

Spektrum

der Wissenschaft

Eine neue Theorie der Unendlichkeit

Lässt sich das Unbeweisbare
bald beweisen?



MARSERKUNDUNG Drei Raumsonden erreichen den Roten Planeten
KLIMAMODELLE Fünf Wege in wärmere Welten
HIRNFORSCHUNG Soziale Landkarten in unserem Denkorgan

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 MONAT DES MARS

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

► Im Februar 2021 ist es so weit: Gleich drei unbemannte Raumfahrzeuge sollen dann den Mars erreichen und – sofern alles glatt läuft – die weitere Erforschung des Roten Planeten vorantreiben (S. 66). Die USA und China beabsichtigen, mit ihren geländegängigen Robotern die Geologie bisher unerforschter Marsregionen vor Ort zu erkunden. Das amerikanische Gerät soll sogar zum ersten Mal Gesteinsproben sammeln, die dann später zur Erde zurückgeschickt werden. In ihnen hoffen die Wissenschaftler unter anderem, Hinweise auf früheres Leben zu entdecken. Der NASA-Rover führt zudem eine Besonderheit mit: einen Minihelikopter in extremer Leichtbauweise, der als Technologiedemonstrator dort einige Flugversuche absolvieren soll (S. 73).

Die Newcomer in dem Trio von Raumfahrtnationen sind die Vereinigten Arabischen Emirate, die mit internationaler Unterstützung durch erfahrene Ingenieure die erste interplanetarische Mission eines arabischen Lands durchführen möchten. Allerdings planen sie keine Landung auf der Oberfläche, sondern wollen mit einem Orbiter einen umfassenden Eindruck vom Marsklima und dem dortigen Wettergeschehen bekommen. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten gerade für zukünftige Besiedlungsversuche wichtig sein.

Bevor sich Menschen auf die Reise zum Roten Planeten begeben und womöglich eine Kolonie gründen, gilt es jedoch ein medizinisches Problem zu lösen: Die Strahlung während des Raumflugs, aber auch auf der Marsoberfläche, stellt eine große Gefahr für Astronauten dar. Ohne geeignete Abschirmung würden zukünftige Mars-Pioniere erhebliche gesundheitliche Risiken eingehen, von getrübbten Augenlinsen über Krebs bis hin zu Hirnschäden (S. 42). Noch ist nicht ganz klar, wie sie sich zuverlässig vermeiden lassen könnten. Wird die Eroberung des Weltalls gar an dieser Aufgabe scheitern?

Andererseits ist es geradezu eine Spezialität von uns Menschen, unlösbar scheinende Probleme anzugehen und oft dann tatsächlich einen Weg aus dem Dilemma zu finden. Das gilt nicht nur für praktische Herausforderungen wie den Raumflug, sondern auch für theoretische Rätsel, etwa in der Mathematik. Unser Titelthema liefert dafür ein glänzendes Beispiel: Es dreht sich um eine sehr grundsätzliche Annahme zur Größe unendlicher Mengen, die bisher als unbeweisbar galt. Mit dem Beitrag von Jean-Paul Delahaye eröffnen wir eine neue dreiteilige Serie zum Thema »Unendlichkeit«.

Viel Vergnügen beim Lesen wünscht Ihr

Hartwig Hanser



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum GESCHICHTE** 6.20 blickt zurück zu den ersten Metropolen Europas – vor 6000 Jahren!

IN DIESER AUSGABE



CLAUDIA HEHR PHOTOGRAPHY

MATTHEW SCHAFER UND DANIELA SCHILLER

vom Mount Sinai Hospital in New York berichten ab S. 34 von neuesten Erkenntnissen über die Repräsentation unserer sozialen Beziehungen im Gehirn.



MELANIE HABERKORN

CHRISTINE HELLWEG

Ab S. 42 erklärt die Strahlenbiologin, welcher Strahlenbelastung Raumfahrer ausgesetzt sind. Ihr Fazit: Die gesundheitlichen Risiken eines Langzeitflugs sind beträchtlich.



NASA/JPL/CALTECH

BOB BALARAM

Schon vor 20 Jahren träumte der Ingenieur des Jet Propulsion Laboratory davon, einen Minihelikopter auf dem Mars zu testen. Nun wird solch ein Projekt tatsächlich Realität, im Rahmen der neuen Mars-Mission der NASA. Was er davon erwartet, erzählt Balaram ab S. 73.

INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM
- 22 FORSCHUNG AKTUELL
Sprunghafte Evolution
Neue Körpermerkmale durch Mutationen in regulatorischen DNA-Abschnitten.
Die optimale Reise
Fortschritte beim »Problem des Handlungsreisenden«.
Radioblitz des Magnetars
Astrophysiker lösen ein hartnäckiges Rätsel.
Astrozyten mit Potenzial
Parkinsontherapie durch neue Nervenzellen.
- 33 SPRINGERS EINWÜRFE
Wie die Impfskepsis zunimmt
Vernetzung lässt miss-trauische Gruppen wachsen.
- 41 FREISTETTERS FORMELWELT
Die Legosteine-Wissenschaft
Mathematik stößt auf Spielzeug.
- 64 SCHLICHTING!
Verborgene Muster im Eis
Flüssigkeit auf Gefrorenem erzeugt seltsame Muster.
- 90 REZENSIONEN
- 93 IMPRESSUM
- 95 ZEITREISE
- 96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE
- 98 VORSCHAU

12 LOGIK **DAS FEHLENDE PUZZLETEIL**

Serie: Unendlichkeiten (Teil 1) Manche Aussagen in der Mathematik sind unentscheidbar. Daher suchen Experten nach neuen Gesetzen, die das mathematische Grundgerüst erweitern und einige Unbeweisbarkeiten aus dem Weg räumen.

Von Jean-Paul Delahaye

34 NEUROWISSENSCHAFT **SOZIALE LANDKARTEN IM GEHIRN**

Unser Denkorgan verarbeitet zwischenmenschliche Beziehungen anscheinend mit denselben Schaltkreisen wie geografische Informationen.

