wie Clayton wegweisende

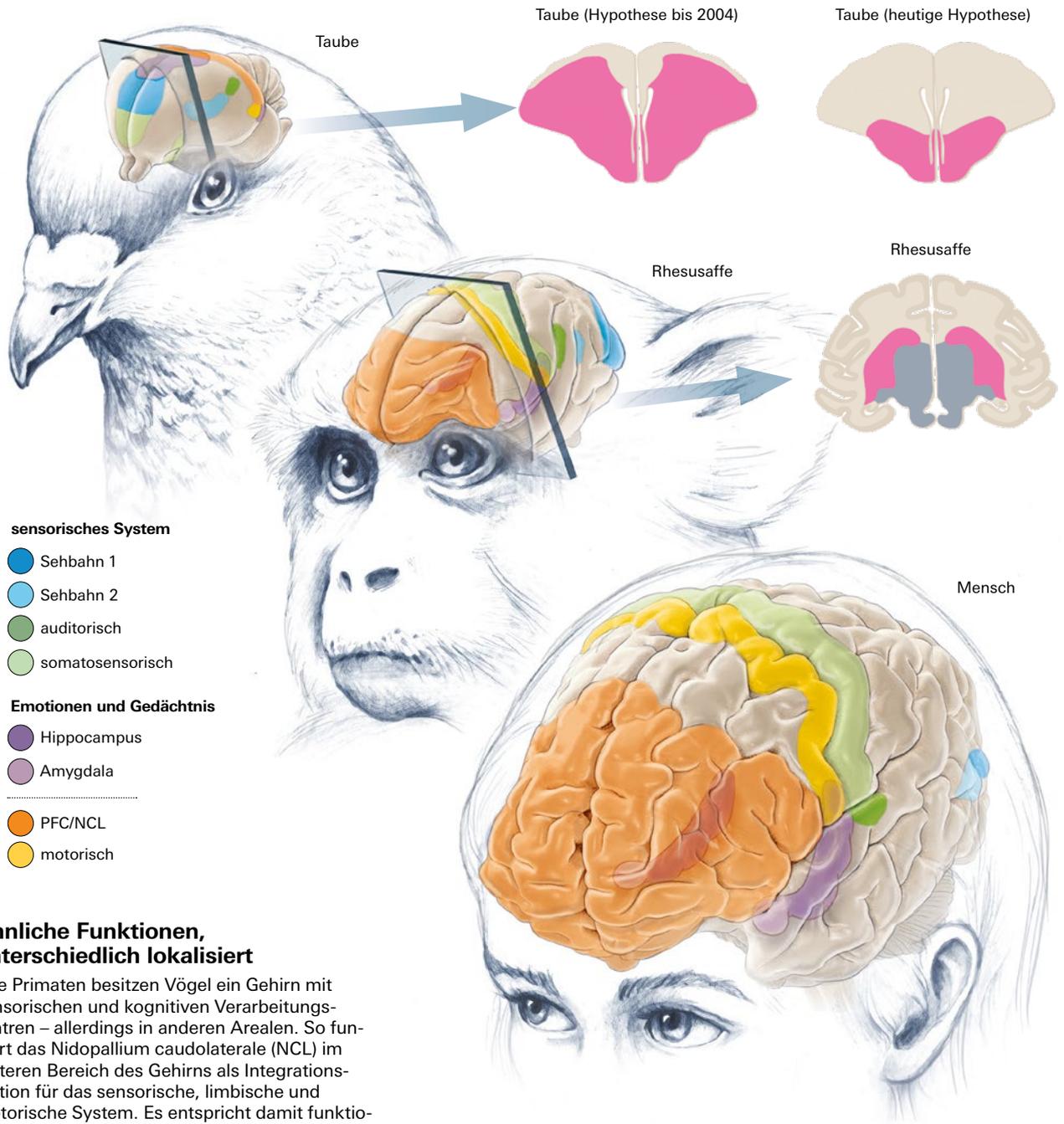
Mehr als ein »Spatzenhirn«

Auf Grund der Winzigkeit des Vogelgehirns trauten Neuroanatomen den gefiederten Tieren intellektuell wenig zu. Doch Vögel erwiesen sich als unerwartet schlau. Die Evolution schuf bei ihnen eine andere Hirnarchitektur als bei Säugetieren, die ähnlich hohe kognitive Leistungen ermöglicht.

Ein neues Verständnis

Bis 2004 galt die Hypothese, das Pallium der Vögel, das höhere kognitive Prozesse erlaubt, läge als schmales Band über dem darunterliegenden großen Subpallium. Wie sich inzwischen jedoch herausstellte, erreicht es Dimensionen wie die Großhirnrinde beim Rhesusaffen.

● Pallium ● Subpallium ● andere Hirnareale

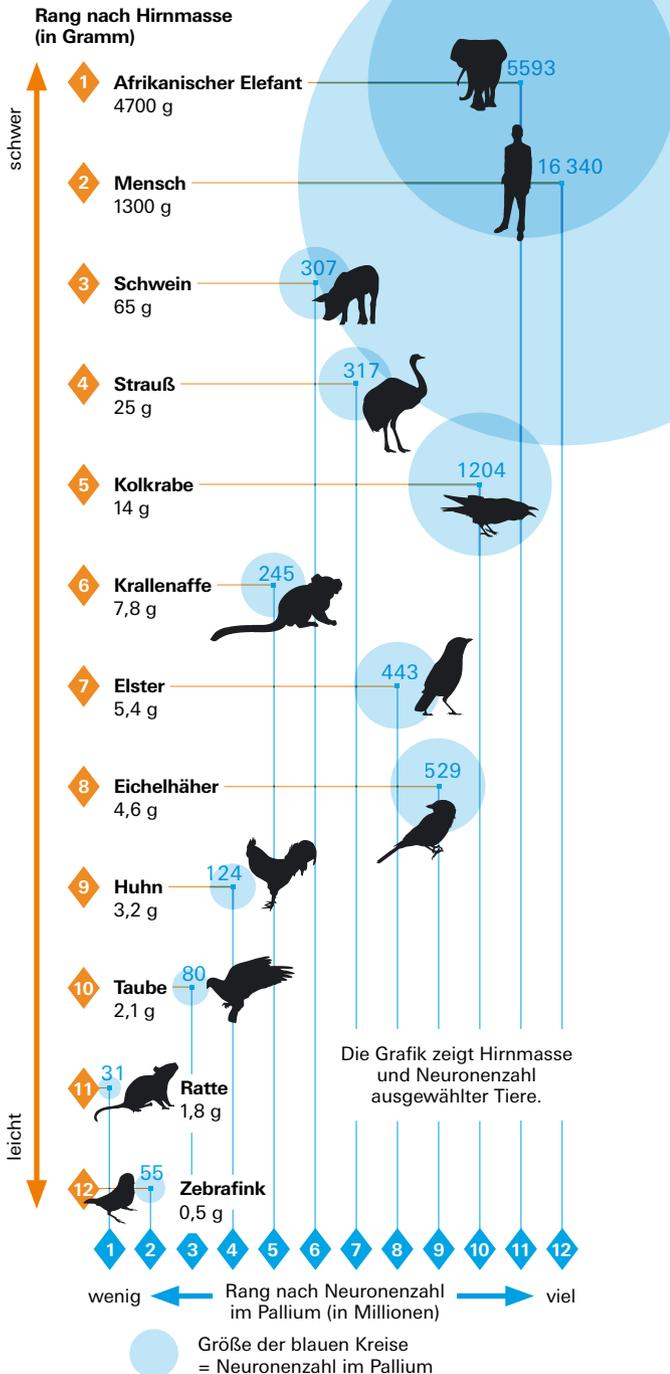


Ähnliche Funktionen, unterschiedlich lokalisiert

Wie Primaten besitzen Vögel ein Gehirn mit sensorischen und kognitiven Verarbeitungszentren – allerdings in anderen Arealen. So fungiert das Nidopallium caudolaterale (NCL) im hinteren Bereich des Gehirns als Integrationsstation für das sensorische, limbische und motorische System. Es entspricht damit funktionell dem präfrontalen Kortex (PFC) der Primaten.

Gehirne im Vergleich

Worauf beruht das hohe kognitive Leistungsvermögen der Vögel? Einerseits enthält ihr Denkorgan mehr Neurone, als auf Grund seiner Größe zu erwarten wäre. Dennoch besitzt es weniger Nervenzellen als das Säugetiergehirn. Das kompensieren die Vögel durch eine dichtere Packung der Neurone. Dadurch verkürzen sich die Strecken zwischen den Hirnzellen, so dass Signale schneller weitergeleitet werden können.



Studien zur Kognition bei Papageien und Rabenvögel vorgelegt hat, wies nach, dass Alex unterschiedliche Objekte, Handlungen und Zahlenmengen bis acht zu kategorisieren vermochte. Außerdem besaß der Papagei ein Verständnis für relative Größenverhältnisse; er nahm es wahr, wenn ein Objekt fehlte; und er konnte Ähnlichkeiten oder Unterschiede bei einzelnen Objekten erkennen. Selbst einfache Additionsaufgaben bewältigte er.

Trotz dieser eindrucksvollen Studien warfen Primatologen die Frage auf, ob die kognitiven Leistungen dieser Vögel an diejenigen von Menschenaffen wirklich heranreichen oder ob es sich eher um einige wenige intelligente Fähigkeiten unter eng umschriebenen Rahmenbedingungen handelt. Falls das zuträfe, müssten Rabenvögel und Papageien versagen, wenn sie sich einer Vielfalt kognitiver Aufgaben gegenübersehen. Um das zu klären, suchten Bugnyar und ich nach Studien, die bei Menschenaffen wie bei Rabenvögeln und Papageien verschiedene Typen intelligenter Aktionen erforderten. Unsere Sammlung an Publikationen auf acht Gebieten höherwertiger Kognition lässt den Schluss zu, dass das kognitive Leistungsvermögen von Rabenvögeln und Papageien dem von Menschenaffen in nichts nachsteht.

Buchstabierkünste von Tauben

Wie verhält es sich mit anderen Vögeln wie zum Beispiel unseren Haustauben (*Columba livia*)? Während das Gehirn von Elstern, Kolkraben und Geradschnabelkrähen immerhin zwischen 5 und 14 Gramm wiegt, bringt es das Taubengehirn lediglich auf rund 2 Gramm und ist damit ungefähr so schwer wie das einer Ratte. Aber selbst Tauben sind schlauer als gedacht. Lorenzo von Fersen, damals an der Universität Bochum, zeigte mit seinen Kollegen bereits vor 30 Jahren, dass die Vögel 725 abstrakte Muster im Gedächtnis behalten und sich logische Zusammenhänge durch so genannte transitive Inferenz erschließen. Ein Beispiel hierfür: Es lässt sich herleiten, dass Julia größer ist als Sarah, wenn bekannt ist, dass Julia größer ist als Sonja und Sonja größer ist als Sarah.

2016 wies Damian Scarf von der University of Otago in Neuseeland zusammen mit unserer Bochumer Arbeitsgruppe nach, dass Haustauben lernen, zwischen englischen Wörtern aus vier Buchstaben und Nichtwörtern, die aus einem Vokal und drei Konsonanten bestehen, zu unterscheiden. Die Vögel waren dieser Aufgabe nicht nur gewachsen, sondern sie übertrugen ihr Wissen auch auf neue Reihen von Wörtern und Nichtwörtern, indem sie Buchstabierstrategien ähnlich denen von Grundschulern einsetzten. Alles in allem erreichen Tauben bei solchen Tests kognitive Leistungen, die mit denen von Rabenvögeln und Papageien zwar nicht in allen Fällen, aber doch weitgehend vergleichbar sind. Sie brauchen allerdings länger, um eine Aufgabe zu lernen, und benötigen mehr Training, um eine abstrakte Regel zu begreifen. Nicht alle Vögel sind so schlau wie eine Krähe oder ein Papagei. Doch offenbar haben sie alle mehr Grips, als man einst glaubte.

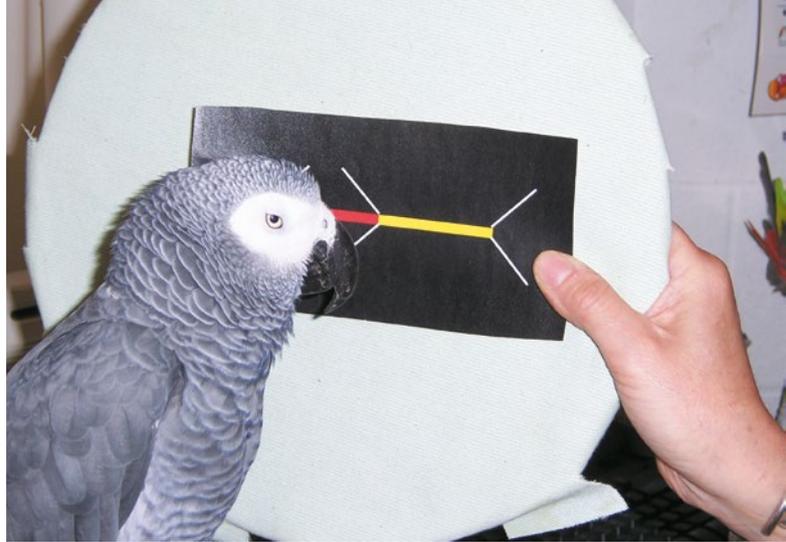
Wenn Vögel solche unterschiedlichen kognitiven Aufgaben – trotz kleinen Gehirns und des Fehlens eines Kortex – erfolgreich bewältigen, stellt sich die Frage, wie sie dieses

Manko ausgleichen. Anfang der 1960er Jahre begann der Neurowissenschaftler Harvey Karten, damals am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA), mit Hilfe neuer Methoden eine Antwort darauf zu suchen. Dabei zeigte er, dass ein Großteil dessen, was Edinger bei Vögeln als Subpallium interpretierte, stattdessen das Pallium sein muss. Im Verlauf seiner Forschung stellte sich heraus, dass die sensorischen und motorischen Nervenbahnen, die das Pallium der Vögel mit anderen Hirnarealen verbinden, identisch sind mit denjenigen des Kortex bei Säugetieren. 2002 bewertete ein internationales Konsortium von Neurowissenschaftlern alle bis dahin zusammengetragenen Belege und kam zu dem Schluss, dass Vögel ein wesentlich größeres Pallium besitzen als früher angenommen. Darüber hinaus ähnelt es dem der Säugetiere und ist im Prinzip gleichen Ursprungs (siehe »Mehr als ein »Spatzenhirn«, S. 34/35).

Das Pallium der Säugetiere besteht nicht nur aus dem Kortex, sondern umfasst auch andere Gebiete wie den Hippocampus sowie Teile der Amygdala. Wie viel beim Pallium der Vögel dem Kortex entspricht, ist immer noch umstritten. Einige Wissenschaftler sind davon überzeugt, dass der Großteil des Vogelpalliums lediglich mit der Amygdala und anderen nichtkortikalen Bereichen des Säugerpalliums übereinstimmt. Andere interpretieren es aber als Entsprechung gewisser Schichten oder Zelltypen des Kortex von Säugetieren. Tatsächlich konnte mein Team zusammen mit Kollegen aus Düsseldorf, Jülich und Aachen 2020 bei Tauben und Schleiereulen nachweisen, dass die sensorischen Anteile des Vogelpalliums eine äußerst komplexe und kortexähnlich verschaltete Organisation aufweisen. Es ist noch offen, ob Vögel und Säuger diese Organisation von einem primitiven Urkortex ihres letzten gemeinsamen Ahnen übernommen und dann parallel weiterentwickelt haben oder ob sich ein entsprechend verschalteter Kortex in beiden Tiergruppen vollkommen unabhängig voneinander herausbilden konnte.

Dass eine solche konvergente Evolution erstaunlich ähnliche Strukturen schaffen kann, zeigt sich ideal am Beispiel der präfrontalen Hirnregion. Bei Säugetieren spielt sie als präfrontaler Kortex (PFC) eine Schlüsselrolle für alle höheren kognitiven Prozesse. Anfang der 1980er Jahre berichteten Jesper Mogensen und Ivan Divac von der Universität Kopenhagen, dass ein Areal des hinteren Taubenpalliums dem PFC der Säugetiere ähnelt. Weil dies ein erster Hinweis auf die neuronale Basis der Vogelkognition war, startete ich eine bis heute laufende Reihe von Studien. Dabei konnten wir zeigen, dass in diesem Areal – dem Nidopallium caudolaterale (NCL) – einlaufende sensorische Signale und ausgehende motorische Befehle aufeinandertreffen und eine Handlung auslösen. Wie im Fall des PFC spielt auch das NCL eine entscheidende Rolle bei allen kognitiven Aufgaben; seine Neurone codieren kognitive Funktionen wie Entscheidungsfindung, das Beachten von Regeln sowie das Bewerten verschiedener zur Wahl stehender Optionen.

Obwohl das NCL und der PFC sich stark ähneln, erscheint es auf Grund ihrer unterschiedlichen Lage in den hintersten beziehungsweise vordersten Bereichen des



ARLENE LEVIN-ROWE / THE ALEX FOUNDATION



HELENA OSVATH, LUND UNIVERSITY



NICOLA S. CLAYTON, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Intelligenztests für Vögel: Ein Graupapagei erliegt einer optischen Täuschung (oben), ein Kolkkrabe ergattert mit einem Werkzeug seine Belohnung (Mitte), und ein Buschhäher beweist sich als Gedächtniskünstler (unten).

Palliums sowie genetischer Belege unwahrscheinlich, dass diese beiden Areale von einem gemeinsamen Vorfahren der Vögel und Säugetiere stammen. Stattdessen dürften sie recht verschiedene Funktionen erfüllt haben, bevor sie sich im Verlauf von 300 Millionen Jahren zu Gebieten der kognitiven Integration von sensorischem Input und motorischem Output verwandelten. Während unserer Forschungsarbeit zum NCL der Vögel habe ich oftmals an den berühmten Satz von Dr. Ian Malcolm in Steven Spielbergs Film »Jurassic Park« gedacht: »Das Leben findet einen Weg.« Wenn Tiere ein Hirnareal für komplexe Kognition benötigen, dann werden sie eine entsprechende Region entwickeln.

Gleiche Schaltpläne bei Vögeln und Säugern

Um herauszufinden, wie letztlich dieselbe kognitive Funktion bedient wird, untersuchten Murray Shanahan vom Imperial College London und ich gemeinsam mit weiteren Kollegen, wie das Konnektom, also der Schaltplan, des Palliums von Tauben organisiert ist. Weil das Vogelpallium so ganz anders als der Kortex der Säugetiere erschien, erwarteten wir auch ein anderes Konnektivitätsmuster. Doch nachdem wir das Konnektom der Tauben rekonstruiert hatten, erlebten wir unseren Aha-Moment: Der Schaltplan im Vogelpallium – mit unterschiedlichen Gebieten für verschiedene Funktionen – glich auf erstaunliche Weise dem im Kortex von Säugetieren. Unsere Botschaft ist somit klar: Um vergleichbare mentale Funktionen zu erzielen, entwickelte sich bei beiden Tiergruppen während der Evolution unabhängig voneinander derselbe Bauplan, weil ähnliche mentale Funktionen offenbar entsprechend aufgebaute Netzwerke erfordern.

Ein wichtiger Aspekt blieb noch ungelöst. Wie bringen es Vögel angesichts der geringen Größe ihres Gehirns fertig, ein derartiges kognitives Leistungsvermögen an den Tag zu legen? Um darauf eine Antwort zu finden, bestimmte ein internationales Team um Pavel Němec von der Karls-Universität in Prag die ungefähre Neuronenzahl bei 28 Vogelarten. Überrascht stellten die Forscher fest, dass das Gehirn von Rabenvögeln und Papageien doppelt so viele Neurone enthält, als anhand der Hirngröße zu erwarten war. Dieses Mehr an Hirnzellen befindet sich größtenteils im Pallium, weshalb Rabenvögel und Papageien eine höhere Leistungskapazität besitzen als mancher Affe mit seinem größeren Gehirn.

Trotz dieser unerwartet hohen Zellzahl besitzt das winzige Vogelgehirn immer noch deutlich weniger Neurone als kognitiv vergleichbare Säugetiere. So weisen Raben und die in Neuseeland heimischen Keas im Pallium lediglich zwischen 1,2 und 1,28 Milliarden Neurone auf; Schimpansen dagegen 7,4 Milliarden – und doch konnten Wissenschaftler keine systematischen kognitiven Unterschiede zwischen ihnen nachweisen.

Auf welche Weise gelingt es Vögeln, die Unterzahl an Hirnzellen zu kompensieren? Wie sich herausstellte, liegen bei den Tieren die Neurone enger beieinander. Wegen der kürzeren Entfernung zwischen den Hirnzellen könnte im dadurch dichter gepackten Zerebrum Information schneller weitergeleitet werden. Eine raschere Übertragung stellt eventuell nur einen der bisher weitestgehend unbekannt

Mechanismen dar, mit denen Vögel es schaffen, pro Neuron mehr kognitive Leistungsfähigkeit zu erzielen als wir Säugetiere.

Als Wissenschaftler in aller Welt damit begannen, die außerordentlichen kognitiven Fähigkeiten von Vögeln aufzudecken, entzog das dem abwertenden Begriff »Spatzenhirn« seine wissenschaftliche Basis. In der Tat wissen wir heute, dass sich die Gehirne von Vögeln und Säugetieren sehr viel mehr ähneln, als man einst dachte.

Diese Entdeckungen verhalfen auch zu weiterführenden Erkenntnissen. Vögel und Säugetiere verbreiteten sich unabhängig voneinander über die ganze Welt, indem sie nahezu jede ökologische Nische besetzten, die einem Wirbeltier das Überleben ermöglicht. Beide Zweige des Tierreichs brachten zudem Arten hervor, die als Generalisten nicht an ein spezielles Ökosystem gebunden sind, sondern fast überall auf der Welt zu überleben vermögen. Hohe kognitive Fähigkeiten wurden gebraucht, um schnell Lösungen für neuartige Probleme zu finden und Konkurrenten auszutricksen. Der starke Selektionsdruck, dem beide Wirbeltierklassen ausgesetzt waren, förderte dann die Ausbildung ausgefeilter kognitiver Fähigkeiten.

Dass in beiden Gruppen immer intelligentere Arten auftauchten, hängt dagegen weniger mit ihren unterschiedlich organisierten Pallia zusammen. Vielmehr trug hierzu im Wesentlichen die Entwicklung identischer neuronaler Mechanismen bei. Für ein hohes kognitives Leistungsvermögen wurden immer mehr Neurone benötigt. Säugetiere schafften das durch ein größeres Gehirn; bei Vögeln erhöhte sich dagegen die Neuronendichte. Beide entwickelten vergleichbare »kortikale« Schaltpläne für die im Pallium verlaufenden Nervenbahnen und bildeten »präfrontale« Areale mit identischen physiologischen, neurochemischen und funktionalen Eigenschaften aus. Dasselbe gilt für die Kognition an sich: Die Art und Weise, wie Vögel und Säugetiere lernen, sich erinnern, vergessen, sich irren, verallgemeinern oder Entscheidungen treffen, folgt den gleichen Prinzipien. Dieses erstaunliche Maß an Ähnlichkeit ist nur möglich, wenn die Natur nicht viele Freiheiten bei der Bildung neuronaler Strukturen für höhere kognitive Prozesse gestattet. Vögel und Säugetiere entwickelten ähnliche neuronale Mechanismen und Denkstrategien – mit denen sie auf unterschiedlichen Wegen dasselbe Ziel erreichten. ◀

QUELLEN

Güntürkün, O., Bugnyar, T.: Cognition without cortex. Trends in Cognitive Sciences 20, 2016

Jarvis, E. D. et al.: Avian brains and a new understanding of vertebrate brain evolution. Nature Reviews Neuroscience 6, 2005

Prior, H. et al.: Mirror-induced behavior in the magpie (*Pica pica*): Evidence of self-recognition. PLOS Biology 6, 2008

Shanahan, M. et al.: Large-scale network organization in the avian forebrain: A connectivity matrix and theoretical analysis. Frontiers in Computational Neuroscience 10.3389/fncom.2013.00089, 2013

Stacho, M. et al.: A cortex-like canonical circuit in the avian forebrain. Science 369, 2020

BILDGEBUNG MIT DURCHBLICK ZU NEUER ERKENNTNIS

Ein spezielles Verfahren macht Körpergewebe und komplette Organe durchsichtig. Mit seiner Hilfe lassen sich vollständige Körperteile mikroskopisch untersuchen und vielleicht sogar künstliche Organe züchten.



Shan Zhao ist studierte Chemikerin und Doktorandin am Helmholtz-Zentrum München.

» spektrum.de/artikel/1795022

Im 16. Jahrhundert setzte der flämische Chirurg Andreas Vesalius mit bahnbrechenden anatomischen Zeichnungen neue Maßstäbe in der medizinischen Bildgebung. In den fünf Jahrhunderten, die seither vergangen sind, hat es zahlreiche Innovationen auf dem Gebiet gegeben. Doch noch immer ist es Medizinern weitgehend verwehrt, in das Innere von intakten Organen zu blicken und die dortigen Strukturen bis auf die Ebene einzelner Zellen hinunter zu analysieren. Damit könnten Ärzte beispielsweise Krebsmetastasen beobachten, die sich von

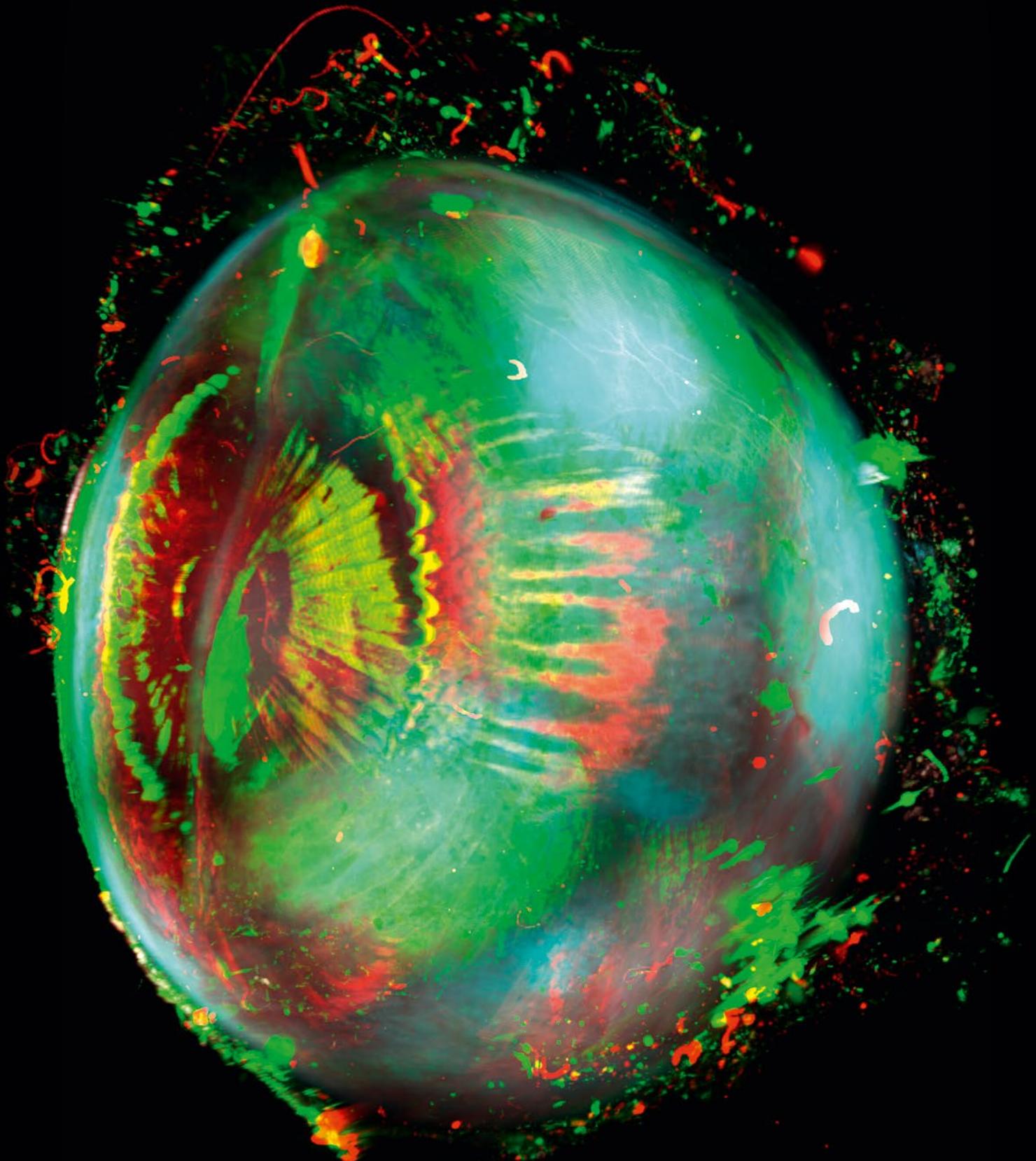
einem Tumor lösen, oder Aneurysmen (Blutgefäßerweiterungen) und andere Veränderungen erkennen, die Gesundheitsrisiken bergen. Forscher könnten damit den Aufbau des Gehirns studieren oder das feine Geflecht der Nieren detailliert abbilden. Solche Informationen machen es eines Tages vielleicht sogar möglich, Ersatzorgane anhand genauer »Baupläne« zu züchten. Aber bis vor Kurzem gab es die erforderlichen Bildgebungstechniken nicht.

Selbst die fantastischen Abbildungen der heutigen Magnetresonanztomografie (MRT) und Computertomografie (CT) ergeben »nur« eine Auflösung im Millimeterbereich. Dieser Detailgrad ist zwar eindrucksvoll und erlaubt es, zahlreiche Krankheiten zu diagnostizieren oder etwa den Blutfluss durch die Hirngefäße zu beobachten. Doch um zelluläre Strukturen des Organismus zu kartieren, ist er viel zu grob. Letzteres erfordert eine Auflösung im Bereich von Mikrometern (millionstel Metern).

Um Körperorgane derart fein zu untersuchen, nutzen Wissenschaftler oft traditionelle histologische Gewebeschnitte. Dabei zerteilen sie das jeweilige Organ in mikrometerdünne Scheiben und färben diese mit speziellen Substanzen an, um bestimmte Gewebestrukturen hervorzuheben. Anschließend lichten sie jeden Schnitt einzeln ab, wobei sie tausende Bilder erhalten, die sie am Computer zusammensetzen, um die Gesamtstruktur des Organs zu rekonstruieren. Im Jahr 2013 beispielsweise veröffentlichten Katrin Amunts und ihre Kollegen vom Institut für Neurowissenschaften und Medizin in Jülich ein hochauflösendes dreidimensionales Modell des menschlichen Gehirns na-

AUF EINEN BLICK TRANSPARENTER BIOLOGIE

- 1 Um Körperorgane mikroskopisch zu untersuchen, nutzen Forscher oft histologische Gewebeschnitte. Das ist jedoch aufwändig und zerstört die Probe.
- 2 Ein neues Verfahren macht nun Gewebe und Organe durchsichtig und bildet ihren inneren Aufbau zerstörungsfrei ab – bis in zelluläre Details.
- 3 Die Methode könnte bessere medizinische Diagnosen ermöglichen und helfen, Ersatzorgane mit 3-D-Drucktechniken herzustellen.



Durchsichtige, speziell angefärbte Organe wie dieses menschliche Auge erlauben neue Einblicke.

mens »BigBrain«. Die Forscher hatten dafür über mehrere Jahre hinweg 7404 Schnitte des Gehirns eines zuvor verstorbenen 65-Jährigen zusammengefügt. So etwas erfordert einen enormen Arbeitsaufwand und liefert beeindruckende Ergebnisse, die aber trotzdem alles andere als ideal sind. Denn das Zerschneiden des Organs verändert und beschädigt das Gewebe, und einzelne Schnitte können dabei verloren gehen.

Meine Kollegen und ich an der Ludwig-Maximilians-Universität München suchten nach einem besseren Verfahren. Wir wollten hochauflösende 3-D-Bilder intakter menschlicher Organe erstellen, und zwar ohne das Gewebe zu beschädigen. Nach zweijährigen Bemühungen ist uns dies gelungen. Wir haben eine skalierbare, robuste Methode entwickelt, die komplette menschliche Körperteile mit Hilfe chemischer Cocktails durchsichtig macht. Solche Präparate können wir anschließend direkt und zerstörungsfrei abbilden, indem wir sie mit der so genannten Lichtscheibenmikroskopie untersuchen, mit der sich mikrometerdünne Schichten in der Probe beleuchten und betrachten lassen. Auf diese Weise bekommen wir völlig neue Einblicke in den Organismus und können Augen, Schilddrüsen, Nieren und andere Organe auf Einzelzellebene analysieren.

Wenn man dicke Gewebestücke oder ganze Organe abbilden möchte, besteht eine der größten Schwierigkeiten darin, dass Licht maximal wenige hundert Mikrometer tief ins Präparat eindringt. Denn Körpergewebe setzen sich aus Wasser, Lipiden, Proteinen und Kohlenhydraten zusammen – sehr unterschiedlichen Substanzen, und jede besitzt ihren eigenen Brechungsindex. Letzterer gibt an, wie schnell sich Licht in einem Material im Vergleich zum Vakuum ausbreitet; je höher er ist, umso niedriger die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die verschiedenen Stoffe, aus denen Organe bestehen, sind überdies räumlich höchst ungleichmäßig verteilt und bilden Strukturen wie Zellen, Blutgefäße, Fettdepots, Proteinfasern oder auch das komplizierte Netzwerk der extrazellulären Matrix. Trifft Licht auf dieses Gewirr aus diversen Komponenten, werden die Lichtteilchen (Photonen) mannigfach gestreut und absorbiert.

Im Prinzip ließe sich das Problem lösen, indem man die optischen Eigenschaften sämtlicher Gewebestandteile einander angleiche, aber das wäre sehr aufwändig. Wasser besitzt einen Brechungsindex von 1,33 und macht bis zu 80 Prozent des Gewebes aus. Proteine und Lipide stellen jeweils etwa 10 Prozent und haben einen Brechungsindex

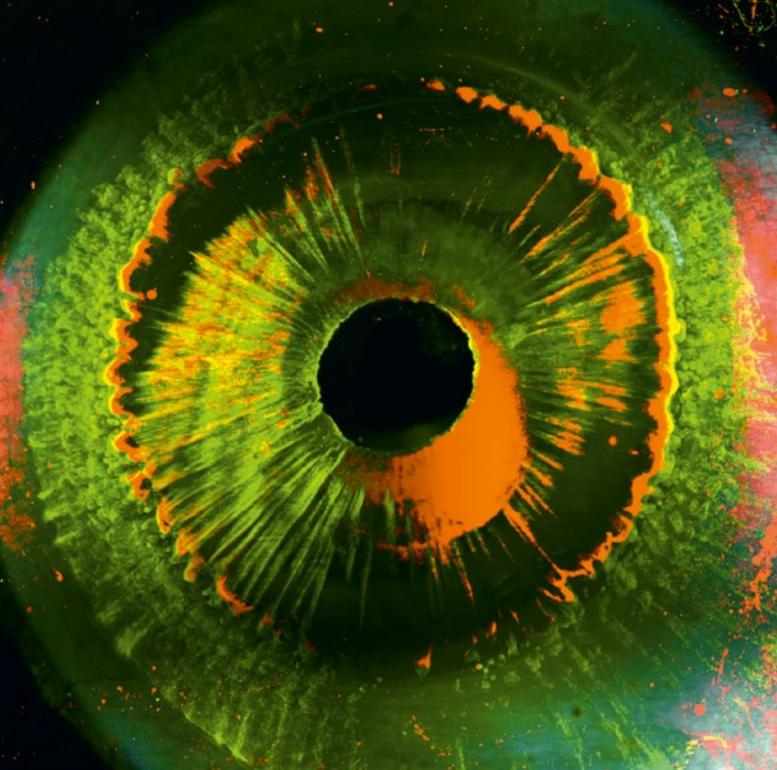
Chemie-Cocktail sorgt für Klarheit

Mit einer Technik namens SHANEL (von small micelle mediated human organ efficient clearing and labeling) gelingt es, Organe und Gewebe transparent zu machen, um sie anschließend mikroskopisch zu untersuchen. Das Verfahren läuft in mehreren Schritten ab und nimmt typischerweise einige Wochen bis Monate in Anspruch. Die Forscher arbeiten mit nach dem Tod entnommenen Organen, die in Formaldehydlösungen fixiert worden sind – etwa einem Schweinehirn, wie in Bild (a) gezeigt. Mit Hilfe einer Pumpe spülen sie einen chemischen Cocktail durch die Blutgefäße des

Präparats. Dabei starten sie mit einer Mischung aus dem Detergens CHAPS (3-[(3-Cholamidopropyl)dimethylammonio]-1-propan sulfonat-Hydrat) und der Substanz NMDEA (N-Dimethyldiethanolamin), die das Organ entfärbt und anderen Reagenzien gegenüber zugänglich macht (b). Anschließend pumpen sie eine Lösung mit Fluoreszenzfarbstoffen hindurch, um bestimmte Zellstrukturen zu markieren, so dass diese sich später mikroskopisch untersuchen lassen. Als Nächstes behandeln die Wissenschaftler das Organ mit ansteigenden Konzentrationen des Alkohols

Ethanol – erst 50, dann 70, schließlich 100 Prozent –, der das Wasser aus dem Gewebe verdrängt. Es folgt eine Behandlung mit dem organischen Lösungsmittel Dichlormethan, um die Lipide zu entfernen. Schließlich fügen die Forscher eine Lösung aus Benzylalkohol und Benzoesäurebenzylester (BABB, im Verhältnis 1:2) hinzu, mit der sie im gesamten Organ einen einheitlichen Brechungsindex erreichen, so dass dieses vollständig durchsichtig wird (c). Mit jener Methode lassen sich auch menschliche Organe wie Augen, Nieren und Gehirne aufklaren.





SHAN ZHAO

Um Organe so zu präparieren, dass sie transparent werden, müssen Chemikalien das Gewebe durchdringen und seine optischen Eigenschaften verändern.

von 1,50 beziehungsweise 1,48. Mit zunehmendem Alter sammeln sich in menschlichen Organen weitere Substanzen an wie Lipofuszin, Melaninpigmente, Hämoglobin und unlösliches Kollagen, die allesamt Licht absorbieren und die Abbildung von Gewebe zusätzlich erschweren.

Die Idee, Organismen durch Manipulieren des Brechungsindex durchsichtig zu machen, ist schon über 100 Jahre alt. 1914 schuf der deutsche Anatom Werner Spalteholz an der Universität Leipzig die ersten transparenten Präparate menschlichen Gewebes. Er bettete die Proben in Medien unterschiedlicher Brechungsindizes ein und stellte fest, dass Licht hindurchgelangt, sobald die Brechzahl des Mediums mit derjenigen des Gewebes übereinstimmt (diese Beobachtung regte übrigens Herbert George Wells' Sciencefiction-Klassiker »Der Unsichtbare« von 1897 an). Andere Wissenschaftler versuchten, Spalteholzens Methode zu modifizieren und zu verbessern, um das Absterben von Zellen, Blasenbildung und Verwischen von Bildetails zu vermeiden, aber mit nur mäßigem Erfolg.

Seit etwa zehn Jahren greifen Forscher die Idee wieder auf, diesmal unter Nutzung eines Verfahrens, das sich als Aufklaren des Gewebes (Tissue Clearing) bezeichnen lässt. Dabei dient ein Cocktail chemischer Substanzen dazu, die Lichtstreuung der Lipidmoleküle zu eliminieren und absorbierende Substanzen wie die Häme, zu denen der Farbstoff der roten Blutkörperchen gehört, aus der Probe zu entfernen. Anschließend werden die verbliebenen Organbestandteile in eine Lösung getaucht, deren Brechungsindex ihrem eigenen entspricht.

Drei Arten von Clearing-Techniken existieren derzeit, um Gewebe von Menschen und anderen Tieren aufzubereiten. Die erste stützt sich auf hydrophobe (Wasser abweisende) Lösungsmittel und hat sich bei der Behandlung größerer

Präparate als am effektivsten erwiesen. Im Jahr 2016 berichteten die Biotechnologin Ruiyao Cai, damals am Institut für Schlaganfall- und Demenzforschung in München, und ihre Kollegen, eine erwachsene Maus damit transparent gemacht zu haben; drei Jahre später beschrieben sie das vollständige neuronale Verknüpfungsmuster des Tiers. Die von ihnen genutzten Verfahren funktionieren allerdings nicht bei intakten menschlichen Organen, da sie sich auf Proben von wenigen Zentimetern Dicke beschränken. Zwei weitere Clearing-Methoden basieren auf hydrophilen (Wasser anziehenden) Reagenzien beziehungsweise auf Hydrogelen, also Wasser bindenden Polymer-Gelen.