Von Matthew Schafer und Daniela Schiller

42 MEDIZIN **»DER GRENZWERT WIRD DEUTLICH ÜBERSCHRITTEN«**

Die Strahlenbiologin Christine Hellweg erläutert, wie gefährlich ein Aufenthalt im Weltraum für Astronauten ist.

Von Janosch Deeg

48 KLIMASZENARIEN **FÜNF WEGE IN WÄRMERE WELTEN**

Ein neuer Satz von Modellen soll mögliche sozioökonomische Entwicklungen der globalen Gesellschaften aufzeigen.

Von Jeff Tolleson

54 PHYSIK **DIE ZWEI GESICHTER DES WASSERS**

Lassen sich die außergewöhnlichen Eigenschaften des Wassers besser erklären, wenn man es als Gemisch zweier Flüssigkeiten betrachtet?

Von Rachel Brazil

59 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **OSZILLIERENDE REAKTIONEN**

Ein einfach nachvollziehbares Beispiel liefern Eisenstäbe in Salpetersäure.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

Spezial »Marserkundung«

66 RAUMFAHRT **MISSION: MARS**

Gleich drei Missionen erreichen im Februar unseren Nachbarplaneten, mit zum Teil sehr unterschiedlichen Zielen.

Von Alexandra Witze, Smriti Mallapaty und Elizabeth Gibney

73 INTERVIEW **»WIE DIE GEBRÜDER WRIGHT«**

Die NASA will in den kommenden Monaten erstmals einen kleinen Helikopter auf dem Mars fliegen lassen. Bob Balaram hat ihn erfunden.

Von Alexander Stirn

76 INFORMATIK **MATHEMATIKER AUS SILIZIUM**

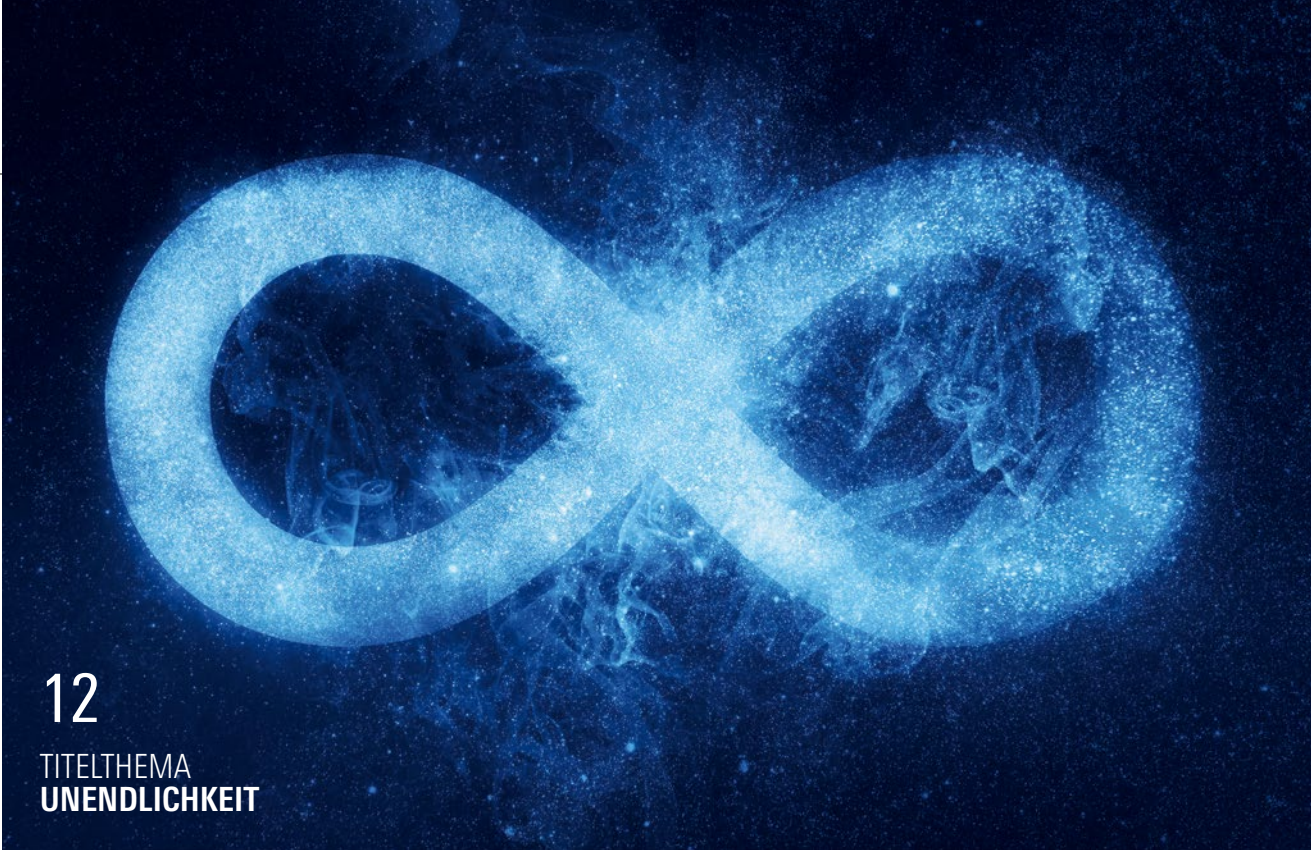
Computer, die mathematische Vermutungen nicht nur formulieren, sondern auch beweisen? Künstliche Intelligenz könnte uns dem Traum näher bringen.

Von Stephen Ornes

82 ARCHÄOLOGIE **WIE DIE BAUERN EUROPA EROBERTEN**

Als die ersten Bauern vor gut 8000 Jahren Europa erreichten, stießen sie auf Jäger und Sammler. Oft knechteten sie dann die Ureinwohner.

Von Laura Spinney



12

TITELTHEMA
UNENDLICHKEIT

ALEXANDAR / GETTY IMAGES / ISTOCK

34

NEUROWISSENSCHAFT
SOZIALE
LANDKARTEN
IM GEHIRN



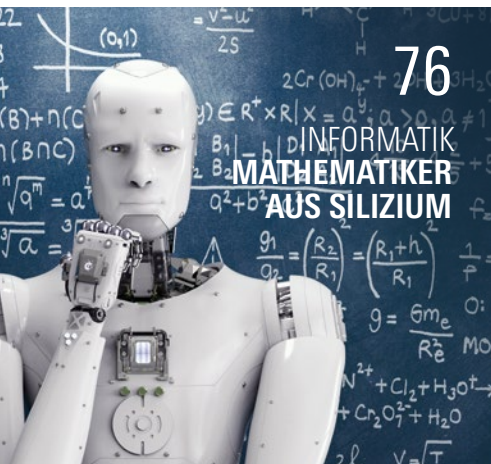
LUCKY77 / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

66

RAUMFAHRT
MISSION: MARS



MASA/JPL-CALTECH



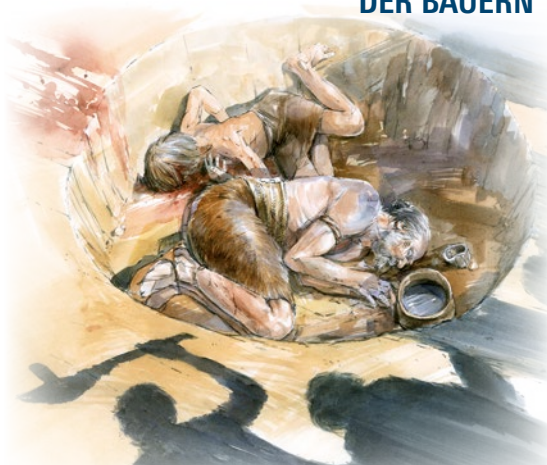
76

INFORMATIK
MATHEMATIKER
AUS SILIZIUM

PHONAMAPHOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK
BEARBEITUNG, SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