Wie ein verfilztes Gewirr

Im Jahr 2017 beschlossen wir, derartige Aufklärungstechniken systematisch zu untersuchen und zu testen, ob sich mit Hilfe hydrophober Lösungsmittel auch größere, dickere Gewebestücke durchsichtig machen lassen. Unser Ziel: vollständige menschliche Organe in einer Auflösung zu kartieren, die zelluläre Details erkennen lässt. Wir begannen damit, existierende Verfahren zu verbessern; wir tauschten Chemikalien, justierten Konzentrationen und Inkubationszeiten und probierten verschiedene Reagenzien aus, um Brechungsindizes innerhalb des Gewebes zu modifizieren. Mehrere Monate konzentrierten Arbeitens und das Austesten diverser Stoffkombinationen führten uns jedoch nicht zum Erfolg.

An diesem Punkt zogen wir Bilanz und fragten uns noch einmal ganz grundsätzlich, warum humanes Gewebe so viel schwerer transparent zu machen ist als jenes von Nagetieren, das sich mit mehr als 40 verschiedenen chemischen Cocktails aufklaren lässt. Die Organe erwachsener Menschen sind wesentlich größer und steifer als die von wenige Monate alten Mäusen. Sie enthalten unzählige hydrophile und hydrophobe Substanzen, die zu tausenden Schichten ineinander verflochten sind. Die Lipidmoleküle kommen in diversen Varianten vor, und zahllose Nervenzellen sind mit proteinhaltigen Myelinscheiden umwickelt. Egal, ob wir es mit wasser- oder fettlöslichen Reagenzien versuchten, wir konnten die Chemikalien nicht dazu bringen, tief in menschliches Gewebe einzudringen und es zu durchsetzen. Wir brauchten etwas Anderes – irgendeine Substanz, die in intakte Organe einsickert, um sie weiteren Stoffen gegenüber zugänglich zu machen.

Detergenzien schienen die besten Kandidaten hierfür zu sein. Denn diese Moleküle, die Grenzflächenspannungen zwischen hydrophilen und hydrophoben Substanzen herabsetzen, besitzen einen Anteil, der mit fetthaltigen Gewebestandteilen interagiert, und einen weiteren, der eine

Mehr Wissen auf Spektrum.de

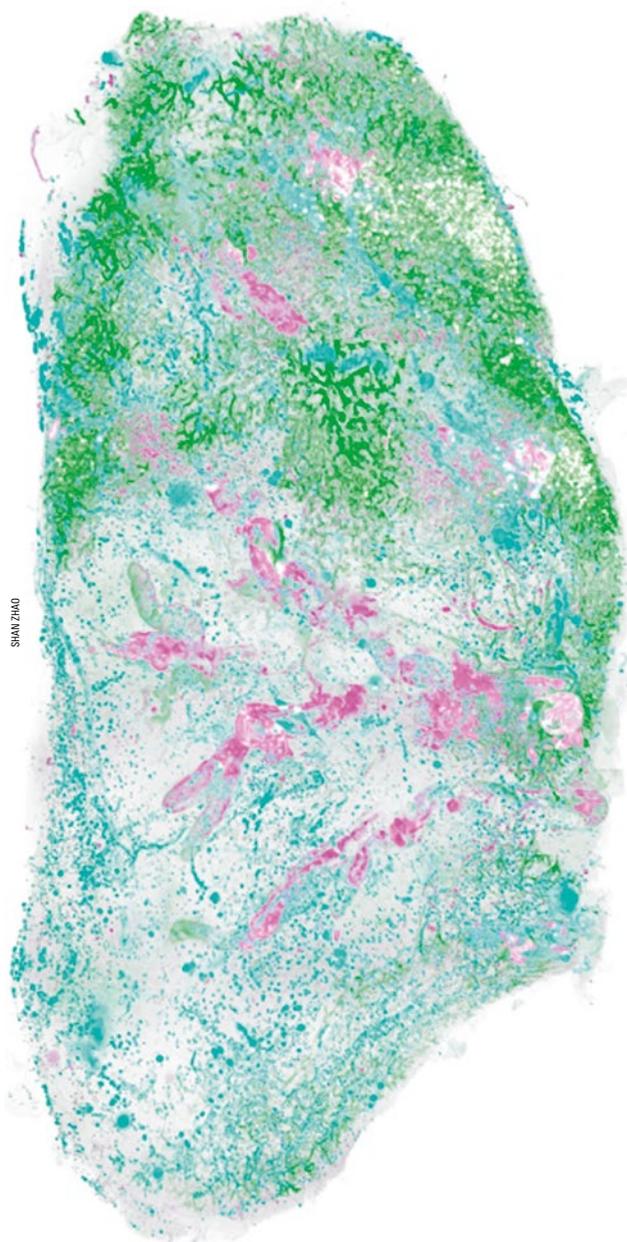
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/bildgebende-verfahren](https://www.spektrum.de/t/bildgebende-verfahren)



SVED OLIVER / STOCK.ADOBE.COM

Affinität zu Wasser besitzt. In wässrigen Lösungen neigen Detergenzien dazu, so genannte Mizellen zu bilden – Bläschen, in denen die hydrophilen Molekülteile nach außen ragen und die hydrophoben nach innen. Wir versuchten, unsere Gewebeproben mit zwei üblichen Detergenzien aufzuklären, mit Natriumlaurylsulfat und Octoxinol 9. Aber wir stellten fest, dass deren Mizellen hierfür zu groß sind: Sie blieben an der Oberfläche des Gewebes stecken, statt in dieses einzudringen. Wir brauchten ein spezielles Detergens, das kleinere Mizellen bildet.

Nach langer Suche fanden wir eine geeignete Substanz. Sie heißt 3-[[3-Cholamidopropyl)dimethylammonio]-1-propan sulfonat-Hydrat, üblicherweise abgekürzt mit CHAPS. Es handelt sich um ein kommerziell erhältliches Detergens, das jedoch noch nie zuvor für solche Zwecke eingesetzt wurde. CHAPS bringt Mizellen hervor, die nur etwa ein Viertel so groß sind wie die der anderen Detergenzien.



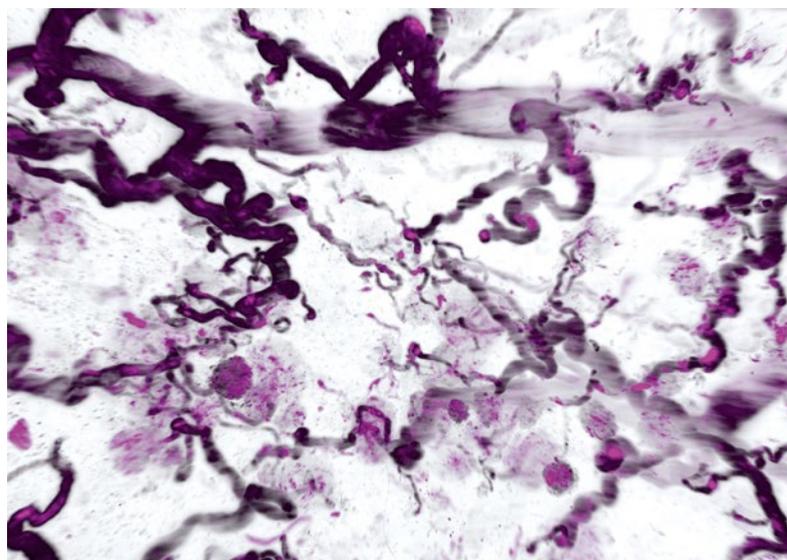
SHAN ZHAO

Mit CHAPS gelang es uns endlich, intakte menschliche Organe so aufzubereiten, dass sie weiteren, Gewebe aufklärenden Reagenzien gegenüber zugänglich wurden. Wir haben mit zahlreichen Chemikalien experimentiert, während wir die Clearing-Prozedur entwickelten: Aminoalkohole, um Häm-Pigmente zu entfernen; Säuren, um die extrazelluläre Matrix aufzulockern; mit Wasser mischbare Alkohole, um das Gewebewasser zu ersetzen; hydrophobe Lösungsmittel, um die Lipide zu beseitigen; Fluoreszenzfarbstoffe, um spezifische Strukturen zu markieren; und schließlich eine Lösung mit ganz bestimmtem Brechungsindex, die volle Transparenz ermöglicht. Diesen Cocktail und das damit verbundene Aufbereitungsverfahren nennen wir »SHANEL«, von »small micelle mediated human organ efficient clearing and labeling«, (sinngemäß: von kleinen Mizellen vermitteltes, effizientes Aufklären und Anfärben menschlicher Organe).

Beim SHANEL-Verfahren spülen wir den chemischen Cocktail mit einer handelsüblichen Pumpe durch das Blutgefäßsystem eines Organs. Der Clearing-Prozess erfordert Geduld: Bei einer menschlichen Niere dauert er sechs Wochen; bei einem intakten menschlichen Gehirn hingegen etwa vier Monate. Im Anschluss an das Durchsichtigmachen markieren wir bestimmte zelluläre Strukturen in dem Organ mit Fluoreszenzfarbstoffen. Dann kommt der wirklich spannende Teil.

Mit Hilfe der transparenten und angefärbten Präparate können wir die inneren Strukturen intakter menschlicher Organe in mikroskopischen Details abbilden. Zusammen mit Miltenyi Biotech, einer in Deutschland gegründeten Firma, die sich auf Produkte und Dienstleistungen im Bereich der Lebenswissenschaften spezialisiert hat, haben wir hierfür ein spezielles Lichtscheibenmikroskop entwickelt. Das Gerät beleuchtet die Probe mit einem wenige Mikrometer dicken, flächigen Lichtbündel, was effektiv das Gleiche ist, als würde man eine entsprechend dünne Gewebescheibe betrachten. Unser Lichtscheibenmikroskop ist das einzige der Welt, mit dem sich Präparate von der Größe einer menschlichen Niere untersuchen lassen.

Eine durchsichtig gemachte menschliche Niere (links); magenta: Zellkerne, grün: Blutgefäße, türkis: Kollagen-Proteine. Es lassen sich sogar einzelne Filtereinheiten erkennen (unten, lila).



SHAN ZHAO

Jede Organ- beziehungsweise Gewebesektion wird dabei von zwei Seiten angestrahlt, was die in ihr enthaltenen Fluoreszenzfarbstoffe zum Leuchten anregt. Der Probenhalter bewegt die Probe in Schritten von jeweils einigen Mikrometern weiter, bis die nächste Aufnahme erfolgt. So lässt sich scheinbar allmählich die Struktur des ganzen Präparats erfassen. Dieser Ansatz ähnelt der Technik histologischer Gewebeschnitte, zerstört aber die Probe nicht. Schließlich kombinieren wir die tausenden aufeinanderfolgenden Bilder digital, um das intakte Organ in seinen zellulären Details zu rekonstruieren. Damit ist das SHANEL-Verfahren abgeschlossen.

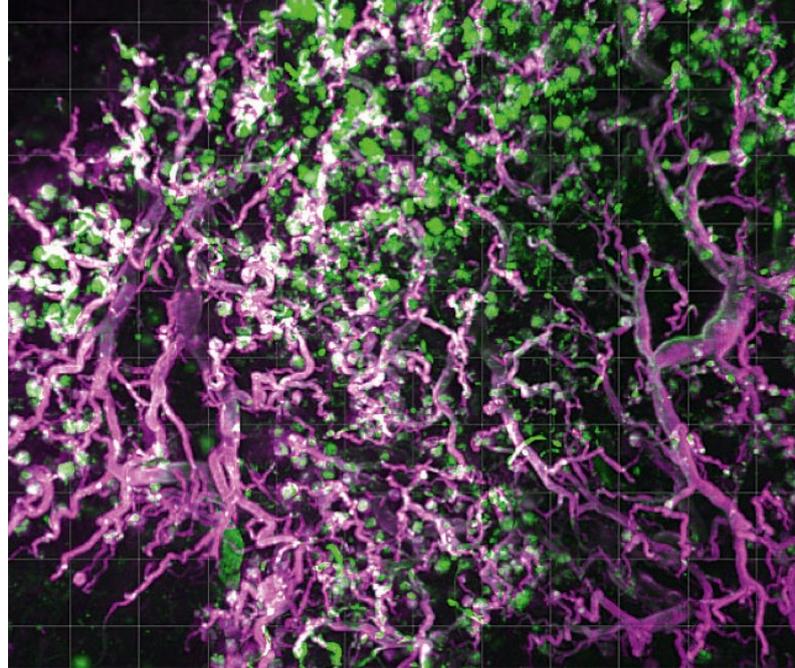
Obwohl es zunächst Wochen oder Monate dauert, das jeweils interessierende Organ durchsichtig zu machen, ist SHANEL unter dem Strich deutlich schneller als traditionelle histologische Verfahren. Und es ist wesentlich genauer. Allerdings benötigt man leistungsfähige Computer und Deep-Learning-Algorithmen, um die außerordentlich große Menge an hochauflösenden Bilddaten zu verarbeiten, die dabei anfallen – allein schon Terabyte an Rohdaten.

Wir haben mit dem Verfahren die ersten detaillierten 3-D-Abbildungen intakter menschlicher Augen und Nieren erstellt und darüber hinaus 1,5 Zentimeter dicke Scheiben eines menschlichen Gehirns analysiert. Dank einer Vierkanal-Pumpe können wir das SHANEL-Verfahren an mehreren Organen gleichzeitig durchführen. Die Methode ist robust und ließe sich problemlos auch in anderen Laboren einsetzen. Zudem haben die durchsichtig gemachten Organe eine feste und stabile Konsistenz, so dass sie sich für weitere Untersuchungen langfristig lagern lassen. Der limitierende Faktor dieser Technik ist derzeit die Größe und Leistungsfähigkeit des Mikroskops und nicht etwa unsere Fähigkeit, Gewebe aufzuklären.

Ein Ersatzorgan aus dem Drucker

Mit SHANEL können wir dreidimensionale Referenzkarten gesunder menschlicher Organe in Einzelzellauflösung erstellen. Damit lassen sich die morphologischen Veränderungen analysieren, die mit Krankheiten, Arzneimittelgebrauch und weiteren Einflüssen einhergehen. Unter anderem möchten wir Organe von Covid-19-Patienten untersuchen, um Anhaltspunkte zu bekommen, wie sich eine Infektion mit dem Sars-CoV-2-Virus auf Gewebestrukturen auswirkt.

Detaillierte Karten vollständiger menschlicher Körperteile könnten Wissenschaftlern in Zukunft sogar dabei helfen, künstliche Organe im 3-D-Druck (3-D-Bioprinting) herzustellen, die ihren natürlichen Vorbildern sehr nahekommen. Mehrere Teams haben bereits begonnen, Verfahren zu entwickeln, mit denen sich funktionstüchtige Nieren im Labor züchten lassen. Damit diese erfolgreich in Patienten verpflanzt werden können, müssen sie mechanisch belastbar sein und über Netzwerke aus Blutgefäßen und Kanälen verfügen, die eine funktionierende Nährstoffversorgung und Urinableitung des Organs sicherstellen. Eine künstliche Niere muss unter anderem Glomeruli enthalten, das sind Knäuel feiner Blutgefäße, die in Filtereinheiten namens Bowman-Kapseln eingebettet sind. SHANEL kann die Bilddaten liefern, die erforderlich sind, um solche



SHAN ZHAO

Menschliche Körperteile sind oft ein Gewirr aus tausenden ineinander verflochtenen Schichten. Das macht es so schwer, in sie hineinzublicken.

Strukturen mittels Bioprinting nachzubilden. Wir entwickeln derzeit einen eigenen 3-D-Bioprinter und studieren die einschlägige Gefäß- und Stammzellbiologie, so dass wir irgendwann hoffentlich funktionierende Organe im Labor erzeugen können.

Einstweilen verfeinern wir unsere Clearing-Technik weiter. Wir sind dabei, den Prozess dahingehend zu optimieren, dass wir Organe innerhalb von Tagen statt Wochen durchsichtig machen und überdies die Autofluoreszenz des menschlichen Gewebes nutzen, um die Anfärbung mit Fluoreszenzfarbstoffen zu überspringen. Wir konstruieren zudem ein größeres, leistungsstärkeres Lichtscheibenmikroskop, damit sich vollständige menschliche Gehirne untersuchen lassen. Künftig werden wir so noch detailliertere Bilddaten gewinnen, und das wird für die Datenverarbeitung mehr Rechenleistung und bessere KI-Algorithmen erfordern.

An unserem Projekt arbeiten Chemiker, Biologen, Ingenieure und Computerspezialisten mit, um gemeinsam die verborgenen Details tief im Inneren menschlicher Organe zu entdecken. Wir entwickeln eine Technologie, die nicht nur nützlich ist, sondern auch beeindruckend schöne Bilder hervorbringt. Letztlich hoffen wir, dass sie wichtige neue Erkenntnisse liefern und die wissenschaftliche Kreativität inspirieren wird. ◀

QUELLEN

Cai, R. et al.: Panoptic imaging of transparent mice reveals whole-body neuronal projections and skull-meninges connections. *Nature Neuroscience* 22, 2019

Zhao, S. et al.: Glycerol-mediated nanostructure modification leading to improved transparency of porous polymeric scaffolds for high performance 3D cell imaging. *Biomacromolecules* 15, 2014

Zhao, S. et al.: Cellular and molecular probing of intact human organs. *Cell* 180, 2020

ÖKOLOGIE

WIPFEL ALS WINDFABRIK

Wälder beeinflussen das Wetter – das wissen Wissenschaftler schon lange. Das Wasser in ihren Blättern verdunstet und erzeugt Wolken und Regen. Eine kontrovers diskutierte Theorie legt nahe: Wälder rufen außerdem die Winde hervor, welche die Wolken über Kontinente hinweg bewegen.



Der Amazonas fasst nicht nur als Fluss enorm viel Wasser. Auch die Winde, die über die ihn umgebenden riesigen Waldgebiete strömen, enthalten große Wassermengen.



Fred Pearce ist Journalist in London.

► spektrum.de/artikel/1795025

Jeden Sommer verlässt Anastassia Makarieva ihr Labor in Sankt Petersburg für einen Urlaub in den ausgedehnten Wäldern Nordrusslands. Die Atomphysikerin zeltet inmitten von Fichten und Kiefern an den Ufern des Weißen Meers und bewegt sich in ihrem Kajak entlang der breiten Flüsse der Region, um sich Notizen über die Natur und das Wetter zu machen. »Die Wälder sind ein großer Teil meines Innenlebens«, meint sie. Nach 25 Jah-

ren, in denen sie ihre jährliche Pilgerreise in den Norden unternimmt, sind Wälder zusätzlich immer mehr zu einem bedeutenden Teil ihres Berufslebens geworden.

Seit über einem Jahrzehnt hat Makarieva gemeinsam mit ihrem Mentor und Kollegen am Institut für Kernphysik in Sankt Petersburg, Victor Gorschkow, eine Theorie dazu entwickelt, wie Russlands boreale Wälder (die größte Baumfläche der Erde) das Klima in Nordasien regulieren. Dabei handelt es sich um ein relativ einfaches physikalisches Modell, das beschreibt, wie der von den Bäumen emittierte Wasserdampf Luftströme antreibt: Winde, die den Kontinent durchqueren und feuchte Luft von Europa über Sibirien in die Mongolei und nach China transportieren; Winde, die Regenfälle liefern, welche die riesigen Flüsse Ostsibiriens nähren; Winde, die das nordchinesische Tiefland bewässern, die Kornkammer der bevölkerungsreichsten Nation der Erde.

AUF EINEN BLICK VOM WINDE VERWEHT

- 1** Das Wetter hängt unter anderem von der Vegetation der Landmassen ab. Die Blätter von Bäumen emittieren Wasserdampf, woraufhin sich Wolken bilden.
- 2** Einige Forscher sind der Meinung, bei dem Prozess entstehen ebenso Winde, welche die Wolken über ganze Kontinente hinweg transportieren.
- 3** Allerdings fechten viele Meteorologen diese Hypothese an. Sie widerspricht der klassischen Lehre davon, wie Strömungen in der Atmosphäre entstehen.

Große Wälder nehmen Kohlendioxid aus der Luft auf und geben Sauerstoff ab – darum bezeichnet man sie oft als die Lungen unseres Planeten. Makarieva und Gorschkow zufolge sind sie aber ebenso dessen schlagendes Herz. »Wälder sind komplexe, selbsterhaltende Systeme, die Regen erzeugen. Zudem treiben sie die atmosphärische Zirkulation auf der Erde an«, sagt Makarieva. Gemäß ihrer Theorie führen die riesigen Baumgruppen enorme Wassermengen in die Luft und bilden dabei auch Winde, welche die Feuchtigkeit um die Welt pumpen. Der erste Teil dieser Idee – Wälder als Regenmacher – stammt von anderen Wissenschaftlern und ist inzwischen belegt. Der zweite Teil, wonach Baumgruppen Winde verursachen, was Makarieva als »biotische Pumpe« bezeichnet, ist allerdings weitaus umstrittener.

Zwar unterstützt eine kleine Gruppe von Kollegen Makarievas Arbeit, doch die Theorie der biotischen Pumpe erntet gewaltigen Gegenwind, vor allem seitens Klimamodellentwickler. Einige von ihnen behaupten, die Auswirkungen der Wälder auf die atmosphärische Zirkulation sei vernachlässigbar. Der Streit hat Makarieva zu einer Außenseiterin gemacht: eine theoretische Physikerin in einer Welt von Modellierern; eine Russin in einem von westlichen Wissenschaftlern geleiteten Gebiet; und eine Frau in einem von Männern dominierten Bereich.

Wälder wachsen nicht nur, wo das Wetter günstig ist – sie machen das Wetter

Wenn ihre Idee zutrifft, könnte sie erklären, warum es in abgelegenen Gebieten inmitten großer bewaldeter Kontinente trotz ihrer Entfernung zu den Ozeanen genauso viel regnet wie in Küstenregionen – und warum die inneren Zonen unbewaldeter Kontinente eher trocken sind. Makarievas Theorie zufolge wachsen die Wälder von der russischen Taiga bis zum Amazonasregenwald nicht nur dort, wo das Wetter günstig ist – sie machen das Wetter.

»Alles, was ich bisher gelernt habe, unterstützt die Theorie der biotischen Pumpe«, kommentiert der Waldökologe Douglas Sheil von der norwegischen Universität für Umwelt- und Biowissenschaften in Ås. Angesichts der ungewissen Zukunft von Wäldern merkt er an: »Selbst wenn die Theorie nur eine geringe Chance hat, völlig richtig zu sein, ist es äußerst wichtig, diese Möglichkeit zu untersuchen.«

Viele meteorologische Fachbücher lehren immer noch eine vereinfachte Variante des Wasserkreislaufs, wonach der größte Teil der Luftfeuchtigkeit durch die Verdunstung der Ozeane entsteht. In den Wolken kondensiert dann der Wasserdampf und fällt als Regen herab. Das Bild ignoriert allerdings die Rolle der Vegetation und insbesondere der Bäume, die wie Fontänen wirken: Ihre Wurzeln nehmen Wasser aus dem Boden für die Fotosynthese auf, und winzige Poren in den Blättern dunsten ungenutzte Flüssigkeit als Dampf aus. Dieses pflanzliche Äquivalent zum Schwitzen nennen Forscher Transpiration. Ein einziger ausgewachsener Baum kann so hunderte Liter Wasser pro Tag emittieren. Weil das Laub eine große Oberfläche für den Austausch bietet, gibt ein Wald oft mehr Feuchtigkeit an die Luft ab als ein Gewässer gleicher Grundfläche.

Anfangs haben Wissenschaftler die Bedeutung des pflanzlichen Wasserkreislaufs unterschätzt. Erst als der

brasilianische Meteorologe Eneas Salati 1979 untersuchte, aus welchen Isotopen sich das Regenwasser aus dem Amazonasbecken zusammensetzt, gewann die Theorie an Popularität. Denn von Pflanzen recyceltes Wasser enthält mehr Moleküle mit dem schweren Sauerstoff-18-Isotop als solches, das aus dem Ozean verdunstet ist. Tatsächlich stammen Salatis Ergebnisse zufolge die Hälfte des Niederschlags über dem Amazonasbecken von der Transpiration des Walds.

Zur gleichen Zeit verfolgten Meteorologen einen atmosphärischen Strom über dem Amazonasgebiet, der in einer Höhe von rund 1,5 Kilometern weht. Der südamerikanische Low-Level-Jet genannte Wind fegt von Ost nach West über die Wälder hinweg und ist dabei etwa so schnell wie ein Rennrad, bevor die Anden ihn nach Süden ablenken. Salati und andere Wissenschaftler vermuteten, das Starkwindband führe einen Großteil der transpirierten Feuchtigkeit mit sich. Sie bezeichneten es daher als fliegenden Fluss. »Inzwischen geht man davon aus, dass der fliegende Fluss des Amazonas genauso viel Wasser mit sich führt wie der riesige Landfluss unter ihm«, sagt der Klimaforscher Antonio Nobre vom brasilianischen Nationalen Institut für Weltraumforschung in São José dos Campos.

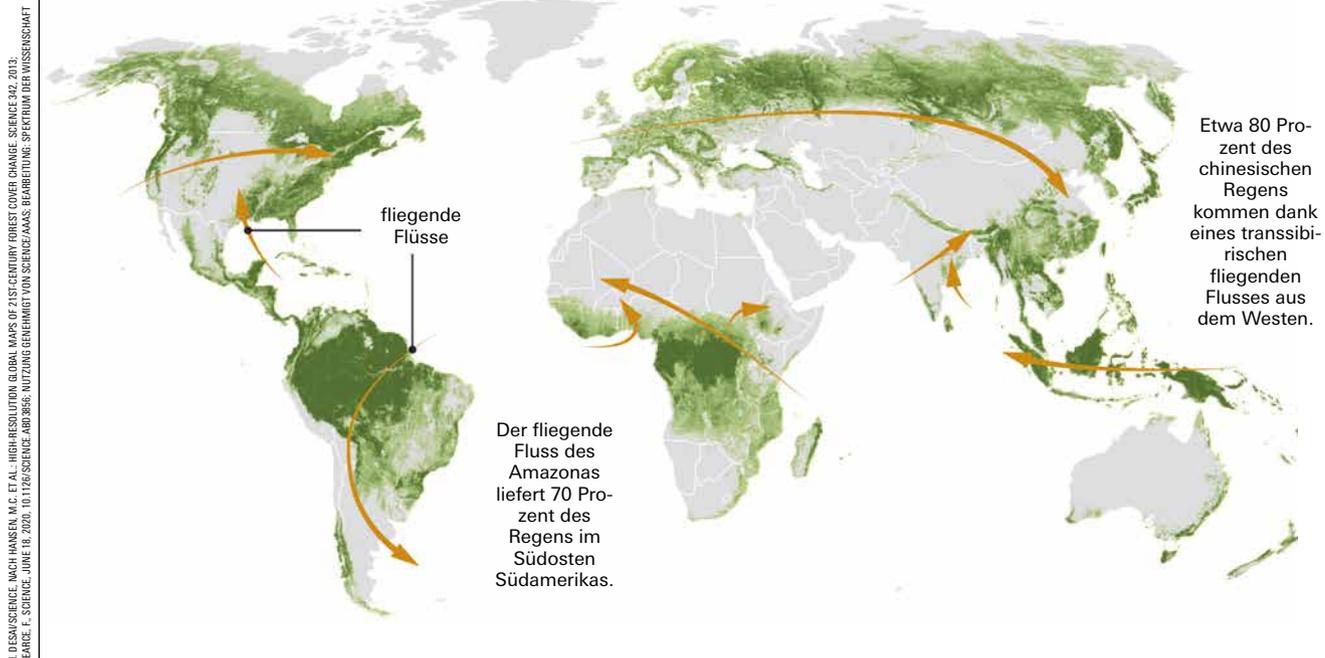
Einige Jahre lang glaubten Experten, fliegende Flüsse seien auf den Amazonas beschränkt. Das änderte sich in den 1990er Jahren, als der Hydrologe Hubert Savenije an der Technischen Universität Delft begann, sich mit dem Feuchtigkeitsrecycling in Westafrika zu beschäftigen. Er entwickelte ein Modell, das auf Wetterdaten basierte, um den Wasserkreislauf der Region zu beschreiben. Wie er dabei feststellte, steigt der Anteil des Niederschlags, der aus den Wäldern stammt, mit zunehmender Entfernung von der Küste ins Landesinnere. Dort beträgt er sogar 90 Prozent! Mit dem Ergebnis lässt sich erklären, warum die Sahelzone im Landesinneren in den letzten Jahrzehnten immer trockener wurde: In dieser Zeit verschwanden nämlich die für das Wetter so wichtigen Küstenwälder.

Einer von Savenijes Studenten, Ruud van der Ent, entwickelte die Idee weiter und schuf ein globales Modell, das den weltweiten Feuchtigkeitsfluss in der Luft simuliert. Dazu kombinierte er Beobachtungsdaten über Niederschlag, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Temperatur mit theoretischen Schätzungen der Verdunstung und Transpiration. Das erlaubte ihm erstmals eine Simulation zu erstellen, die auf einem wesentlich größeren Maßstab als gewöhnliche Flusslängen operiert.

2010 veröffentlichten van der Ent und seine Kollegen die Resultate ihres Modells: Weltweit stammen etwa 40 Prozent aller Niederschläge von transpirierenden Pflanzen – häufig ist der Anteil sogar noch höher. Der fliegende Fluss des Amazonas liefert beispielsweise 70 Prozent des Niederschlags im Río-de-la-Plata-Becken, das sich über den Südosten Südamerikas erstreckt. Am erstaunlichsten ist aber wohl, dass 80 Prozent des Regens in China aus dem Westen stammt, hauptsächlich von der atlantischen Feuchtigkeit, die von den borealen Wäldern Skandinaviens und Russlands recycelt wird. Die Reise des Wassers besteht aus mehreren Etappen. Bäume transpirieren, Wind treibt die dadurch entstehenden Wolken an, es regnet, andere Bäu-

Aufziehender Regen

So genannte fliegende Flüsse sind Winde, die den emittierten Wasserdampf von Bäumen aufnehmen und Regen in entfernte Regionen leiten. Einer umstrittenen Theorie zufolge erzeugen die Wälder diese Winde.



me transpirieren erneut und so weiter. Der gesamte Prozess dauert sechs Monate oder länger. »Die Theorie widersprach den Kenntnissen, die man in der Schule lernt«, sagt van der Ent. »China liegt an einem Ozean, dem Pazifik, und dennoch kommt der größte Teil seines Niederschlags von weit entfernten Regionen im Westen.«

Ökologen an einem Ort voller Kernphysiker

Sollte Makarieva Recht haben, liefern Wälder nicht nur die Feuchtigkeit, sondern sie erzeugen zusätzlich die Winde, die sie transportieren. Vor 25 Jahren begann sie die Zusammenarbeit mit dem 2019 verstorbenen Gorschkow, zunächst als seine Studentin am Institut für Kernphysik in Sankt Petersburg. Die beiden Wissenschaftler waren von Anfang an Außenseiter: Sie studierten Ökologie an einem Ort voller Physiker, die Neutronenstrahlen aus Kernreaktoren verwenden, um Materialien zu untersuchen. Als Theoretiker, erinnert sich Makarieva, genossen sie eine außergewöhnliche Freiheit der Forschung und des Denkens, bei der sie der Atmosphärenphysik folgen konnten, wohin diese sie auch führte.

2007 veröffentlichten die Forscher erstmals ihre Idee der biotischen Pumpe. Das Modell provozierte von Anfang an, weil es einem langjährigen Grundsatz der Meteorologie widerspricht, wonach unterschiedliche Temperaturen in der Atmosphäre weitgehend für Winde verantwortlich sind. Wenn warme Luft aufsteigt, senkt sie den Luftdruck unter

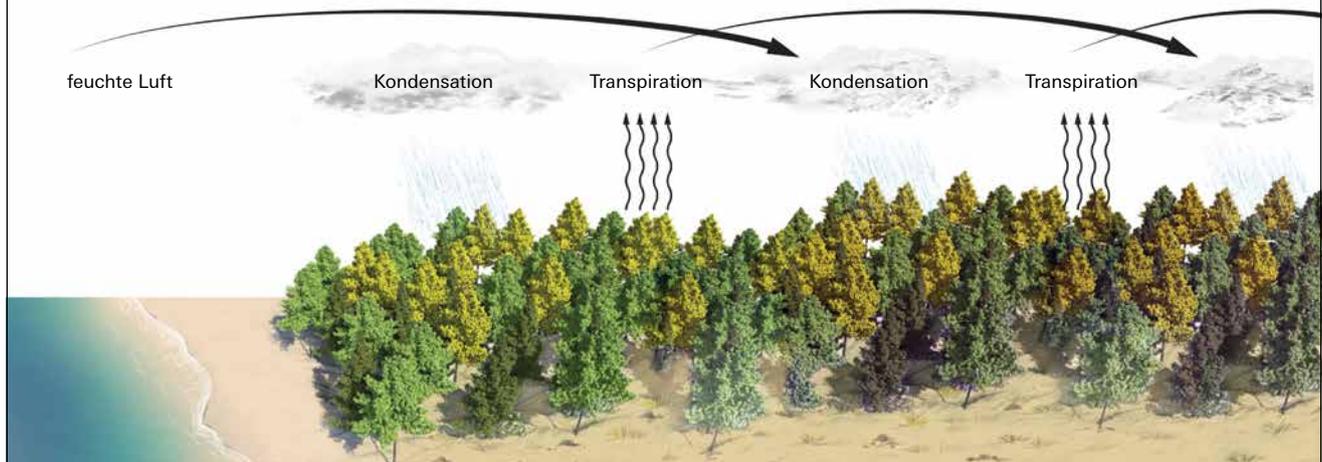
sich ab, wodurch Luft von der umgebenden Erdoberfläche einströmen kann. Im Sommer heizt sich das Land beispielsweise schneller auf und zieht feuchte Brisen aus dem kühleren Ozean an.

Doch Makarieva und Gorschkow sind überzeugt, dass manchmal ein zweiter Prozess dominiert. Kondensiert Wasserdampf aus Wäldern zu Wolken, wird das Gas zu einer Flüssigkeit, die weniger Volumen einnimmt. Dadurch verringert sich der Druck, und Luft wird horizontal aus Gebieten mit weniger Kondensation angesaugt. Das heißt, das verdampfende Wasser über küstennahen Wäldern verstärkt die Meeresbrisen, indem es die feuchte Luft ins Landesinnere saugt. Dort kondensiert sie und fällt schließlich als Regen herab. Wenn sich die Wälder innerhalb eines Kontinents fortsetzen, kann der Kreislauf weitergehen, wodurch sich feuchte Winde über Tausende von Kilometern ausbreiten. Damit widerspricht die neue Theorie dem traditionellen Bild: Nicht die atmosphärische Zirkulation treibt den Wasserkreislauf an, sondern der Wasserkreislauf die bewegten Luftmassen.

Sheil, der vor mehr als einem Jahrzehnt zu einem Befürworter der biotischen Pumpe wurde, betrachtet sie als Ergänzung des fliegenden Flusses. »Die Modelle schließen sich nicht gegenseitig aus«, erläutert er. »Die Pumpe erklärt die Kraft der Flüsse.« Ihm zufolge könnte Makarievas Theorie das so genannte Kalte-Amazonas-Paradoxon auflösen: Von Januar bis Juni, wenn das Amazonasbecken kälter ist als der Ozean, wehen starke Winde vom Atlantik in die Wälder – das

Den Wind säen

Die Theorie der biotischen Pumpe geht davon aus, dass Wälder nicht nur Regen, sondern auch Wind produzieren. Wenn Wasserdampf über Küstenwäldern kondensiert, senkt er den Luftdruck ab und bildet Winde, die feuchte Meeresluft ansaugen. Zyklen von Transpiration und Kondensation führen zu Winden, die Regen über Tausende von Kilometern ins Landesinnere befördern.



N. DESAI/SCIENCE. IMAGI HANSEN, M.C. ET AL. - HIGH-RESOLUTION GLOBAL MAPS OF 21ST-CENTURY FOREST COVER CHANGE. SCIENCE 342, 2013; PONDIC, F. SCIENCE, JUNE 16, 2010. ILLUSTRIERUNG: NUTZUNG GEMEINER VON SCIENCE/AGASS; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ist das Gegenteil von dem, was man erwarten würde, führte man den Effekt auf die gewöhnliche Thermik zurück, ohne den Einfluss von Pflanzen oder Wäldern zu berücksichtigen.

Selbst wenn viele Wissenschaftler die biotische Pumpe anzweifeln, so sind sie sich doch einig, dass der Waldverlust weit reichende klimatische Folgen haben kann. Denn höchstwahrscheinlich sind Rodungen vor Tausenden von Jahren dafür verantwortlich, dass sich im australischen Outback und in Westafrika riesige Wüsten ausgebildet haben. Künftige Entwaldungen könnten weitere Regionen austrocknen, zum Beispiel, falls man weiterhin Teile des Amazonasregenswalds in Savanne umwandelt. Unter anderem sind die ländlichen Regionen Chinas, die afrikanische Sahelzone und die argentinische Pampa gefährdet, so der Atmosphärenchemiker Patrick Keys von der Colorado State University in Fort Collins.

Keys und seine Kollegen verwendeten 2018 ein Modell, ähnlich dem von van der Ent, um zu ergründen, woher die Niederschläge in 29 weltweit verstreuten Megastädten stammen. Wie die Forscher herausfanden, hängt die Wasserversorgung von 19 der untersuchten Metropolen stark von weit entfernten Wäldern ab, darunter Karatschi in Pakistan, Wuhan und Schanghai in China sowie Neu-Delhi und Kalkutta in Indien. »Selbst kleine Veränderungen der Niederschläge, die sich aus modifizierter Landnutzung ergeben, könnten sich drastisch auf die empfindlichen städtischen Wasserversorgungen auswirken«, erklärt Keys.

Einige Modelle legen sogar nahe, Entwaldung könnte das Wetter jenseits der Pfade fliegender Flüsse verändern. Ähnlich wie bei El Niño, bei dem veränderte Strömungen und Winde im tropischen Pazifik das Wetter in weit entfernten Gebieten beeinflussen, könnte die Abholzung des

Amazonasgebiets die Niederschläge im Mittleren Westen der USA und die Schneedecke in der Sierra Nevada verringern, warnt der Klimatologe Roni Avissar von der Miami University, der solche Phänomene modelliert.

Daher dürfe man sich nicht bloß auf die atmosphärischen Flüsse selbst konzentrieren, um sie zu schützen, gibt Lan Wang-Erlandsson zu bedenken, die an der Universität Stockholm untersucht, wie Land, Wasser und Klima miteinander wechselwirken. »Wir brauchen neue internationale hydrologische Abkommen, um die Wälder der entsprechenden Quellregionen zu erhalten«, argumentiert sie.

40 Prozent des Regens in Äthiopien stammt aus den Wäldern des Kongo

Bei einer Sitzung des Waldforums der Vereinten Nationen präsentierte der Landforscher David Ellison von der Universität Bern 2018 eine Studie, wonach bis zu 40 Prozent der gesamten Niederschläge im äthiopischen Hochland, der Hauptquelle des Nils, durch die Feuchtigkeit aus den Wäldern des Kongobeckens entstehen. Ägypten, Sudan und Äthiopien verhandeln schon lange über eine längst überfällige Vereinbarung, um das Nilwasser gemeinsam zu nutzen. Ein solches Abkommen wäre jedoch wertlos, wenn das weit entfernte Kongobecken weiter abgeholzt wird und die Feuchtigkeitsquelle austrocknet, erklärte Ellison. »Viele haben das Zusammenspiel zwischen Wäldern und Wasser fast völlig ignoriert.«

Sollte die Theorie der biotischen Pumpe wahr sein, ist der Einfluss der Bäume sogar noch größer. Denn ihr zufolge verändert der Waldverlust nicht nur Feuchtigkeitsquellen, sondern auch Windmuster. Demnach hätten Wälder »entscheidende Auswirkungen auf die planetarischen Luftzirkulation«.

lationsmuster«, sagt Ellison, insbesondere auf solche, die feuchte Luft in kontinentale Innenräume bringen.

Bisher bilden die Befürworter der biotischen Pumpe eine Minderheit unter den Wissenschaftlern. 2010 reichten Makarieva, Gorschkow, Sheil, Nobre und der Ökologe Bai-Lian Li von der University of California in Riverside bei der bedeutenden Fachzeitschrift »Atmospheric Chemistry and Physics« erstmals eine Beschreibung der biotischen Pumpe ein. Unter dem Titel »Where do winds come from?« erntete die Arbeit online eine Flut von Kritik. Es dauerte viele Monate, bis das Journal zwei Wissenschaftler fand, die sich bereit erklärten, sie zu begutachten.

Der Meteorologe Isaac Held vom Geophysical Fluid Dynamics Laboratory der Princeton University meldete sich schließlich freiwillig – und empfahl, den Beitrag abzulehnen. »Das ist kein unbekannter Effekt«, sagt er. »Er ist klein und in einigen atmosphärischen Modellen enthalten.« Kritiker behaupten, die Ausdehnung der Luft, die durch die Wärme entsteht, wenn Wasserdampf kondensiert, wirke dem raumbildenden Effekt der Kondensation entgegen. Aber Makarieva entgegnet, beide Phänomene fänden örtlich getrennt statt: Der Wärmeeffekt hoch oben und der Druckabfall der Kondensation näher an der Oberfläche, wo er den biotischen Wind erzeugt.