82

ARCHÄOLOGIE
DER EROBERUNGSZUG
DER BAUERN



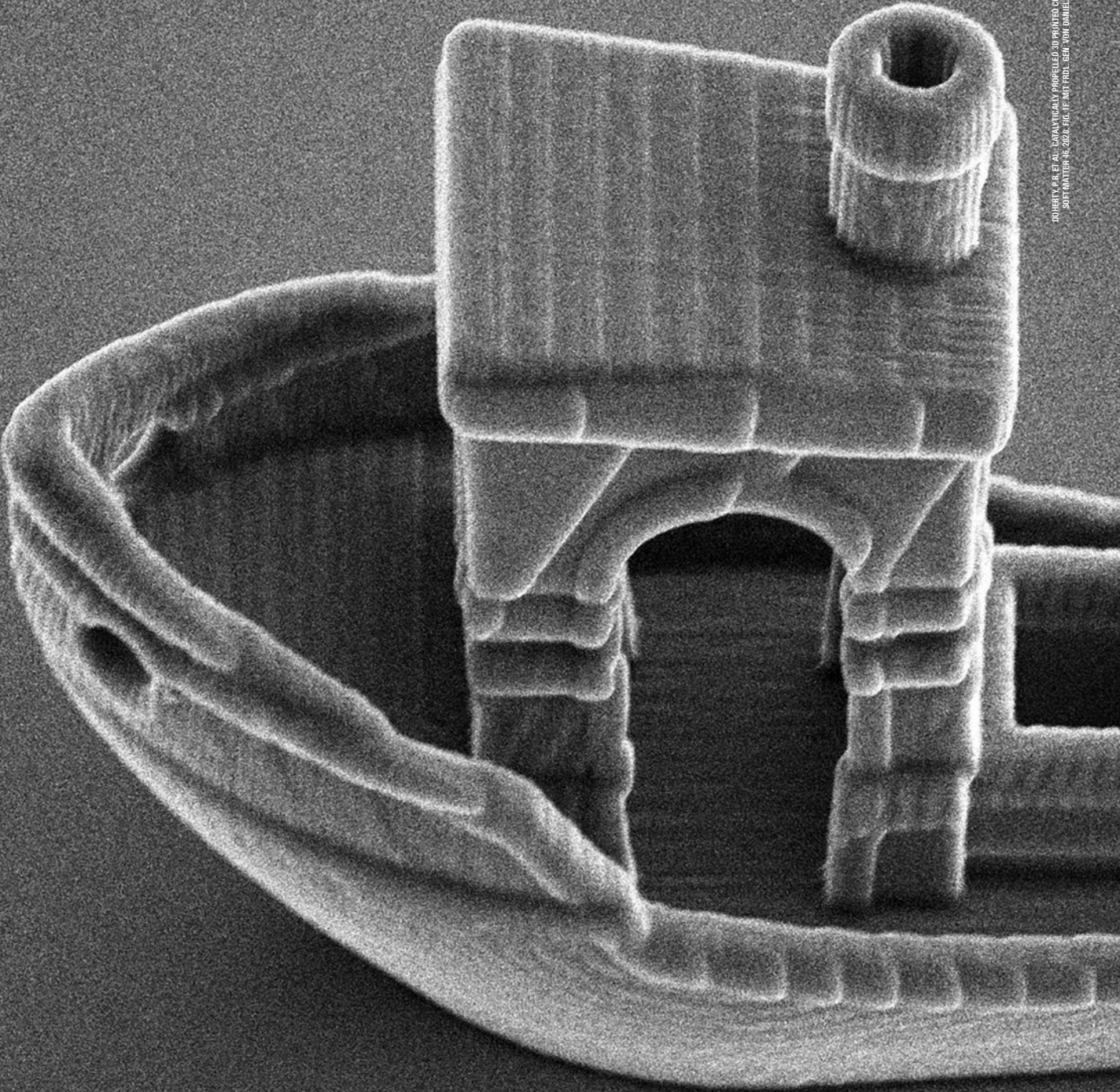
BENOIT CLAIRS



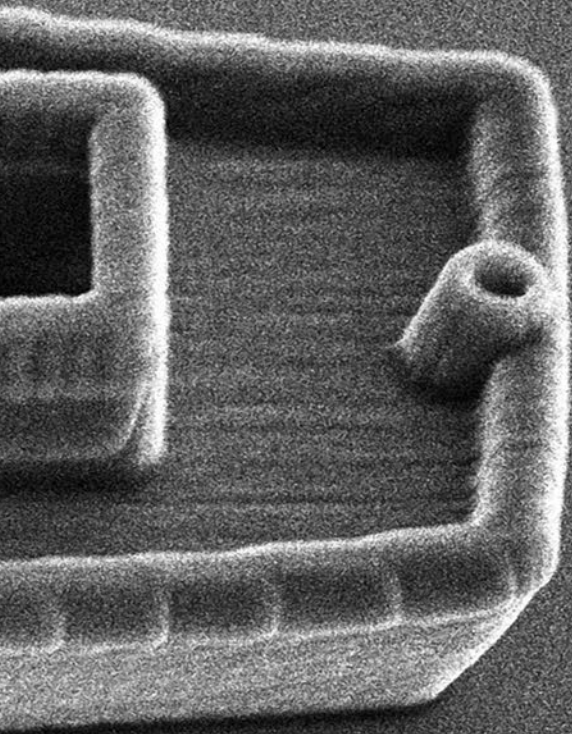
Alle Artikel auch digital
auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM



DOHERTY, P. R. ET AL.: TOPOLYTICALLY PRINTED 3D-PRINTED COLLOIDAL MICROSWIMMERS
SOFT MATTER 16, 2021, FIG. 1F MITT MIT PROF. GERRIT VON DEMBOWSKI, LEIBNIZ UNIVERSITÄT



BÖTCHEN ALS MIKROSWIMMER

▶ Seit Jahren arbeiten Forscher an Mikroschwimmern: Partikel mit einem Durchmesser von gerade mal einigen tausendstel Millimetern, die künftig im menschlichen Körper Arzneimittel zu Krankheitsherden transportieren könnten. Aber noch ist es schwierig vorherzusagen, wie sich die winzigen Teilchen in bestimmten Umgebungen bewegen.

Ein Team um Daniela Kraft von der Universität Leiden in den Niederlanden hat nun ein enorm präzises 3-D-Druck-Verfahren entwickelt, mit dem sich Mikroschwimmer in ungeahntem Detailgrad herstellen lassen. Bei dieser Zwei-Photonen-Polymerisation schießt man extrem kurze Laserpulse in ein Material, das dadurch an einer gewünschten Stelle aushärtet. Damit sind Kreationen wie das hier per Rasterelektronenmikroskop abgebildete Boot möglich: Es ist nur 0,03 Millimeter lang und hat auf seinem Ruderhaus sogar einen kleinen Schornstein sitzen.

In einem Mix aus Wasser und Wasserstoffperoxid bewegt sich das Schiffchen von selbst fort, da seine eine Seite mit Platin und Palladium beschichtet ist. Der Materialmix wirkt als Katalysator für das Aufspalten des Wasserstoffperoxids, bei dem Bläschen entstehen. Sie treiben das Boot mittels Rückstoß voran.

Soft Matter, 10.1039/d0sm01320j, 2020

RADIOASTRONOMIE EINSTURZ EINER LEGENDE

► Das Arecibo-Observatorium, eine der berühmtesten Stätten der modernen Astronomie, war bis 2016 das größte Radioteleskop der Erde. 1995 tauchte es sogar im Showdown eines James-Bond-Films auf, was nur wenigen Orten der Wissenschaft vergönnt ist. Bis zuletzt besuchten jährlich zehntausende Touristen die 305-Meter-Schüssel in den Bergen Puerto Ricos.

Nun hat Arecibo ein tragisches Ende ereilt: Am 1. Dezember riss ein Stahlseil, das eine 900 Tonnen schwere Plattform mit Instrumenten über der Anlage befestigte. Mit einem ohrenbetäubenden Knall stürzte sie herab und zerstörte dabei wesentliche Teile der Reflektorschale. Schon in den Monaten zuvor waren wiederholt Stahlseile gerissen und hatten die Anlage beschädigt. Die US-amerikanische National Science Foundation (NSF) beschloss daher bereits im November, den Betrieb einzustellen.



ZERFETZTER REFLEKTOR Eine herabgestürzte Plattform hat das Arecibo-Observatorium irreparabel beschädigt.

Arecibo war wissenschaftlich enorm erfolgreich: Forscher spürten damit etwa das Doppelsternsystem PSR B1913+16 auf, das schon 1974 Hinweise auf Gravitationswellen lieferte. Und auch die Entdeckung der ersten Plane-

ten außerhalb unseres Sonnensystems gelang hier: Sie hinterließen Spuren in den Radiowellen eines Pulsars, wie Astronomen 1992 feststellten.

Mitteilung der NSF, Dezember 2020

BIOLOGIE KI ERRÄT FALTUNGSSTRUKTUR VON PROTEINEN

► Eine spezielle Software der Firma »DeepMind« hat die räumliche Gestalt von Proteinen vorhergesagt – mit einer Treffsicherheit, die viele Experten beeindruckt. DeepMind gehört, ebenso wie Google, zum US-amerikanischen Unternehmen Alphabet Inc.

Proteine bestehen aus aneinandergereihten Aminosäuren. Damit ein Eiweißstoff richtig funktioniert, muss sich seine Aminosäurekette in eine ganz bestimmte Form falten. Diese räumliche Gestalt legt fest, wie sich das Protein verhält und an welchen biochemischen Reaktionen es mitwirkt. Falsch gefaltete Proteine können verheerende Schäden im Organismus anrichten, etwa bei Prionenerkrankungen. Experimentell lässt sich die Faltungsstruktur von Eiweißen nur

schwer ermitteln. Forscher setzen hierfür Methoden wie die Röntgenstrukturanalyse, die Cryo-Elektronen-Tomografie oder die NMR-Spektroskopie ein. Das dauert oft Jahre und verschlingt erhebliche Ressourcen. Deshalb versuchen Biologen schon seit Langem, den gefalteten Zustand allein aus der Abfolge der verketteten Aminosäuren vorherzusagen. Bisher wenig erfolgreich.

Die Software »AlphaFold« von DeepMind hat hierbei jetzt enorme Fortschritte erzielt. Bei einem internationalen Wettbewerb bekam das Programm 100 Aminosäuresequenzen vorgelegt und sagte bei 70 davon die Faltungsstruktur so präzise voraus, wie es bislang nur mit Hilfe experimenteller Verfahren möglich war. Die Vorhersagegenauigkeit lag auf einer

Skala von 1 bis 100 bei 92,4 – und im Falle besonders schwer prognostizierbarer Formen bei 87. Die besten konkurrierenden Forschergruppen kamen auf 75; bei früheren Wettbewerben waren Werte um die 53 erreicht worden.

AlphaFold nutzt Methoden des maschinellen Lernens. Die Entwickler haben das System mit den Daten zehntausender bekannter Proteine trainiert – offenbar erfolgreich. Allerdings kann die Software bisher keine Formen von Proteinkomplexen vorhergesagen, bei denen sich mehrere Eiweiße zusammenlagern. Dennoch zeigen sich Strukturbiologen und Bioinformatiker durchweg von der KI beeindruckt, wie eine Umfrage des Science Media Center Germany ergab.

Nature, 10.1038/s41586-019-1923-7, 2020

KLIMAWANDEL DÜNGUNGSEFFEKT VON CO₂ NIMMT AB

Die Menschheit bläst riesige Mengen Kohlendioxid in die Luft. In den zurückliegenden 40 Jahren ist sein Gehalt in der Atmosphäre um rund 20 Prozent gestiegen, was zu höheren Temperaturen und saureren Meeren führt. Zugleich ist die Erde ergrünt: Der so genannte Blattflächenindex, das Verhältnis von Blatt- zu Bodenfläche, hat weltweit zugenommen, da Pflanzen CO₂ aus der Luft aufnehmen und via Fotosynthese zu Biomasse verarbeiten. Die zusätzlichen Grünflächen bedecken dabei eine Fläche, die etwa doppelt so groß wie die USA sind.

Mittlerweile scheinen Pflanzen aber immer weniger von dem Überangebot an Treibhausgas zu profitieren, berichten Forscher um Yongguang Zhang

von der Nanjing-Universität in China. Sie haben unter anderem Satellitendaten aus den vergangenen vier Jahrzehnten ausgewertet. Aus ihnen geht hervor, in welchem Maß die Erdoberfläche bestimmte Wellenlängen des Lichts zurückwirft. Da fotosynthetisch aktive Pflanzen im nahen Infrarot mehr Strahlung reflektieren als im Bereich des sichtbaren Lichts, lässt sich so die Pflanzenmasse auf der Oberfläche abschätzen.

Zhang und sein Team überprüften, wie sich dieser Wert zwischen 1982 und 2015 entwickelte. Mehr Kohlenstoffdioxid führt demnach zu stärkerem Pflanzenwachstum, doch mit steigender CO₂-Konzentration verliert die Düngung an Wirksamkeit. Seit den

1980er Jahren hat sie um etwa 40 Prozent nachgelassen.

Der Grund: Pflanzen benötigen zum Wachsen nicht nur CO₂, sondern auch Wasser und Nährstoffe wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen – Ressourcen, die im Zuge des Klimawandels in vielen Regionen knapper werden. Die Pflanzen können das zusätzliche CO₂ daher nicht in noch kräftigeres Wachstum umsetzen.

Klimamodelle müssten daher modifiziert werden, argumentiert das Team: Die Modelle gehen davon aus, dass Pflanzen bei steigenden Temperaturen weiterhin wachsende Mengen CO₂ binden und dabei dem Trend der Vergangenheit folgen.

Science, 10.1126/science.abd8911, 2020

ASTROPHYSIK ZWEITE FUSIONSREAKTION DER SONNE

Physiker haben eine komplizierte Variante der Kernfusion im Innern der Sonne nachgewiesen. Bei diesem Bethe-Weizsäcker- oder CNO-Zyklus wandeln sich Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff schrittweise ineinander um, mal, indem sie mit Wasserstoff verschmelzen, mal über den Beta-Zerfall. An einer Stelle des Kreislaufs spaltet sich auch ein Heliumkern ab.

Da dieser etwas leichter ist als die vier in den Prozess einfließenden Wasserstoffkerne, wird insgesamt Energie frei. Der CNO-Zyklus steuert etwa ein Prozent der Fusionsleistung

der Sonne bei. Der Rest stammt aus der direkten Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Helium.