Die zweite Gutachterin war Judith Curry, damals Atmosphärenphysikerin am Georgia Institute of Technology, die seit Langem die atmosphärische Dynamik anzweifelt, die man in den meisten Klimamodellen verwendet. Sie hielt es für wichtig, die Arbeit zu veröffentlichen. Ihrer Meinung nach brauche die Klimawissenschaft dringend den Einfluss von theoretischen Physikern.

Nach dreijährigen Diskussionen, in denen sich die Gutachter nicht einigen konnten, setzte sich der Herausgeber der Zeitschrift über die Empfehlung von Held hinweg und veröffentlichte den Aufsatz mit der Begründung, es handle sich dadurch nicht um eine Befürwortung – vielmehr fordere man eine Fortsetzung des wissenschaftlichen Dialogs über die kontroverse Theorie.

Bis heute ist die biotische Pumpe weder bestätigt noch widerlegt. Der Klimamodellierer Gavin Schmidt von der Columbia University hält sie immer noch für Unsinn. Die Antwort von Makarieva und Gorschkow auf die Kritik sei reine Mathematik gewesen, die niemandem das Vertrauen gab, es habe irgendeinen Sinn, den Dialog fortzusetzen. Jose Marengo, ein Meteorologe in Brasilien und Leiter des Nationalen Zentrums zur Überwachung und Warnung vor Naturkatastrophen, sieht das anders: »Ich glaube, die Pumpe existiert. Die Russen sind die besten Theoretiker der Welt, deshalb brauchen wir richtige Feldversuche, um sie zu testen.« Allerdings hat bisher noch niemand klar vorge schlagen, wie ein solcher Test aussehen könnte.

Makarieva lässt sich von der Kritik nicht von ihrem Weg abbringen und entwickelt ihre Theorie weiter. In einer Reihe neuer Arbeiten argumentiert sie, die biotische Pumpe könne auch tropische Wirbelstürme beeinflussen. Demnach könnten Wälder an Land Druckunterschiede erzeugen, die feuchtigkeitsreiche Luft aus ihnen absaugen. Das könnte erklären, warum sich im Südatlantik selten solche Stürme bilden: Der Amazonas- und der Kongo-Regenwald zwi-

schen ihnen ziehen so viel Feuchtigkeit ab, dass zu wenig übrig bleibt, um Hurrikane zu schüren.

Dem führenden Hurrikan-Forscher Kerry Emanuel vom Massachusetts Institute of Technology zufolge sind die Auswirkungen zwar nicht zu vernachlässigen, jedoch sehr gering. Er zieht andere Erklärungen für das Fehlen von Hurrikanen im Südatlantik vor, etwa das kühle Wasser der Region, das weniger Feuchtigkeit an die Luft abgibt, sowie die starken Scherwinde, welche die Bildung der Wirbelstürme stören. Makarieva sieht das nicht so und entgegnet, einige der bestehenden Theorien zur Hurrikanintensität stünden mit den Gesetzen der Thermodynamik in Konflikt. Sie hat einen weiteren Aufsatz zu dem Thema als Preprint vorab veröffentlicht, der momentan begutachtet wird. »Unsere Arbeit könnte trotz der Ermutigung durch den Herausgeber erneut abgelehnt werden«, befürchtet Makarieva.

»Die Wissenschaft schreitet mit einer Beerdigung nach der anderen voran«

Selbst wenn ihre Ideen im Westen auf Widerstand stoßen, schlagen sie in Russland Wurzeln. 2019 startete die Regierung einen öffentlichen Dialog, um die Forstgesetze zu überarbeiten. Abgesehen von streng geschützten Gebieten sind die russischen Wälder für die kommerzielle Nutzung offen, aber die Regierung und die Bundesforstverwaltung erwägen nun eine neue Bezeichnung des »Klimaschutzwalds«. Die Russische Akademie der Wissenschaften unterstützt diese Idee. Makarieva meint, es tue gut, Teil eines Konsenses zu sein und nicht der ewige Außenseiter.

Wegen der Coronavirus-Epidemie musste die Forscherin im Sommer 2020 auf ihre jährliche Reise in die nördlichen Wälder verzichten. Sie nutzte die Zeit, um von Sankt Petersburg aus auf Einwände anonymer Gutachter gegen ihre Arbeit zu reagieren. Sie ist überzeugt davon, dass ihre Theorie sich letztlich durchsetzen werde. »Es gibt eine natürliche Trägheit in der Wissenschaft«, sagt sie. Sie beruft sich dabei auf die Worte des legendären deutschen Physikers Max Planck, der einmal bemerkt haben soll, die Wissenschaft schreite mit einer Beerdigung nach der anderen voran. ◀

QUELLEN

Keys, P.W. et al.: Megacity precipitation sheds reveal tele-connected water security challenges. *PLoS One* 13, 2018

Makarieva, A. M., Gorschkov, V. G.: Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union* 11, 2007

Makarieva, A. M., et al.: Where do winds come from? *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 2013

Van der Ent, Rudi J., et al.: Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water resources research* 46, 2010

© **American Association for the Advancement of Science**
www.sciencemag.org

Pearce, F.: A controversial Russian theory claims forests don't just make rain – they make wind. *Science*, June 18, 2020, 10.1126/science.abd3856; Übersetzung genehmigt von AAAS. Dies ist keine offizielle Übersetzung durch Mitarbeiter von AAAS. In wichtigen Angelegenheiten verweisen wir auf die offizielle englischsprachige Version, die ursprünglich von AAAS veröffentlicht wurde.



VULKANFORSCHUNG AUF DEM WEG ZUR ERUPTIONS- VORHERSAGE

Mit Seismografen, Satellitendaten und künstlicher Intelligenz wollen Wissenschaftler Vulkane besser verstehen, um Ausbrüche künftig punktgenau vorhersagen zu können. Immerhin werden die Prognosen stetig besser.

Jane Palmer lebt als freie Autorin in Colorado.

» spektrum.de/artikel/1795031



Die indonesische Vulkaninsel Anak Krakatau, was so viel bedeutet wie »Kind des Krakatau«, wächst seit 1927 als derzeit aktiver Schlot des Vulkans Krakatau aus dem Meer. Beim Ausbruch am 22. Dezember stürzte ein Teil der Insel ins Wasser, was einen katastrophalen Tsunami auslöste. Das Bild entstand vor dem Kollaps.

Der Kollaps der indonesischen Vulkaninsel Anak Krakatau begann schleichend. Anfang 2018 rutschten an der Süd- und Südwestseite die Flanken des aktiven Schlots des Vulkans Krakatau mit einer Geschwindigkeit von etwa vier Millimetern pro Monat ins Meer, ohne dass jemand davon Notiz nahm. Im Juni des Jahres fing der Feuerberg dann an, für alle Welt sichtbar zu rumoren. Während einer Serie kleinerer Eruptionen spuckte er glühende Asche und Gesteinsbrocken gen Himmel, und seine Temperatur stieg deutlich. Satelliten zeichneten eine Wärmestrahlung von 146 Megawatt auf – das ist mehr als das 100-Fache des normalen Werts. Mit der erhöhten Aktivität nahm auch das Abrutschen auf zehn Millimeter pro Monat zu.

Am 22. Dezember 2018 stürzte schließlich die Südflanke ins Meer und löste einen Tsunami aus, bei dem mindestens 430 Menschen an den benachbarten Küsten Javas und Sumatras starben. Niemand hatte diese Katastrophe vorhergesehen. Allerdings kam eine 2019 veröffentlichte Studie zu dem Ergebnis, dass Instrumente am Boden und auf Satelliten eine Reihe von Signalen empfangen hatten, die dem Kollaps vorangegangen waren. In Radardaten erkannten Forscher etwa die geringfügigen Verschiebungen des Vulkans. Solche Anzeichen könnten künftig dazu dienen, ähnliche Ereignisse vorherzusagen.

Der überraschende Kollaps von Anak Krakatau offenbarte, welche Herausforderungen auf die Wissenschaftler warten, wenn sie nicht nur einen, sondern Tausende potenziell gefährlicher Vulkane weltweit überwachen wollen. Verschiedene Entwicklungen auf dem Gebiet der Vulkanologie machen jedoch Hoffnung, dass die Prognosen katastrophaler Ausbrüche in Zukunft deutlich zuverlässiger werden. Eine Flut von Satellitendaten erlaubte es etwa jüngst, fast unmerkliche Bewegungen der Feuerberge festzustellen. Sensoren am Boden erkennen zusätzlich, wie Magma in großen Tiefen wandert, und auf Drohnen installierte Messgeräte können beim Flug über brodelnden Vulkanen verräterische Gase aufspüren. Auch die theoretischen Erkenntnisse haben merklich zugenommen. Das liegt daran, dass die Forscher auf Basis der gewonnenen Daten Computermodelle entwickelt haben,

die Auskunft über die Vorgänge im Inneren von Vulkan-Systemen geben. Mittlerweile versuchen sie mit künstlicher Intelligenz (KI) in den Datenbergen subtile Muster zu identifizieren, die schon Monate vor dem tatsächlichen Ausbruch Hinweise auf die bevorstehende Entwicklung geben können.

Für viele Experten begann die moderne Vulkanologie am 18. Mai 1980 mit der größten Vulkankatastrophe in der Geschichte der Vereinigten Staaten, dem Ausbruch des Mount St. Helens. Das Ereignis nahm mit dem umfangreichsten dokumentierten Erdbeben seinen Lauf und forderte 57 Menschenleben. Asche deckte einen großen Teil des US-Bundesstaats Washington sowie seiner Nachbarstaaten zu und führte in der Region zu einem mehrtägigen Stillstand. Bereits in den Monaten vor der Explosion waren Wissenschaftler zu dem Vulkan geströmt und hatten sein Verhalten genau beobachtet. »Es handelte sich um den ersten bedeutenden Vulkanausbruch, der durch moderne wissenschaftliche Instrumente erfasst wurde«, konstatiert Seth Moran, leitender Wissenschaftler am Cascades Volcano Observatory des US Geological Survey (USGS) in Vancouver, Washington. »Daher wurde er weltweit in vielerlei Hinsicht zum Maßstab für einen neuen Blick auf Vulkane.«

Goldenes Zeitalter der Vulkanologie

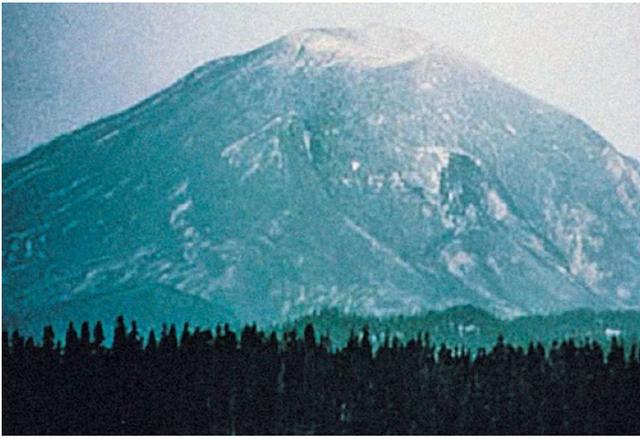
Fortan erfuhr das Forschungsgebiet eine gewaltige Aufstockung an Finanzmitteln und Personal, was den Weg für rasche Erkenntnisgewinne ebnete. Inzwischen hat die Zahl an Überwachungsdaten von Boden- und Satelliteninstrumenten deutlich zugenommen. Computer sind viel leistungsfähiger geworden und ihre Analysen erheblich besser. Die Entwicklung hat das Verständnis der Wissenschaftler von Vulkansystemen revolutioniert. »Ich glaube, im Rückblick wird man diese Epoche als goldenes Zeitalter der physikalischen Vulkanologie ansehen«, meint Christopher Kilburn vom University College London. Das nächste Ziel der Forscher lautet nun, die Wahrscheinlichkeit eines Ausbruchs innerhalb eines konkreten Zeitraums zu prognostizieren – ähnlich wie Meteorologen die Niederschlagswahrscheinlichkeit für einen bestimmten Tag vorhersagen.

Beim Mount St. Helens gab eine Serie kleinerer Erdbeben, die am 15. März 1980 begann, erste Hinweise auf eine drohende Explosion. Rund eine Woche später sprengten Dampfexplosionen die Eiskappe am Gipfel des Vulkans und hinterließen einen Krater, der innerhalb weniger Tage einen Durchmesser von 400 Metern erreichte. Forschungsteams vom USGS und anderen Institutionen trafen ein, um den Berg zu überwachen. Flugzeuge flogen über den rauchenden Krater und maßen die austretenden Gasmengen. Seismometer verzeichneten Erschütterungen im Magma, also der unter der Erdoberfläche wandernden Gesteinschmelze. Experten erklimmen die Berghänge, um die sich wölbende Nordflanke mit Maßbändern und Lasergeräten zu vermessen. Eindeutig stieg Magma im Vulkan nach oben und drückte gegen den Hang.

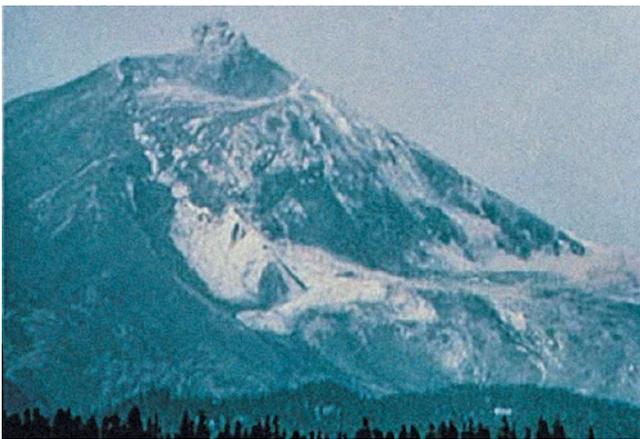
Die Forscher warnten zwar, dass eine größere Eruption bevorstünde. Von dem, was dann geschah, wurden sie allerdings überrumpelt: Am 18. Mai 1980 um 8.32 Uhr stürzte eine gewaltige Erdlawine den Berghang hinab. Sie

AUF EINEN BLICK REVOLUTION DER VULKANOLOGIE

- 1 Vor 40 Jahren brach der Mount St. Helens im US-Bundesstaat Washington, USA, aus – 57 Menschen starben. Der Vulkanforschung verlieh das Ereignis einen enormen Schub.
- 2 Heutzutage werden Messungen von Bodeninstrumenten sowie Aufzeichnungen von Satelliten und Drohnen mit KI-Anwendungen analysiert, um Anzeichen für bevorstehende Ausbrüche zu finden.
- 3 Ziel der Forscher ist es, irgendwann Prognosen für Eruptionen ähnlich einer Wettervorhersage zu erstellen.



Am 18. Mai 1980 riss ein gigantischer Erdbeben – der größte, der jemals dokumentiert wurde – die Nordflanke des Mount St. Helens mit sich und löste eine Eruption aus.



USGS: PALMER, J.: THE VOLCANOLOGY REVOLUTION. NATURE 591, 2020

riss den schnee- und eisbedeckten Gipfel mit sich. Die Druckentlastung entkorkte sozusagen den Vulkan, eine wuchtige Explosion war die Folge. Steine, Asche, Gas und Dampf wurden mit Überschallgeschwindigkeit herausgeschleudert und zogen bis zu 25 Kilometer nach Norden. »Wir lernten aus der Eruption vom 18. Mai, wie instabil Vulkane mit steilen Hängen sind, wie sie in sich zusammenbrechen und dabei eine starke seitliche Druckwelle erzeugen können«, sagt der Geologe Don Swanson vom Hawaiian Volcano Observatory des USGS, der die Eruption 1980 beobachtete. »Was jetzt so offensichtlich erscheint, war damals nicht selbstverständlich.«

Nach der Eruption fanden Wissenschaftler in der Umgebung des Mount St. Helens zahlreiche Hügel, die als komplette Gesteinsblöcke hangabwärts gerutscht waren. Derartige Formen sind an vielen Stellen der Erde in der Nähe von Vulkanen anzutreffen. Anhand historischer Aufzeichnungen ermittelten die Forscher rund 1000 vergleichbare Erdbeben an mehr als 550 Feuerbergen. »Große Vulkane wachsen nicht nur an, sondern sie brechen auch in sich zusammen«, erklärt Thomas Walter vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam.

Die Eruption des Mount St. Helens erteilte weitere Lektionen: etwa über die tödliche Wirkung von heißer Asche und heißem Gas, die den Berg mit Orkangeschwindigkeit herabrasen, oder über die Kraft von Schlammlawinen, die alles auf ihrem Weg zerstören. Der Ausbruch setzte außerdem eine enorme Entwicklung der Vulkanologie in Gang. Innerhalb von zehn Jahren baute der USGS Vulkanobservatorien im Nordwesten der USA, auf Hawaii und in Alaska auf. Das Vulkangefahrenprogramm des USGS ist heutzutage finanziell fast zehnmal so gut ausgestattet wie vor dem Ausbruch des Mount St. Helens.

Nachdem fünf Jahre später, 1985, eine Schlammlawine nach einer Eruption in Kolumbien 23000 Todesopfer gefordert hatte, richtete der USGS das Volcano Disaster Assistance Program (VDAP) ein, um anderen Ländern bei der Vorbereitung auf vulkanische Krisensituationen zu helfen. Bereits 1991 konnte die Initiative ihren Wert unter Beweis stellen: Forscher des USGS kamen in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der Philippinen zu dem Schluss, dass vom Pinatubo eine akute Gefahr ausgehe, und sprachen eine Warnung aus. Zehntausende Menschen konnten aus der Region evakuiert werden, bevor es am 15. Juni 1991 schließlich zu einer gewaltigen Eruption kam.

Ausbrüche wie die des Mount St. Helens oder des Pinatubo lieferten den Wissenschaftlern wichtige Erkenntnisse. In der Regel sind seismische Erschütterungen die ersten Anzeichen für das »Erwachen« eines Vulkans. Denn schon bevor Magma an die Oberfläche dringt und es zu sichtbaren Eruptionen kommt, kann die aufsteigende Gesteinsschmelze Erdbeben auslösen. Zusätzlich bläht die Magmabewegung mitunter den Berg vor seinem Ausbruch auf, wie beim Mount St. Helens geschehen. Aus diesen Gründen überwachen mittlerweile nicht nur seismische Netzwerke Dutzende der weltweit gefährlichsten Vulkane, sondern auch GPS-Empfänger sowie in jüngster Zeit satellitengestütztes Radar. Diese Techniken zeichnen ihre Bewegungen permanent auf.

Noch bevor sicht- oder fühlbare Warnsignale auftreten, können wachsende Kohlendioxidkonzentrationen im Krater oder in Schloten nahendes Unheil ankündigen. Denn im Magma sind Gase gelöst, die aufsteigen und austreten, sobald die Gesteinsschmelze nach oben wandert und somit der Umgebungsdruck nachlässt. Da Kohlendioxid eines der am schlechtesten löslichen vulkanischen Gase ist, entweicht es schon dann, wenn sich das Magma noch vergleichsweise tief unter der Erde befindet. »Im Prinzip bekommt man bei einer Eruption ein Gassignal, lange bevor das Magma die Oberfläche erreicht«, sagt der auf vulkanische Gase spezialisierte Geochemiker Alessandro Aiuppa von der Universität Palermo, Italien.

Früher mussten die Wissenschaftler Gasproben in der Nähe der Krater oder Schloten sammeln, was ein gefährliches Unterfangen war und lediglich Informationshappen lieferte. Im Jahr 2005 entwickelten italienische Forscher dann ein schuhkartongroßes Instrument zur Spurengasanalyse. Mit diesem Apparat lassen sich schon sehr geringe Konzentrationen der fünf wichtigsten Gase messen, die von Vulkanen ausgestoßen werden. Heutzutage werden solche Messgeräte in der Nähe von Schloten installiert und auf Drohnen montiert, die anschließend über aktive Krater fliegen. »Das war eine wirkliche Revolution bei der Erforschung der Vulkangase«, schwärmt Aiuppa. »Man sieht nun im Sekundentakt und in Echtzeit auf dem Computer deren Zusammensetzung.«

Als der Stromboli explodierte

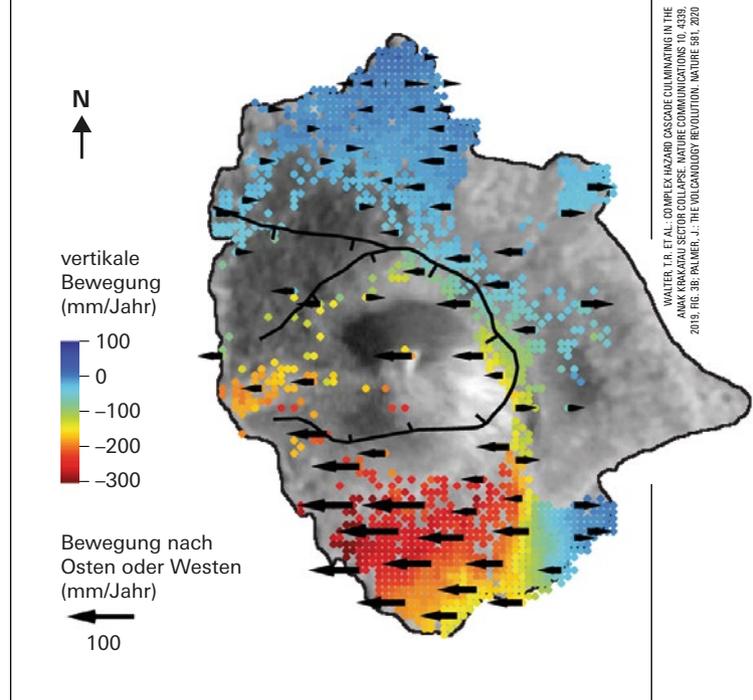
Die Multi-Gas-Instrumente erprobten italienische Wissenschaftler etwa beim Ausbruch des Stromboli vor der Nordküste Siziliens. Im Jahr 2005 hatten sie dort einige Exemplare neben Kameras und Spektrometern installiert und fortan Gasdaten gesammelt. Am 27. Februar 2007 begann dann eine so genannte effusive Eruption, bei der Lava mehr oder minder ruhig herausquillt. Die Forscher beobachteten im Anschluss rund zwei Wochen lang eine Verzehnfachung der Kohlendioxidwerte, bevor der Stromboli am 15. März 2007 explosiv ausbrach. Mit Hilfe der Daten konnten sie modellieren, wie sich dieser komplexe Vulkan verhält. Demnach gehen Explosionen von einer in sieben bis zehn Kilometer Tiefe unter dem Gipfel gelegenen Magmakammer aus. Den Forschern zufolge nimmt die Wahrscheinlichkeit einer explosiven Eruption zu, wenn die Kohlendioxidemissionen 2000 Tonnen pro Tag übersteigen.

Im August 2019 floss aus dem Stromboli erneut Lava aus. In den darauf folgenden zwei Wochen stellten die Italiener wie 2007 eine allmähliche Zunahme des Kohlendioxidausstoßes fest. »Also wussten wir, dass etwas passieren würde«, sagt Aiuppa. Die Wissenschaftler wurden wachsamer und erfassten nun auch leichteste Veränderungen der Hangneigung. Am 28. August 2019 waren sie schließlich sicher, dass eine Explosion kurz bevorstand. Sie alarmierten die örtlichen Behörden – und schon wenig später kam es zum Ausbruch.

Neben Gasen können auch niederfrequente Schallwellen, die einige Vulkane kurz vor einer Eruption aussenden, auf einen bevorstehenden Ausbruch hindeuten. Im Jahr 2008 installierten italienische Wissenschaftler ein entspre-

Insel in Bewegung

Satellitenradardaten offenbaren, wie sich die Bodenoberfläche der Vulkaninsel Anak Krakatau in den zwölf Monaten vor der Eruption am 22. Dezember 2018 verschob. Der Südwestteil der Insel kollabierte im Verlauf der Eruption, was einen Tsunami auslöste. Solche Beobachtungen könnten helfen, Vulkanausbrüche vorherzusagen.



chendes Messsystem am Ätna auf Sizilien. Bei 59 Ausbrüchen in den folgenden acht Jahren konnten sie die Wirksamkeit der Methode prüfen: Bis auf zwei sah das System alle voraus; rund eine Stunde vor der jeweiligen Eruption hatte es jeweils einen Warnhinweis gegeben. Angesichts dieses Erfolgs schickt das System seit dem Jahr 2015 automatische Warnungen in Form von E-Mails und SMS an die Zivilschutzabteilung in Rom und an die Verwaltung der am Fuß des Vulkans gelegenen Stadt Catania.

Ursprünglich wollten Forscher mit der Schallwellenmessung eine einfache Methode entwickeln, um Eruptionen von Bergen vorherzusagen, die nicht mit Bodennessgeräten überwacht werden. Denn gegenwärtig sind Letztere an weltweit weniger als der Hälfte der aktiven Landvulkane im Einsatz. Überdies handelt es sich in vielen Fällen nur um ein paar wenige Seismometer. Gleichwohl können selbst Ausbrüche in abgelegenen Gegenden weit reichende Folgen haben – etwa die des Eyjafjallajökull auf Island 2010. Die Eruption erzeugte eine Aschewolke, die den Flugverkehr in ganz Europa wochenlang unterbrach. »Von Vulkanen ausgehende Risiken kennen keine Grenzen«, betont Geophysiker Maurizio Ripepe von der Universität Florenz, der dabei half, das automatische Frühwarnsystem

am Ätna einzurichten. Allerdings haben Wissenschaftler im vergangenen Jahrzehnt neue Wege gefunden, alle Vulkane weltweit mittels auf Satelliten montierter Instrumente zu überwachen. Schallwellenmessungen sind daher nicht mehr unbedingt notwendig.

Nach dem katastrophalen Tsunami im Dezember 2018 entdeckten deutsche Vulkanologen ein auffälliges Muster in NASA-Satellitendaten des Krakatau, aufgezeichnet mit dem Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, kurz MODIS, also einem bildgebenden Radiospektrometer mittlerer Auflösung. Bereits sechs Monate vor dem Ereignis, im Juni 2018, zeigten die Infrarotspektralbänder eine sprunghafte Zunahme der Wärmeemissionen. »Der gesamte Vulkan war vollkommen überhitzt, so stark wie nie zuvor seit Beginn der Aufzeichnungen«, sagt Walter. »Es handelte sich also eindeutig um ein abnormes Verhalten.«

Die Forscher zogen zusätzlich Radarbeobachtungen von Satelliten zu Rate, mit denen sich feine Bewegungen in vertikale und horizontale Richtung aufspüren lassen. So fanden sie heraus, dass die Flanke des Vulkans zunächst mit einer Geschwindigkeit von zehn Millimetern pro Monat Richtung Meer rutschte, bevor der Berg schließlich kollabierte (siehe »Insel in Bewegung«, links). Solche Beobachtungen zeigen, dass Wissenschaftler allein aus Satellitendaten die Vorboten einer Eruption oder eines Erdbebens bemerken können. »Als Vulkanologen pflegten wir immer zu sagen, wir hätten nicht ausreichend Daten zur Verfügung«, meint Michael Poland, leitender Wissenschaftler am Yellowstone Volcano Observatory des USGS in Vancouver, Washington. »Doch die Satellitendaten erweitern nun unsere Möglichkeiten, herauszufinden, was die Vulkane wirklich treiben.«

Als 2014 und 2016 die Satelliten Sentinel-1A beziehungsweise Sentinel-1B der Europäischen Weltraumorganisation ESA ins All geschossen wurden, gab das der Vulkanologie

weiteren Auftrieb. Die Flugkörper nutzen eine Radartechnik, das interferometrische SAR (Synthetic Aperture Radar), um Bewegungen in bisher nicht gekannten Auflösungen und geringen Zeitabständen zu beobachten (siehe »Das Aufblähen überwachen«, unten). »Diese Satelliten erkennen Deformationen der Bodenoberfläche im Millimeterbereich, so dass wir das Anschwellen eines Vulkans genau verfolgen können«, verrät Charles Mandeville, Programmkoordinator des Vulkangefahrenprogramms des USGS. »Derzeit wird eine Unmenge solcher Daten gesammelt.«

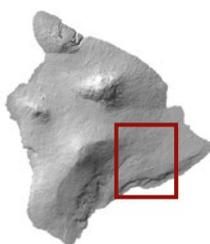
Mehrdimensionale Vorboten eines Ausbruchs

Die Radardaten wiederum kombinieren Forscher mit Satellitenaufzeichnungen von Temperatur und Schwefeldioxidemissionen, um ein mehrdimensionales Bild der Vorgänge in Vulkanen vor und während Eruptionen zu erhalten. Eine Untersuchung der 47 aktivsten Feuerberge in Südamerika anhand von Satellitendaten aus 17 Jahren zeigte, dass Veränderungen in mindestens einer dieser Variablen und manchmal in allen dreien einem Ausbruch vorangehen, manchmal über mehrere Jahre hinweg. Um die oft frei verfügbaren Daten auszuwerten, hat das Forschungsteam um Walter die Vulkanüberwachungsplattform »Monitoring Unrest from Space«, kurz MOUNTS, entwickelt. Sie verwendet Daten der aktuellen Serie von Sentinel-Satelliten sowie am Boden gewonnene Informationen über Erdbeben und überwacht derzeit 17 Vulkane, darunter auch den Krakatau.

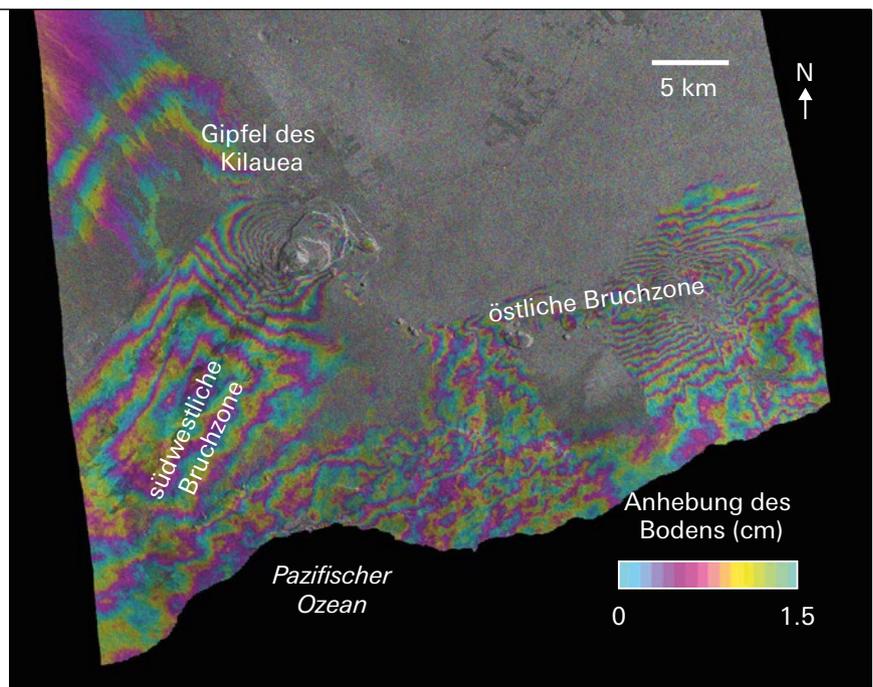
Am 10. April 2020 spie der Schlot Anak Krakatau dann eine 500 Meter hohe Aschesäule gen Himmel. Walter begann sofort damit, Satellitendaten zu analysieren, um die Lage aus der Entfernung zu bewerten. Wegen schlechter Sichtverhältnisse musste er sich auf Radardaten verlassen, die die dicke Wolken durchdringen können. Diese sahen nicht unbedingt sehr beunruhigend aus. Das indonesische Zen-

Das Aufblähen überwachen

Teile des Vulkans Kilauea auf Hawaii heben sich derzeit an, wie aus dem Farbmuster der interferometrischen Radardaten hervorgeht, die zwischen dem 4. April und dem 1. Mai 2020 aufgenommen wurden.



Insel Hawaii



MICHAEL POLAND, USGS; PALMER, J.: THE VOLCANOLOGY REVOLUTION, NATURE 581, 2020

trum für Vulkanologie und geologische Risikominderung gab daher lediglich eine Warnung der Stufe 2 heraus, was ein Ausbruchspotenzial mit begrenztem Risiko bedeutete. Walter hofft, dass die Informationen der Satelliten in Zukunft beim Aufbau eines Frühwarnsystems für Tsunamis helfen könnten, die durch Erdbeben an dem indonesischen Vulkan ausgelöst werden.

Bereits seit Beginn des Projekts mit Sentinel-1A und Sentinel-1B sehen sich die beteiligten Forscher mit ungewöhnlich großen Datenmengen konfrontiert. Die Satelliten senden stetig unzählige Messwerte, mehr, als sich mittels konventioneller Methoden analysieren lassen. »Angesichts der vielen Vulkane brauchten wir elegantere Methoden zum Umgang mit dem umfangreichen Datensatz«, sagt Walter. Die Wissenschaftler wandten sich daher Techniken des maschinellen Lernens zu. Bei dieser Form künstlicher Intelligenz (KI) können Computeralgorithmen, etwa neuronale Netze, darauf trainiert werden, selbstständig Muster in Daten zu finden.



JACQUES DESCLAITRES, MODIS RAPID RESPONSE TEAM, NASA/GSFC

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Das Team um Juliet Biggs von der englischen University of Bristol schuf ein neuronales Netz, das sich durch etwa 30000 Sentinel-1-Bilder von über 900 Vulkanen wühlte und rund 100 Aufnahmen markierte, die erhöhte Aufmerksamkeit verdienten. Von diesen zeigten 39 tatsächliche Bodenverformungen. Damit hatte das KI-System den Arbeitsaufwand für die Forscher erheblich reduziert. Jetzt testen sie ihr System an etwa einer halben Million Bilder von mehr als 1000 Vulkanen. »Man kann einfach nicht jedes Bild selbst anschauen«, sagt Poland. Maschinelles Lernen sei deshalb wirklich sinnvoll, um die gewaltigen Datenmengen zu filtern. Für die MOUNTS-Plattform haben Wissenschaftler nun auch ein neuronales Netz programmiert, das nach großen Deformationen sucht. Andere bemühen sich, Algorithmen zu entwickeln, die Temperatur- oder Gasemissionsdaten von Satelliten durchforsten können. Biggs ist zwar der Meinung, die Kombination aus Satellitendaten und KI sei ein brauchbares Werkzeug, um Risiken frühzeitig zu erkennen. Allerdings glaubt sie nicht, dass Satelliten jemals in der Nähe von Vulkanen aufgestellte Instrumente vollständig ersetzen können.

Das sehen offenbar auch andere so. In den Vereinigten Staaten werden Forscher daher schon bald über etliche zusätzliche Bodendaten verfügen. Im März 2019 verabschiedeten die USA ein Gesetz zur Finanzierung eines nationalen Vulkan-Frühwarnsystems, des National Volcano Early Warning System (NVEWS). Im Zuge dessen sollen auf 104 Vulkanen des Landes digitale Breitbandseismometer installiert werden. Zusätzlich wollen die Verantwortlichen

neue digitale Fernmessnetze mit ausreichender Bandbreite schaffen, um Daten von verschiedensten Bodensensoren zu übertragen.

In den vergangenen 40 Jahren haben Wissenschaftler zwar erfolgreich den zeitlichen Ablauf etlicher Eruptionen vorhergesagt, von kleineren Ausbrüchen am Mount St. Helens in den frühen 1980er Jahren bis hin zu aschereichen Lavafontänen am Ätna. Doch nicht immer reicht es für eine Evakuierung. Bei einer kleinen, explosiven Eruption am Ontake in Japan 2014 starben 63 Menschen, und eine heftige Eruption des Volcán de Fuego in Guatemala forderte im Juni 2018 hunderte Todesopfer. Im Jahr 2019 kostete eine kleinere Eruption auf White Island in Neuseeland 21 Menschen das Leben.

Offensichtlich stoßen Vulkanologen nach wie vor bei ihren Vorhersagen von Eruptionen an Grenzen. Trotz Daten über Gasemissionen und Bodendeformationen ist es oftmals schwierig, genaue Rückschlüsse auf Vorgänge in großen Tiefen zu ziehen. Erschwerend kommt hinzu, dass jeder Berg eine einzigartige Materialzusammensetzung und Struktur aufweist. »Wenn Vulkanologen die ersten Warnzeichen erkennen, denken sie oft, sie hätten diese schon bei vorherigen Ausbrüchen gesehen und wüssten, was passieren wird«, sagt Poland. »Aber jeder Vulkan tickt anders«, fügt er hinzu. Unser Verständnis für derartige Systeme kratze zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur an der Oberfläche.

Mit noch mehr Daten und verbesserten Erkenntnissen über Vulkansysteme hoffen die Forscher dynamische Modelle zum Erfassen physikalischer und chemischer Vorgänge unter der Erdoberfläche entwerfen zu können. Dann würde sich die Vulkanologie vielleicht ähnlich wie die Meteorologie entwickeln, die dynamische Modelle der Atmosphäre benutzt, um das Wetter auf einige Tage im Voraus vorherzusagen. »Es wäre schön, eines Tages beim Aufschlagen der Zeitung die Vulkanausbruch-Vorhersage neben der Wetterprognose zu sehen«, findet Poland.

Er persönlich hat jedoch Zweifel, dass solche Voraussagen jemals so gut sein werden wie die der Meteorologen. Dafür seien Vulkansysteme einfach zu komplex. ◀

QUELLEN

Aiuppa, A. et al.: Unusually large magmatic CO₂ gas emissions prior to a basaltic paroxysm. *Geophysical Research Letters* 37, 2010

Anantrasirichai, N. et al.: The application of convolutional neural networks to detect slow, sustained deformation in InSAR time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 2018

Reath, K. et al.: Thermal, deformation, and degassing remote sensing time series (CE 2000–2017) at the 47 most active volcanoes in Latin America: Implications for volcanic systems. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124, 2019

Ripepe, M. et al.: Infrasonic early warning system for explosive eruptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 2018

Walter, T.R. et al.: Complex hazard cascade culminating in the Anak Krakatau sector collapse. *Nature Communications* 10, 2019



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 2.900 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

LITHIUM-IONEN-AKKUS DIE ATTLAST DER ELEKTROMOBILITÄT

Sollten tatsächlich bald Millionen E-Autos unterwegs sein, fallen früher oder später auch riesige Mengen an alten Batterien an. Schon jetzt ist klar: Ihr Recycling wird eine enorme Herausforderung.



Christopher Schrader ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

» [spektrum.de/artikel/1795034](https://www.spektrum.de/artikel/1795034)

► Frisch gekürte Nobelpreisträger erzählen in Interviews oft von den Anfängen ihrer Entdeckung. Der Japaner Akira Yoshino, im Jahr 2019 mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt, sprach hingegen über das »Ende« seiner Entwicklung: Es gehe darum, ob die Lithium-Ionen-Akkus recycelt werden können, sagte er.

Seit den frühen 1990er Jahren versorgen die leistungsfähigen Energiespeicher Videokameras und Handys; damals maß man ihr Gewicht in Gramm. Inzwischen treiben zentnerschwere Exemplare Elektroautos an. Die Akkus sind ein

wesentlicher Teil der Hoffnung, den Straßenverkehr klimafreundlicher zu gestalten.

Dazu müsste man jedoch viele Bestandteile wiederverwerten, finden Nobelpreisträger Yoshino und andere Experten. Doch das effiziente Recycling der Energiespeicher ist bei Batterieentwicklern offenbar noch immer ein nachrangiges Designkriterium. Stattdessen dreht sich alles um Kosten, Leistung und Ausdauer. Diesen Missstand beobachtet Jens Peters schon lange: »Die Batteriepacks sind meist verschweißt oder verklebt und normalerweise nicht dafür gebaut, jemals wieder aufgemacht zu werden«, berichtet der Elektroingenieur. Er hat lange am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zu Energiespeichern geforscht; seit Kurzem arbeitet er an der Universidad de Alcalá im Großraum Madrid.

Auf Grund geringer Stückzahlen und langer Lebensdauer sei der Rückfluss der Batterien noch gering, sagt Peters. Zudem ist das Recycling in der Regel nicht wirtschaftlich genug, weshalb die Akkus fast ausschließlich auf Initiative der Hersteller wiederverwendet werden. Keine zukunftsfähige Lösung, findet der Fachmann. »Wenn Elektroautos irgendwann die Hälfte der Fahrzeuge ausmachen, wird es eine unüberschaubare Vielfalt an Batterien geben, die entsorgt werden müssen.« Dazu bräuchte es eine leistungsfähige Recyclingwirtschaft, die möglichst viele Inhaltsstoffe der E-Auto-Batterien wiederverwertet und nicht bloß die wertvollsten.

Das Öko-Institut in Freiburg bezeichnet das Recycling der Batterien in einer aktuellen Analyse sogar als »Stützpfeiler



AUF EINEN BLICK VORPROGRAMMIERTES MÜLLPROBLEM

- 1 Damit Elektroautos eine wirklich umweltfreundliche Alternative darstellen, müssen die Akkus, die sie antreiben, wiederverwertet werden.
- 2 Heutige Batteriepacks lassen sich aber nur schwer auseinanderbauen, geschweige denn in ihre chemischen Bestandteile auftrennen.
- 3 Der Königsweg wäre direktes Recycling, bei dem die wertvollen Komponenten erhalten bleiben. Dazu müssen die Hersteller der Akkus diesen letzten Schritt im Lebenszyklus bereits mitdenken.



Verglichen mit einem normalen Auto mit Verbrennungsmotor verfügt ein E-Mobil über deutlich weniger Bauteile, wie die 3-D-Grafik eines elektrischen SUVs mit Aufhängung, Lenksystem und Batteriepaket zeigt. Die Batteriepacks der E-Autos (rechts) bestehen aus ganz unterschiedlichen Materialien und Komponenten, die zudem verklebt oder verschweißt sind. Diese Architektur erschwert das Recycling enorm.

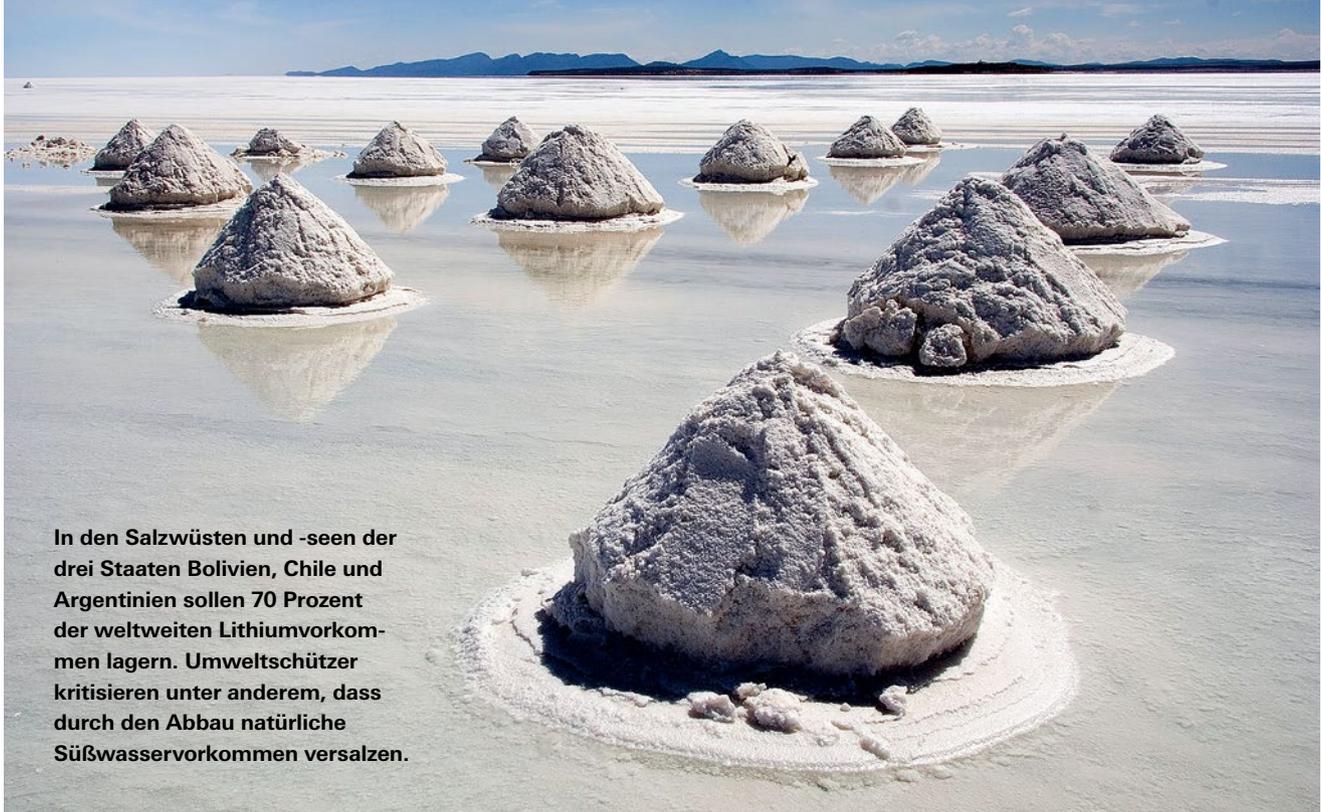


der Elektromobilität«. Insbesondere vor dem Hintergrund des »European Green Deal«, mit dem die EU-Kommission einen gemeinsamen Weg aus der Klimakrise sucht, habe die Wiederverwendung »strategische Relevanz«. Bei der gesetzlichen Regelung sind gleichwohl noch viele Fragen offen: Welche Quoten sollen für die Menge der wiederverwendeten Materialien gelten? Lassen sie sich vom Recycling der Akkus von Mobiltelefonen und Laptops ableiten? Oder müssen sie verschärft werden? Auf EU-Ebene wird momentan intensiv um entsprechende Antworten gerungen.

Vorbild ist dabei die Aufbereitung der Blei-Säure-Starterbatterien konventioneller Autos, die in Deutschland laut Umweltbundesamt derzeit zu 82 Prozent verwertet werden.

Generell gilt für Autos sogar, dass am Ende ihrer Lebenszeit mindestens 85 Prozent ihrer Masse recycelt werden müssen; Deutschland erreichte 2017 fast 90 Prozent. Die europäische Autoindustrie wehrt sich aber momentan gegen Quoten für einzelne Materialien. Setzt sie sich durch, würden möglicherweise einige der Metalle in den Batterien durchs Recycling-Raster fallen.

Wie ein zukunftssträchtiger Weg aussehen könnte, erörtert die »Circular Economy Initiative« der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften »Acatech« in einem im Oktober 2020 erschienenen Bericht zu ressourcenschonenden Batteriekreisläufen. Die Autoren regen unter anderem ein neues Design der Batterien für Reparaturen und Recycling an, Standards und autonome Verfahren für die Demon-



In den Salzwüsten und -seen der drei Staaten Bolivien, Chile und Argentinien sollen 70 Prozent der weltweiten Lithiumvorkommen lagern. Umweltschützer kritisieren unter anderem, dass durch den Abbau natürliche Süßwasservorkommen versalzen.

LUCA GALUZZI / CONTRASTO / WUNDERMAN; ORIGINAL FILES OF SALT SALAR, DE LUINI / BOLIVIA, LUCA GALUZZI / 2006 JPB / CC BY-SA 4.0 / CREATIVE COMMONS BY-SA 4.0 / GAD001

tage sowie einen umfassenden Informationsaustausch über die Lebensgeschichte der Produkte. Laut ihren Berechnungen könnten so bis zum Jahr 2030 in Deutschland aus alten Batterien rund 8000 Tonnen Lithium, knapp 28000 Tonnen Kobalt und knapp 26000 Tonnen Nickel zurückgewonnen werden – genügend Material für 1,3 Millionen neue Elektroautos. Das entspricht schätzungsweise etwa einem Siebtel der bis dahin in Deutschland fahrenden Elektroautos.

Eine Studie, die das Wuppertal-Institut zurzeit für die Veröffentlichung vorbereitet, prognostiziert allerdings, dass die Zahl der verwerteten Autobatterien im Jahr 2030 realistischere etwa eine halbe Million Aggregate erreichen wird. Daraus könnten immerhin 85 Prozent des Lithiums, je 90 Prozent von Kobalt, Nickel und Kupfer sowie 95 Prozent von Stahl und Aluminium zurückgewonnen werden. »Bei Kobalt und Nickel sollten diese Werte eigentlich mit sauberer Prozessführung gut zu erreichen sein«, sagt Arno Kwade, Professor an der Technischen Universität Braunschweig und einer der Leiter der Acatech-Arbeitsgruppe. Beim Lithium sei das Ziel etwas schwieriger zu erfüllen. Ob entsprechende Vorgaben am Ende in EU-Direktiven verankert werden, ist jedoch offen.

Bislang zumindest lassen sich Batteriepacks kaum demontieren, automatisiert geht es schon gar nicht. »Recycling« bedeutet hier in der Regel: aufreißen, schreddern, rösten, mit Schockwellen oder Laugen und Säuren behandeln, einschmelzen, teilweise abfackeln, zu Füllmaterial für Zement reduzieren. Wirklich nachhaltig ist das nicht.

Darüber hinaus ist noch unklar, wie sehr sich die heutigen Verfahren finanziell auszahlen. Eine entsprechende Verwertung von Lithium-Ionen-Akkus, sowohl aus Elektrogeräten wie aus Fahrzeugen, kostet derzeit bis zu 3000 Euro pro Tonne, schätzt das Umweltbundesamt. Gilt das in Zukunft auch für die Energiespeicher von Elektroautos, bedeutet das 700 bis 1600 Euro pro Autowrack. Eine Analyse der Beratungsfirma Boston Consulting ergab hingegen,

dass mit dem Recycling 25 Dollar Umsatz und vier Dollar Gewinn pro Kilowattstunde Kapazität zu machen sind. Das wären beim Stromspeicher eines heutigen VW Golf e 690 Euro Umsatz und 110 Euro Gewinn.

Eine neue Batterie erhält man nach dem Recyclingprozess wohlgerne nicht. Es lassen sich lediglich manche Bestandteile zur Herstellung anderer Produkte wiederverwenden. Entsprechend warnen Experten seit Langem vor einem Berg nicht recycelter Batterien, die sich im Schatten des E-Auto-Booms anhäufen könnten. Schätzungen zufolge werden bis 2030 elf Millionen Tonnen ausgediente Akkus anfallen, jährlich sollen danach weitere zwei Millionen Tonnen dazukommen. Für Deutschland rechnet das Umweltbundesamt mit einer Menge von 30000 Tonnen pro Jahr. Immerhin: Die sechs »Recycling«-Anlagen, die es hier zu Lande bereits gibt, könnten bereits 21000 Tonnen verwerten.

Akkus der Zukunft könnten anders aussehen

Trotzdem stehen der Branche schwierige Richtungsentscheidungen bevor, warnt Jens Peters: »Ein Grundproblem ist, dass man Prozesse und Anlagen planen muss und dabei nicht weiß, wie die Batterien der Zukunft aussehen werden.« Offen sei zudem, welche zurückgewonnenen Materialien künftig gefragt sein werden und welche Form sie dazu haben müssten. Als Trend erscheint jedoch erkennbar, so stellt es der Bericht des Wuppertal-Instituts dar, dass teures Kobalt mehr und mehr durch Nickel ersetzt wird. Der Autohersteller Tesla arbeitet Berichten zufolge schon daran, vollständig auf Kobalt zu verzichten. Das würde den Preis für die Energiespeicher weiter nach unten treiben.

Neben dem Recycling der Materialien verfolgen manche Entwickler das Ziel, Autobatterien länger zu nutzen. Sie versuchen etwa, die Energiespeicher gezielt zu reparieren oder nur jene verbrauchten Komponenten auszusortieren

und auszutauschen, welche die Leistung des Batteriepacks senken.

Zudem verhelfen Autohersteller und andere Firmen den Akkus nach ihrem Straßendasein bereits zu einem so genannten »Second Life« – etwa als Zwischenspeicher von erneuerbaren Energien. Wie viele der Batterien letztlich fit genug für ein Nachleben sein werden, ist unklar. Die Arbeitsgruppe des Wuppertal-Instituts hält es für möglich, dass die Hälfte der Aggregate vor der Demontage und dem Wiederverwerten für etwa acht weitere Jahre einen stationären Einsatzort finden könnten. Auf Dauer werden diese Initiativen die Mengen nutzloser Autobatterien jedoch nicht reduzieren, sondern ihre Ankunft auf dem Recyclingmarkt nur verzögern.

Dort müssen sich die Arbeiter dann mit dem komplizierten Innenleben der Energiespeicher auseinandersetzen. Ein Batteriepack besteht aus einem oder etlichen Dutzend Modulen, in denen wiederum bis zu mehrere hundert Zellen zusammengeschaltet sind. Hinzu kommen Anschlüsse und Ladeelektronik, Gehäuse und mechanische Verstärkungen. Das alles wird an die Platzverhältnisse im Auto angepasst und für mögliche Unfälle versteift und verkapselt. Bei Wagen mit großer Reichweite und hohem Preis erreichen Batteriepacks eine halbe Tonne an Masse und viele hundert Liter Volumen.

Schaut man genauer hin, wird die Sache noch komplexer: Auf der Zellebene, dem eigentlich aktiven Part des Aggregats, sind viele Schichten zusammengepresst oder -gewickelt und mit einer eigenen, hermetischen Hülle versehen. So kann das Bauteil die Form eines Zylinders, eines Quaders oder einer flachen, leicht biegsamen Tasche annehmen.

Im Inneren finden sich die beiden Elektroden: Die Kathode besteht meist aus einem feinen Pulver von Lithiumoxid-Metallverbindungen auf einer Aluminiumfolie. Die enthaltenen Metalle wie Nickel und vor allem Kobalt sind teuer und wertvoll; sie wiederzugewinnen, treibt heute oft die Recyclingbemühungen an. Weniger wichtig sind den Verwertern die Anteile von Mangan, Eisen, Phosphor oder Aluminium.

Die Anode, der Pluspol, besteht dagegen üblicherweise aus einer Graphitschicht auf Kupfer. Eine Art Klebstoff hält die pulvrigen Materialien auf beiden Seiten an den jeweiligen Metallfolien fest. Zwischen den Elektroden befindet sich zur Isolierung ein dünner, durchlöcherter Plastikfilm, der auf beiden Seiten von einer meist lithium- und fluorhaltigen, Strom leitenden Flüssigkeit umgeben ist. Hier bewegen sich die Lithium-Ionen, die dem Batterietyp seinen Namen gegeben haben, zwischen den Elektroden. Beim Laden oder Entladen schlüpfen sie in die porösen Materialien auf beiden Seiten und wieder hinaus.

Um ein solch komplexes Gebilde sachgerecht zu recyceln, sind Informationen über Bauweise, absolvierte Ladezyklen und Zustand notwendig. Derartige Daten sind meist schwer zu bekommen. Fachleute für Kreislaufwirtschaft fordern, dass sich dies in Zukunft ändern müsse. Im Idealfall gäbe es eine Art elektronischen »Batterie-Pass«, der jedem Berechtigten den Zugang zu allen verfügbaren Informationen ermöglicht.

Ein weiteres Hindernis beim Recyclingprozess ist die in den alten Akkus enthaltene Energie. Sie muss üblicherweise aus Sicherheitsgründen zunächst abgeführt werden. Einige Unternehmen machen aus der Not bereits eine Tugend: Sie nutzen den gespeicherten Reststrom, um Wärme zu erzeugen, oder speisen ihn ins Netz. Anschließend beginnen Mitarbeiter dann mit der händischen Demontage. Gehäuse, Kabel und Elektronik liefern dabei relativ sortenrein Aluminium, Stahl und Kupfer. Aber schon bei diesem Schritt erschweren Schweißverbindungen und Verklebungen an den Batteriemodulen das Zerlegen, wie teilnehmende Fachleute eines Workshops zum Recycling von Akkus am KIT im Jahr 2018 festhielten.

Das Problem hatten zuvor schon andere benannt: Man solle doch mehr »Schrauben und Muttern« verwenden, um die Trennung der Komponenten zu vereinfachen, forderte die US-amerikanische Wissenschaftlerin Linda Gaines vom Argonne National Laboratory bereits 2015 im Fachmagazin »Nature«. Allerdings haben sich bisher weder diese noch andere Lösungen durchgesetzt. Manche Forscher erproben immerhin, ob Wärme oder Schockwellen in einem Wasserbad dabei helfen können, die Verklebungen zu lösen.

Herausforderungen im Inneren der Akkus

Trotz der beschriebenen Probleme ist die äußere Demontage der einfachere Teil. Sobald es daran geht, Module oder gar Zellen zu öffnen, müssen weitere Vorsichtsmaßnahmen greifen. Die fluorhaltigen Elektrolyte dürfen nicht austreten, denn sie sind toxisch und leicht brennbar – unter anderen deshalb sind die Batteriepacks hermetisch gesichert, denn Elektroautos sollen nach Auffahrunfällen nicht in Flammen aufgehen. Beim kontrollierten Verbrennen von Komponenten, die nicht mehr gebraucht werden, entstehen Flüssigkeiten und Dämpfe, deren Entsorgung höchste Standards in der Abgaskontrolle erfordert. Laut den Experten des KIT-Workshops stellt das eine der größten Herausforderungen der Prozesskette dar.

Darum werden die Module oft unter Luftabschluss zerstört – hauptsächlich mit zwei verschiedenen Verfahren. Die Pyrometallurgie schmilzt die Bauteile bei bis zu 1500 Grad Celsius ein. Diese Methode wenden zum Beispiel die Firmen Umicore an ihrem Standort im belgischen Hoboken und Nickelhütte in Aue im Erzgebirge an. Am Ende bleibt eine Legierung der wertvollen Kathoden-Metalle Kobalt, Nickel und Kupfer übrig, die weiter getrennt werden müssen, um sie sortenrein verkaufen zu können. Der Aufwand, der in die Herstellung des keramischen Kathoden-Pulvers geflossen ist, geht so verloren.

Kunststoffe, Elektrolyte, Graphit und andere Stoffe verbrennen im Schmelzofen entweder einfach und verbessern so die energetische Bilanz des Prozesses, oder sie enden teilweise in einer amorphen schwarzen Masse. Das Lithium kann dann zusammen mit Anteilen von seltenen Erden als Konzentrat an einen Verwerter geliefert werden – so hält es Umicore.

Sowohl die weitere Aufspaltung der Reste als auch die Zurückgewinnung des Lithiums sind zwar möglich, wie Forschungsprojekte herausgefunden haben. Sie lohnen sich bei diesem Verfahren finanziell aber kaum – etwa, weil sie

unverhältnismäßig viel Energie benötigen. Zu diesem Schluss kamen die Teilnehmer des KIT-Workshops und auch amerikanische und britische Fachleute in einer Publikation im Fachmagazin »Nature« aus dem Jahr 2019.

Oft bilden Lithium, Mangan sowie Aluminium nach dem pyrometallurgischen Recycling dagegen eine Art Asche, die Zementhersteller verwenden können. Wenn das geschieht oder die Schlacke aus dem Einschmelzen wie bei anderen Batterietypen im Straßenbau verwendet wird, gilt es aktuell als erfolgreiches »stoffliches« Recycling. Laut europäischen Bestimmungen muss für dieses Etikett nur die Hälfte der Masse von Lithium-Ionen-Akkus wiederverwendet werden. Und dazu zählt auch das so genannte Downcycling, wenn also Reste eines Hightech-Produkts etwa in Fahrbahnen oder Rohbauten landen.

Die andere wichtige Methode der Verwertung nennt sich Hydrometallurgie. Dafür werden die Batteriezellen unter Luftabschluss geschreddert. Im Anschluss lassen sich einige der Trümmer magnetisch oder mechanisch sortieren, etwa durch Sieben. Außerdem kommen ätzende Flüssigkeiten wie Schwefelsäure oder Wasserstoffperoxid zum Einsatz, um Metalle aus den Batteriefetzen auszulaugen oder auszufällen. Die Temperaturen liegen dabei nur bei etwa 100 Grad Celsius.



JOSJE71 / STOCKADOB.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Die deutsche Firma Duesenfeld mit Sitz in der Nähe von Braunschweig sammelt bei einem solchen Prozess nach eigener Darstellung auch die Elektrolytflüssigkeit, das Lithium und das Graphit. Sie rühmt sich, 91 Prozent des Materials der Batteriezellen zurückzugewinnen. Diese Quote sei knapp dreimal so hoch wie im pyrometallischen Prozess. Volkswagen baut im Moment ebenfalls eine Recyclinganlage nach diesem Prinzip auf, die schon bald in Betrieb gehen soll.

Eine etwas andere Variante der Hydrometallurgie nutzt das Unternehmen Accurec in Krefeld: Dort erhitzen Mitarbeiter die Batteriemodule zunächst auf einige hundert Grad, damit Elektrolyte und Kunststoffe sich unter Sauerstoffabschluss zersetzen und Verklebungen sich lösen. Danach erst beginnt der weitere Prozess mit dem Zerkleinern der abgekühlten, oft schon verformten Reste. Zurzeit läuft dort ein vom Bundesumweltministerium gefördertes Projekt, das die Kobalt-Nickel-Fraktion der Kathode als »produktfähiges Pulver« gewinnen und auch Graphit und Lithium industriell weiterverarbeiten will.

Diese beiden Grundverfahren des Batterierecyclings, das Schmelzen und das Auslaugen, liegen auch den Überlegungen in dem Acatech-Bericht zu Grunde: Ziel ist in jedem Fall, möglichst große Mengen sortenreiner Rohstoffe

zurückzugewinnen, die sich dann wieder für neue Batterien nutzen lassen.

Ob das gelingt, ist offen. Bislang sind jedenfalls nicht alle Experten überzeugt. Die Autoren des »Nature«-Artikels von 2019 schreiben zum Beispiel: »Es ist klar, dass das momentane Design von Batteriezellen das Recycling extrem kompliziert macht und dass weder Hydro- noch Pyrometallurgie zu reinen Strömen von Material führen, die sich einfach in ein Kreislaufsystem für Batterien einspeisen lassen.«

Besser könnte das so genannte direkte Recycling abschneiden. Dieses Verfahren würde das Lithium-Metall-Pulver auf der Kathodenseite möglichst in seiner Form bewahren und nicht sortenrein zurückgewinnen. Denn das Herstellen der Verbindungen ist aufwändig und energieintensiv. Probleme könnten allerdings entstehen, wenn das Pulver aus verschiedenen Batterietypen stammt, deren Zusammensetzung gar nicht genau bekannt ist. Und womöglich entspricht es Jahrzehnte nach der Herstellung ohnehin nicht mehr den aktuellen Anforderungen der Produzenten.

Darum sieht das Verfahren vor, die Module zu zerkleinern und das isolierte Pulver mit Metallverbindungen in der nötigen Menge zu ergänzen. So ließe sich zum Beispiel das erwünschte Verhältnis von Mangan, Nickel und Kobalt herstellen, die in einem derzeit viel verwendeten Batterietyp Dienst tun. Und dann bleibt das Material für einige Zeit in einer Reaktionsflüssigkeit, bis sich Pulverpartikel der erwünschten Korngröße gebildet haben.

Eine Woche hat das bei einem Versuch gedauert, den Forscher des Worcester Polytechnic Institute in Massachusetts mit Entwicklern verschiedener Firmen unternommen haben. Das Team hatte 30 Kilogramm Batteriemodule aus Autos von Chevrolet, Ford und Fiat zusammen verarbeitet. Das ist ein Fortschritt, denn in einem ersten Versuch betrug die recycelte Menge bloß ein Kilogramm. Dennoch dürfte der Weg zum industriellen Maßstab noch weit sein, zumal das so gewonnene Material den Beweis erbringen muss, dass es die nötige Leistung liefert.

Umweltbilanz des Recyclings fragwürdig

Nur mit einer solchen Methode aber lohnt sich das Recyceln der Batteriezellen womöglich auch für das Klima, wie erste Daten zeigen. In Deutschland hatte das Öko-Institut im Jahr 2016 Umweltbilanzen für wissenschaftliche Recyclingprojekte aufgestellt, die den Verfahren bei den Firmen Accurec und Duesenfeld zu Grunde liegen. Die Prüfer erteilten durchweg gute Noten. Doch uneingeschränkt positiv war die Bilanz nur für die anfängliche Demontage der Batteriepacks. Für die »Aufbereitung des Aktivmaterials« in den Zellen ergaben sich für Treibhauspotenzial und Primärenergiebedarf keine »Nettogutschriften«, wie es die Kontrolleure formulierten. Fürs Klima war das Verwerten der Zellen also eher eine Belastung.

Ähnlich sehen Wissenschaftler der Carnegie Mellon University die Verfahren, wie sie 2019 in »Nature Sustainability« berichteten: Nur direktes Recycling, das freilich nach wie vor in den Kinderschuhen steckt, könne demnach verlässlich helfen, CO₂-Emissionen zu verhindern.



ALAMY / REUTERS / SYLVIA BUCHHOLZ

Für den Bau von E-Auto-Batterien ist Kobalt notwendig; ein wichtiger Lieferant ist die Demokratische Republik Kongo. Zwar gilt Kobalt heutzutage nicht mehr als Konfliktrohstoff, doch laut Beobachtern kommt es in dem Land im Bergbau nach wie vor zu Menschenrechtsverletzungen. In illegalen Minen ist zudem Zwangs- und Kinderarbeit keine Seltenheit.

Aus zylindrischen Zellen, auf die etwa Tesla setzt, muss man damit aber etwa 90 Prozent des Kathodenmaterials wiedergewinnen, damit tatsächlich CO₂ eingespart wird; aus Zellen im Taschenformat ungefähr 60 Prozent.

»Pyro- und hydrometallurgische Prozesse haben keine Umweltvorteile«, urteilte das Autorenteam um Rebecca Ciez. Eine Einschätzung, welche die Ingenieurin, die mittlerweile an der Columbia University in New York arbeitet, gegenüber »Spektrum der Wissenschaft« per E-Mail unterstreicht: »Die Folgen für die Umwelt wären in einer gut gemanagten Müllkippe viel geringer«, schreibt Ciez.

Darüber hinaus ist die Wirtschaftlichkeit des Recyclings mit Unsicherheiten behaftet: Zurzeit mag es sich lohnen, Kobalt aus den Zellen zurückzugewinnen. Doch da die Preise schwanken und Produzenten seit Langem versuchen, immer weniger von dem teuren Metall zu verwenden, kann sich das Blatt genauso gut wenden. Wenn überdies die Initiative von Tesla, ganz auf Kobalt zu verzichten, Erfolg hat und die Batterien deswegen preiswerter geworden sind, könnte das ganze Recycling unrentabel und ökologisch fragwürdig werden, warnt Beatrice Browning von der britischen Faraday Institution, einem unabhängigen Forschungsinstitut, das sich mit elektrochemischer Energiespeicherung beschäftigt.

Beim Lithium könnte es umgekehrt sein: Aktuell rechnet sich die aufwändige Wiederaufbereitung nicht, urteilten die Sachkundigen auf dem KIT-Workshop. Denn der Abbau des Leichtmetalls ist billiger und teils sogar ökologischer als das Recycling. Eine verbesserte Wiederaufbereitungstechnik und eine erhöhte Nachfrage durch einen Elektroauto-Boom könnte aber dazu beitragen, dies zu ändern.

Der größte Teil des weltweit verarbeiteten Lithiums – etwa die Hälfte – wird momentan in australischen Bergwer-

ken gefördert. Große Mengen stammen darüber hinaus aus dem bolivianischen, chilenischen und argentinischen Hochland, wo es teilweise unter sehr umstrittenen Bedingungen produziert und dann um den halben Planeten transportiert wird. Auch das spricht dafür, die Wiederverwertung weiter voranzutreiben.

Gleichermaßen kann die Herkunft der Batteriemetalle als Argument für mehr Recycling herangezogen werden: 60 Prozent des Kobalts auf dem Weltmarkt kommen aus der Demokratischen Republik Kongo. Zwar werden davon heute immerhin 80 Prozent in industriellen Bergwerken abgebaut, wo bis auf Ausnahmen keine Kinder beschäftigt sind, wie das UN-Kinderhilfswerk UNICEF und Beobachter der deutschen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe konstatieren. Gleichwohl führen im Kongo Armut und politische Instabilität weiterhin zu Zwangs- und Kinderarbeit besonders in illegalen Minen. Zudem sind laut Beobachtern auch im industriell geführten Bergbau Menschenrechtsverletzungen nicht ausgeschlossen.

Deutsche Autohersteller wie BMW und Volkswagen überwachen daher die Herkunft des für ihre Batterien verwendeten Rohstoffs sorgfältig, auch wenn Kobalt inzwischen nicht mehr als »Konfliktrohstoff« gilt und somit keinen besonderen Importkontrollen unterliegt. Nichtsdestoweniger könnte man es als moralische und gesellschaftliche Verantwortung betrachten, jedes Gramm des Metalls wiederzugewinnen.

Bevor das passiert, sind aber noch etliche industriepolitische und europarechtliche Fragen zu klären – etwa: Was soll man in Deutschland mit dem recycelten Material machen, wenn die meisten Batterien in Asien hergestellt werden? Baut man – wie es etwa Volkswagen plant – hier zu Lande eigene Produktionsstätten auf, um die Rohstoffe direkt verwerten zu können? Oder wird das Gros der gebrauchten Elektroautos ohnehin aus Deutschland in Billiglohnländer exportiert, wo sie deutlich preiswerter zerlegt werden können? Wer würde darauf achten, dass auch dort gewisse Standards während des Recyclingprozesses eingehalten werden?

Peters und seine Kollegen verdichten solche Zielkonflikte im Begriff »Recycling-Tiefe«. Sie ist eine von vielen Herausforderungen, für die Industrie und Politik in den kommenden Jahrzehnten Lösungen finden müssen. Eins ist den Forschern hingegen jetzt schon klar: »Wenn die Autohersteller damit beginnen würden, auf das spätere Recycling zu achten und es vorzubereiten, wären viele dieser Probleme leichter zu lösen.« ◀

QUELLEN

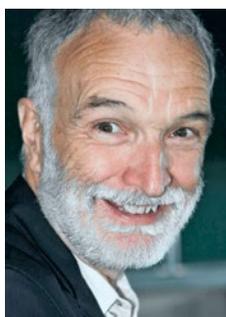
Chen, M. et al.: Closed loop recycling of electric vehicle batteries to enable ultra-high quality cathode powder. *Scientific Reports* 9, 2019

Ciez, R.E. et al.: Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability* 2, 2019

Gies, E.: Recycling: Lazarus batteries. *Nature* 526, 2015

Harper, G. et al.: Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 2019

SCHLICHTING! GEHEIMNISVOLLE SPUREN IM SCHNEE



Abdrücke im Schnee entwickeln sich unter besonderen Bedingungen zu auffällig kreisförmigen Strukturen. Das liegt vor allem am Wärmeaustausch mit der Umgebung, der sich mit der Konsistenz des gefrorenen Wassers verändert.

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/1795052

Vergessen wir die Dinge, betrachten wir die Struktur

Georges Braque (1882–1963)

Der Unterschied zwischen Schnee und Eis scheint auf der Hand zu liegen: Ersterer ist weich und porös, während Letzteres hart, glatt und äußerst kompakt ist. Bei Temperaturen um den Gefrierpunkt sind die Übergänge zwischen den beiden Formen des Wassers jedoch im wahrsten Wortsinn fließend. Das Hin und Her von Auftauen und Erstarren kann faszinierende Strukturen hervorbringen (siehe »Spektrum« Januar 2019, S. 64).

Ein besonders ungewöhnliches Phänomen sind torusförmige Abdrücke im Schnee. Die kreisrunden Hügel wirken wie weiße Donuts, die in fast gleichen Abständen in der sonst ungestörten Flockendecke liegen (siehe Foto rechts oben). Man könnte denken, das Muster wäre hineingemalt worden, doch eine nähere Betrachtung zeigt, dass keine gestalterische Absicht dahintersteht. Vielmehr waren nur eine schmelzende Schneesicht sowie eine wiederholte gleichartige mechanische Einwirkung nötig – hier vermutlich durch die Schritte einer Katze.

Zuvor ist ein Schneeschauer auf einen Boden mit Temperaturen über dem Gefrierpunkt niedergegangen. In so einer Situation beginnen die Eiskristalle im Kontakt mit der Erdoberfläche zu schmelzen. Unmittelbar über dieser wird die Lage darum wässrig. In so einem Zustand drücken Schritte den Schnee nicht einfach etwas dichter zusammen, sondern verändern dessen Konsis-

tenz dramatisch. Daraufhin wird der dunkle Untergrund sichtbar.

Die Katze, die wohl über die frisch gefallene Schicht getapst ist, hat mit jedem Tritt die bereits partiell angeschmolzene, etwas matschige Masse unter jeder Pfote komprimiert und radial zu den Seiten weggedrückt. Wie man es von Schneeballschlachten kennt, ist der Schnee besonders dann leicht zu formen und zu festigen, wenn seine Temperatur in der Nähe des Nullpunkts liegt. In dem Fall wird das Kristallgemenge, das ohnehin kurz vor dem Schmelzen steht, zusätzlich vom Druck der Hände teilweise verflüssigt.

Dabei spielt die so genannte Dichteanomalie des Wassers die entscheidende Rolle. Denn anders als bei den meisten übrigen Stoffen dehnt es sich aus, wenn es fest wird, und verringert im flüssigen Zustand sein Volumen. Presst man Schnee zusammen, schmilzt ein Teil davon. Sobald der Druck nachlässt, gefriert das Schmelzwasser wieder. Mit dem Trick kann man sein Wurfgeschoss besonders hart machen.

Das legt einen möglichen Mechanismus für die Bildung der mysteriösen Donuts nahe: Dort, wo der Schnee Kontakt zum relativ warmen Untergrund bekommt, schmilzt er teilweise und bildet eine dünne wässrige Schicht. Diese wird vom Druck der Pfoten des Tiers komprimiert und radial zur Seite weg- und zusammengedrückt. So entsteht ein ringförmiger Wulst, der sich unmittelbar danach wieder entspannt – und partiell neu gefriert und sich dadurch verfestigt. Dabei wird Kristallisationswärme frei, die vor allem in die Umgebung fließt. Das beschleunigt den Schmelzvorgang in direkter Nähe. Gleichzeitig wölbt sich der auf dem Wulst befindliche



MIT FOTL GEN. VON RUDOLF BRÜTSCH

In kürzlich gefallenem und nun wieder schmelzendem Schnee hat sich eine auf den ersten Blick geheimnisvolle Spur gebildet. Nach dem Auftauen bleiben Ringe aus verdichtetem und teilweise vereistem Material noch eine Weile erhalten.

lockere Schnee auf. Im Lauf der Zeit schmilzt der Schnee weiter. Die ehemals weiße Schicht wird dünner und infolge des wachsenden Wasseranteils transparenter. Der dunkle Boden schimmert immer mehr hindurch, insbesondere an den Trittstellen und in einem Ring unmittelbar um die Donuts. Dieser ist durch Schmelzwasser entstanden, das der Wulst bei seiner Entstehung vor sich hergetrieben hat und das die Kristallisationswärme vom Erstarren des Hügels aufgenommen hat.

Die vereisten und nach wie vor von Schnee bedeckten Wulste bleiben bei Tauwetter lange erhalten, sogar, wenn das Weiß in der Umgebung bereits verschwunden ist (siehe unteres Foto). Würde man sie erst jetzt wahrnehmen, gäben sie kaum noch Hinweise auf ihre Entstehung. Sie sind so dauerhaft, weil der Schnee, der auf den Donuts liegt, vom Boden isoliert ist, während die Schicht drumherum direkt mit dem wärmeren Untergrund in

Verbindung steht. Der isolierende Wulst selbst schmilzt langsamer, weil er dichter ist und somit eine größere Wärmekapazität hat. Da er so kompakt ist, strömt ihm außerdem weniger Wärme zu als dem von zahlreichen Hohlräumen durchzogenen Schnee. Die kreisrunde Form wird vom Wärmetransport verstärkt: Jede Abweichung von der Ringstruktur liegt besonders exponiert und kann daher leichter Energie an die Umgebung abgeben und abschmelzen.

Wegen der vielen Umstände, die dafür günstig zusammentreffen müssen, dürften derart konservierte Pfotenabdrücke ein eher seltenes Phänomen sein. Kompakter und vereister Schnee überdauert allerdings auch in alltäglicheren Situationen wesentlich länger als die ursprüngliche lockere Form. Beispielsweise liegt die auf Gehwegen festgetretene Schicht häufig noch, während zu den Seiten kaum etwas übrig ist. Das Schmelzwasser schmiert den von Eis bedeckten Weg dann regelrecht und macht das Betreten riskant (siehe »Spektrum« Dezember 2020, S. 70). Das erklärt vielleicht ebenfalls, warum wir solche Strukturen abseits der Pfade so gut wie nie entdecken: Gerade, wenn die Witterung für ihre Entstehung günstig ist, sind wir meist eher damit beschäftigt, vorsichtig vor unsere eigenen Füße zu schauen.

FLUIDDYNAMIK GEHEIMNISVOLLE TURBULENZ

Ob Wirbelstürme, der Blutfluss in Arterien oder Wasserfälle: Wir sind von Turbulenzen umgeben. Und dennoch sind Forscher noch weit davon entfernt, das rätselhafte Phänomen zu verstehen. Jetzt könnte ein neues Laborverfahren den Durchbruch bringen.

AUF EINEN BLICK WIE EIN WIRBELWIND

- 1** Seit Jahrhunderten versuchen Physiker zu verstehen, wie Turbulenzen entstehen, sich entwickeln und schließlich wieder verschwinden.
- 2** Nun ist es Forschern gelungen, einen turbulenten Bereich in einem Wassertank zu erzeugen, der räumlich begrenzt und stabil ist.
- 3** Das bietet Wissenschaftlern völlig neue Möglichkeiten, um solche Phänomene kontrolliert zu untersuchen.



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

» spektrum.de/artikel/1795037

Es ist Zeit, den Blob zu füttern. Schäumend und gefräßig saugt er alle paar Sekunden acht tellergroße Portionen auf. Was wir hier als Blob bezeichnen, ist ein stabiler turbulenter Fleck in einem riesigen Wassertank im Labor des Physikers William Irvine von der University of Chicago.

Anders als alle bisher beobachteten Turbulenzen ist es keine diffus umherwirbelnde Strömung, die sich mit der Zeit vergrößert oder verkleinert. Stattdessen gleicht der Blob einer in sich geschlossenen, brodelnden Kugel, die das Wasser um sich herum unbewegt lässt. Um das ungewöhnliche Phänomen zu erzeugen und insbesondere aufrechtzuerhalten, müssen Irvine und sein Doktorand Takumi Matsuzawa es immer wieder mit acht ringförmigen Wirbeln, dem flüssigen Gegenstück zu Rauchringen, beschießen. »So bauen wir die Turbulenz Stück für Stück auf«, erklärt Matsuzawa.

Weil die beiden Forscher die ringförmigen Wirbel sehr genau kontrollieren, können sie die daraus entstehende Turbulenz aus nächster Nähe untersuchen. Der Blob könnte damit Einblicke in eine chaotische Welt geben, denen Physiker seit mehr als zwei Jahrhunderten nachjagen. Die mühsame Suche veranlasste Richard Feynman dazu, die Turbulenz als das wichtigste ungelöste Problem der klassischen Physik zu bezeichnen. Sie spielt eine entscheidende Rolle bei der Erforschung von Sternen, der Luftfahrt, der Kernfusion, beim Wetter, bei Veränderungen im Erdkern, in Windturbinen und sogar für die menschliche Gesundheit – denn auch der Blutfluss in Arterien kann turbulent werden, was äußerst gefährlich ist.

Eine-Million-Dollar-Problem

Obwohl Turbulenzen so allgegenwärtig sind, ist es extrem schwierig, sie zu untersuchen. Die zu Grunde liegenden Formeln, um Fluide theoretisch zu beschreiben, sind die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen. Sie sind allerdings nur für Spezialfälle exakt lösbar, etwa für ideale Flüssigkeiten, die keine Reibung besitzen. Im Allgemeinen ist nicht einmal bekannt, ob überhaupt eine Lösung existiert: Tatsächlich ist die Frage eines der sieben Millennium-Probleme, deren Beantwortung mit einer Million US-Dollar belohnt wird. Glücklicherweise können Computer die Navier-Stokes-Gleichungen zumindest näherungsweise lösen, wodurch eine theoretische Beschreibung von Fluiden häufig gelingt. Doch Turbulenzen sind chaotische Effekte, das heißt, sie hängen stark von den äußeren Bedingungen ab. Wenn diese nur ein wenig variieren, kann das Ergebnis plötzlich völlig anders aussehen. Das macht eine experimentelle Untersuchung unerlässlich.

Turbulenzen sind sowohl rechnerisch als auch experimentell schwer zu untersuchen.

Bisher erzielten Irvine und seine Studenten schon eine ganze Reihe überraschender Durchbrüche beim Studium von Systemen, die aus wirbelnden Objekten, Flüssigkeiten oder sogar Feldern bestehen. Besonders viel Aufsehen erregten ihre Ergebnisse im Bereich der Fluidodynamik, der eigentlich für extrem langsame Fortschritte berüchtigt ist. Sie konnten eine Gesetzmäßigkeit nachweisen, die trichterförmige, tornadoähnliche Strömungen – Vortizes genannt – befolgen. Die Arbeit der Forscher beleuchtet, wie die Phänomene entstehen, miteinander wechselwirken, sich zeitlich entwickeln und schließlich zerfallen.

»In der naturwissenschaftlichen Forschung geht es oft darum, eine kleine Lücke in dem, was bereits getan wurde, zu füllen«, so der Physiker Daniel Lathrop von der University of Maryland, der mit Irvines Arbeit vertraut ist. »William sucht dagegen nach Möglichkeiten, etwas völlig anders anzugehen als bisher.« Da er es nun geschafft hat, Wirbel so präzise zu kontrollieren, dass der Blob entsteht, verschreibt sich Irvine immer mehr der Erforschung von Fluiden. »Wegen der fehlenden Daten und Theorien sieht man Turbulenz als etwas an, an dem Karrieren scheitern«, sagt er. »Dennoch lasse ich mich immer stärker darauf ein.«

2006 hatte der damals 26-jährige Irvine bereits zwei unterschiedliche Promotionen in Quantenoptik durchlaufen, eine in Experimentalphysik an der University of Oxford und eine andere an der University of California in Santa Barbara, die zusätzlich theoretische Studien umfasste. Am Ende hatte er genug davon, winzige Fortschritte in abstrakten physikalischen Bereichen zu machen, und beschloss, auf dem weiter gefassten Gebiet der Neurowissenschaften an

Indem Irvine und seine Kollegen Tragflächen aus Kunststoff ins Wasser stellen, können sie dort unterschiedliche Wirbel erzeugen.