Nachweisen lassen sich die genauen Abläufe im Sonneninneren über Neutrinos: Die geisterhaften Elementarteilchen sind ein Nebenprodukt der Kernfusion und können die heiße Materie fast ungehindert durchdringen. Auf der Erde spüren Wissenschaftler sie mit unterirdischen Detektoren auf, etwa dem Borexino-Experiment unter dem Gran Sasso d'Italia. Trifft ein Neutrino aus der Sonne eines der Atome in dem 280 Tonnen schwe-

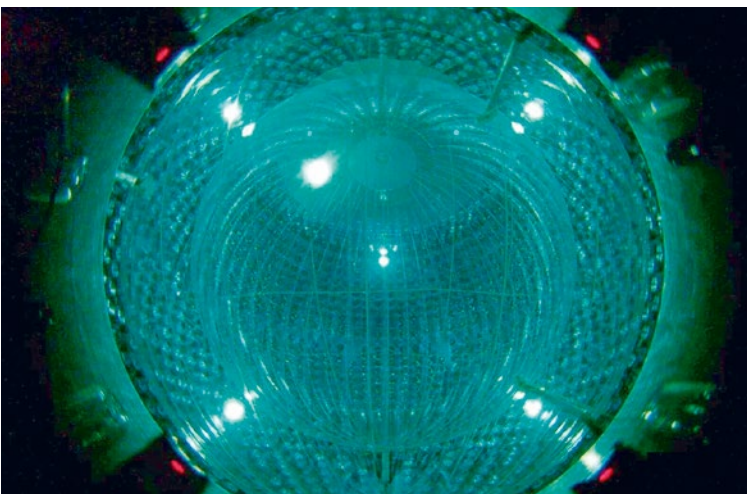
ren Tank, entweicht ein winziger Lichtblitz.

Über die Stärke des Signals können die Forscher die Energie des Neutrinos rekonstruieren. Beim CNO-Prozess tragen die Partikel meist mehr Energie davon als bei der klassischen Fusion von Wasserstoff zu Helium. Die Geisterpartikel heben sich dadurch allerdings nicht sehr deutlich vom Hintergrundrauschen im Borexino-Detektor ab, in dem insbesondere der Zerfall von radioaktivem Wismut-210 für Störsignale ähnlicher Energie sorgt.

Das Forscherteam konnte diesen Beitrag jetzt besser abschätzen als in der Vergangenheit – und stieß zwischen 2016 und 2020 auf einen Überschuss an Signalen, die auf Neutrinos aus dem CNO-Prozess zurückgehen. In schweren Sternen spielt er eine größere Rolle als in der Sonne: Sie enthalten deutlich mehr Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff und machen den komplizierten Fusionskreislauf daher zur dominanten Energiequelle.

Nature 10.1038/s41586-020-2934-0, 2020

BOREXINO-DETEKTOR Der kugelförmige Nylonballon enthält 280 Tonnen einer speziellen Flüssigkeit. Trifft ein Neutrino aus der Sonne darin ein Atom, entweicht ein Lichtblitz.



INFORMATIK

CHINESISCHES EXPERIMENT BEWEIST QUANTENÜBERLEGENHEIT

Ein Quantencomputer-Prototyp hat in 200 Sekunden eine Rechenaufgabe gelöst, für die ein klassischer Computer 2,5 Milliarden Jahre benötigen würde. Das berichten Forscher um Jian-Wei Pan von der University of Science and Technology of China. Sie ziehen damit mit einem Team von Google gleich: Es hatte 2019 gezeigt, dass Quantenrechner bei einer Spezialaufgabe schneller zum Ziel kommen als normale Computer.

Die Amerikaner hatten dafür ein Netz aus 53 supraleitenden Kreuzchen auf einem stark gekühlten Mikrochip genutzt. Dieser ermittelte in Rekordzeit, mit welcher Wahrscheinlichkeit die gekoppelten Qubits beim Auslesen bestimmte Zahlenfolgen hervorbringen (siehe »Spektrum« Januar 2020, S. 31).

Das chinesische Team hat nun einen anderen Weg zur »Quantenüberlegenheit« gewählt: Mit Lasern feuerte es eine Schar aus Lichtteilchen in ein Feld aus Strahlteilern, Spiegeln und

Prismen. An jedem der Strahlteiler haben die Photonen die Wahl, ob sie abbiegen oder weiter geradeaus fliegen wollen. Am Rand der Versuchsoberfläche wiesen 100 Detektoren nach, welchen Weg die Lichtteilchen über den Labortisch genommen hatten.

Wie oft welcher Detektor aufleuchtet und welche Polarisation die eintreffenden Lichtteilchen jeweils haben, ist für normale Computer extrem schwer zu berechnen. Für 50 gleichzeitig abgeschossene Photonen ergeben sich 10^{30} denkbare Ausgänge des Experiments (eine Zahl mit 30 Nullen). Und nicht alle sind gleich wahrscheinlich: Die Lichtpulse lassen sich im Rahmen der Quantenphysik als Wellen beschreiben und interferieren daher auf komplizierte Weise miteinander.

Ein klassischer Computer kann das Experiment simulieren, muss dafür aber ein Gleichungssystem lösen, dessen Komplexität exponentiell mit der Zahl der beteiligten Photonen

wächst. Wenn man den Parcours dagegen nachbaut, ihn regelmäßig mit genau aufeinander abgestimmten Laserpulsen füttert und zählt, wie häufig welcher Photodetektor aufleuchtet, lässt sich das Ergebnis viel schneller ermitteln: Die Natur nimmt einem in diesem Fall das komplizierte Überlagerungsgeschehen ab.

Die Forscher haben pro Durchlauf des Experiments bis zu 76 Photonen detektiert. Damit habe man eine Komplexität erreicht, die sich für Supercomputer nicht mehr simulieren lasse. Folgerichtig konnte das Team nur auf Umwegen ermitteln, ob die von ihrem Quantenrechner ausgespuckte »Wahrscheinlichkeitsverteilung« stimmt: Anders als Googles Quantenchip eignet sich der Versuchsaufbau nicht für andere Aufgaben. Dazu müsste man die Photonen nach jedem Strahlteiler messen und den Parcours blitzschnell verändern.

Science, 10.1126/science.abe8770, 2020

ASTRONOMIE

EIN PLANETARISCHER NEBEL VERBLASST

Mit Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble haben Forscher drastische Veränderungen in einem planetarischen Nebel dokumentiert. Zwischen 1996 und 2016 hat die als Stingray-Nebel bekannte Gaswolke ihre Form und Farbe verändert sowie deutlich an Helligkeit verloren.