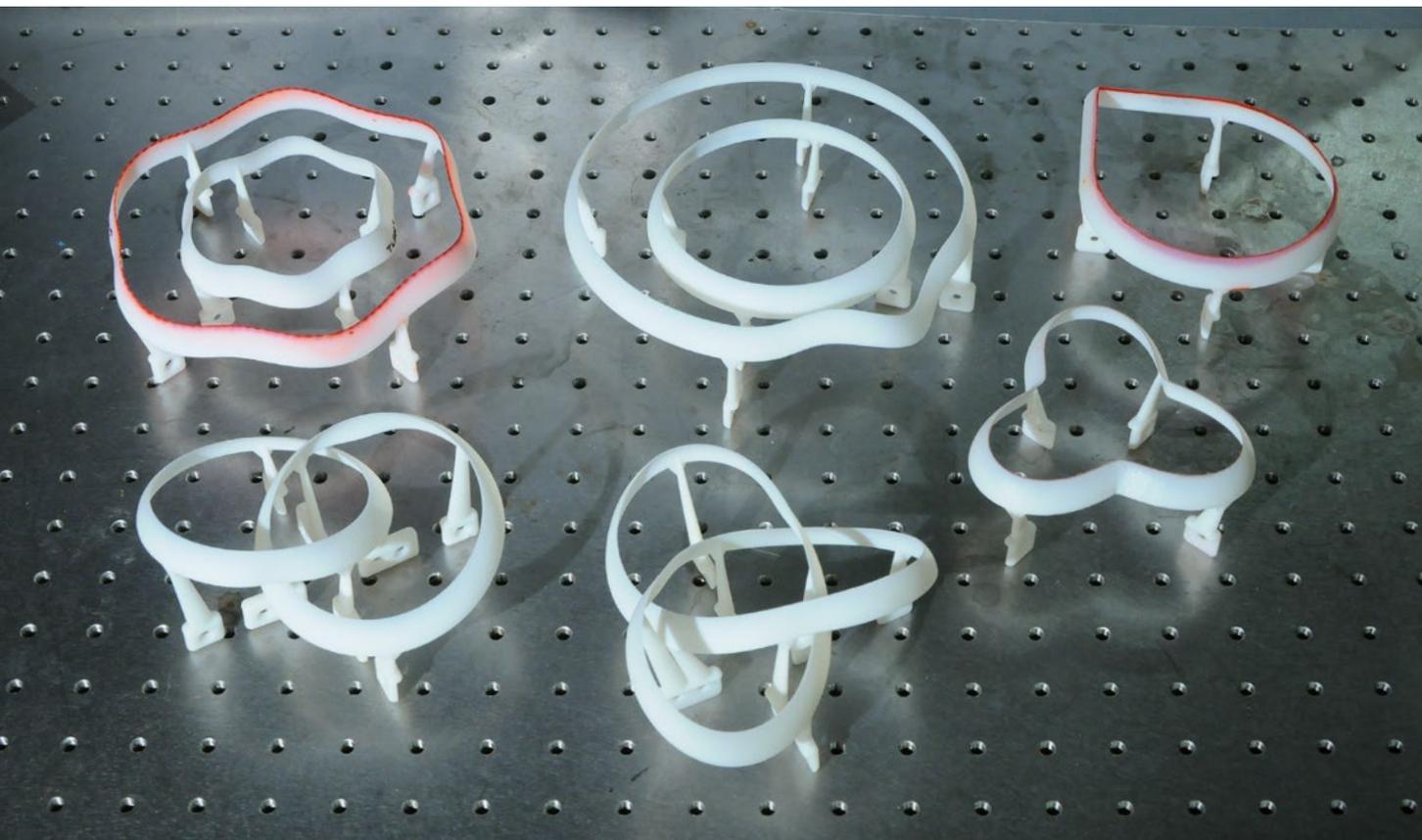
der Princeton University weiterzuforschen. Doch kurz bevor er dort anfing, erwähnte ein Freund von ihm eine Arbeit des Physikers Paul Chaikin von der New York University, die mit weicher Materie wie Schäumen, Gelen oder Flüssigkristallen zusammenhängt.

Chaikin und seine Kollegen weisen in solchen Materialien ungeahnte Eigenschaften nach: Die Systeme können sich selbst ordnen, erstaunliche Muster ausbilden und sogar Kopien von sich selbst erzeugen. Im Gegensatz zur gewöhnlichen Physik der kondensierten Materie finden die Prozesse bei Raumtemperatur direkt vor den Augen der Forscher statt – ohne die sonst notwendigen aufwändigen Aufbauten nahe am absoluten Temperaturnullpunkt.

Das Gebiet der weichen Materie überzeugte Irvine vor allem, weil es noch viel zu entdecken gab. »Dort führt man nicht ein Experiment durch, um eine theoretische Vorhersage zu bestätigen«, erklärt er, »sondern weil niemand weiß, wie es überhaupt ausgehen wird.« Kurzerhand verwarf Irvine seine Pläne, sich den Neurowissenschaften zu widmen, und begann stattdessen als Postdoc in Chaikins Labor. Dort untersuchte er Kolloide, das heißt Partikel, die fein in einer Flüssigkeit verteilt sind.

Als Irvine eines Tages während eines Spaziergangs in Manhattan beobachtete, wie ein Raucher Ringe ausblies, eilte er sofort zurück ins Labor, um eine Vorrichtung zu bauen, die solche komplexen Strukturen aus Rauch erzeugt. Allerdings kam er nicht weit und legte das Projekt beiseite, um an seinem eigentlichen Forschungsthema weiterzuarbeiten. Doch der Gedanke ließ ihn über die Jahre nicht mehr los.

Als er 2011 eine Stelle an der University of Chicago antrat, begann er, ringförmige Wirbel – ähnlich denen, die er in Manhattan beobachtet hatte – in Wasser zu untersuchen. Die Forschung begeisterte ihn, denn er wusste zu dem Zeitpunkt kaum etwas über das Thema. »Ich hatte noch nicht einmal einen Kurs in Strömungsmechanik belegt«,



gibt er zu. »Ich habe es mir beigebracht, als ich es unterrichten musste.«

Ein Wirbel (oder Vortex) ist eine röhrenförmige, sich drehende Strömung in einem Gas, einer Flüssigkeit oder einem anderen Medium. Eines der bekanntesten Beispiele dafür stellt ein Tornado dar, doch man kann auch Wirbel in kleinerer Form beobachten, wenn man etwa Wasser in einem Spülbecken ablaufen lässt. Einige Vortizes sind dabei erstaunlich stabil und tauchen in einer Vielzahl von Varianten auf. Wie bei einem Rauchring können sich ihre Enden zu einer Schleife zusammenfügen, zudem lassen sich mehrere ringförmige Wirbel miteinander verbinden und sogar verknoten.

Weil Vortizes in allerlei physikalischen Systemen auftauchen, von Flüssigkeiten und Gasen bis hin zu elektrischen und magnetischen Feldern, sind sie für Wissenschaftler besonders interessant. Ein Strom, der durch einen dünnen Leiter fließt, erzeugt beispielsweise rundherum einen Magnetfeldwirbel – eine Art magnetischen Tornado, der einen hypothetischen magnetischen Monopol (falls so etwas existieren sollte) dazu veranlassen würde, den Leiter zu umkreisen.

Ringförmige Wirbel im Wasser

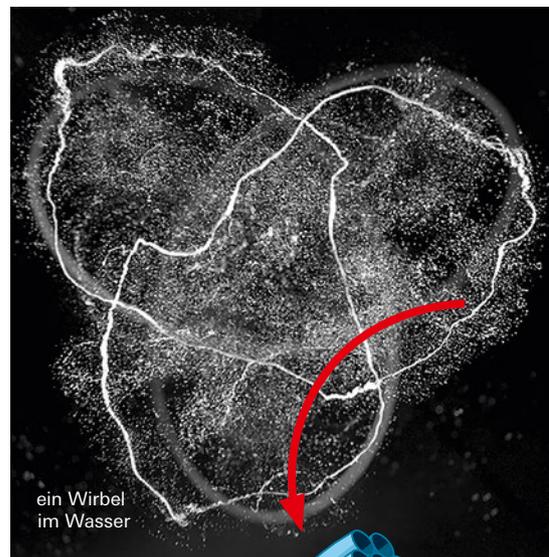
Irvine widmete sich zusammen mit einem Doktoranden zunächst elektromagnetischen Feldern, doch das Hauptinteresse des Forschers blieb das Wasser. Einen tornadoähnlichen Wirbel in einer Flüssigkeit zu erzeugen, ist einfach – jeder kann es mit einer Wasserflasche tun. Aber wie kann man kompliziertere Formen wie Ringe oder Kombinationen von Wirbeln, einschließlich Knoten, herstellen? Mit solchen Strukturen könnte man etliche Rätsel über die Eigenschaften von Turbulenzen klären, unter anderem die Frage nach der Helizitätserhaltung. Die Helizität entspricht der Anzahl der Verschlingungen und Knoten eines oder mehrerer Wirbel. Verschlingungen und Knoten sind so genannte topologische Merkmale, das bedeutet, sie verändern sich nicht, wenn man einen Wirbel dehnt, staucht oder anderweitig verformt – und sind somit sehr robust.

Wie Wissenschaftler vor etwa 50 Jahren herausgefunden haben, bleibt die Helizität von Wirbeln in einer idealen Flüssigkeit erhalten. Eine solche Flüssigkeit besitzt keine Viskosität, das heißt, sie bringt einem Objekt, das sich durch sie hindurchbewegt, keinen Widerstand entgegen. Für den Spezialfall eines solchen Fluids reduzieren sich die Navier-Stokes-Gleichungen zu den Euler-Gleichungen, die sich in einigen Situationen besser (beziehungsweise überhaupt) lösen lassen – etwa wenn es um die Erhaltung der Helizität geht. In einer idealen Flüssigkeit bleibt die Anzahl der Verschlingungen und Knoten von Wirbeln also stets gleich, unabhängig davon, wie sich das Fluid und die darin auftretenden Vortizes mit der Zeit verändern.

Doch wie der Name schon nahelegt, entsprechen ideale Flüssigkeiten nicht den Fluiden, denen man in der realen Welt begegnet. Ob die Helizität von Wirbeln dort bestehen bleibt, ließ sich trotz etlicher Analysen und Experimente jahrelang nicht beantworten. Ein solcher Erhaltungssatz wäre für Meteorologen und alle anderen Wissenschaftler, die sich mit Wirbeln befassen, jedoch extrem nützlich.

Ringförmige Wirbel

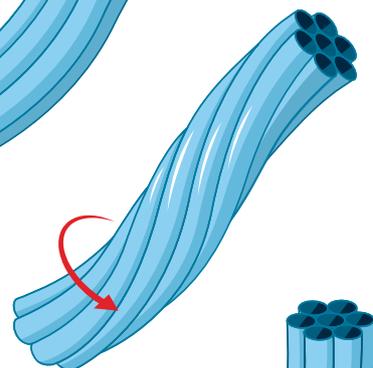
Man kann einen gewöhnlichen Rauchring nutzen, um die Topologie von Wirbeln zu untersuchen – unabhängig davon, ob sie sich in Flüssigkeiten wie Wasser oder in der Luft bilden. Meist zerfallen diese Phänomene allerdings zu schnell, um sie genau zu analysieren. Anders ist es beim »Blob« in Irvines Labor.



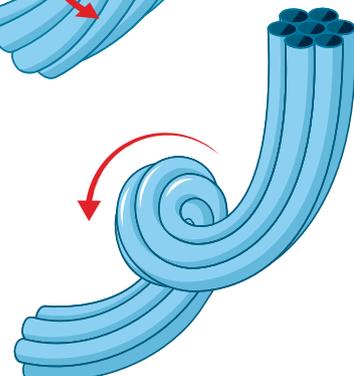
Filamente eines Wirbels

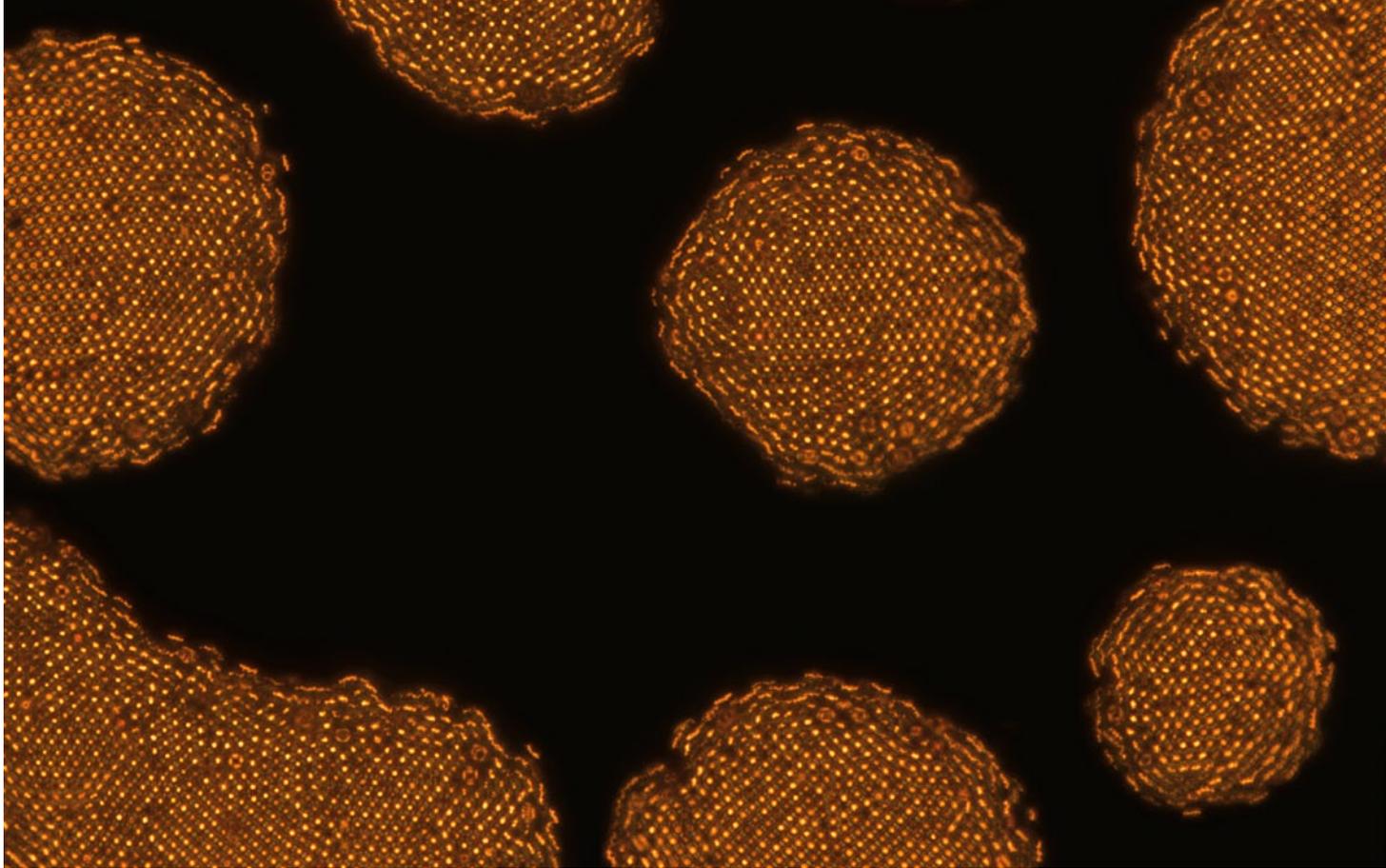


Bei einer Verdrehung winden sich die einzelnen Filamente umeinander.



In einem gewundenen Wirbel dreht sich der Schlauch.





Irvine nutzt winzige magnetische Partikel, um eine neuartige zweidimensionale Flüssigkeit herzustellen, die Tröpfchen mit einzigartigen Eigenschaften bildet.

Zudem hängt die Helizitätserhaltung mit einer weiteren grundlegenden Frage zusammen: Was passiert mit den Verdrehungen der Wirbel, wenn sie zerfallen (was sie zwangsläufig immer tun)? Die Physik lehrt uns, dass die Rotationsenergie und der Drehimpuls eines Systems stets erhalten bleiben. Aber lange wusste man nicht, wie die makroskopischen Drehungen eines Wirbels auf immer kleinere Skalen übergehen, bis sie sich schließlich auf molekularer Ebene auflösen. Könnte man diesen Mechanismus verstehen, würde man wahrscheinlich mehr über die zeitliche Entwicklung von Helizität in Flüssigkeiten erfahren und umgekehrt.

Irvine suchte nach einer Möglichkeit, um diesen Fragen in Laborversuchen nachzugehen. Dabei ließ er sich von einem seiner vielen Hobbys inspirieren: Er spricht vier Sprachen, spielt Cello (und hat drei weitere Instrumente gelernt), er klettert und segelt gerne, zudem ist er Pilot, der an Kunstflügen teilnimmt.

Der letzte der genannten Zeitvertreibe führte ihn zu einer Möglichkeit, ringförmige Wasserwirbel zu erzeugen. Denn an den Spitzen der Tragflächen von Flugzeugen bilden sich beim Beschleunigungsvorgang heftige Verwirbelungen der Luft aus, die sich anschließend vom Flügel lösen. Das veranlasste ihn dazu, Tragflügel zu verwenden, um Vortizes in Wasser herzustellen.

Irvine nutzte einen 3-D-Drucker, der innerhalb von acht Stunden Tragflächen beliebiger Form produzierte, und probierte mit seinem damaligen Postdoc Dustin Kleckner und später mit seinen Doktoranden Martin Scheeler und

Robert Morton hunderte verschiedene Formen aus. Um die Wirbel zu schaffen, mussten die Forscher die Tragflächen mit der 100-fachen Schwerkraft beschleunigen. Dazu wählten sie etliche Methoden, von Sprengstoff bis hin zu Railguns, und landeten schließlich bei dem, was Irvine als »Kartoffelkanone« bezeichnet: einem mächtigen Kolben, der von komprimiertem Gas angetrieben wird.

Für seine Versuche in dem riesigen Wassertank benötigte Irvine vor allem viel Platz. Der Wissenschaftler nahm in einem Laborgebäude der University of Chicago einen großen Raum in Beschlag, der sich drei Stockwerke unter der Erde befindet. Anschließend ließ er die vier Meter hohe Decke und das gesamte Gebäudeinnere darüber heraus schlagen, wodurch ein zehn Meter hoher Saal entstand, in dem er einen kleinen Kran einbauen konnte.

Der Aufwand sollte sich lohnen. Schließlich fanden Irvine und seine Kollegen geeignete Tragflächen, die saubere, ringförmige Wirbel mit einer Breite von etwa 30 Zentimetern produzieren. Es gelang ihnen sogar, mehrere verbundene Ringe und knotenartige Wirbel zu konstruieren. Um diese zu visualisieren, verkleideten Kleckner und Scheeler den Wassertank mit Hochgeschwindigkeitslaser-Messgeräten und Videokameras. Sie schossen winzige Gasblasen und markierte Partikel in den Tank, damit diese sich in den wirbelnden Strömungen verfangen und man ihre Bewegung und dadurch auch die Entwicklung der Vortizes nachvollziehen konnte.

Schließlich fanden die Forscher durch Zufall eine noch einfachere Methode, um die Strömungen zu beobachten: Sie hatten die Tragflügel mit einem Stift beschriftet, um sie leichter auseinanderzuhalten. Die Farbe erwies sich aber als nicht vollkommen unlöslich, wodurch etwas davon ins Wasser gelangte und den Wirbeln folgte. Im Laserlicht

begann die Tinte zu fluoreszieren, was zu einem extrem klaren Bild führte. Daraufhin bemalten die Forscher die entscheidenden Stellen der Tragflächen mit einer eigens entwickelten Farbe, wodurch sie jedes beliebige Merkmal der Strömung hervorheben konnten, etwa die Mittellinie eines Wirbels, die sonst schwer zu identifizieren ist.

Dank der zahlreichen Experimente konnten Irvine und seine Kollegen 2017 schließlich das Geheimnis um die Helizität in realen Fluiden lüften: Anders als in idealen Flüssigkeiten bleibt die Anzahl der Verschlingungen und Knoten über die Zeit nicht immer erhalten.

Dafür konnte Irvine zwei andere Größen identifizieren, die in realen Fluiden eine wichtige Rolle spielen: die Windungen und Verdrehungen eines Wirbels. Stellen Sie sich dazu einen geraden Schlauch vor, der die Länge eines geraden Vortex (etwa eines Tornados) darstellt. Der Schlauch kann sich dabei um sich selbst winden – im Extremfall kann er sich sogar aufrollen. Unabhängig davon lassen sich aber auch die Enden des Schlauchs in entgegengesetzte Richtungen verdrehen, selbst wenn der Schlauch dabei gerade bleibt.

Die Helizität ist aus mathematischer Sicht ein topologisches Merkmal, was sie auf den ersten Blick sehr stabil macht. Topologen klassifizieren Objekte nach globalen Eigenschaften, die sich nicht verändern, wenn man einen Körper verformt, ohne ihn zu zerreißen. Ein Beispiel dafür ist die Anzahl der Löcher, die eine geometrische Figur besitzt, oder eben die Anzahl der Knoten und Verschlingungen von Wirbeln.

Windungen und Verdrehungen sind hingegen geometrische Merkmale. Während topologische Eigenschaften ein ganzes Objekt charakterisieren, betreffen geometrische Merkmale nur einen bestimmten Bereich des Körpers, etwa die Krümmung einer Oberfläche an einer Stelle.

Windungen, Verschlingungen und Knoten in Wirbeln

Vor Irvines Veröffentlichung hatten bereits andere Forscher vorgeschlagen, Windungen und Verdrehungen zusammen mit Verschlingungen und Knoten zu berücksichtigen, um ein allgemeineres Maß für die Komplexität eines Wirbels zu definieren. Sie hofften, das neue Maß könne zu einem Erhaltungssatz führen.

Genau das gelang dem Physiker: Er bewies, dass die gesamte Anzahl von Knoten, Verschlingungen und Windungen – ohne Verdrehungen – in einem viskosen Fluid erhalten bleibt. Damit schuf er eine neue Art kombinierter Helizität aus diesen drei Größen. Die Verdrehungen fallen dabei heraus, da sich eine Windung immer in eine Verdrehung umwandeln lässt: Zieht man etwa einen aufgewickelten Schlauch gerade, dann ist dieser automatisch verdreht.

Mit seiner Arbeit beantwortete Irvine nicht nur, wie sich die Helizitätserhaltung in der realen Welt darstellt, sondern auch, wie Wirbel ihre Rotationsenergie und ihr Drehmoment an ihre Umwelt abgeben. »Man muss Williams Stil als Experimentalphysiker wirklich bewundern«, lobt ihn Lathrop. »Es ist beeindruckend, einen so neuartigen Aufbau zu schaffen und ihn so zu bearbeiten, dass man tatsächlich aussagekräftige Antworten erhält.«

In Interviews präsentiert sich der inzwischen 40-jährige Forscher freundlich – selbst wenn er etwas verschroben wirkt, was durch seine turbulente Frisur verstärkt wird. »Er hat seltsame Ideen, die zunächst keinen Sinn zu machen scheinen, aber am Ende lerne ich immer etwas«, sagt sein momentaner Doktorand Ephraim Bililign. Als Beispiel führt er Irvines Vorschlag an, er solle versuchen, Seifenfilmen neue Verhaltensweisen abzugewinnen – ein Projekt, das sich als nicht realisierbar erwies. Doch es führte direkt zu Bililigns gegenwärtiger Arbeit mit wirbelnden, mikroskopischen, magnetischen Würfeln in einer Seifenfilm-Suspension, die zahlreiche unerwartete Eigenschaften besitzen. Sonst ist Irvine bei der Arbeit recht in sich gekehrt, fast schon geheimnisvoll – seine Studenten wussten beispielsweise nicht, dass er Pilot ist.

Seine breit gefächerte Interessen spiegeln sich in der Vielzahl der Projekte wider, die derzeit in seinem Labor stattfinden. Zusätzlich zu den Arbeiten über Wasserwirbel beschäftigt er sich mit topologischer Mechanik, bei der es darum geht, quantenähnliche Eigenschaften in klassischen Systemen herauszuarbeiten, die aus identischen rotierenden Objekten bestehen.

Zum Beispiel gelang es ihm und seinen Studenten, eines der Merkmale so genannter topologischer Isolatoren nachzustellen. Diese neuartige Materialklasse ist eine Mischung aus extrem gutem Leiter und Isolator: Während das Innere des Materials keinerlei Stromfluss zulässt, können sich die Elektronen am Rand nahezu widerstandsfrei in eine Richtung bewegen. Irvine und seine Kollegen imitierten dieses äußerst ungewöhnliche Verhalten, indem sie zahlreiche Kreiselinstrumente so anordneten, dass sie Schallwellen bestimmter Frequenzen nur am Rand des Systems und bloß in eine Richtung leiteten. Grob lässt sich das wie folgt erklären: Die rotierenden Teilchen neigen dazu, die Vibrationen, aus denen die Schallwellen bestehen, nach außen zum Rand hin und in eine bestimmte Richtung zu lenken, was das seltsame Verhalten zur Folge hat.

Der Forscher hat darüber hinaus verschiedene magnetische Teilchen mit Flüssigkeiten gemischt, wodurch Fluide entstanden, die eine ungewöhnliche Viskosität aufweisen: Es ist, als besäße die Flüssigkeit keine Reibung. Wellen können sich daher über die Oberfläche bewegen, ohne Energie zu verlieren – so wie in einigen quantenmechanischen Systemen.

Der Vorteil der Experimente von Irvine und seinem Team ist, dass die von ihnen untersuchten Materialien viel besser zu verstehen, zu erschaffen und zu untersuchen sind als die quantenmechanischen Varianten, die sie imitieren. Daher ist der Physiker überzeugt, derartige Experimente könnten eines Tages dabei helfen, quantenmechanische Probleme zu beleuchten. »Die originalen Versionen sind chaotisch und kompliziert«, erklärt er. »Ich möchte herausfinden, was das Minimum ist, das man braucht, um die gleichen Verhaltensweisen zu erhalten.«

Die Leitung eines großen Arbeitsbereichs hat Irvine bisher nicht davon abgehalten, seine eigenen kleinen Experimente durchzuführen. Dafür nutzt er einen winzigen Raum außerhalb des Hauptlabors, der als Lager gekennzeichnet ist. Dort sind ein paar hundert Kreisel auf dem Boden ver-



ALEXANDER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Enden von Tragflächen an Flugzeugen erzeugen Wirbel in der Luft.

streut. »Sie verhalten sich wie eine Flüssigkeit«, äußert er begeistert. »Sie sind für mich die Quelle vieler guter Ideen.« Als das Labor wegen der Covid-Pandemie vorübergehend geschlossen wurde, nahm Irvine die Kreisel mit nach Hause, um in seinem Wohnzimmer weiter zu experimentieren.

Doch momentan sind es die Turbulenzen, die in seinem Labor die meiste Aufmerksamkeit beanspruchen. Nachdem es Irvine und Matsuzawa gelungen war, kontrollierte Wirbel zu schaffen, begannen sie vor vier Jahren neue Experimente mit diesen spannenden Phänomenen. Sie schossen unterschiedlich viele ringförmige Wirbel verschiedener Frequenzen in den Tank und brachten sie dazu, sich auf interessante Weise zu verbinden. Manchmal erzeugten sie dabei turbulente Bereiche, aber diese verschwanden schnell wieder.

Eines Tages probierten Irvine und Matsuzawa eine würfelförmige Tragfläche aus, die acht ringförmige Wirbel hintereinander produzierte. Die Ringe strömten an einer einzigen Stelle zusammen, und plötzlich blieben die daraus entstehenden Turbulenzen für einige Augenblicke bestehen. Also beschossen die Forscher den turbulenten Fleck wieder mit acht Ringen – und kurz darauf noch mal. Die Turbulenzen hielten sich daraufhin noch länger. Wie die Wissenschaftler feststellten, konnten sie einen stabilen turbulenten Bereich – den eingangs erwähnten Blob – erzeugen, wenn sie ihn nur regelmäßig beschossen.

Bisher waren Turbulenzen für Experimentalphysiker zu kompliziert, um sie genau zu vermessen. Matsuzawa bezeichnet sie gern als Wirbelsuppe – sie nehmen alle Komplexitäten der einzelnen Wirbel auf und vermischen sie dann zu einem verworrenen, brodelnden Durcheinander von Strudeln ohne klare Grenzen, die sich über viele Größenordnungen erstrecken. Sie tauchen aus dem Nichts auf, verändern sich wie wild, verschmelzen, fliegen auseinander und verschwinden wieder.

Wie Lathrop betont, können sich Physiker nicht einmal auf eine klare Definition von Turbulenz einigen. Man weiß nicht, ob die Turbulenzen, die man beispielsweise in einem

langen Rohr beobachtet, dasselbe Phänomen sind wie die wirbelförmigen Strömungen an den Spitzen der Tragflächen von Flugzeugen. »Erstaunlicherweise hängen wir trotz der enormen Fortschritte, die wir in allen anderen Bereichen der Physik gemacht haben, immer noch an diesem Punkt«, sagt er.

Bei einem ist man sich jedoch einig: Turbulenzen sind chaotisch. Daher reicht selbst eine winzige Ungenauigkeit bei der Messung aus, um jede Prognose über den Haufen zu werfen. Nicht, dass es eine große Rolle gespielt hätte: Bisher gab es keine Möglichkeit, auch nur grob die vielen sich schnell verändernden Wirbel zu messen, die sich in bis zu 10000-fach unterschiedlichen Größenordnungen manifestieren.

Meistens haben sich Forscher damit begnügt, die Strömungsgeschwindigkeit an mehreren Punkten innerhalb einer Turbulenz wiederholt zu messen. Um Letztere herzustellen, ließen Wissenschaftler ein Fluid durch ein Maschennetz oder andere Hindernisse laufen, die den gleichmäßigen Fluss stören sollten. Dadurch waren die Ergebnisse stets eine Kombination aus turbulenter und nichtturbulenter Aktivität, die schwer auseinanderzuhalten ist. »Ich rechne es ihnen hoch an, dass sie mit diesen Geräten überhaupt etwas über Turbulenzen herausgefunden haben«, merkt Irvine an.

Eine in sich geschlossene, stabile Turbulenz, die aus kontrollierten Wirbeln aufgebaut ist, bietet völlig neue Möglichkeiten zur Messung und Analyse. Der Blob lässt sich nicht durch umgebende Strömungen, Oberflächen und Objekte stören – er bildet ein vereinfachtes Turbulenzmodell, an dem sich Forscher austoben können. Matsuzawa und Irvine sind somit in der Lage, genau zu beobachten und zu messen, wie die Wirbelschleifen ineinander übergehen und sich zum Blob entwickeln.

Doch von all den Erkenntnissen, die Irvine dem Blob abringen möchte, ist sein Hauptziel ein altbekanntes. »Turbulenzen sind der härteste Test für die Erhaltung der Helizität«, erklärt er. »Da wir die Turbulenz Wirbel für Wirbel aufbauen, wissen wir, wie viel Helizität sie enthält. So können wir sehen, was damit wirklich im Detail passiert.« ◀

QUELLEN

Irvine, W. T. M. et al.: Complete measurement of helicity and its dynamics in vortex tubes. *Science* 357, 2017

Irvine, W. T. M. et al.: Starting flow past an airfoil and its acquired lift in a superfluid. *Physical Review Letters* 123, 2019

Irvine, W. T. M. et al.: Tunable band topology in gyroscopic lattices. *Physical Review B* 98, 2019

Vitelli, V. et al.: Odd elasticity. *Nature Physics* 16, 2020

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »An Unexpected Twist Lights Up the Secrets of Turbulence« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

 **Quanta**magazine



FRANK SCHÄDEL (GERMAN FREISTETTER DE PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (REACTICOMMUNICATIONS ORIGINALS/PI-SA/4.0/LEGAL/0001)

FREISTETTERS FORMELWELT WIE MAN EIN SOFA UM DIE ECKE BRINGT

Das Problem begegnet den meisten Menschen beim Umzug, wenn man das schwere Möbelstück transportieren möchte. Doch auch Mathematiker machen sich ihre Gedanken dazu.

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

► spektrum.de/artikel/1795055

Unter dem Titel »Moving Furniture Through a Hallway« erschien 1966 im Journal der Society for Industrial and Applied Mathematics eine ungewöhnliche Frage von Leo Moser, die mit der Form von Möbelstücken zu tun hat. Irgendwie muss der Autor in seinem Arbeitsleben als Mathematiker auf die Idee gekommen sein, sich mit dem Transport von sperrigem Hausrat zu beschäftigen. Moser wurde 1921 in Wien geboren und siedelte 1924 nach Kanada über. Da er zu dem Zeitpunkt erst drei Jahre alt war, ist es eher unwahrscheinlich, dass er damals beim Möbelpacken half. Dennoch lautete die Frage, die er 1966 offiziell der Welt stellte: Wie sieht die größtmögliche Fläche aus, die sich um die Ecke eines L-förmigen Korridors mit Breite eins manövrieren lässt?

Wie man schnell erkennt, kann man einen Halbkreis mit dem Radius eins recht gut durch so einen Flur bugsieren. Dafür muss man ihn bis zum Anschlag den Gang entlangschieben, wodurch der Mittelpunkt des Halbkreises mit dem Eckpunkt des Korridors zusammenfällt. Das Möbelstück lässt sich einfach um 90 Grad drehen und weitertransportieren. Mit einer Fläche von $\pi/2$ klappt es also. Aber geht vielleicht mehr?

Mittlerweile weiß man: Ja, das funktioniert auch für größere Objekte. Für die »Sofakonstante« A gilt:

$$A > \frac{\pi}{2} + \frac{2}{\pi}$$

Schon 1968 bewies der britische Mathematiker John Hammersley (1920–2004), dass ein Objekt der Fläche $\pi/2 + 2/\pi$ ebenfalls um die Ecke passt. Die entsprechende Form sieht ein wenig wie ein altmodischer Telefonhörer aus, lässt sich mit ein bisschen Fantasie aber als Sofa betrachten. 1992 konnte der inzwischen emeritierte Professor Joseph Gerver von der Rutgers

University die Form verfeinern und ihre Fläche dadurch geringfügig erhöhen. Hammersley hatte allerdings auch gezeigt, dass das sperrige Sofa nicht größer als zweimal die Wurzel aus zwei sein kann. Erst 2017 gelang es den Mathematikern Yoav Kallus und Dan Romik, diese obere Schranke ein wenig zu senken.

Von den Ergebnissen kann man mindestens zwei Dinge lernen. Erstens: Der tatsächliche Wert der Sofakonstante liegt irgendwo zwischen 2,2195 und 2,37. Zweitens: Der Transport einer Couch um eine Ecke beschäftigt Mathematiker seit über 50 Jahren – und wird das auch noch weiter tun. Denn das »Sofaproblem« ist weiterhin ungelöst, der wahre Wert der Konstante ist unbekannt.

Im echten Leben klappt das mit ein bisschen Kraft und gutem Willen meistens irgendwie schon. Zur Not weicht man nach oben in die dritte Dimension aus, um Platz für die Drehung zu finden. Und wenn gar nichts mehr geht, lässt ein Sofa sich immer noch auseinanderschrauben. Es wäre also gar nicht nötig, sich so intensiv mit der Frage zu beschäftigen.

Doch Mathematiker tun es trotzdem, weil ein ungelöstes Problem ihnen ebenso ein Dorn im Auge ist wie Möbelpackern eine störrische Couch. Zudem ist die Aufgabe unterhaltsam, und man kann dabei einiges über Geometrie lernen. Das Sofaproblem ist sogar so populär, dass es im Roman »Der elektrische Mönch – Dirk Gentlys holistische Detektei« des beliebten Sciencefiction-Autors Douglas Adams auftaucht.

Leo Moser hatte jedenfalls großen Spaß an solch alltäglichen Rätseln. Er sammelte sie in einem Buch, in das Kollegen, Gäste an der Universität oder andere Personen, die bei ihm vorbeikamen, ihre ungelösten Fragen und Probleme eintragen konnten. Leider starb Moser bereits 1970 im Alter von 48 Jahren. Wer weiß, welche mathematischen Aspekte der Inneneinrichtung er sonst noch entdeckt hätte.

TECHNIK SPINTRONIK FÜR NEUROMORPHE COMPUTER

Computer und insbesondere Algorithmen der künstlichen Intelligenz verbrauchen viel Energie – erheblich mehr als unser Gehirn für ähnliche Aufgaben. Nun nutzen Forscher eine quantenmechanische Eigenschaft der Elektronen, um neuartige Geräte zu entwerfen, die ähnlich wie das menschliche Denkorgan funktionieren.



Damien Querlioz ist Physiker am Centre de nanosciences et nanotechnologies an der Université Paris-Saclay in Palaiseau. **Julie Grollier** ist Physikerin am CNRS Thalès in Palaiseau.

» [spektrum.de/artikel/1795040](https://www.spektrum.de/artikel/1795040)

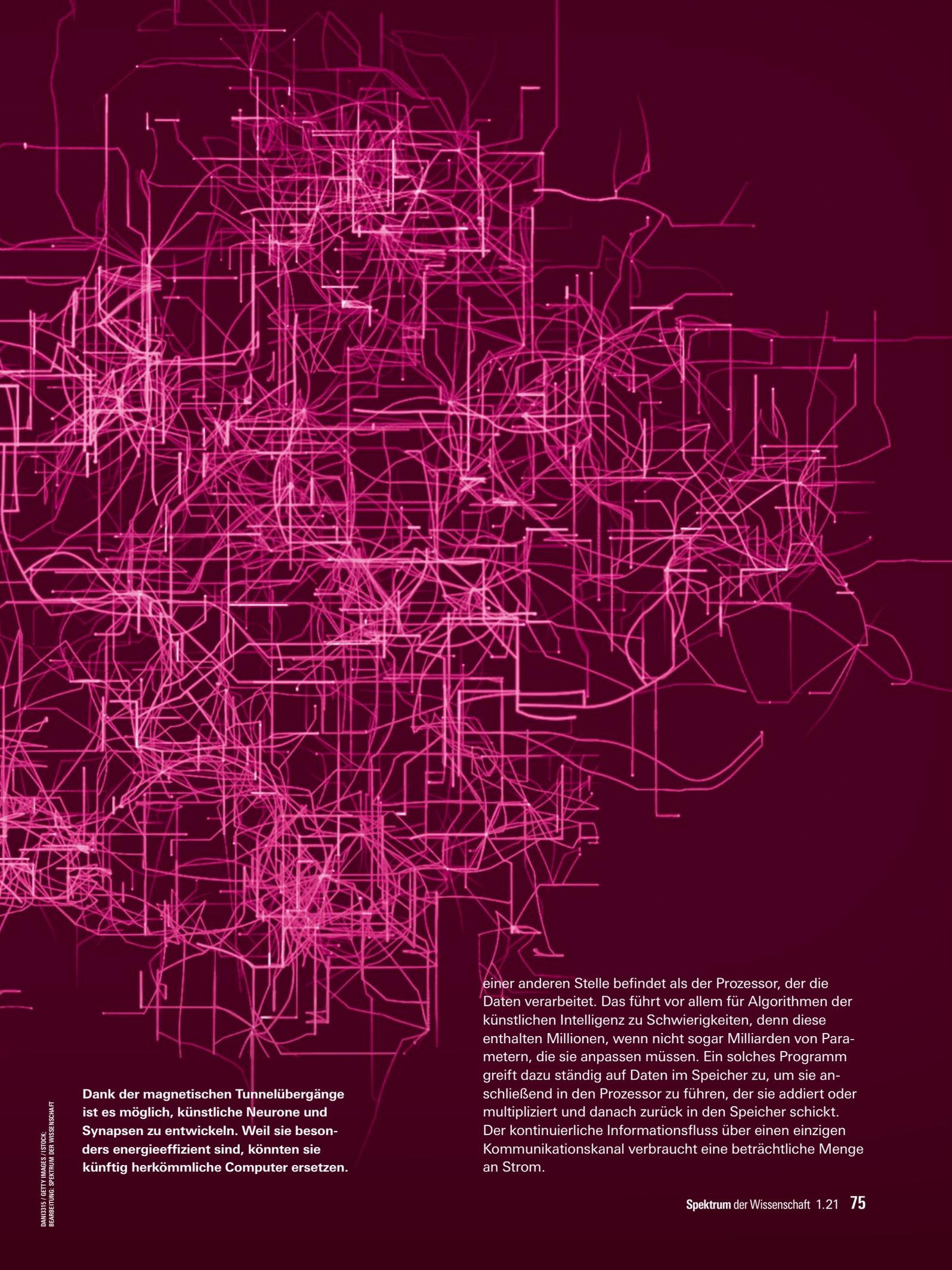
▶ Künstliche Intelligenz (KI) ist aus unserem alltäglichen Leben kaum noch wegzudenken: Die Algorithmen sortieren E-Mails, sind nützliche Sprachassistenten, analysieren den Inhalt von Texten oder Bildern – und das manchmal sogar besser als ein Mensch. Zum Beispiel besiegte 2017 das Programm AlphaGo von DeepMind den koreanischen Go-Weltmeister Ke Jie. Mit dieser Leistung hatten Experten in frühestens zehn Jahren gerechnet.

Um derart beeindruckende Ergebnisse zu erzielen, verbrauchen die Algorithmen jedoch sehr viel Energie, weitaus mehr als das menschliche Gehirn bei gleichwertigen Aufgaben. Ein Spracherkennungsprogramm wie Bert von Google erfordert für ein Training beispielsweise etwa 1000 Kilowattstunden Strom; eine solche Energiemenge würde dem menschlichen Gehirn für sechs Jahre reichen!

Moderne Algorithmen der künstlichen Intelligenz basieren häufig auf tiefen neuronalen Netzen, deren Struktur teilweise an die des visuellen Kortex angelehnt ist. Warum unterscheidet sich ihre Leistungsfähigkeit also so stark von unserem Denkorgan? Das Problem ist die Hardware, auf der die Programme laufen. Der Aufbau von herkömmlichen Computern und Grafikkarten weicht deutlich von dem des Gehirns ab.

Deshalb arbeiten viele Forscher und Firmen an neuen Ansätzen, um effizientere Geräte zu entwickeln. Eine aussichtsreiche Möglichkeit bietet die so genannte Spintronik, bei der man quantenmechanische Eigenschaften von Elektronen nutzt. Bauteile, die auf dieser Technik beruhen, können das Verhalten von Neuronen und den sie verbindenden Synapsen simulieren. Von der industriellen Umsetzung kompletter spintronischer Geräte ist man zwar noch weit entfernt, aber erste Ergebnisse derartiger Prototypen sind viel versprechend.

Der Aufbau heutiger Computer hindert die Maschinen daran, energieeffizienter und schneller zu arbeiten. Informationen werden in einem Speicher gesichert, der sich an



Dank der magnetischen Tunnelübergänge ist es möglich, künstliche Neurone und Synapsen zu entwickeln. Weil sie besonders energieeffizient sind, könnten sie künftig herkömmliche Computer ersetzen.

einer anderen Stelle befindet als der Prozessor, der die Daten verarbeitet. Das führt vor allem für Algorithmen der künstlichen Intelligenz zu Schwierigkeiten, denn diese enthalten Millionen, wenn nicht sogar Milliarden von Parametern, die sie anpassen müssen. Ein solches Programm greift dazu ständig auf Daten im Speicher zu, um sie anschließend in den Prozessor zu führen, der sie addiert oder multipliziert und danach zurück in den Speicher schickt. Der kontinuierliche Informationsfluss über einen einzigen Kommunikationskanal verbraucht eine beträchtliche Menge an Strom.

Das Gehirn funktioniert grundlegend anders. Es speichert Informationen in den Synapsen, die über das ganze Organ verteilt sind und die Neurone miteinander verbinden, welche die Daten verarbeiten. Jedes Neuron ist über durchschnittlich 10000 Synapsen mit anderen Zellen verbunden, wodurch das Denkorgan mehrere Berechnungen gleichzeitig durchführt. Eine solche Nachbarschaft von Recheneinheit und Speicher erweist sich als äußerst energieeffizient.

Auch durch die Art der Informationsverarbeitung lässt sich Energie einsparen. Computer manipulieren Daten, die durch Nullen und Einsen codiert sind, indem sie präzise logische Operationen durchführen. Für viele Anwendungen, etwa den Start einer Rakete, ist eine solche Genauigkeit entscheidend. Bei anderen Aufgaben wie dem Erkennen eines bekannten Gesichts kann man dagegen darauf verzichten. Einer elektronischen Schaltung ein perfektes Verhalten aufzuzwingen, erfordert viel Energie, weil man dafür alle Störungen und Fehler korrigieren muss.

Im Lauf der Evolution hat unser Gehirn, das nur über eine begrenzte Energiequelle durch die tägliche Kalorienzufuhr verfügt, eine völlig andere Strategie entwickelt. Es balanciert zwischen zuverlässiger Berechnung und vertretbarem Energieaufwand. Die Synapsen und Neurone legen somit ein stochastisches Verhalten an den Tag: Sie liefern bei ähnlichen Informationen nicht immer das gleiche Ergebnis.

Damit das Gehirn trotzdem funktioniert, nutzt es Redundanz. Manchmal verarbeiten mehrere Neurone das gleiche Signal. Aus den gesammelten Antworten leitet sich dann ein stabiles Ergebnis ab. Tatsächlich sind solche Dopplungen weniger energieaufwändig als eine allzu starre Struktur, die systematisch Fehler korrigiert. Darüber hinaus sind die Signale, die das Gehirn speichert und verarbeitet, keine Nullen oder Einsen wie in der heutigen Elektronik. Stattdessen haben die Daten eine große Bandbreite unterschiedlicher Werte. Dadurch enthalten sie mehr Informationen, sind aber empfindlicher gegenüber Störungen.

Ein weiterer Nachteil von Prozessoren ist, dass jedes der darin befindlichen Elemente im Rhythmus eines einzigen Taktgebers arbeitet, was ihre Geschwindigkeit beschränkt. Das Gehirn funktioniert dagegen asynchron: Jedes Neuron

sendet elektrische Signale mit einer individuell angepassten Rate aus. Dadurch kann es effektiv mit anderen Nervenzellen kommunizieren, die sich möglicherweise in einem anderen Bereich des Organs befinden.

All diese Besonderheiten machen das Gehirn energieeffizient. Deswegen haben Wissenschaftler schon vor Jahrzehnten versucht, elektronische Bauteile nach biologischem Vorbild zu entwerfen. Bereits Ende der 1980er Jahre entwickelte Carver Mead, ein Forscher am California Institute of Technology und einer der Gründerväter der modernen Mikroelektronik, das Konzept der neuromorphen Schaltkreise, die mit elektronischen Neuronen und Synapsen die neurobiologische Struktur des Gehirns nachahmen sollen. Wegen der vielen technologischen Hindernisse haben Forscher den Ansatz allerdings lange Zeit aufgegeben.

Die Quantenmechanik bietet eine energieeffiziente Lösung

Elektronische Speicher verbrauchen viel Platz, weshalb sie sich nicht nah an Prozessoren einbauen lassen. Darum haben Recheneinheiten meist nur wenig Speicherkapazität; der größte Teil des Speichers befindet sich auf einer äußeren Festplatte. Angesichts aktueller Fortschritte widmen sich Wissenschaftler nun wieder Ansätzen, um die zwei fundamentalen Bauteile anzunähern. Dabei hat sich die Spintronik in den letzten Jahren als neue, viel versprechende Möglichkeit herauskristallisiert.

Bei dieser Technik nutzt man nicht nur die elektrische Ladung der Elektronen aus, sondern auch ihren Spin. Letzterer ist eine rein quantenmechanische Eigenschaft von Teilchen, die einem Drehmoment ähnelt. Je nach Drehsinn lässt sich der Spin daher als nach oben oder unten gerichteter Pfeil darstellen. Weil Elektronen geladen sind, führt das zu einem Magnetfeld. Hat die Mehrheit der Teilchen eines Objekts einen gleichgerichteten Spin, dann ist es magnetisiert. In der Spintronik lassen Wissenschaftler elektrische Ströme mit magnetischen Materialien wechselwirken, um digitale Schaltkreise herzustellen.

Die Grundbausteine spintronischer Systeme sind kleine Zylinder mit einem Durchmesser von etwa zehn Nanometern (millionstel Millimetern), so genannte magnetische Tunnelübergänge. Sie bestehen aus zwei hauchdünnen magnetischen Materialien (Nanomagneten), die eine isolierende Schicht voneinander trennt. Dank des quantenmechanischen Tunneleffekts können Elektronen die Isolation überwinden und von einer Schicht in die andere dringen. Wenn die Magnetisierungen der beiden Stoffe gleich orientiert sind, kann ein elektrischer Strom leicht durch den Übergang fließen, der elektrische Widerstand ist also gering. Sind die Nanomagnete hingegen entgegengesetzt magnetisiert, ist der dazugehörige Widerstand hoch.

Die magnetischen Tunnelübergänge lassen sich somit je nach Magnetisierung als Informationsbit verwenden: Zwei parallel ausgerichtete Nanomagnete mit niedrigem Widerstand bilden eine Null, während entgegengesetzt orientierte mit hohem Widerstand einer Eins entsprechen. Das ermöglicht es, Daten zuverlässig zu speichern. Derartige Komponenten heißen MRAM (englisch: magnetoresistive random-

AUF EINEN BLICK VERNETZTE SCHALTUNGEN

- 1** Computer benötigen viel Energie beim Hin- und Herschieben von Daten: zwischen dem Speicher und dem Prozessor, der sie verarbeitet.
- 2** Dank der Spintronik lassen sich Speicher viel näher an den Recheneinheiten platzieren. Solche Geräte haben eine ähnliche Struktur wie das Gehirn – mit Neuronen, die durch Synapsen verbunden sind.
- 3** Erste Umsetzungen derartiger spintronischer Bauteile sind extrem energieeffizient und ähnlich leistungsfähig wie herkömmliche Computerprogramme.

Neuronale Netzwerkalgorithmen

Neuronale Netze sind keine physikalischen Strukturen, sondern Algorithmen, die auf der Funktionsweise des Gehirns basieren. Sie bestehen aus einzelnen Recheneinheiten, den Neuronen, die durch Synapsen miteinander verbunden sind. Beim so genannten tiefen Lernen sind die Neurone in Schichten organisiert. Die genaue Struktur der Netzwerke hängt von der Aufgabe ab, die sie durchführen sollen, etwa Bild-, Ton- oder Textanalyse.

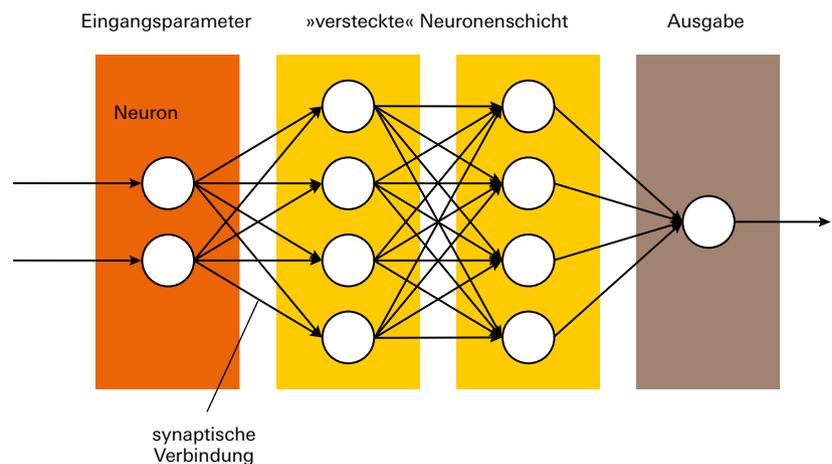
Dabei übergibt man der ersten Neuronenschicht ein Eingangssignal, etwa die Pixelwerte eines Bilds. Die Recheneinheiten leiten die Daten anschließend an die nächste Schicht weiter, die sie an die darauf folgende Schicht schicken.

Jedes Neuron addiert die einkommenden Werte, die zuvor mit den Koeffizienten der entsprechenden Synapse gewichtet wurden. Diese Gewichtungen definieren die so genannte synaptische Funktion,

die das Netzwerk während der Lernphase konfiguriert. Während des Prozesses übermittelt man Daten an das Programm, das sie verarbeitet und die erhaltene Lösung mit einer vorgegebenen vergleicht.

Identifiziert ein Algorithmus zum Beispiel fälschlicherweise ein Objekt in einem Bild als Katze, dann korrigiert er die synaptischen

Gewichte mit der mathematischen Methode der Fehlerrückführung. Dafür nutzt das Programm statistische Methoden, um die Variation eines Fehlers in einem Neuron von der letzten bis zur ersten Schicht zu berechnen. Nach mehreren Durchläufen ist die synaptische Funktion korrekt konfiguriert, wodurch das neuronale Netz Katzenbilder mit einer geringen Fehlerrate erkennt.



CHARLOTTECALAMET / POUR LA SCIENCE SEPTEMBER 2020

access memory). Bereits Mitte der 1980er Jahre hielten die Bauteile Einzug in die Industrie. Allerdings benötigte man damals noch ein externes Magnetfeld, um die Orientierung eines Nanomagnetens und damit den Wert eines Bits zu ändern. Deshalb war es nicht möglich, die Komponenten auf den Nanometermaßstab zu verkleinern.

1996 schlugen der IBM-Forscher John Slonczewski und Luc Berger von der Carnegie Mellon University unabhängig voneinander eine Methode vor, um die Bauteile zu verbessern. Dafür nutzten sie einen bis dahin unbekanntem Effekt, den so genannten Spin-Transfer. Fließen Elektronen durch einen Nanomagnet, wechselwirkt ihr Spin mit dem der Elektronen in der Schicht: Ihr Drehmoment richtet sich mit der Magnetisierung des Materials aus. Bei einem Tunnelübergang ist einer der Stoffe fest in eine Richtung gepolt, während die Orientierung des zweiten veränderlich ist. Hat ein Strom eine bestimmte Spinausrichtung, kann er die Magnetisierung der Schicht ändern. Abhängig von der Richtung des elektrischen Flusses lässt sich ein magnetischer Tunnelübergang daher als Null oder Eins codieren – ganz ohne externes Magnetfeld. Diese Entdeckung öffnete die Tür zur großflächigen Nutzung von MRAMs (siehe »Manipulation des Spins«, S. 80).

Seitdem produzieren mehrere Hersteller die spintronischen Speicherbausteine. Inzwischen lassen sich etwa eine

Milliarde davon in einen Siliziumchip einbauen. MRAMs finden sich häufig in gewöhnlicher Elektronik, weil sie die wichtigsten Eigenschaften der zwei Hauptspeicherfamilien vereinen: die Lese- und Schreibgeschwindigkeit von RAMs und die Fähigkeit von nichtflüchtigen Datenspeichern, Informationen auch ohne externe Stromquelle zuverlässig zu sichern.

Auf diese Weise ist man der Idee neuromorpher Chips ein Stück näher gerückt. Denn die magnetischen Tunnelübergänge lassen sich in Siliziumschaltungen einfügen, welche die Rechenoperationen durchführen. Wie im Gehirn, wo sich Synapsen direkt an Neuronen befinden, liegen die Speicher also nahe am Silizium-Rechenkern.

Durch ihre Architektur eignen sich die Chips perfekt, um neuronale Netzwerkalgorithmen auszuführen (siehe »Neuronale Netzwerkalgorithmen«, oben). Ähnlich wie der visuelle Kortex bestehen die Netze aus Neuronenschichten, die durch Synapsen miteinander verbunden sind. Übergibt man dem Programm etwa die Pixelwerte eines Bilds, führen die Neurone damit Berechnungen durch, die von den »Gewichtungen« der Synapsen abhängen. Diese geben an, wie stark eine Verbindung ist. Möchte man mit einem neuromorphen Chip einen KI-Algorithmus laufen lassen, muss man alle Synapsen mit den richtigen Werten konfigurieren, um die konkrete Aufgabe zu definieren.

Damit verringert man den Datenaustausch zwischen externem Speicher und Prozessor drastisch, wodurch die KI-Algorithmen deutlich weniger Energie verbrauchen als solche auf gewöhnlichen Computern. Das macht den Ansatz sowohl für universitäre wie für industrielle Forschungseinrichtungen interessant. Allerdings ist die Technik noch nicht vollkommen ausgereift: Man muss im Voraus die richtigen Gewichtungen der Synapsen und somit die Voreinstellungen des neuronalen Netzes kennen, damit es funktioniert. Die neuromorphen Chips sind also nicht so anpassungsfähig wie ein Gehirn. Deshalb suchen Wissenschaftler nach einem System, das sich neue Aufgaben beibringen kann, indem es die passenden Gewichtungen selbst findet.

In gewöhnlichen KI-Algorithmen gibt es eine Trainingsphase, in der die Programme lernen. Währenddessen passt

das neuronale Netz die Synapsen-Werte an, um eine zugewiesene Aufgabe immer besser zu erfüllen. Der Vorgang basiert jedoch auf einer komplexen mathematischen Methode, der so genannten Fehlerrückführung. Sie erfordert zahlreiche extrem genaue und daher energieintensive Berechnungen. Auf herkömmlichen Computern funktioniert das gut, aber nicht in vom Gehirn inspirierten Systemen, die weniger präzise arbeiten.

Viele Wissenschaftler sind überzeugt, man dürfe die Grundidee nicht aus den Augen lassen, um das Problem zu lösen: Statt bisherige Methoden des maschinellen Lernens zu verwenden, müsse man imitieren, wie das Gehirn lernt. Biologische Synapsen dienen beispielsweise nicht nur als Gedächtnis, sondern sind auch das Herzstück des Lernmechanismus. Sie sind flexibel, das heißt, sie passen ihre

Die verschiedenen neuromorphen Ansätze

In herkömmlichen Computern befindet sich der Speicher an einer anderen Stelle als der Prozessor, der die Daten verarbeitet. Diese so genannte Von-Neumann-Architektur ist zwar einfach zu implementieren, allerdings verbraucht sie viel Energie und hat eine begrenzte Geschwindigkeit. Die Spintronik könnte dabei helfen, Speicher und Prozessoren einander näher zu bringen.

Spintronik



Diese Technik basiert auf magnetischen Tunnelübergängen. Der Widerstand eines Übergangs, der von der Magnetisierung zweier Schichten abhängt, lässt sich als Null oder Eins codieren. Man kann aus solchen Komponenten daher künstliche Synapsen oder Neurone erzeugen.

- + basiert auf vielfältigen und gut verstandenen physikalischen Prinzipien
- komplizierte Herstellung

Transistoren



Künstliche Neurone und Synapsen lassen sich aus Siliziumtransistoren herstellen. Für ein einziges Neuron benötigt man aber bereits Hunderte solcher Bauteile. Diese Idee wurde in den TrueNorth-Chips von IBM und den Loihi-Chips von Intel umgesetzt.

- + schon heute verfügbar
- extrem teure Speicher



Memristoren



Die elektronischen Bauteile, die beispielsweise aus Titanoxid bestehen, haben einen veränderlichen Widerstand: Er hängt von dem Strom ab, der durch sie hindurchfließt. Ihr Zustand ist damit durch die bereits angelegten Ströme bestimmt. Solche Speicher ähneln dadurch den biologischen Vorbildern.

- + einfache Herstellung
- + günstig
- niedrige Zuverlässigkeit

Phasenwechsel-Speicher



Die Komponenten enthalten Materialien, wie Chalkogenidgläser, die unter Wärmeeinwirkung aus einer kristallinen in eine amorphe Phase übergehen. Der elektrische Widerstand der amorphen Phasen ist höher als der der kristallinen, wodurch sich digitale Null- und Eins-Zustände codieren lassen.

- + Technologie schon weit entwickelt
- hoher Energieverbrauch

Optik



In einem optischen Computer ersetzen die von Lasern emittierten Photonen die Elektronen herkömmlicher Geräte. Optische Komponenten, die schneller als elektrische Transistoren sind, verarbeiten das Lichtsignal direkt. Mit dieser Technologie lassen sich auch Speicherbausteine entwerfen.

- + schnelle Berechnungen
- komplizierte Umsetzung (vor allem die Verkleinerung der Komponenten)
- hoher Energieverbrauch

Reaktion an die Informationen an, denen sie ausgesetzt sind. Wenn etwa zwei Neurone gleichzeitig aktiv sind, verstärkt sich die Synapse, die beide verbindet.

Um das Prinzip auf spintronische Bauelemente zu übertragen, müssten die Gewichtungen vom empfangenen Signal abhängen. Legt man eine elektrische Spannung an einen magnetischen Tunnelübergang an, dann kann sich die Magnetisierung von einem der Nanomagneten durch den Spin-Transfer-Effekt umkehren. Damit ändert sich der digitale Wert des Übergangs. Der Vorgang ist aber nicht immer exakt vorhersagbar: Liegt die Spannung nicht lange genug an, erfolgt die Umkehrung nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Je stärker die Spannung, desto wahrscheinlicher ist es, dass der Übergang seinen Wert ändert.

In gewöhnlichen Speichern möchte man ein solches unsicheres Verhalten um jeden Preis vermeiden. Doch mit neuromorphen Systemen kann man auf diese Weise biologische Synapsen imitieren, die abhängig von den empfangenen Signalen die Konfiguration des neuronalen Netzes schrittweise ändern – dadurch passen sich die Algorithmen an eine neue Aufgabe an, ohne dafür umständliche Methoden wie die Fehlerrückführung verwenden zu müssen.

2015 haben wir zusammen mit unseren Kollegen ein solches System spintronischer Speicher umgesetzt und es lernen lassen, verschiedene Aufgaben zu meistern. Unter anderem konnte unser neuronales Netz unterschiedliche Fahrzeuge auf einer Autobahn mit 95-prozentiger Genauigkeit zählen oder handgeschriebene Zahlen erkennen, ähnlich wie ein gewöhnlicher KI-Algorithmus auf Computern. Bei diesen relativ einfachen Aufgaben schneiden die neuromorphen Bauteile vergleichbar ab wie herkömmliche Methoden des maschinellen Lernens. Wenn es jedoch um komplexere Probleme geht, etwa Go oder Schach zu spielen, sind die neuen Ansätze noch weit davon entfernt, mit den etablierten Algorithmen konkurrieren zu können.

Um hier voranzukommen, sollte man nicht nur flexible und lernfähige Synapsen modellieren, sondern auch die Neurone, welche die Berechnungen durchführen, dem biologischen Vorbild nachempfunden. Denn die bisher betrachteten gewöhnlichen Prozessoren imitieren keinesfalls einzelne Nervenzellen.

Das menschliche Gehirn enthält fast 100 Milliarden Neurone. Inzwischen können moderne KI-Algorithmen auf herkömmlichen Computern bis zu zehn Millionen davon simulieren. Möchte man gleich viele Recheneinheiten in einem Chip mit einem Zentimeter Größe verarbeiten, müssten sie weniger als einen Mikrometer breit sein. Das stellt jedoch aktuell ein Problem dar, denn ein einziges künstliches Neuron erfordert hunderte Transistoren.

IBM entwarf 2014 einen neuromorphen Chip namens TrueNorth, der ganz ohne Spintronik auskommt. Das System besteht aus mehr als fünf Milliarden Transistoren, was etwa einer Million Neurone und hunderten Millionen Synapsen entsprechen würde. Durch die Annäherung von Rechenzentrum und Speicher, behauptet IBM, verbrauche das Bauteil zirka 1000-mal weniger Leistung als herkömmliche Varianten.

Der TrueNorth-Chip simuliert jedoch nicht wirklich eine Million biologischer Neurone. Die Bauteile nehmen zu viel

Platz ein, als dass man derart viele auf einem Chip unterbringen könnte. Die digitalen Schaltkreise bestehen stattdessen aus mehreren Neuronen, welche ihre Berechnungen nacheinander ausführen – und nicht wie im Gehirn unabhängig voneinander. Dadurch weicht der Aufbau vom biologischen Vorbild ab. Dennoch erwiesen sich die Chips von IBM als extrem schnell und energieeffizient.

Drei Jahre später hat Intel ein ähnliches Bauteil namens Loihi entwickelt, das bloß 130000 Neurone enthält und verhältnismäßig groß ausfällt. Wir halten es deshalb für unwahrscheinlich, dass diese rein elektronischen Ansätze in der nächsten Zeit mit der Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns konkurrieren werden.

Magnetische Tunnelübergänge, die Neurone und Synapsen imitieren

Die Spintronik könnte allerdings zu bedeutenden Fortschritten führen. Denn neben den Synapsen lassen sich die magnetischen Tunnelübergänge auch dazu nutzen, die Schlüsselfunktionen von Neuronen im Gehirn nachzuahmen. Die biologischen Nervenzellen kommunizieren, indem sie elektrische Impulse aussenden, die zwar alle gleich sind, deren Anzahl aber variiert. Wie viele Impulse ein Neuron innerhalb einer gewissen Zeit erhält, beeinflusst die Frequenz, mit der es selbst welche aussendet.

Mit herkömmlicher Elektronik ist es schwierig, impuls-gesteuerte Neurone in Nanometergröße herzustellen. Will man Signale einer bestimmten Rate erzeugen, muss man Rückkopplungsschleifen in elektronischen Schaltungen erzeugen, was Platz beansprucht. Magnetische Tunnelübergänge können das Verhalten jedoch effizient reproduzieren.

Dazu führt man Eingangssignale in Form elektrischer Ströme in die Übergänge. Die Signale summieren sich, genau wie in einem biologischen Neuron, bevor sie in die

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Verbindungsstelle eindringen. Hat man die Eigenschaften des Bauteils richtig konfiguriert, kippt der durch den Strom übertragene Spin die Magnetisierung des einen Nanomagneten nicht vollständig, sondern lässt sie rotieren, wie die Nadel eines Kompasses. Das beeinflusst den elektrischen Widerstand des Übergangs und führt zu einem periodischen elektrischen Signal. Je stärker der Strom, desto höher fällt die Frequenz der erzeugten Impulse aus. Das Verhalten ist dem eines biologischen Neurons sehr ähnlich. Weil das Phänomen bei Raumtemperatur auftritt und sich stabil erzeugen lässt, kann man es für industrielle Zwecke nutzen.

2017 haben wir mit unseren Kollegen einen magnetischen Tunnelübergang erzeugt, der ein biologisches Neu-

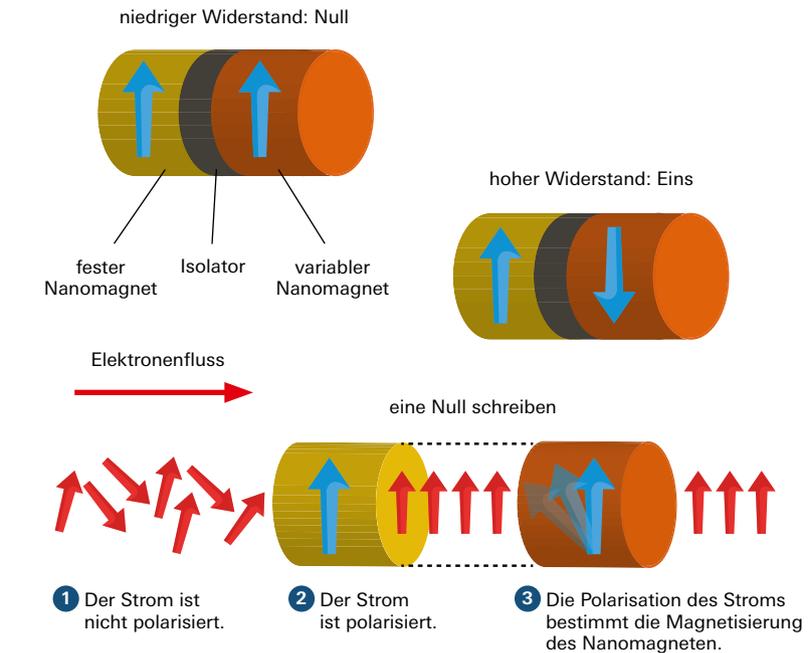
Manipulation des Spins

Gewöhnliche Schaltkreise wie Transistoren basieren auf der Veränderung der elektrischen Ladung. In der Spintronik nutzt man neben der Ladung eine weitere Eigenschaft von Elektronen: den Spin. Dieser entspricht einem intrinsischen magnetischen Moment. Materialien wie Eisen sind magnetisch, weil der Spin der darin befindlichen Elektronen meist in die gleiche Richtung zeigt. Fließt ein elektrischer Strom durch einen solchen Stoff, orientiert sich der Spin der strömenden Elektronen in Richtung der Magnetisierung. Diesen Effekt nutzt man in der Spintronik.

Dort arbeitet man mit magnetischen Tunnelübergängen, die aus zwei magnetischen Stoffen bestehen, die durch eine Isolierschicht getrennt sind. Welche Materialien man dafür genau verwendet, hängt von den Eigenschaften ab, die man der Verbindung verleihen möchte. Der Isolator ist oft ein Metalloxid, und seine Dicke beträgt ein bis zwei Nanometer. Die Magnetisierung des einen Stoffs ist fest, während die des anderen veränderlich ist.

1975 wies Michel Jullière vom INSA in Rennes erstmals den sogenannten magnetoresistiven Tunneleffekt bei 4,2 Kelvin nach; 1991 entwickelte Terunobu Miyazaki von der Tohoku-Universität in Japan ein System, bei dem das Phänomen auch bei Raumtemperatur stattfindet: Fließt ein elektrischer Strom durch einen magnetischen Übergang, tunnelt er durch die Isolierschicht. Sind die Magnetisierungen der beiden Materialien gleich, strömen die Elektronen leicht hindurch. Sind sie dagegen entgegengesetzt magnetisiert, erfahren die Teilchen einen hohen elektrischen Widerstand.

Indem man den Widerstand eines magnetischen Tunnelübergangs misst, kann man daher die Magnetisierungen der Stoffe ablesen. Auf diese Weise lässt sich ein



solches Bauteil als Informationseinheit verwenden: »Null« bei parallelen und »Eins« bei entgegengesetzten Magnetisierungen. Damit kann man magnetische Tunnelübergänge als Speichersysteme nutzen. 1984 entwickelten Arthur Pohm und James Daughton von der Firma Honeywell das erste auf diesem Prinzip basierende Gerät: den MRAM (magnetoresistive random-access memory).

Weil die Magnetisierung der einen Schicht des Tunnelübergangs veränderlich ist, kann man sie von einer Null zu einer Eins umorientieren. Früher nutzte man dafür ein externes Magnetfeld, jedoch ist es dadurch nicht möglich, die Geräte auf Nanometerskalen zu verkleinern.

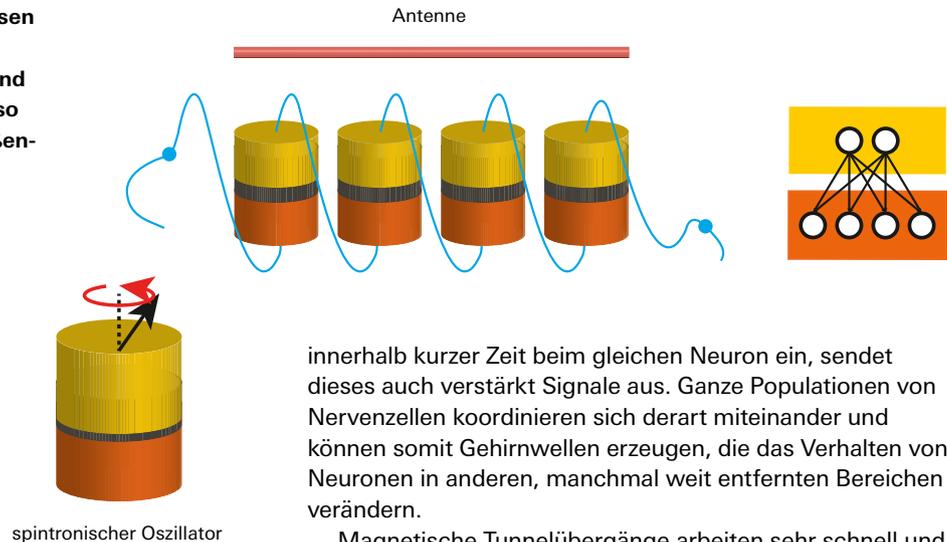
Abhilfe schufen der IBM-Forscher John Slonczewski und Luc Berger von der Carnegie-Mellon University in den Vereinigten Staaten, als sie 1996 auf das zweite entscheidende Phänomen der Spintronik hinwiesen: den Spin-Transfer.

Fließt ein ausreichend starker elektrischer Strom durch einen magnetischen Tunnelübergang,

kann er die Magnetisierung der variablen Schicht kippen. Um eine Null zu schreiben, strömen die Elektronen **1** zunächst durch die fest magnetisierte Schicht. Dadurch nimmt ihr Spin die entsprechende Ausrichtung an **2**. Wenn die Elektronen daraufhin in der zweiten Schicht ankommen, wechselwirken sie mit den Teilchen im Material und übertragen ihren Spin darauf. Die Magnetisierung der Schicht richtet sich dann parallel zur anderen aus **3**.

Möchte man eine Null in eine Eins umwandeln, führt man den Strom zuerst durch die variable Schicht. Die Elektronen nehmen deren Magnetisierung an. Sobald der Strom allerdings auf die isolierende Grenzschicht trifft, werden einzelne Teilchen reflektiert. Dabei ändert sich ihre Spinausrichtung, und sie übertragen die Orientierung auf die variable Schicht. Die Magnetisierung der variablen Schicht richtet sich entgegen der anderen aus, was einer Eins entspricht. Seit 2008 verwenden viele Hersteller magnetische Tunnelübergänge, um Hochleistungs-Speicherbausteine zu entwerfen.

Magnetische Tunnelübergänge lassen sich als Neurone verwenden, die Informationen verarbeiten. Dazu sind die Eigenschaften des Übergangs so beschaffen, dass der hindurchfließende Strom die Magnetisierung der obersten Schicht permanent dreht (links im Bild). Das Bauteil sendet dann ein Signal aus, ähnlich wie ein biologisches Neuron. In einem Experiment kombinierten die Forscher vier künstliche Neurone, die ihre Signale zusätzlich mit einer Antenne synchronisierten (Mitte). Das neuronale Netz (rechts) war damit in der Lage, gesprochene Vokale zu erkennen.



ron imitiert. Wir gingen sogar noch weiter: Mit einem einzigen Übergang konnten wir ein Netzwerk von 400 Neuronen simulieren! Dafür nutzten wir die als Zeitschlitz bekannte Methode, bei welcher der magnetische Übergang nach und nach die Rolle jedes Neurons übernimmt.

Das Netzwerk haben wir anschließend verwendet, um gesprochene Zahlen zu identifizieren. Dazu haben wir die Audiosignale in elektrische Signale umgewandelt, die wir durch den magnetischen Tunnelübergang geschickt haben. Die Magnetisierung des einen Nanomagnetens begann zu rotieren, wodurch es zu einer Spannungsänderung an den Anschlüssen kam. Indem wir diese aufzeichneten, konnten wir mit Hilfe eines Computers das neuronale Netzwerk mit den synaptischen Gewichtungen simulieren. Die Werte der Synapsen haben wir anschließend in einer Lernphase am Computer entsprechend konfiguriert, damit das Programm gesprochene Zahlen versteht. Am Ende des Trainings erkannte das neuromorphe System zuvor unbekannte Sprachproben mit einer Erfolgsquote von 99,6 Prozent – eine außergewöhnliche Leistung. Das Experiment zeigt, wie zuverlässig magnetische Tunnelübergänge biologische Neurone imitieren. Allerdings war für das spintronische System noch immer ein Computer nötig, der die korrekten Gewichtungen des Netzwerks berechnet.

In Zukunft möchten wir riesige Netzwerke mit Millionen magnetischer Tunnelübergänge realisieren, die als Neuronen und Synapsen fungieren. Wie wir gesehen haben, lassen sie sich bereits milliardenfach in Chips integrieren und mit herkömmlichen elektronischen Schaltungen zu Speichern verbinden, was eine industrielle Nutzung vereinfachen würde.

Zudem haben wir das volle Potenzial der Spintronik noch lange nicht ausgeschöpft. Magnetische Tunnelübergänge könnten andere Eigenschaften des Gehirns nachahmen, etwa die Synchronisation von Neuronen. Tatsächlich können teilweise sehr weit entfernte biologische Nervenzellen ihre Reaktionen aufeinander abstimmen, wenn sie gleichzeitig Signale aussenden. Das hat viele Vorteile: Neurone, die zeitgleich Impulse feuern, werden bei der Signalverarbeitung als wichtiger wahrgenommen. Treffen die Signale

innerhalb kurzer Zeit beim gleichen Neuron ein, sendet dieses auch verstärkte Signale aus. Ganze Populationen von Nervenzellen koordinieren sich derart miteinander und können somit Gehirnwellen erzeugen, die das Verhalten von Neuronen in anderen, manchmal weit entfernten Bereichen verändern.

Magnetische Tunnelübergänge arbeiten sehr schnell und bilden elektromagnetische Impulse mit einer Frequenz von bis zu mehreren hundert Megahertz. Informationen lassen sich dadurch millionenfach schneller verarbeiten als im Gehirn. Die Übergänge reagieren zudem empfindlich auf umgebende elektromagnetische Wellen, die die erzeugten Impulse ändern können: Die Tunnelübergänge sind daher gute Radioempfänger. Indem man ihre Eigenschaften geeignet anpasst, lassen sich die Übergänge dank der Signale, die sie senden und empfangen, synchronisieren – genau wie biologische Neurone. Dadurch kann man neuronale Netze effizient koordinieren. 2018 haben wir ein System von vier magnetischen Tunnelübergängen untersucht, das gesprochene Vokale erkennen sollte. Tatsächlich konnten die Bauteile dadurch, dass sie ihre Rhythmen koordinierten, die Sprachsignale deutlich besser klassifizieren als ohne Synchronisation.

Momentan versuchen wir, dichte Netzwerke künstlicher Neurone herzustellen, die über elektromagnetische Wellen miteinander kommunizieren. Irgendwann ließe sich ein solches System mit MRAM-basierten künstlichen Synapsen kombinieren: Damit würde man dem Traum eines lernfähigen neuromorphen Netzwerks näher kommen.

Unser Ziel ist es dabei nicht, ein System zu schaffen, das mit der menschlichen Intelligenz konkurriert. Dafür wissen wir viel zu wenig über das Gehirn. Stattdessen möchten wir eine KI entwickeln, die energieeffizienter und schneller ist als die derzeit verfügbaren Algorithmen, um den enormen Energieverbrauch von Rechenzentren zu verringern. ◀

QUELLEN

Grollier, J. et al.: Neuromorphic spintronics. *Nature Electronics* 3, 2020

Locatelli, N. et al.: Spintronic devices as key elements for energy-efficient neuro-inspired architectures. *IEEE Xplore: Design, Automation & Test in Europe. Conference & Exhibition*, 2015

Romera, M. et al.: Vowel recognition with four coupled spin-torque nano-oscillators. *Nature* 563, 2018

Torrejon, J. et al.: Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators. *Nature* 547, 2017

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN KUNSTVOLLE SPIRALPARKETTE

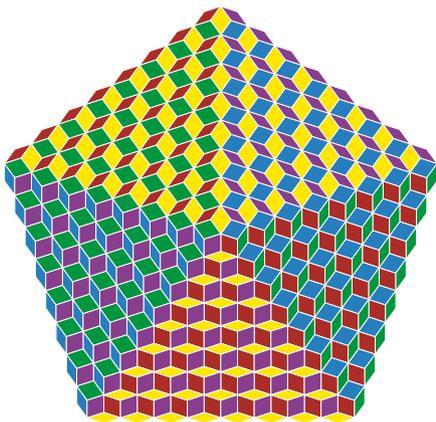
Ein Badezimmer lässt sich mit vollkommen ungewohnten Mustern fliesen, und das mit einer einzigen Sorte von Kacheln oder einem sehr kleinen Sortiment. Diese Parkette sind weder periodisch noch unperiodisch in der Art der Quasikristalle – vielmehr gehen Spiralen von einem definierten Zentrum aus.



Christoph Pöppe war Redakteur bei »Spektrum«, zuständig vorrangig für Mathematik und Informatik.