Verantwortlich scheint der Stern im Zentrum zu sein, so die Arbeitsgruppe um Bruce Balick von der University of Washington in Seattle. Es handelt sich um einen Weißen Zwerg, der einst aus dem Kollaps eines Roten Riesen hervorgegangen ist. Wie alle Sterne im Mittelpunkt von planetarischen Nebeln gibt er beim Abkühlen ultraviolette Strahlung ab, die Gasatome in der abgestoßenen Hülle des Roten Riesen zum Leuchten anregt.

Das Exemplar im Stingray-Nebel scheint zeitweise besonders hell

geleuchtet zu haben: Offenbar fusionierte ein Rest an Heliumatomen miteinander und lieferte der Sternleiche so vorübergehend eine zusätzliche Energiequelle. Dies würde erklären, wieso der Nebel 1990 plötzlich auf Teleskopaufnahmen auftauchte und nun wieder verblasst.

Planetarische Nebel haben entgegen ihrem Namen nichts mit Planeten zu tun. Astronomen nahmen sie einst

nur als verschwommene Scheiben wahr, die wie Planeten aussahen. Der Stingray-Nebel selbst wurde nach dem Stechrochen benannt, da die Form des leuchtenden Gases an den Meeresbewohner erinnert. Durch die jüngsten Veränderungen hat die Gashülle ihr ursprüngliches Aussehen, auf dem der Name beruht, allerdings eingebüßt.

ArXiv, 2009.01701, 2020

STECHROCHEN ADÉ
Der Stingray-Nebel ist mehrere tausend Lichtjahre von der Erde entfernt und steht auf der Südhalbkugel im Sternbild Altar. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich sein Aussehen deutlich verändert.

1996

2016



HIRNFORSCHUNG SCHARFSICHTIGE MAUSMAKIS

► Ein Team um Daniel Huber von der Universität Genf hat untersucht, wie der Graue Mausmaki (*Microcebus murinus*) optische Reize verarbeitet und dabei überraschende Ähnlichkeiten mit anderen Affen entdeckt. Die handgroßen Tiere sind auf Madagaskar heimisch und ähneln in vielerlei Hinsicht den ersten Primaten, die vor etwa 55 Millionen Jahren lebten und von denen auch der moderne Mensch abstammt.

Alle Primaten haben gemeinsam, dass der visuelle Kortex des Großhirns (Sehrinde) eine relativ hohe Neuronendichte aufweist. Die Nervenzellen ordnen sich dabei in säulenartigen Gruppen an, die jeweils auf ähnliche optische Reize ansprechen. Um scharf zu sehen, benötigt die Sehrinde eine Mindestanzahl dieser Orientierungssäulen. Letztere lassen sich allerdings nicht beliebig verkleinern, da sie sonst ihre Funktion einbüßen.

Somit wäre es naheliegend, dass das Gehirn der winzigen Mausmakis anders organisiert ist als das von erheblich größeren Affen. Mittels Neuroimaging-Methoden fanden Huber und sein Team nun jedoch heraus: Die Sehrinde von Mausmakis untergliedert sich ebenfalls in Orientierungssäulen aus Neuronengruppen – mit annähernd gleicher Größe und Dichte wie bei anderen Primaten.

Abmessung und Anordnung dieser grundlegenden »Recheneinheiten« des Primatengehirns hängen somit nicht von der Körpergröße ab, folgern die Wissenschaftler. Bei kleinen Gehirnen müsste der visuelle Kortex demnach im Verhältnis mehr Platz beanspruchen, um die gleiche Sehschärfe zu ermöglichen. Genau das konnten Huber und seine Kollegen auch beobachten: Der visuelle Kortex nimmt bei den Lemuren etwa ein Fünftel der Großhirnrinde in Beschlag. Bei Makaken ist es ein Zehntel, bei Menschen nur ein Dreißigstel.

Vermutlich entwickelte sich die typische Primatensehrinde bereits bei



NIKPAU / GETTY IMAGES / ISTOCK

den frühesten Vertretern dieser Säugetierordnung, argumentiert das Team. Im Zuge der evolutionären Entwicklung hätten die Anteile anderer Hirnareale zugelegt, was mit einer weiteren Veränderung einhergegangen sein müsste: Die Augen rückten enger zusammen und ermöglichten den geraden Blick nach vorne.

Current Biology 10.1016/j.cub.2020.11.027, 2020

LEMUREN Die auf Madagaskar heimischen Mausmakis haben ein ausgezeichnetes Sehvermögen. Dafür müssen die Äffchen allerdings ein Fünftel ihrer Großhirnrinde zur Verarbeitung visueller Reize nutzen.

LOGIK DAS FEHLENDE PUZZLETEIL

Gibt es eine Menge, die größer ist als die natürlichen Zahlen, aber kleiner als die reellen? Diese grundlegende Frage gehört zu den unweisbaren Problemen der Mathematik. Experten suchen deshalb nach neuen Gesetzen, die das mathematische Grundgerüst ergänzen und diese Unentscheidbarkeit aus dem Weg räumen.

PETER FORBOM / COMMONS WIKIMEDIA.ORG/
CC BY-SA 4.0 / CERN / PHOTODISC / JPL /
LUCIFER / PHOTODISC / JPL /
LUCIFER / PHOTODISC / JPL /
LUCIFER / PHOTODISC / JPL /



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor der Universität de Lille und Forscher am Centre de recherche en informatique, signal et automatique (Cristal) de Lille.

» spektrum.de/artikel/1807454

DAS UNVORSTELLBARE: Unendlich ist nicht immer gleich unendlich – tatsächlich lassen sich die Größen unvorstellbarer Mengen ordnen.

SERIE

Unendlichkeiten

Teil 1: Februar 2021

Das fehlende Puzzleteil

Jean-Paul Delahaye

Teil 2: März 2021

Das Multiversum der Unendlichkeiten

Jakob Kellner und Martin Goldstern

Teil 3: April 2021

Eine neue Mathematik der Zeit

Natalie Wolchover

Das Konzept der Unendlichkeit hat schon immer zu Schwierigkeiten geführt: Philosophen und Theologen zerbrechen sich seit Jahrhunderten den Kopf darüber – ganz zu schweigen von Mathematikern, denen es erst im 19. Jahrhundert gelang, mit den unvorstellbaren Größen zu arbeiten. Tatsächlich stießen sie dabei schon früh auf verschiedene Arten von Unendlichkeiten, doch lange wussten sie nicht, wie man diese beschreiben oder miteinander vergleichen sollte.