► spektrum.de/artikel/1795043

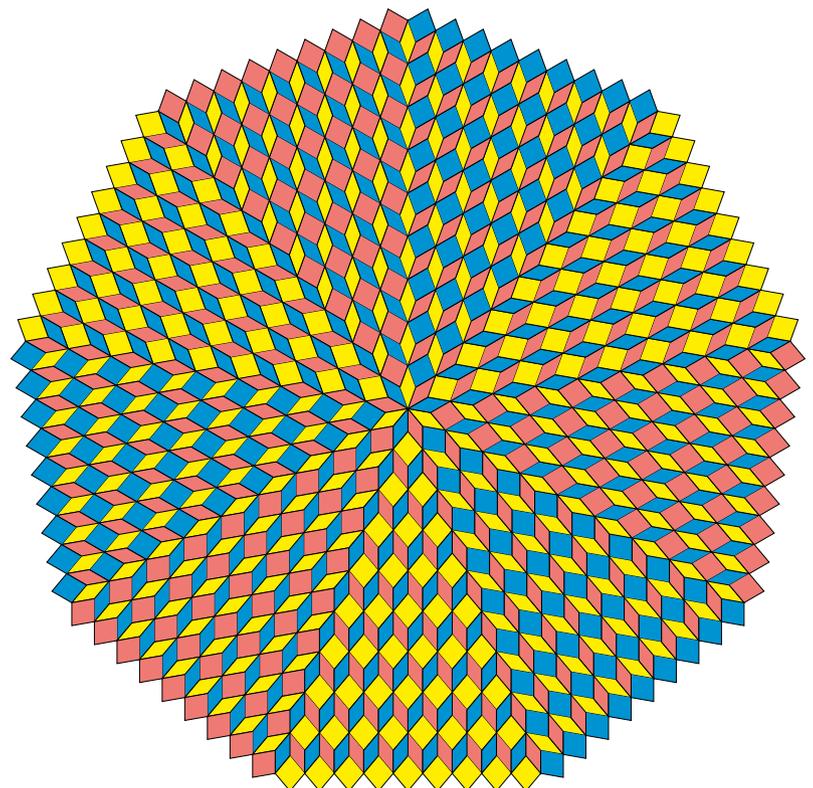
► Jahrzehnte später ist es endlich an der Zeit zu würdigen, wie sich mein Geschichtslehrer um den Fortschritt der Geometrie verdient gemacht hat. Der gleichmäßige Fluss seiner Rede ließ mir ausreichend Gelegenheit, nicht nur den Ausführungen zu folgen, sondern mir nebenher noch völlig andere Gedanken zu machen. Wichtiger noch: Im Gegensatz zu seinen Kollegen tolerierte er es sogar, wenn ich während des Unterrichts diese Gedanken in sorgfältig ausgearbeitete Zeichnungen umsetzte. So konnte ich erproben, auf welch verschiedene Weisen man die Ebene mit speziellen Rauten lückenlos bedecken kann. Erst später erfuhr ich, dass solche Rauten – mit Öffnungswinkeln von 36 und 72 Grad – in der Theorie der berühmten



CHRISTOPH PÖPPE

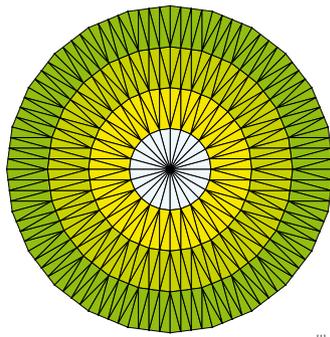
1 Radialparkett mit fünfzähliger Symmetrie: Im Zentrum werden fünf dicke goldene Rauten, die sich in einem Punkt treffen, durch fünf dünne zu einem regelmäßigen Zehneck ergänzt. Zwei dicke Rauten und die dazugehörige dünne bilden ein Sechseck; Kopien dieser Figur füllen die Ebene, aber jedes der fünf möglichen Sechsecke nur den ihm zugehörigen Ausschnitt.

2 Radialparkett mit neunzähliger Symmetrie: Die Parkettsteine lassen sich mit nur drei Farben so kolorieren, dass nirgends zwei gleichfarbige entlang einer Kante aufeinandertreffen.



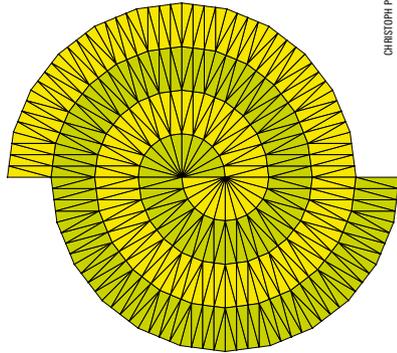
CHRISTOPH PÖPPE

3 24 gleichschenklige Dreiecke mit einem Scheitelwinkel von 15 Grad lagern sich zu einem regelmäßigen 24-Eck zusammen. Um diese zentrale Figur lassen sich aus demselben Material Ringe bauen.



CHRISTOPH PÖPPE

4 Aus einem Radialparkett wird durch schlichte Verschiebung einer Hälfte gegen die andere eines mit spiralförmiger Struktur.



Penrose-Parkette eine entscheidende Rolle spielen, weswegen man sie auch goldene Rauten nennt.

Bis zu einem echten Penrose-Parkett habe ich es damals in der Schule nicht geschafft; aber es reichte zu einem Muster, das man heute ein Radialparkett nennen würde **1**. Wie bei Rautenparketten üblich, stellt sich der Eindruck eines Stapels aus lauter Würfeln ein. Manchmal springt die Wahrnehmung um, so dass aus hervorstechenden Ecken plötzlich einspringende werden und umgekehrt. In diesem Fall endet der Versuch, dem ganzen Bild eine einheitliche räumliche Interpretation zu geben, in hoffnungsloser Verwirrung. Noch krasser wurde der Effekt, als ich von fünfzähliger zu neunzähliger Symmetrie überging und mich dadurch auf drei Farben beschränken konnte **2**.

Die professionellen Parkett-Mathematiker sind andere Wege gegangen. Will man über das Standardverfahren hinwegkommen, nämlich die Ebene mit periodischen Wiederholungen desselben Grundmusters zu bedecken, muss man nicht unbedingt zwei unterschiedliche Sorten Parkettsteine verwenden. Eine einzige Grundform genügt, vorausgesetzt, man kann die gleichen Steine auf verschie-

5 Spiralparkett aus neuneckigen Steinen. Die deutlich sichtbaren Spiralen sind an jeder Stelle gekrümmt. Infolgedessen findet man zwar zahlreiche Beispiele dafür, dass zwei Steine einen dritten vollständig umschließen, aber keines, wo in das Loch zwischen zwei Steinen zwei weitere passen; denn das würde einen geraden Abschnitt erzeugen.



MIT FRIEDRICH VON BRIAN WICHMANN (WWW.TILINGSARCH.ORG/HTML/DATA/129/95443.HTM)

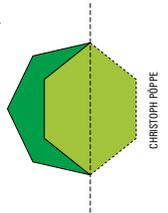
dene Weisen aneinanderlegen. Und wenn das Parkett ein deutlich erkennbares Zentrum haben soll, bietet sich als Urstein ein gleichschenkliges Dreieck an, mit einem geeigneten Scheitelwinkel derart, dass ziemlich viele Dreiecke mit ihren Spitzen im Zentrum liegen. Dann bilden ihre außen liegenden kurzen Seiten ein regelmäßiges (gleichseitiges und gleichwinkliges) Vieleck **3**. An dessen Außenseite kann man lauter Dreiecke derselben Art anlagern und die entstehenden Lücken mit weiteren Exemplaren stopfen, bis ein kompletter Ring entsteht. Daran baut man wiederum einen Ring an, und so weiter.

Jetzt kommt der entscheidende Trick. Man zerschneidet das Parkett entlang einer geraden Linie, die durch das Zentrum geht, und verschiebt die eine Hälfte um eine lange Dreiecksseite gegen die andere. Dadurch werden die Ringe entzweigeschnitten und die Hälften neu zusammengesetzt. Und siehe da: Aus einer Anordnung, die wie eine Zielscheibe aussieht, ist auf einmal eine zweiarmlige Spirale geworden **4**. Verschiebt man um mehr als eine Dreiecksseitenlänge, erhält man Spiralen mit vier, sechs, ..., jedenfalls einer geraden Zahl von Armen.

Wie bei einem gewöhnlichen Parkett kann man auch zu einem Radial- oder Spiralparkett Variationen erzeugen, indem man die Seiten der Parkettsteine geeignet deformiert. Gibt man einem Stein eine Ausbuchtung, dann muss sein unmittelbarer Nachbar die dazu passende Einbuchtung haben. Wenn, wie hier, das Parkett nur aus lauter gleichen Steinen besteht, ist der Nachbar allerdings ein weiteres Exemplar desselben Ursteins. Bei den Dreiecksparketten muss also eine deformierte lange Seite erstens an die andere passen und zweitens an die umgedrehte Version ihrer selbst. Das heißt, die deformierten Versionen beider langen Seiten sind erstens gleich und zweitens punktsymmetrisch.

Ein besonderer Vertreter dieser deformierten Dreiecke ist ein neuneckiger Parkettstein, den 1936 der Mathematikstudent Heinz Voderberg (1911–1945) zu einem ganz anderen Zweck konstruierte: Sein Professor Karl Reinhardt hatte ihm aufgegeben zu beweisen, es könne keinen Parkettstein geben mit der Eigenschaft, dass zwei von

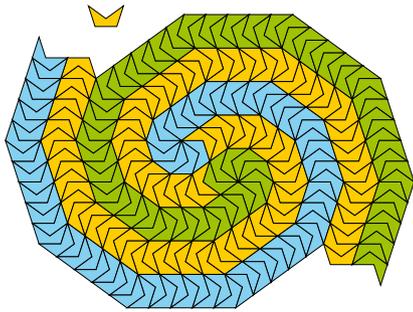
6 Aus einem regelmäßigen Siebeneck entsteht eine Mondsichel mit vier und drei Seiten (kleines Bild). Zwei Mondsicheln passen sowohl »parallel« als auch »verdreht« zusammen; diese Freiheit hat Brian Wichmann für ein Spiralparkett genutzt (großes Bild).



CHRISTOPH PÖPPE



MIT FRIEDRICH VON BRIAN WICHMANN (WWW.TILINGSARCH.ORG/HTML/DATA/129/95443.HTM)



- 7 Mukundis Krone, ein gleichseitiges Fünfeck mit einspringenden Seiten (links oben), eignet sich als Urstein für ein Spiralparkett nach dem Rezept von Brian Wichmann.**

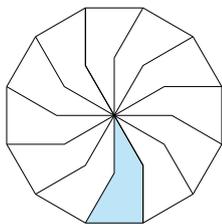
ihnen vollständig ein Loch umfassen, in das ein weiteres Exemplar hineinpasst. Voderberg fand ein Gegenbeispiel. Sein Parkettstein ist so gebaut, dass zwischen zweien nicht nur ein, sondern sogar zwei Exemplare perfekt einsetzbar sind. Zu allem Überfluss lassen sich so prachtvolle Spiralparkette legen **5**.

Das liegt an einer anderen Eigenschaft von Voderbergs Stein: Das erste Teilstück des Streckenzugs, der an die Stelle einer langen Dreiecksseite tritt, ist genauso lang wie die kurze Dreiecksseite. Dies eröffnet eine weitere Möglichkeit zum lückenlosen Aneinanderlegen von Steinen und schafft damit die notwendige Flexibilität für eine spiralförmige Anordnung.

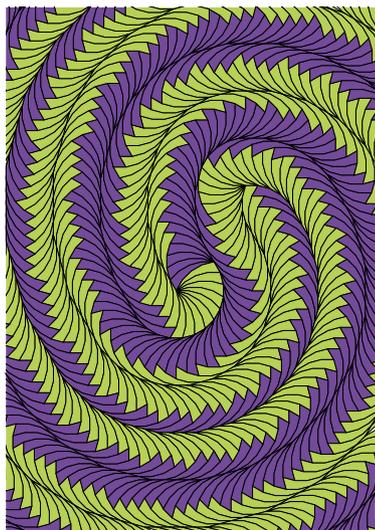
Voderbergs Entdeckung löste eine Welle neuer Ideen aus. Wie findet man einen Stein, von dem mehrere Exemplare auf möglichst viele verschiedene Weisen lückenlos zusammenpassen?

Schon 1955 hat der Mathematiker Michael Goldberg, der durch die nach ihm benannten Polyeder aus Fünf- und Sechsecken bekannt geworden ist (siehe Spektrum 5/2014, S. 72), eine erstaunliche Anzahl von Möglichkeiten gefunden, aus lauter gleichen Steinen Parkette mit definiertem Zentrum zu legen. Goldberg hatte auch schon die Idee, aus einem Zentralparkett durch Verschiebung zweier Hälften gegeneinander ein spiralisches zu machen.

Danach scheint sich die Erforschung der Parkette im Wesentlichen im stillen Kämmerlein – oder eben auf der Schulbank – abgespielt zu haben, bis 1987 Branko Grün-



- 8 Ein Zwölfleck lässt sich zerlegen in zwölf Matterhörner (kleines Bild). Nach demselben Prinzip gewinnt man aus dem 24-Eck das überaus vielseitige »Versatile«, aus dem Brian Wichmann eine fünfarmige Spirale konstruiert. Das Versatile und sein Spiegelbild tragen verschiedene Farben.**



baum und G. C. Shephard zu diesem Thema das Monumentalwerk »Tilings and Patterns« veröffentlichten. Neben Voderbergs Stein und einigen Varianten führt die »Bibel der Parkettierungskunde« zwei neue Typen von Steinen auf, die sich in als überaus fruchtbar erwiesen.

Den einen möchte ich die »Mondsichel« nennen (der eingeführte Name ist »reflexed n-gon« wie »eingeklapptes n-Eck«). David R. Simonds, damals Doktorand an der State University of New York in Albany, hat 1977 ein erstes Beispiel veröffentlicht. Die Mondsichel entsteht, indem man in einem regelmäßigen Vieleck eine Verbindungslinie zwischen zwei Ecken zieht und den kleineren Teil des Vielecks an dieser Linie einwärts spiegelt **6**.

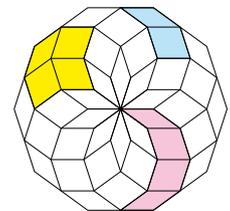
Der britische Mathematiker Brian Wichmann, der über das Studium der islamischen Kunst an das Thema Parkettierungen geraten war, systematisierte das Konzept und konstruierte eine große Vielzahl von Parketten, darunter etliche spiralförmige. Seine Website www.tilingsearch.org bietet ein reichhaltiges Sortiment.

Aus Mondsicheln macht Wichmann zunächst lauter Ringe, die einander dicht umschließen. Ein solches Parkett kann man nicht exakt entlang einer horizontalen Linie zerschneiden, sondern nur ungefähr. In der oberen Hälfte bleiben auf einer Seite des Zentrums Ausbuchtungen (»Zähne«) stehen und auf der anderen Seite entsprechende Lücken; der unteren Hälfte geht es genau umgekehrt. Verschiebt man nun die eine Hälfte gegen die andere, so knirscht es, denn es trifft Zahn auf Zahn oder Lücke auf Lücke. Aber dem ist abzuhelfen: Das Spiegelbild eines Rings ist wieder ein Ring aus denselben Bausteinen. Wenn man also vor dem Zerschneiden jeden zweiten Ring spiegelt, passt das Gebiss auch nach dem Verschieben prächtig.

Mit anderen Spiegelungsmustern findet Wichmann Muster aus Zähnen und Lücken, die nach einer Verschiebung um mehrere Ringbreiten erneut zusammenpassen. Aus ihnen ergeben sich Spiralparkette mit einer beliebigen ungeraden Anzahl von Armen, alle mit demselben Urstein. Ob es einen solchen überhaupt geben könne, war damals für Grünbaum und Shephard eine ungelöste Frage.

Simonds hatte mit der kleinsten denkbaren Mondsichel gearbeitet, einem Fünfeck mit zwei einwärts gespiegelten Seiten. In dieser Zeitschrift ist sie auch schon einmal aufgetreten, unter dem Namen »Mukundis Krone« (siehe Spektrum 7/2007, S. 98). Und in der Tat kann man mit dem vielseitigen Stein ebenso Spiralparkette legen **7**.

Den anderen vielseitigen Urstein hat der Schweizer Mathematikdidaktiker Hans Walser »Matterhorn« genannt,



- 9 Aus zehn gegeneinander verdrehten Zehnnecken entsteht ein Rautenmuster. Geeignete Rauten-Ensembles, die von zwei oder drei Randabschnitten der Zehnnecke begrenzt sind, ergeben interessante Parkettsteine, darunter eine Mondsichel (pink), die Verallgemeinerung eines Matterhorns (hellblau) und eine symmetrische »Schuppe« (gelb).**

weil seine einfachste Form eine entfernte Ähnlichkeit mit dem populären Berggipfel aufweist. Man zerlegt dafür nach dem Vorbild von 3 ein regelmäßiges Vieleck in lauter gleichschenklige Dreiecke, indem man jeden Eckpunkt mit dem Mittelpunkt verbindet. Dann ersetzt man die lange Seite jedes dieser Dreiecke durch ein Stück vom Rand des Vielecks. Das funktioniert, wenn die Eckenzahl ein Vielfaches von 6 ist. Bei einem $(6n)$ -Eck überbrückt nämlich ein Stück aus n aufeinanderfolgenden Seiten genau die Entfernung zwischen einer Ecke und dem Mittelpunkt.

Durch die Konstruktion kann man nicht nur mehrere deformierte Dreiecke mit ihren ehemals langen Seiten aneinanderlegen; ein Stein passt sogar sozusagen quer-gelegt an ein Stück Außenseite des $(6n)$ -Ecks. Das bietet eine große Auswahl an Möglichkeiten 8. Allerdings ist dieser Stein im Gegensatz zu allen bisher genannten nicht spiegelsymmetrisch. Deswegen kommen im Allgemeinen sowohl der Stein selbst als auch sein Spiegelbild zum Einsatz.

Paul Gailiunas von der Literary and Philosophical Society of Newcastle upon Tyne hat eine umfassendere Methode gefunden, mit der man nicht nur Mondsicheln und Matterhörner, sondern auch weitere vielseitig verwendbare Steine erzeugen kann.

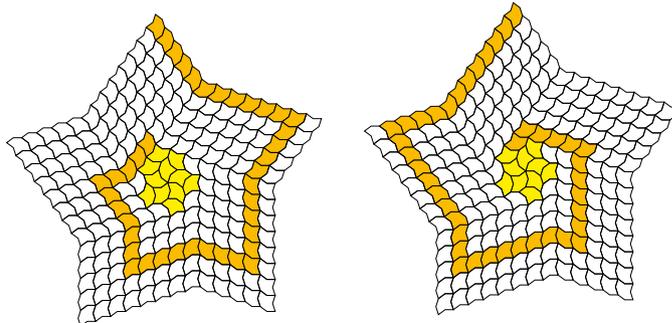
Dreht man ein regelmäßiges n -Eck um seinen Mittelpunkt, kommt es immer dann mit sich selbst zur Deckung, wenn der Drehwinkel gleich 360 Grad geteilt durch n oder einem Vielfachen davon ist. Falls man es aber mit denselben Drehwinkeln nicht um seinen Mittelpunkt dreht, sondern um eine Ecke, so entsteht ein Rautenmuster. Aus ihm kann man gewisse Rauten auswählen; diese zusammen ergeben immer dann einen interessanten Parkettstein, wenn deren äußerer Rand aus den Rändern von zwei oder drei der ursprünglichen n -Ecke zusammengesetzt ist 9. Einer von Gailiunas' neuen Steinen, nennen wir ihn »Schuppe«, lässt sogar ein Parkett zu, das Spiralen in beiderlei Drehsinn enthält 10.

Selbst das berühmte »Hirschhorn-Fünfeck«, das zu den unglaublichsten Parketten, darunter auch spiraligen, fähig ist (siehe Spektrum 11/2015, S. 62), kann man mit etwas zusätzlicher Mühe aus den Gailiunas-Verfahren herleiten. Es handelt sich um anderthalb Elemente aus dem Rautenmuster zum 18-Eck: eine Raute plus von der Nachbarraute eine Hälfte, die in diesem Fall ein gleichseitiges Dreieck ist 11.

In dasselbe Schema passt erstaunlicherweise auch eines der verwirrendsten Parkette aus Michael Goldbergs Arbeit von 1955. Der hatte das regelmäßige Zwölfeck nicht in zwölf (fünfeckige) Matterhörner zerlegt, sondern in zwölf unregelmäßige Vierecke. Es stellt sich heraus, dass ein solches Viereck aus einem schräg halbierten Quadrat und einem gleichseitigen Dreieck zusammengesetzt ist, was wiederum zwei halben Elementen aus dem Rautenmuster zum Zwölfeck entspricht 11a.

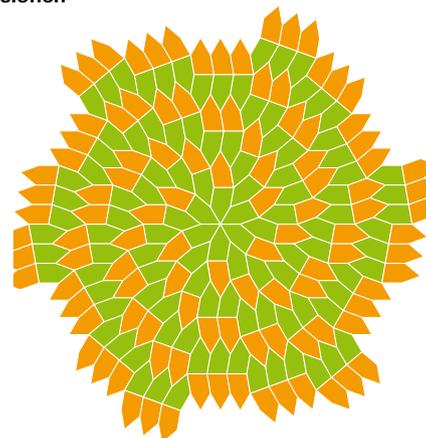
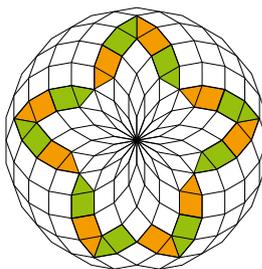
Während die Spiralstruktur mancher Parkette dem Betrachter ins Auge springt, muss ihm bei dem Schuppenparkett und vielen anderen durch geeignete Einfärbung nachgeholfen werden. Andererseits kann man auf solche

10 In diesem Parkett aus Schuppen kann man neben vielen anderen diese beiden rechts- beziehungsweise linksdrehenden Spiralen sehen.



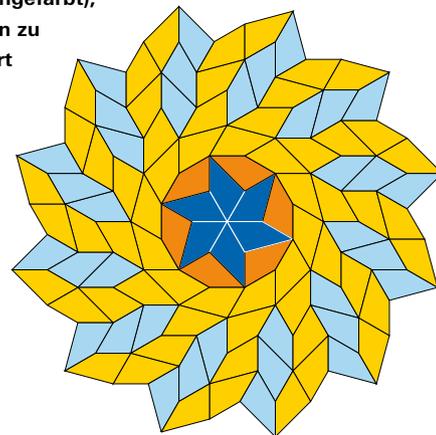
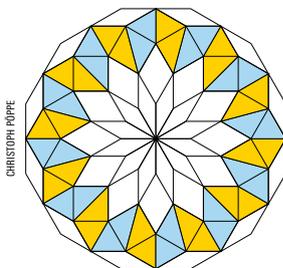
CHRISTOPH PÖPPE, NACH PAUL GAILIUNAS, MIT FRIEDRICH VON PAUL GAILIUNAS (ARCHITECTURE/MATH/2007/BRIDGES.ORG-SPFH)

11 Unter den 15 Klassen konvexer Fünfecke, welche die Ebene periodisch pflastern, ist auch das gleichseitige Fünfeck von Michael Hirschhorn mit den Winkeln 60 , 160 , 80 , 100 und 140 Grad. Es lässt sich aus dem Rautenmuster des Achtzehnecks herleiten (links); die beiden spiegelsbildlich gleichen Versionen sind durch verschiedene Farben gekennzeichnet. In dem Parkett (rechts) bilden die hellbraunen Steine eine sechsarmige Spirale.



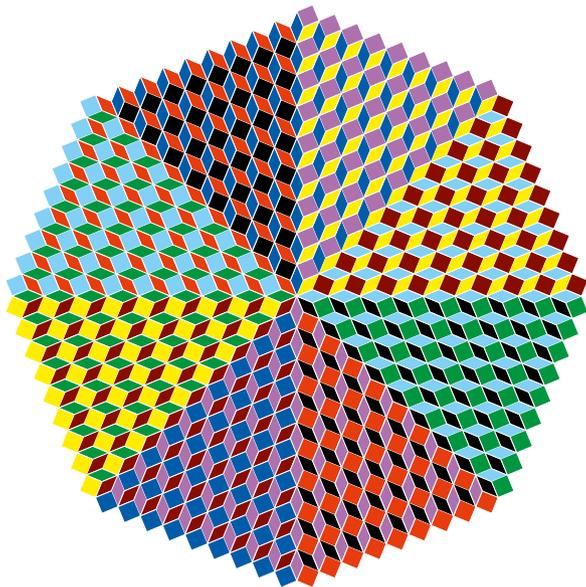
CHRISTOPH PÖPPE

11a Ein viereckiger Parkettstein von Michael Goldberg besteht aus zwei halben Elementen des Rautenmusters zum Zwölfeck (links; Bild und Spiegelbild wieder verschieden gefärbt). Zwölf dieser Steine füllen ein Zwölfeck (rechts; dunkler eingefärbt), das auf verschiedene Weisen zu einem Spiralparkett erweitert werden kann.

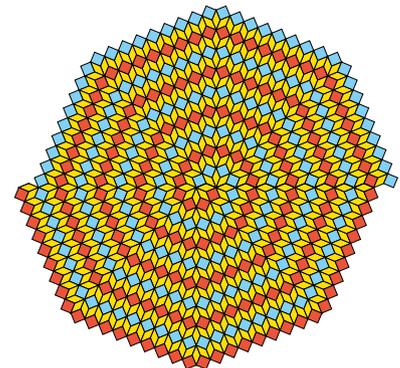
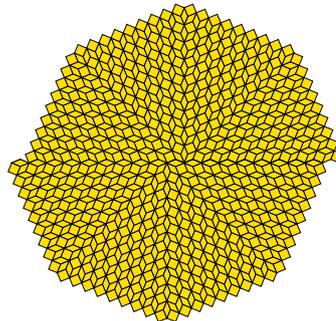


CHRISTOPH PÖPPE

CHRISTOPH PÖPPE, NACH MICHAEL GOLDBERG (SCRIPTA MATHEMATICA 21, S. 253-260, 1953)



Ein Radialparkett mit achtzähliger Symmetrie **12a** (links) lässt sich entlang der schmalen Rauten entzweischneiden. Die beiden Teilstücke passen auch verschoben noch lückenlos aneinander **12b** (Mitte). Eine geeignete Einfärbung verdeutlicht die Spiralstruktur **12c** (rechts).



CHRISTOPH PÖPPE

Weise Spiralgigkeit in die langweiligsten Parkette hineininterpretieren, bis hin zu der Standard-Badezimmerkachelung aus Quadraten. Ist Spiralgigkeit eine Eigenschaft eines Parketts, die unabhängig vom visuellen Eindruck mathematisch definierbar ist?

Die Frage ist überraschend schwer zu beantworten. Schon Grünbaum und Shephard hatten bemerkt, dass der Eindruck der Spiralgigkeit bis zu einem gewissen Grad psychologischer Natur sei. Bernhard Klaassen vom Fraunhofer für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAL in St. Augustin hat mehrere Anläufe zu einer mathematischen Erfassung unternommen. Dabei konnte er sich noch per E-Mail mit dem damals 87-jährigen, inzwischen verstorbenen Altmeister Branko Grünbaum austauschen.

Welche strukturellen Eigenschaften eines Parketts lassen uns Spiralarms sehen? Erster Versuch einer Definition: Eine Teilmenge eines Parketts soll »Spiralarm« genannt werden, wenn man einen »Faden« hindurchlegen kann, das heißt eine Kurve, die jedes Element des Spiralarms genau einmal trifft, alle anderen Parkettsteine höchstens am Rand berührt und selbst die Eigenschaften einer Spirale hat: Sie beginnt in der Nähe eines Zentralpunkts und windet sich – im Prinzip unendlich oft – um denselben, ohne sich selbst jemals zu schneiden. Hinzu kommen ein paar Bedingungen zum Ausschluss exotischer Fälle.

Es stellt sich heraus, dass diese Definition noch nicht trennscharf genug ist. So würde ein Schachbrett darunter fallen, denn es lässt sich mühelos ein Spiralfaden durch dessen schwarze Felder legen. Man muss zusätzlich fordern, dass die durch den Faden vermittelte Verbindung zwischen zwei benachbarten Steinen nirgendwo anders vorkommt. Andernfalls, wenn nämlich zwei Steine über die Grenze eines Spiralarms hinweg in derselben Weise benachbart sind wie ein dazu kongruentes Paar Steine innerhalb des Spiralarms, dann ist die Einzigartigkeit, die uns einen Spiralarm sehen lässt, dahin. Um die verschärfte Definition auf ein konkretes Parkett anzuwenden, muss man alle Paare benachbarter Steine in Klassen einteilen, und zwar nach dem Kriterium, auf welche Weise – entlang einer kurzen oder langen Kante, parallelverschoben, ge-

dreht oder gespiegelt – sie benachbart sind, und dann nachprüfen, ob die so gefundene Einteilung mit der Definition eines Spiralarms verträglich ist.

Diese und weitere Fragen lassen sich durch einen von Klaassen entwickelten Algorithmus klären. Der liefert zumindest bei einer Vielzahl von Beispielen dasselbe Ergebnis wie spontanes Hinschauen.

Und wie steht es mit den Radialparketten aus meiner Schulzeit? Man kann Spiralparkette daraus machen, allerdings nur, wenn die Anzahl der Rauten im Zentrum (und damit die Zähligkeit der Drehsymmetrie) gerade ist. So kann man ein achtzähliges Radialparkett **12a** entlang einer waagerechten Zickzacklinie zerlegen und wieder neu zusammensetzen. Das sieht zunächst nicht besonders spiralgig aus **12b**, aber wenn man ein wenig nachhilft, zum Beispiel nur die Quadrate geeignet einfärbt, springen einem die beiden Spiralarms ins Auge **12c**.

Mir persönlich kommen bei der Arbeit an diesen Parketten immer wieder unverhofft Dinge wie die Schlacht von Königgrätz, Bismarcks Indemnitätsvorlage und der Zweibund in den Sinn. Anscheinend hat der Geschichtsunterricht doch gewisse Spuren in meinem Gedächtnis hinterlassen. ◀

QUELLEN

Gaiiunas, P.: Some monohedral tilings derived from regular polygons. Proceedings of the Bridges Conference San Sebastián, 2007

Grünbaum, B., Shephard, G. C.: Tilings and patterns. Freeman, New York 1987

Simonds, D. R.: Central tessellations with an equilateral pentagon. Mathematics Teaching 83, 1977

Stock, D., Wichmann, B.: Odd spiral tilings. The Mathematics Magazine 73, 2000

Voderberg, H.: Zur Zerlegung der Umgebung eines ebenen Bereiches in kongruente. Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 46, 1936

Wichmann, B.: The world of patterns. World Scientific, Singapore 2001

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

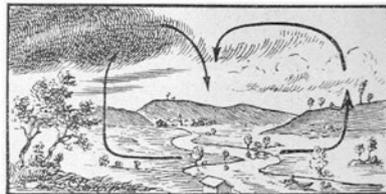
DER MANN, DER DIE DENDROCHRONOLOGIE ERFAND

1921

»Prof. Douglass vom Carnegie-Institut in Washington hat an Hand vieljähriger Untersuchungen und Wetterberichten festgestellt, daß die Dicke der Jahresringe von den jährlichen Niederschlägen abhängt. Diese Abhängigkeit muß auch in der Vergangenheit, in der man Wetterberichte nicht herausgab, bestanden haben, so daß die Jahrhunderte alten Bäume die Möglichkeit bieten, die klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit zu ermitteln. Der Gelehrte hat Bäume aus den verschiedensten Landstrichen der Erde untersucht und konnte mittels kalifornischer Baumarten seine Forschungen auf mehr als 3000 Jahre ausdehnen.« *Prometheus 7, S. 181*

WARUM FLÜSSE GEWITTER BREMSEN

»Die Zugstraße der Gewitter findet häufig an Flüssen ein vorzeitiges Ende. [Weil] in der warmen Jahreszeit die Flüsse kälter sind als der Boden, also kühlere Streifen in



Die Luftströme über einem Fluss, wenn ein Gewitter naht.

wärmerer Umgebung darstellen. Daraus ergibt sich ein absteigender Luftstrom über dem Fluß sowie eine entsprechende Luftbewegung, die am Boden von beiden Ufern weg und aufwärts führt, um oben von beiden Seiten her gegen den absteigenden Strom zurückzukehren. Das Gewitter trifft im Heranziehen zuerst auf den äußeren aufsteigenden Luftstrom, der dessen Geschwindigkeit verstärkt, dann aber auf den entgegengesetzten Wind und den absteigenden Strom, durch die das weitere Fortschreiten des Gewitters verzögert oder auch ganz verhindert wird.« *Kosmos 1, S. 28*

SMARTHOME RUFT BEI EINBRUCH POLIZEI

»Das Telefon kann zur Nachtzeit den Wächter unserer Wohnungen spielen und bei einem Einbruchversuch automatisch die Polizei herbeirufen. Ingenieur Paul Kroll hat einen Apparat zum Patent angemeldet, der an eine Einbruchssicherungsanlage angeschlossen wird und sofort in Tätigkeit tritt, wenn einer der Tür-, Schloß- oder Fenster-Kontakte betätigt oder die Anlage zu beschädigen versucht wird. Der Telefon-Alarmapparat gibt in diesem Falle der Post ein Zeichen, diese gibt den Hilferuf der Polizeiwache weiter, die dann sofort eine Streife sendet.«

Centralzeitung für Optik und Mechanik 1, S. 8

BEWEGLICHE FAHRBAHN GLEITET DURCHS MEER

1971

»Ein Schwimmertunnel soll in Japan die beiden Inseln Hondo und Hokkaido miteinander verbinden. Man denkt an einen etwa 25 Kilometer langen schwimmenden Tunnel, der sich ungefähr 20 Meter unter der Wasseroberfläche befinden soll. Ein Stahlbetonrohr mit 60 Zentimeter Wandstärke und 8 Meter Durchmesser [soll] eine zweistöckige Fahrbahn aufnehmen. Das obere Stockwerk soll dem Kraftfahrzeugverkehr, das untere dem Eisenbahnverkehr dienen. An den Enden soll der Tunnel auf 6 Kilometer Länge fest auf dem Meeresboden aufliegen. Man schätzt die Bauzeit auf fünf Jahre.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 1, S. 36*

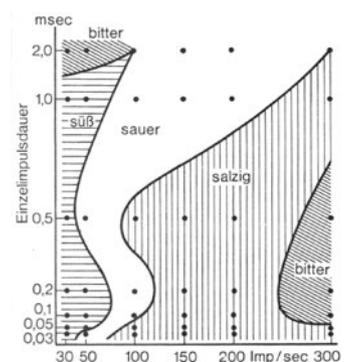
HYPNOSE BEKEHRT RAUCHER

»Auf dem 5. Internationalen Kongreß für Hypnose und psychosomatische Medizin war Interessantes über Hypnose bei Rauchern zu hören. An 30 Patienten wurde eine vier- bis sechswöchige Hypnose-Therapie durchgeführt, in deren Verlauf den Patienten Abscheu und Ekel vor Zigaretten sowie starker Hustenreflex mit Übelkeit und Erbrechen bei Lungenzügen suggeriert wurde. In posthypnotischem Zustand traten diese Erscheinungen prompt auf. Eine Kontrolle nach zwei Jahren ergab, daß alle Patienten, mit Ausnahme von dreien, das Rauchen vollständig aufgegeben hatten.« *Kosmos 1, S. *6*

ELEKTRISCHE GESCHMÄCKER

»Zur Untersuchung der zentralnervösen Verarbeitung von Geschmacksempfindungen wurden die Zungen von [Probanden] elektrisch gereizt. Werden als Reizparameter sowohl die Impulsfrequenz als auch die Einzelimpulsdauer der applizierten Rechteckimpulse variiert, empfindet die Versuchsperson verschiedene Geschmacksqualitäten. Das Diagramm zeigt die Ergebnisse an 20 Versuchspersonen: Die Geschmacksempfindung süß wurde nur bei niedrigen Impulsfrequenzen angegeben, bitter dagegen erscheint vorwiegend bei niedrigen bis mittleren Impulsdauern und bei höheren Impulsfrequenzen. Salz und bitter finden sich in den mittleren Bereichen.« *Die Umschau 2, S. 64*

Geschmacksqualitäten bei elektrischer Reizung der Zunge



REZENSIONEN



ASTRONOMIE SCHATZKISTE UNIVERSUM

Mit seinem neuen Buch entfacht der Physiker und Wissenschaftsjournalist Thorsten Dambeck die Begeisterung für das Universum.

► Wir leben im goldenen Zeitalter der Astronomie. Nie zuvor haben Wissenschaftler so viele faszinierende Erkenntnisse in den Weiten des Universums gesammelt wie in den letzten Jahrzehnten. Und noch nie haben Entdeckungen – etwa Exoplaneten in habitablen Zonen, Neutronensterne oder die ältesten Galaxien – derart viele neue Fragen aufgeworfen.

Der Physiker und Wissenschaftsjournalist Thorsten Dambeck liefert in seinem Buch »Sternenwelten« einen umfassenden Überblick zum aktuellen Kenntnisstand über das Universum. Er vermittelt sowohl Grundlagen über die Mechanismen, wie der Kosmos funktioniert, etwa welche Kräfte die Sterne unserer Milchstraße zusammenhalten, als auch neueste Ergebnisse aus aktuellen astronomischen Forschungsarbeiten.

Der Autor spannt den Bogen von den 47 Sternbildern, die Claudius Ptolemäus erstmals im 2. Jahrhundert in Alexandria beschrieb, bis hin zur Erforschung von Neutronensternen von der Internationalen Raumstation ISS aus. 2019 konnten Wissenschaftler dort Massen, Radien und Temperaturen von Neutronensternen bestimmen, indem sie die davon ausgehende Röntgenstrahlung analysierten. Erstes Beobachtungsobjekt war ein rund 1100 Lichtjahre entfernter Pulsar im Sternbild der Fische, der rund 1,34-mal die Masse unserer Sonne und dabei einen Radius von bloß 12,7 Kilometern hat. Die Astronomen errechneten zudem, dass er sich rund 200-mal pro Sekunde um sich selbst dreht.

Neben Pulsaren, die wohl zu den spannendsten Phänomenen im Universum zählen, berichtet Dambeck über weitaus kleinere, mysteriöse Himmelskörper, etwa den Asteroiden 'Oumuamua, der 2017 aus den Tiefen

des interstellaren Raums in unser Sonnensystem eindrang. Bis heute ist nicht klar, welche rätselhaften Kräfte solche Himmelskörper aus ihrem Heimatsystem hinauswerfen und auf die weite Reise schicken.

»Sternenwelten« ist nicht nur ein gut recherchiertes Sachbuch, sondern auch ein äußerst sehenswerter Bildband, angereichert mit spektakulären Fotos, vor allem von der Europäischen Weltraumorganisation ESA und der amerikanischen Weltraumbehörde NASA. Es sind insbesondere diese farbintensiven, meist großformatigen Bilder, die den Leser auf eine Reise in die Weiten des Kosmos mitnehmen. Man findet Aufnahmen funkelnder Sternhaufen, kosmischer Nebel und gewaltiger Galaxien, aufgenommen von den leistungsstärksten Teleskopen weltweit. Dazu gesellen sich eindrucksvolle Fotografien, etwa das einer totalen Sonnenfinsternis über dem La-Silla-Observatorium in Chile oder eine Panoramaaufnahme unserer Milchstraße, die sich wie ein silbriges Band über den glasklaren Abendhimmel des Very Large Telescope von Paranal wölbt.

Thorsten Dambeck
STERNENWELTEN
Kosmos,
Stuttgart 2020
224 S., € 40,-



Dambeck versteht es, die Begeisterung für die Tiefe des Universums zu entfachen. Bei all der opulenten Pracht, die den Leser in diesem Buch empfängt, wird klar: Immerzu verändern gewaltige Ereignisse die unvorstellbaren Weiten des Weltalls – es steht niemals still. Das macht das Universum zu einer riesigen Schatzkiste, in der es noch unzählige Geheimnisse zu entdecken gibt.

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

**Von Schwarzen Löchern
bis Neutronensternen:
Das Universum steckt
voller atemberaubender
Geheimnisse.**

HISTORIE GESCHICHTE DER INDIANER

Von der ersten Besiedelung Amerikas über die Kolonialzeit bis heute: Eine neue kompakte Gesamtdarstellung gibt Einblick in die vielschichtige Vergangenheit der indigenen Bevölkerung Nordamerikas – fernab von Klischees, wissenschaftlich fundiert und hochaktuell.

► Es fällt schwer, die Geschichte der Indianer nicht als eine Folge von Betrug, Diskriminierung und gewaltsamer Vertreibung durch die Euroamerikaner zu betrachten – auch nach der Lektüre dieser aktuellen, informationsreichen und komprimierten Gesamtdarstellung. In mehr als der Hälfte der 13 Kapitel spielen Auseinandersetzungen zwischen Indigenen und den aus Europa stammenden Einwanderern und ihren Nachfolgegenerationen eine gewichtige Rolle. Trotzdem gelingt Heike Bungert durch ihre sachliche und wissenschaftliche Herangehensweise eine vielschichtige Betrachtung.

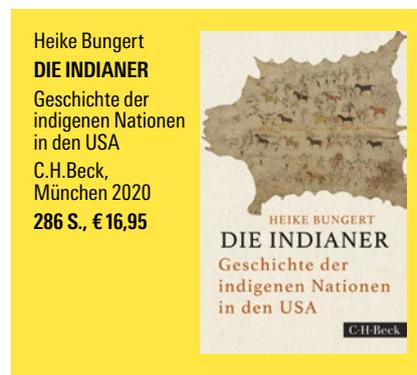
Die Historikerin von der Universität Münster und Expertin für nordamerikanische Geschichte macht es sich zur Aufgabe, mit den Indianern »keine passiven Opfer der Euroamerikaner oder Objekte« darzustellen, sondern ihre Geschichte »als Interaktion verschiedener indianischer und euroamerikanischer Kulturen mit daraus resultierender Transformation aller Beteiligten« zu beschreiben.

Kenntnisreich und souverän leitet die Autorin durch das enge Geflecht von hunderten indianischen Völkern und Gruppen. Zwei Karten im Anhang des Buchs helfen, die verschiedenen Siedlungsgebiete zuzuordnen. Sie verzichtet auf Legenden und Pathos und ordnet prominente Indianer – wie Sitting Bull, Crazy Horse oder Pocahontas – in die historischen Gesamtzusammenhänge ein, anstatt sie besonders herauszuheben.

Bungert schreibt aus einer neutralen Perspektive heraus und zeigt, dass die ersten Zusammentreffen mit den Europäern nicht nur feindselig waren.

Beide Seiten versuchten anfangs, Vorteile aus der Begegnung zu ziehen. So gewannen die Franzosen die Indigenen sowohl als wichtige Handelspartner, etwa für Pelze, als auch als Verbündete gegen die Engländer.

Dort, wo sich nicht zu viele Europäer auf einmal niederließen, lernten sich die unterschiedlichen Völker kennen, tauschten sich aus und kooperierten sogar. »Euroamerikaner und Indianer, aber auch indigene Gruppen untereinander übernahmen kulturelle Praktiken ihrer Handelspartner, um Verständigung und Überleben zu gewährleisten. So akzeptierten Europäer tagelange Zusammenkünfte mit Reden, Gebeten, Tänzen und gemeinsamem Rauchen der Kalumet-Pfeife und dem Austauschen von Geschenken. Indianische Gruppen passten Europäer in ihr Verwandtschaftssystem ein und bezeichneten den französischen Gouverneur



beispielsweise als »Vater.« Häufig suchten Indianergruppen auf diese Weise Verbündete gegen ansässige Konkurrenten.

Das zeitweilige Einvernehmen, das vor allem auf die zahlenmäßige Überlegenheit der Indigenen zurückzuführen ist, wirkte sich mitunter auf ihre Lebensgewohnheiten aus. So übernahmen Indianer importierte Gegenstände und Praktiken oder zogen in die Nähe euroamerikanischer Siedlungen. Die Weißen verließen sich dagegen etwa auf die Ortskenntnis und Versorgungsleistungen ihrer Nachbarn.

Ein friedliches Zusammenleben war jedoch häufig nur von kurzer Dauer. Schon früh drängten insbesondere Engländer einzelne indigene Gruppen nach Westen. Gleichzeitig beteiligten

sich Indianer auf unterschiedlichen Seiten an euroamerikanisch initiierten Konflikten, wie dem Krieg zwischen Engländern und Franzosen in den 1750er Jahren oder dem amerikanischen Unabhängigkeitskrieg und traten dabei nicht als indigene Einheit in Erscheinung.

Zeitweilige Bündnisse mit den Eindringlingen konnten ihre Vertreibung jedoch nicht verhindern. Bungert schildert detailliert, wie die Indianer über die folgenden Jahrhunderte hinweg meist vergeblich versuchten, durch Diplomatie, Gewalt oder Anpassung ihrer Lebensweise, die Siedlungsgebiete zu bewahren, und wie sie unter der aufkommenden Entwurzelung litten. »Die psychologischen Folgen für Gruppen, die wie die Winnebagos siebenmal in 30 Jahren migrieren mussten, lassen sich kaum abschätzen«, schreibt die Autorin. Ende des 19. Jahrhunderts lebten nahezu alle Angehörigen der indigenen Bevölkerung in Reservaten.

Besonders informativ (da seltener behandelt) sind die beiden Abschnitte, die den Zeitraum zwischen der Ankunft der Weißen und dem Ende der Indianerkriege 1890 einrahmen. Ab etwa 14000 v. Chr. gelangten die indianischen Vorfahren vermutlich in mehreren Wellen aus Nordsibirien und dem nordöstlichen Teil Asiens über eine Landzunge nach Nordamerika. Skelettfunde wie die »Buhl Woman« aus Idaho und der »Kennewick Man« aus dem Staat Washington unterstützen diese These.

Erste landwirtschaftlich geprägte Kulturen wie die Hohokam, die zwischen dem 6. und 14. Jahrhundert im Südwesten Amerikas Mais, Kürbisse und Baumwolle anbauten und unter großem Aufwand ihre Felder bewässerten, siedelten sesshaft in größeren Dörfern. Mississippi-Kulturen im Südosten brachten sogar so genannte Chieftoms hervor, wie Cahokia in der Nähe des heutigen St. Louis. In den stadttähnlichen Verwaltungseinheiten sowie wirtschaftlichen und religiösen Zentren lebten tausende Menschen zusammen.

In einem Kapitel gibt Bungert zudem spannende Einblicke in die vielfäl-

tigen Gesellschaftsstrukturen und die religiösen Vorstellungen der Indigenen kurz vor Ankunft der Europäer. Zum Beispiel verweist sie auf die weit verbreitete Matrilinearität, das heißt die Ausrichtung der Abstammung auf die Frau.

In den abschließenden Kapiteln beschreibt die Autorin ein langes Jahrhundert bis in die Gegenwart, in dem sich die Indianer gegen Diskriminierung, assimilatorische Initiativen und kulturelle Auslöschung wehrten und unter anderem durch panindianische Bürgerrechtsbewegungen Souveränität und einen Platz in der US-amerikanischen Gesellschaft für ihre Nationen erkämpften. Ihre Lebensumstände sind allerdings bis heute von einer schwierigen Beziehung zur USA und damit einhergehender Benachteiligungen geprägt – Armut, Arbeitslosigkeit und Unterversorgung prägen das Leben in vielen Reservaten.

Sebastian Hollstein ist Wissenschaftsjournalist in Jena.

DIGITALISIERUNG NETFLIX ALS GEFAHR FÜR DIE DEMOKRATIE?

Der Medienwissenschaftler Marcus Kleiner beschreibt, wie bekannte Streaming-Anbieter ihre Nutzer entmündigen.

► In der Coronakrise erleben Streaming-Dienste wie Netflix, Amazon Prime Video und Disney Plus einen Boom. Statt vor der Kinoleinwand sitzt man lieber auf dem eigenen Sofa vor dem Fernseher. Das ist günstiger, bequemer und hygienischer. Doch das Heimkino hat einen Preis: Nutzer werden pausenlos überwacht. Algorithmen entschlüsseln die Sehgewohnheiten; sie wissen, wann man eine Toilettenpause einlegt, wann man auf den Pausenknopf drückt oder ob man sich Sexszenen mehrmals anschaut.

Der Medienwissenschaftler Marcus S. Kleiner sieht in diesem überwachungskapitalistischen Geschäftsmodell

eine Gefahr für die Demokratie. In seinem Buch »Streamland« beschreibt er, wie Netflix und Co. durch algorithmische Entscheidungssysteme die Massenkultur monopolisieren und Menschen manipulieren. Ausgehend von den Beobachtungen der Philosophen Max Horkheimer und Theodor W. Adorno an der US-amerikanischen Unterhaltungsindustrie in den 1930er und 1940er Jahren entwickelt der Autor die These, Streaming-Dienste seien zu »Wirklichkeitsbrillen« geworden, die Informationen filtern und neu aufbereiten: »Je tiefer wir dabei in diese Streaming-Welt abtauchen, desto mehr beeinflusst uns das, was wir dort sehen, beim Beurteilen der realen Welt um uns herum. Wir reagieren daher positiv auf die Manipulation von Netflix.« Dadurch verlernen wir dem Autor zufolge selbst zu entscheiden: »Wir lassen für uns entscheiden, sind selbstentmündigt.«

Kleiner, der an der SRH Hochschule Berlin Medien- und Kommunikations-

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)



REZENSIONEN

wissenschaft lehrt, geht zunächst auf den Bildungsaspekt ein. Er erklärt, es habe von der Schriftkritik Platons bis hin zu Neil Postmans Kulturkritik («Wir amüsieren uns zu Tode») schon immer Skepsis gegenüber neuen Technologien gegeben. Im zweiten Kapitel skizziert der Autor die jüngste Geschichte des Fernsehens, das zum einen als »Fenster zur Privatsphäre«, zum anderen als »Fenster zur Welt« fungierte. Die Zeiten, in denen sich das Publikum am Lagerfeuer von »Wetten, dass..?« oder der »ZDF Hitparade« wärmte, sind längst vorbei. Mit diesen Formaten verschwanden auch Moderatoren wie Dieter Thomas Heck und Thomas Gottschalk von der Bildfläche. An Stelle von Persönlichkeiten identifizieren sich die jüngeren Nutzer mit Plattformen und ihren Angeboten, so Kleiner.

Dass Streaming-Dienste dem Fernsehen den Rang abgelassen haben, liegt nicht nur am veränderten Medienverhaltensverhalten, sondern an einem gesellschaftlichen Wandel, den der Autor treffend analysiert: »Früher sah man seine Lieblingsfernseher, hatte einen Lieblingsplattenladen oder eine Lieblingskneipe (...) Die heutige Generation will hingegen ultraleicht leben: Man will keinen Besitz anhäu-

die Streaming-Anbieter immer dort ist, wo man sich gerade befindet.«

Streaming-Giganten wie Netflix oder Amazon Prime betreiben Echtzeit-Marktforschung und kündigen jedes Jahr hunderte neue Serien und Filme an. Das heißt: mehr konfektionierte Kultur, mehr Konsum, mehr Binge-Watching. Auswählen? Braucht man nicht. Der Algorithmus weiß, was dem Nutzer gefällt – und schlägt nach der beendeten Serie gleich die nächste vor. Laut Kleiner wirke sich das auf das politische System aus. »Das Selbst wird zum Produkt von Algorithmen und der Algorithmus zum Subjekt.«

Die Konsumkritik an einer algorithmengetriebenen Fernsehmaschinerie, die immer mehr Daten von Nutzern sammelt, ist richtig und wichtig. Doch der Autor bleibt den Beweis schuldig, warum Netflix und Co. eine Bedrohung für die Demokratie darstellen, wie der Untertitel des Buchs vollmundig ankündigt. Ist eine Netflix-Serie wie »Narcos« oder »The Great Hack« wirklich eine Gefahr für die Demokratie – oder schaffen sie nicht eher ein Problembewusstsein für politische Konflikte? Der Autor geht dabei an den entscheidenden Stellen zu weit, etwa wenn er schreibt: »Die Digitalunternehmen tragen mit ihrem auf Unterhaltung, plakative Inhalte oder Blockbuster reduzierten Programm dazu bei, dass wir als Bürger*innen entmündigt und die Demokratie geschwächt beziehungsweise bedroht wird.«

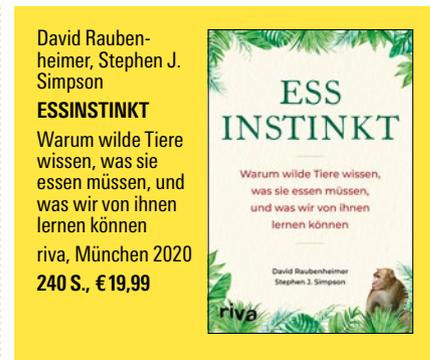
Leider unterlaufen dem Autor auch inhaltliche Fehler, etwa wenn er die Netflix-Serie »Marseille« als Beispiel für eine gelungene Regionalstrategie anführt. Die Politserie mit Gérard Depardieu in der Hauptrolle, angekündigt als französisches »House of Cards«, floppte in Frankreich. Nach zwei Staffeln hat Netflix die Serie eingestellt. Dass sich das amerikanisierte Storytelling nicht überallhin exportieren lässt, zeigt, dass es – zumindest in Frankreich mit seiner stolzen Kinotradition – immer noch ein Publikum gibt, das sich der Sogwirkung algorithmischer Entscheidungsmaschinen entzieht.

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



fen, nicht viel Physisches besitzen – Möbel etwa oder einen Fernsehapparat. Wichtiger ist, jederzeit in der Lage zu sein, den Ort zu wechseln.«

Diese Flexibilisierung des Konsums in einer postmaterialistischen Gesellschaft führt dazu, dass bestehende Institutionen an Bedeutung verlieren. »Wir gehen durchschnittlich deutlich weniger ins Kino, weil das Kino durch



BIOLOGIE WAS TIERE ESSEN – UND WARUM

Zwei Biologen erklären, welche Schlüsse sie aus Ernährungsstudien mit verschiedenen Tierarten ziehen – und was das für den Menschen bedeutet.

Seit mehr als 30 Jahren arbeiten die zwei Biologen David Raubenheimer und Stephen J. Simpson schon zusammen. In den ersten zwei Jahrzehnten studierten sie Insekten, »um eines der größten Rätsel in der Natur zu lösen: Woher wissen Lebewesen, was sie essen sollen?« Und wie viel? Warum gibt es keine übergewichtigen Tiere? Wer diese Fragen beantwortet, lernt etwas Nützliches fürs Leben – und über die Ernährung des Menschen. Die Erkenntnisse aus ihrer Forschung fassen die Autoren im letzten Kapitel zusammen: »Die Umsetzung der Lehren in die Praxis«. Darin geben sie Tipps für eine »gesunde und genussvolle Ernährung«.

In den 13 Kapiteln davor beschreiben Raubenheimer und Simpson ihre Untersuchungen zum Ernährungsverhalten verschiedener Tiere – nach eigenen Zählungen analysierten sie mehr als 50 Arten. Vor allem interessierten sie dabei die Evolutionsmechanismen hinter den Essgewohnheiten.

Die beiden Wissenschaftler forschen aktuell in Australien: Der in Kapstadt geborene David Raubenheimer ist Professor für Ernährungsökologie an der University of Sydney, während der gebürtige Australier Stephen J. Simpson akademischer Direktor des Charles Perkins Centre ist, eines mul-

tidisziplinären Forschungszentrums zur Verbesserung der globalen Gesundheit, und ebenfalls an der University of Sydney forscht. Ihre Zusammenarbeit begann 1991 an der University of Oxford, wo sie mit Heuschrecken im Labor experimentierten und die Insekten in der Natur von Utah beobachteten. Dabei fanden sie heraus, dass die Tiere sowohl Verlangen – also Appetit – auf Kohlenhydrate als auch auf Eiweiß haben, weshalb Heuschrecken in bestimmten Situationen ihre Artgenossen fressen. War die im Labor verabreichte Nahrung unausgewogen bezüglich der beiden Nährstoffe, bevorzugten die Tiere Eiweiß (Protein).

Die Autoren stellten in weiteren Untersuchungen fest, dass viele Tierarten unterschiedliche Appetite auf die Makronährstoffe Eiweiß, Kohlenhydrate und Fette entwickelt haben, aber auch auf die beiden essenziellen Mikronährstoffe Natrium(chlorid) und Kalzium. Ebenso kann der Mensch diese fünf Nährstoffe aus Nahrungsmitteln

herausschmecken. »Unsere Appetite haben sich so entwickelt, dass wir uns auf bestimmte Geschmacksrichtungen fokussieren, und bringen uns dazu, nur die Dinge zu essen, die wir zum Überleben brauchen.« So kann man im Idealfall eine ausgewogene Menge an Nährstoffen aufnehmen, was Experten als Nährstoffausgleich bezeichnen.

Die Autoren beschreiben genau, wie sie durch ihre Experimente zwar Antworten fanden, aber gleichzeitig immer wieder neue Fragen auftauchen, die sie mit neuen Versuchen beantworten wollten. So stellten sie fest, dass viele Tierarten ihre Mehrfachappetite für eine ausgewogene Ernährung nutzen, und schlossen daraus: »Nährstoffausgleich ist artenübergreifend, weit verbreitet und keine Ausnahme.«

Wie Raubenheimer und Simpson erkannten, setzt sich bei vielen Arten bei einem unausgewogenem Nahrungsangebot der Appetit auf Eiweiß durch – wie bei Heuschrecken. Erste

Erkenntnisse deuten darauf hin, das Phänomen könnte sich auf den Menschen übertragen lassen: »In einer eiweißarmen, aber energiereichen Welt essen wir zu viele Kohlenhydrate und Fette, um unser Eiweißziel zu erreichen, und riskieren so, fettleibig zu werden.«

Leider lässt sich das menschliche Adipositas-Problem nicht einfach dadurch lösen, den Eiweißanteil in der Ernährung zu erhöhen. Weitere Studien mit verschiedenen Tierarten – und Erfahrungen auf einer japanischen Insel mit besonders vielen 100-Jährigen – zeigten nämlich: Eine eiweißreiche Kost birgt auch Nachteile. Zudem kann eine eiweißarme, kohlenhydratreiche Ernährung das Leben verlängern. Die Autoren erklären verschiedene mögliche Gründe dafür. Dabei gehen sie auf die Nährstoffbedürfnisse in unterschiedlichen Lebensphasen ein, genauso wie auf Veränderungen der Nahrungsumgebungen. Das führt sie schließlich auf industriell herge-



Ein Geschenk, das ankommt!

Mit einem **Spektrum**-Geschenkgutschein hat der Beschenkte die freie Wahl: ob Abonnement, Einzelhefte oder Kalender, ob Print- oder Digitalprodukte. In unserem Onlineshop www.spektrum.de/shop bieten wir eine große Auswahl an.

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

REZENSIONEN

stellte Lebensmittel und ihren Einfluss auf die menschliche Gesundheit.

»Ultrahochverarbeitete Lebensmittel sind in der Regel eiweiß-, ballaststoff- und mikronährstoffarm und reich an Fetten, ungesunden Kohlenhydraten und zusätzlichen Geschmacksverstärkern – genau jener Cocktail, der auch unsere Tierstudien als Ursache für Überkonsum und schlechte Gesundheit ergab.« Die beiden Biologen beschreiben den Teufelskreis aus Insulinresistenz, höherem Eiweißziel und verschiedenen Krankheiten.

Im letzten Kapitel kommen sie zu den praktischen Folgen ihrer Forschungsarbeit. Dort erhält der Leser 15 konkrete Tipps: angefangen mit der Abschätzung seines persönlichen Eiweißziels bis zum Hören auf den Appetit. Zudem erklären die Biologen, was man bei welchem Appetit essen sollte, und raten darüber hinaus zu gutem und ausreichendem Schlaf, körperlicher Aktivität im Freien und dem Kochenlernen. Der interessierte Leser findet am Ende ein ausführliches Quellenverzeichnis mit den zu Grunde liegenden wissenschaftlichen Studien.

Das Buch »Essinstinkt« liefert überraschende Einblicke in die Ernährungsweisen vieler Tierarten, aber auch konkrete Tipps für die eigene gesunde Ernährung. Es ist verständlich geschrieben und kurzweilig zu lesen. Das Buch eignet sich zudem für Leser, die sich dafür interessieren, wie Wissenschaftler zu ihren Erkenntnissen gelangen.

Maren Schenk ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin.

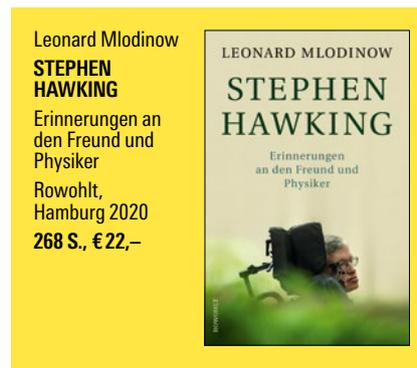
STEPHEN HAWKING POPSTAR DER PHYSIK

Stephen Hawkings Kollege und Freund Leonard Mlodinow schildert seine Erinnerungen an das Ausnahmetalent.

► Am 14. März 2018 starb der renommierte Physiker Stephen Hawking im Alter von 76 Jahren. Die Kombination aus messerscharfem Verstand und körperlicher Behinderung prägte sein wissenschaftliches Leben und

machte ihn weltberühmt. Er wurde zu einem Popstar der Physik. Viele kennen ihn durch sein Werk »Eine kurze Geschichte der Zeit«, das sich über 10 Millionen Mal verkaufte und in 40 Sprachen übersetzt wurde.

Sein letztes Buch »Der große Entwurf«, das 2010 erschien, ist dagegen weniger bekannt. Hawkings Koautor war der am Caltech lehrende theoretische Physiker Leonard Mlodinow, der nun seine Erinnerungen an seinen verstorbenen Freund veröffentlicht. In



»Stephen Hawking« erzählt er, wie die zwei Forscher ihr gemeinsames Buch schrieben, und nutzt das, um sowohl über fachliche Themen zu berichten als auch zahlreiche Anekdoten über das Ausnahmetalent loszuwerden.

Eine rechte Struktur hat Mlodinows Werk nicht. Es gibt keine Inhaltsangabe, und die Kapitel sind durchnummeriert. Wie die Lektüre zeigt, gilt das auch für den Text. Es handelt sich um ein gewöhnungsbedürftiges Gemisch aus Biografie, Kosmologie und persönlichen Erinnerungen. Zwar plätschern die Worte das ganze Buch hindurch, aber man weiß nicht so ganz, wohin die Reise führen soll.

Fachlich gesehen ist das verständlich, denn Mlodinow möchte natürlich nicht »Der große Entwurf« nacherzählen. Erst auf Seite 242 verrät er, was die Quintessenz des gemeinsamen Werks ist – nämlich das anthropische Prinzip, das Hawking am Ende seiner Karriere vertrat. Demnach sind die Gesetze der Physik, wie sie sind, weil wir zufällig in einem von vielen Universen leben, das die passenden Eigenschaften für die Bildung von Leben besitzt.

Dem Untertitel folgend widmet Mlodinow den größten Teil des Buchs den persönlichen Erlebnissen, die er mit Hawking teilte. So beschreibt er über viele Seiten, wie er das erste Mal einen Bootsausflug mit seinem gebrechlichen Freund unternahm, und wie er dabei ängstlicher als Hawking selbst war. Leider diskutiert der Autor mit etwas zu viel Details die Beziehung Hawkings zu seinen Ehefrauen oder beschreibt unnötig genau, wie der Physiker Mahlzeiten zu sich nehmen musste.

Die Stellen im Buch, an denen es um Physik geht, sind unterschiedlich gut gelungen. Beispielsweise muss man sich wieder einmal durch die Rosinenbrot-Analogie quälen, wenn es um die Expansion des Universums geht. Das ist weder schlecht noch falsch, aber Mlodinow bemüht ein doch sehr abgegriffenes Bild. An anderen Stellen finden sich gar banale Plattitüden: »Die Briten klagen viel über das Wetter, und sie haben allen Grund dazu.«

Gut gelungen ist hingegen die Geschichte der theoretischen Erforschung Schwarzer Löcher im sechsten Kapitel. Nach der mathematischen Vorhersage durch Karl Schwarzschild (1873–1916) im Jahr 1916 gerieten sie in Vergessenheit, bis sie dank der Arbeiten von Roy Kerr (*1934), von dem diesjährigen Physiknobelpreisträger Roger Penrose (*1931) und von Stephen Hawking ihren Weg in die aktive Forschung fanden – ein Gebiet, das heute kräftig blüht.

In einem Punkt fällt es allerdings schwer, Mlodinow zu glauben: Nahn Stephen Hawking wirklich an, die Antworten auf die brennenden Fragen zu Schwarzen Löchern und dem Urknall gefunden zu haben, wie der Autor im Buch behauptet? Das erscheint nicht wirklich plausibel. Hawking verfolgte bis an sein Lebensende aufmerksam die Entwicklung der Kosmologie und der Physik, der bis heute eine Theorie der Quantengravitation fehlt.

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

ZUSAMMENBRUCH DURCH SEUCHE?

Vor rund 6000 Jahren gründeten Bauerngesellschaften in der heutigen Ukraine ausgedehnte Planstädte. Doch die zivilisatorische Blüte dauerte nur wenige Generationen lang, wie die Archäologen Johannes Müller und Robert Hofmann sowie die Archäobotanikerin Wiebke Kirleis rekonstruierten. (»Europas erste Metropolen«, »Spektrum« November 2020, S. 78)

Rainer Specker, Tettang: Mir als Laie war tatsächlich nicht bekannt, dass es bereits vor 6000 Jahren dermaßen große Städte in Europa gab. Durch die interessanten Bilder kann man sich die Siedlung gut vorstellen. Erstaunlich auch, wie schön die Tongefäße gestaltet waren!

Nur der Schlussfolgerung kann ich nicht ganz folgen. Es stellen sich mir einige Fragen: Wie ist der Verdacht begründet? Bloß dadurch, dass zuletzt nur ein Gebäude übrig blieb und das ein Indiz für eine zusammengebrochene Verwaltung ist? Wie erklären Sie damit, dass das in den anderen Siedlungen auch so war? Gibt es modernere, gesicherte Parallelen oder auch Simulationen dazu?

Ich würde hier viel eher eine Seuche vermuten. Vielleicht beobachteten die Menschen, wie jemand nach dem Aufenthalt in einem bestimmten Haus krank wurde und weitere Menschen ansteckte. Das könnte außerdem eine Erklärung dafür sein, dass Kommunalbauten eingestellt wurden. Das Niederbrennen der Häuser zur Eindämmung wäre nur die logische Folge. Es würde zudem erklären, weshalb es allen damaligen Siedlungen so erging, wieso die Menschen wieder zu kleineren Siedlungsformen übergingen und auch, warum sie sich nicht mehr mit anderen treffen wollten: Wie beschrieben waren Objekte ab 3500 v. Chr. nicht mehr einheitlich gefertigt.

Antwort der Redakteurin Karin Schlott:

Die Archäologen interpretieren die Daten so, dass Spekulationen möglichst außen vor bleiben. In der letzten Siedlungsphase wurden die Gemeinschaftsbauten nicht mehr genutzt, nur noch der große Bau in der Mitte. Daraus haben die Ausgräber den Schluss gezogen: Die Verwaltung hatte sich verändert und war womöglich für den Zusammenbruch verantwortlich.

Eine Seuche wäre vorstellbar, aber es fehlen stichhaltige, genetische Belege an menschlichen Knochen. Die frühesten Nachweise für *Yersinia pestis* sind etwa 4900 Jahre alt. Sie reichen also nicht ganz in die Zeit der Tripolje-Kultur zurück. Zwar dürfte das Pestbakterium noch etwas älter sein – zirka 5500 Jahre, das ergeben molekulargenetische Berechnungen –, aber wo genau es seinen Ursprung hatte, ist ebenfalls nicht gesichert. Vermutet wird Zentralasien. Es gibt also Indizien, jedoch keine konkrete Verbindung zu den Tripolje-Städten. Ich gehe davon aus, dass sich die Datenlage ändert, sobald Nekropolen gefunden werden oder es neue Ergebnisse durch weitere Grabungen in den Siedlungen gibt.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

Was vergleichbare Befunde betrifft: Zunächst liefern Analogien zwar gute Anschauungsbeispiele, aber sie haben keine Beweiskraft. Denn Siedlungen brennen aus verschiedenen Gründen ab. Wenn nun ein Brand nur archäologisch belegt ist und es keine Schriftquellen dazu gibt, dann lässt sich bloß aus den Funden rekonstruieren, was geschehen sein könnte. Gibt es Hinweise auf Angreifer, etwa Pfeilspitzen, oder stoßen Archäologen auf die Überreste von Opfern, dann liegt es nahe, von einer Attacke auszugehen. Im Fall von Maidanetske deutet bislang nichts darauf hin. Auch hier freue ich mich schon auf die nächsten Grabungsergebnisse mit womöglich neuen Interpretationen.

ANTISENSE UND MUSKELATROPHIE

Antisense-Oligonukleotide (ASO) beeinflussen die zelluläre Proteinproduktion. Nach langer Forschung werden Therapien allmählich einsatzreif. (»Heilsame Molekülschnipsel«, »Spektrum« Dezember 2020, S. 12)

Berthold Häßlin, Leverkusen: In den auf S. 17 dargestellten Erklärungen heißt es, »dass die Zellmaschinerie Exon 7 ignoriert«. Gemeint ist der zelluläre Spleißapparat. Richtiger wäre doch wohl zu sagen, dass er Exon 7 wie ein Intron behandelt. Oder verstehe ich da etwas falsch?

Zweitens sind die Gene *SMN1* und *SMN2* auf Chromosom 5 lokalisiert. Nun hat jeder Mensch davon zwei. Ist die Vererbung rezessiv oder dominant? Sofern sie rezessiv ist, sollte das Krankheitsbild nicht auftreten, wenn das zweite Chromosom 5 funktionsfähiges *SMN1* enthält. Hat man eventuell Einfluss durch sein Verhalten?

Antwort des Redakteurs Frank Schubert:

Der Spleißapparat gehört zur Zellmaschinerie. Die Formulierung »ignoriert« meint, dass er Exon 7 nicht als Exon behandelt und dieses dementsprechend nicht an der Herstellung des Proteins mitwirkt.

Die spinale Muskelatrophie wird autosomal-rezessiv vererbt. Bekannt ist, dass die Schwere der Krankheit von der Zahl der funktionsfähigen *SMN2*-Kopien abhängt – deren Expression kann vermutlich den Funktionsverlust von *SMN1* zum Teil kompensieren. Über epigenetische Aspekte der Erkrankung ist mir nichts bekannt.

Nur keine falsche Scham

Wie zerronnen, so gewonnen.

Eine Kurzgeschichte von Naomi Kanakia

Für eine kurze Zeit war Kameron Layas der berühmteste Schamtechniker der Welt – damals, anno 2031.

Seinen Durchbruch erzielte er, als er mehrere Jahrzehnte archivierte Videomaterials kaufte; es stammte aus den Überwachungskameras einer sehr großen Supermarktkette. 30 Jahre mit Aufzeichnungen von entnervten Müttern und Vätern, wie sie gerade versuchten, ihre hyperaktiven Kinder zu bändigen, doch die hörten nicht auf, ihnen die Ohren vollzujammern wegen irgendeiner sieben Dollar teuren neonfarbigen ungesunden Süßigkeit neben der Kasse, und die Eltern bettelten um nur eine Minute, nein eine Sekunde Ruhe, damit sie versuchen konnten, sich zu erinnern, ob sie alles auf der Einkaufsliste wirklich im Wagen hatten ...

Drei Jahrzehnte lang Eltern, wie sie die Beherrschung verloren – nur einmal ... einmal im Leben – und wie sie sich diesen einen Augenblick Ruhe verschafften, indem sie ihrem Kind einen Klaps auf den Kopf gaben.

Und dann, im Sommer 2031, bekamen all diese über 30 Jahre hinweg angesammelten Eltern, deren Nachwuchs schon längst erwachsen war und meist eine gesunde Abneigung gegen jegliche Autorität entwickelt hatte, höchst offiziell aussehende Briefe. Darin lagen Bilder des lange geleugneten oder längst vergessenen Vorfalls ... und die Schreiben enthielten Bußgeldbescheide. Die Mütter und Väter zahlten. Alle. Ausnahmslos. Weil sie sich schämten.

Das war nur der Anfang. Die Geldquelle sprudelte. Binnen sechs Monaten hatten die Schamtechniker die Kindererziehung unter ihrer Fuchtel.

Sie haben Ihrem Kind zu viel quecksilberhaltigen Tunfisch verabreicht? Es nicht im Kindersitz festgezurrt? Sie haben zugelassen, dass es ohne Helm Rad fährt? Die allgegenwärtigen Kameras zeichnen alles heimlich auf, und ruckzuck bekommen Sie eine Mahnung.

Natürlich sprudelte die Quelle nicht ewig. Kein Start-up hält sich lange. Eben noch hatte Kameron als Mann des Jahres das Cover der Zeitschrift »Time« geziert, da ging es schon bergab, denn mehrere Großkonzerne waren bereits dabei, das Elternschambusiness unter sich aufzuteilen. Sie fingen an, in all ihre Produkte – Autos, Fernseher, Waffen, einfach alles – Mikrochips einzubauen, um damit zu registrieren, ob Eltern ihre Kinder in Gefahr brachten. Wie sollten kleinere Firmen damit konkurrieren?

Und so begann Kamerons langer, allmählicher Abstieg. Allerdings weigerte er sich, über seinen Niedergang Scham zu empfinden. Er spuckte auf den Gehweg und pinkelte gegen die Wand, er trat gegen geparkte Autos und brach die Mikrochips aus den Waren. Die Strafgebühren dafür stiegen und stiegen, bis sie schwindelnde Höhen erreich-

ten. Mit der Zeit summierten sich Kamerons Schulden auf Hunderttausende, nein Millionen Dollar an Bußgeldern. Aber das war ihm egal. Bis er eines Tages eine Überdosis nahm.

*

Kamerons bester Freund hieß Doktor Exponential. Sie streunten gemeinsam durch die Parkanlagen und sammelten Pfandflaschen. Wenn die Nacht kam, schoben sie ihre Einkaufswagen zurück unter die Stadtautobahn und lauschten der Musik des Straßenverkehrs. Manchmal legten sie ihr Geld zusammen und kauften ein bisschen Rauschgift von dem Typen an der Ecke.

Aber sie hatten nie darüber gesprochen, was im Fall einer Überdosis zu unternehmen wäre. Kameron war ein Riese; er wog 150 Kilogramm. Doktor Exponential war klein und mager. Er würde es nie schaffen, seinen Freund bis zum nächsten Krankenhaus zu schleppen.

Als der Doktor verzweifelt zum Himmel aufblickte, sah er die drei Kameras, die jeden ihrer Schritte beobachteten. Sie registrierten, dass Kameron sterbenskrank war. Wenn sie wollten, konnten sie ihn retten. Allerdings war dem Doktor klar, dass sich die Überwachungskameras einen Dreck um Leute wie Kameron scherten.

Aber diesmal war er im Irrtum.

Sobald die Kameras den Bewusstlosen als Kameron Layas identifiziert hatten, alarmierte ein Computer einen privaten Krankenwagendienst in Oakland. Während Doktor Exponential noch nach Hilfe suchend umherlief, raste ein kleines selbstfahrendes Rettungsauto herbei und nahm Kameron auf. Als der Doktor sich umdrehte, sah er gerade noch, wie der Krankenwagen mit seinem Freund verschwand.

*

Doktor Exponential war nicht dabei, als Kameron aufwachte; er recherchierte in der Stadtbücherei, denn die wunderbare Errettung seines Freundes hatte ihn auf eine Idee gebracht. Kameron wurde am nächsten Tag mit vollem Magen und einer Krankenhausrechnung über 24000 Dollar entlassen.

Die beiden klopfen einander auf die Schulter, als sie sich wiedersahen. Sie setzten sich, lehnten sich gegen einen Pfeiler, und der Doktor deckte Kameron mit einer Decke zu. So saßen die beiden zehn Minuten lang schweigend da.

»He du«, sagte dann der Doktor plötzlich, »ist dir klar, dass du lebendig mehr wert bist als tot?«

Kameron spähte hinüber zu dem Dealer an der Ecke: Der Typ trug unter dem Hemd eine Schusswaffe.

»Was willst du damit sagen?«, fragte Kameron.

»Deine Außenstände betragen insgesamt etwa zehn Millionen Dollar, hast du mal gesagt.«

»Ja, und?«

Früher einmal war der Doktor ein echter Akademiker gewesen: promoviert in Mathematik. Er erklärte: »Jedes Mal, wenn du einen Bußgeldbescheid kriegst, schuldest du damit einem Unternehmen Geld.«

»Ist mir klar.«

Der Doktor räusperte sich ungeduldig. Wie war Kameron nur so lange zurechtgekommen? Der Riesenkerl verstand überhaupt nichts.

»Wenn jemand einer Firma zehn Millionen schuldet, dann trägt dieses Unternehmen den Betrag in die Bilanz als Guthaben ein: Das Unternehmen verhält sich so, als wäre es zehn Millionen reicher. Beziehungsweise die Computer tun das, die heute alle Finanzgeschäfte steuern, genauso wie unser ganzes restliches Leben über diese verdammten Kameras. Sie spalten dann diese Schuldsumme auf und verwenden sie, um Wertpapiere abzuschließen, die das Unternehmen an andere Leute verkauft. Mit der Zeit vervielfacht sich das alles, und daher werden inzwischen hunderte Millionen an Wertpapieren völlig wertlos, wenn du stirbst. Das ist der Grund, warum du noch am Leben bist.«

»Wirklich?« Kameron überlegte. »Ja dann ...«

Er betrachtete die nächste Kamera. Und dann lächelte er. Sie war exakt auf ihn gerichtet.

Er stand auf und schlenderte zum Dealer hinüber. »Du gibst mir sofort alles, was du hast«, sagte Kameron lässig.

Der Dealer antwortete: »Was? Hau ab, du Junkie.«

Kameron trat näher, griff dem Dealer in die Tasche und nahm alles heraus. Der Dealer rief »Bist du total ...« und zog seine Waffe aus dem Hemd. Doch als er abdrückte, blinkte sie rot; sonst geschah nichts.

»Siehst du?«, meinte Kameron. »Der Computer lässt nicht zu, dass du mir etwas tust.«

Er nahm dem anderen die Waffe aus der Hand und feuerte einmal in die Luft. Der Dealer nahm Reißaus.

Kameron ging mit gesenktem Blick mitten auf die Straße. Dort herrschte reger Verkehr, aber die selbstfahrenden Autos wichen samt und sonders mit quietschenden Reifen aus. Er ging zurück zu Doktor Exponential und warf ihm das eingesammelte Rauschgift in den Schoß. »Nimm das«, sagte Kameron, »ich brauch das Zeug nicht mehr.«

Dann setzte er sich neben seinen Freund, legte die Waffe in den Schoß und bedeckte sie mit einem Zipfel der Decke. ◀

DIE AUTORIN

Naomi Kanakia schreibt unter anderem Sciencefiction und lebt in San Francisco (US-Bundesstaat Maryland). Ihr Jugendroman »We are totally normal« erschien 2020.

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 494, S. 276, 2013

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heintelmann, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ingrid Horn, Dr. Susanne Lipps-Breda, 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.

Ein Teil dieser Ausgabe beinhaltet das KlarText-Magazin der Klaus Tschira Stiftung.

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 41 vom 1.1.2020.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2020 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

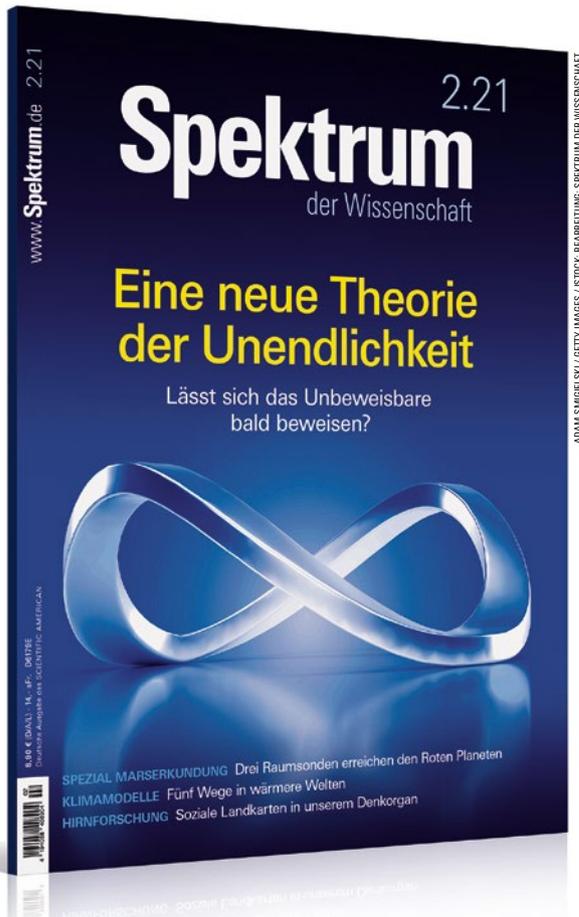
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
 Editor in Chief: Laura Helmut
 Executive Vice President: Michael Florek
 Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



VORSCHAU



ADAM SMIGIELSKI / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

EINE NEUE THEORIE DER UNENDLICHKEIT

Gibt es eine Menge, die größer ist als die natürlichen Zahlen, aber kleiner als die reellen? Grundlegende Fragen wie diese gehören immer noch zu den unbeweisbaren Problemen der Mathematik. Experten suchen deshalb nach neuen Gesetzen, die das mathematische Grundgerüst ergänzen und entsprechende Antworten liefern sollen.

SOZIALE LANDKARTEN IM GEHIRN

Dieselben neuronalen Schaltkreise, die zur Orientierung in Raum und Zeit dienen, befähigen uns offenbar auch dazu, uns im Dickicht der zwischenmenschlichen Beziehungen zurechtzufinden. So ist darin unter anderem verzeichnet, wie nah uns andere Personen stehen und wo sie in der gesellschaftlichen Hierarchie oder Rangordnung einer Gruppe angesiedelt sind.



LUCKYTO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



ANGKHAM / GETTY IMAGES / ISTOCK

FÜNF WEGE IN WÄRMERE WELTEN

Klimamodelle zeigen die Folgen diverser Treibhausgaskonzentrationen. Doch welche gesellschaftlichen Entwicklungen stehen dahinter? Neue Szenarien könnten die Lücken schließen.



MASOUP / GALEPH

DER MONAT DES MARS

Im Februar 2021 erreichen gleich drei Raumsonden den Roten Planeten: Die Vereinigten Arabischen Emirate schicken einen Orbiter, der das Marswetter beobachten soll. Die USA wollen einen Rover auf der Oberfläche absetzen – genauso wie China, für das solch eine Mission eine Premiere ist.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandspporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

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

www.spektrum.de/abo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.

Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR
47
19.11.
2020

- > Ein weiterer Impfstoffkandidat zeigt überraschend hohe Wirksamkeit
- > SpaceX' »Crew-Dragon« erreicht ISS
- > Erstmals Geburt eines Magnetars beobachtet

TITELTHEMA: PLANETENSYSTEM TRAPPIST-1

Sieben erdgroße Fragezeichen

Gleich sieben Planeten umrunden den Stern Trappist-1. Knapp vier Jahre nach ihrer Entdeckung versuchen Forscher noch immer, Näheres über sie herauszufinden - eine kolossale Herausforderung.



COVID-19

Auch mit einem Impfstoff bleibt viel zu tun



ARCHÄOLOGIE

Massaker am Markttag



QUANTENCOMPUTER

»Wenn wir zu lange warten, wird es zu spät sein«

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung.

Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

www.spektrum.de/abonnieren