In den 1870er Jahren gelang dem deutschen Mathematiker Georg Cantor schließlich der Durchbruch. Indem er Mengen mit unendlich vielen Elementen untersuchte, konnte er ihre Größen voneinander unterschieden und begründete dabei die moderne Mengenlehre, auf der inzwischen die gesamte Mathematik fußt.

Dieser Schritt ging aber nicht problemlos vonstatten. Wissenschaftler mussten eine Sammlung so genannter Axiome formulieren – unbeweisbare Aussagen, aus denen alle mathematischen Zusammenhänge folgen sollten, ohne dabei Widersprüche zu produzieren. Diese anspruchsvolle Aufgabe ist inzwischen größtenteils gelöst. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts nutzt man ein System von Axiomen, genannt ZFC, das bisher widerspruchsfrei ist und eine umfangreiche Theorie der Unendlichkeiten umfasst.

Dennoch hat die moderne Mengenlehre Schwachstellen. Wie Kurt Gödel Anfang des 20. Jahrhunderts zeigte, gibt es grundlegende Fragen, die sich mit ihr nicht beantworten lassen, man kann sie weder beweisen noch widerlegen. Logiker versuchen daher die Theorie zu erweitern, um zumindest einige der hartnäckigen Rätsel zu lösen.

Im letzten Jahrzehnt machte insbesondere der US-amerikanische Mathematiker Hugh Woodin von der Harvard University bedeutende Fortschritte auf dem Gebiet. Er ist davon überzeugt, das prominenteste aller unentscheidbaren Probleme, die so genannte Kontinuumshypothese, müsse eine Lösung haben. Sie ist entweder wahr oder falsch. Um das zu klären, gründete er zwei gegensätzliche Forschungsprogramme.

AUF EINEN BLICK DAS UNBEWEISBARE BEWEISEN

- 1 Die moderne Mathematik fußt auf der Mengenlehre, die aus einer Sammlung von Axiomen besteht. Die Theorie umfasst auch unendliche Größen und kann diese sogar ordnen.
- 2 Die Kontinuumshypothese behauptet, dass es keine Menge gibt, die größer als die natürlichen und kleiner als die reellen Zahlen ist. Allerdings kann man die Vermutung weder beweisen noch widerlegen.
- 3 Deshalb versuchen Mathematiker die Mengenlehre durch sinnvolle Annahmen zu ergänzen, aus denen eindeutig folgt, ob die Kontinuumshypothese wahr oder falsch ist.

Kurz erklärt: Potenzmenge

Die Potenzmenge $P(M)$ einer Menge M ist die Sammlung all ihrer Teilmengen. Wenn M zum Beispiel $\{1,2,3\}$ ist, dann lautet $P(\{1,2,3\}) = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1, 2\}, \{2, 3\}, \{1, 3\}, \{1,2,3\}\}$. Sie enthält stets die leere Menge und die Menge M selbst. Wie Georg Cantor zeigte, ist die Potenzmenge größer als die ursprüngliche Menge – selbst wenn diese bereits unendlich viele Elemente enthält.

Das erste begann vor etwa 15 Jahren. Gemeinsam mit seinen Kollegen versuchte Woodin die Kontinuumshypothese zu widerlegen. Aber die dabei entwickelten Ergebnisse änderten seine Meinung, so dass er ein zweites Programm entwarf, das die Kontinuumshypothese beweisen soll.

Die berühmte Vermutung handelt von der Größe unendlicher Mengen. Cantor erkannte bereits 1871, dass unendlich nicht immer gleich unendlich ist. Manche Mengen mit unendlich vielen Elementen sind größer als andere. Um sie voneinander zu unterscheiden, bediente er sich eines Tricks. Anstatt mühsam die einzelnen Elemente zu zählen, verglich er zwei Mengen, indem er die Elemente der einen mit jeweils einem Element aus der anderen paarte. Möchte man etwa herausfinden, ob es in Deutschland genauso viele angemeldete Fahrzeuge wie Personen mit Führerschein gibt, ordnet man jedem Fahrer ein gemeldetes Auto zu. Wenn das möglich ist, sind beide Mengen gleich groß.

Genauso viele gerade wie natürliche Zahlen

Wendet man diese Methode der Bijektion auf unendliche Mengen an, führt das zu überraschenden Ergebnissen. Indem man zum Beispiel jede natürliche Zahl mit zwei multipliziert, erhält man eine solche Eins-zu-eins-Abbildung zwischen den natürlichen und den geraden Zahlen: Jeder natürlichen Zahl n lässt sich genau eine gerade Zahl $p = 2n$ zuordnen; umgekehrt findet man für jede gerade Zahl p eine natürliche Zahl $n = p/2$. Cantor folgerte daraus, dass es genauso viele gerade wie natürliche Zahlen gibt. Das wirkt auf den ersten Blick widersprüchlich, schließlich bestehen letztere aus geraden und ungeraden Zahlen – es müssten also doppelt so viele sein.

Doch anders als gewöhnliche Zahlen verhalten sich unendliche Größen nicht immer so, wie man es erwartet. Cantor konnte beweisen, dass seine Methode zum Vergleich von Mengen zu keinerlei Widersprüchen führt, und sie ist bis heute akzeptiert. Damit lässt sich eine unendliche Menge formal als Menge definieren, die sich aus der Bijektion mit einem ihrer Teile ergibt. Zum Beispiel entstehen die natürlichen Zahlen wie beschrieben aus der Abbildung mit einer ihrer Teilmengen, den geraden Zahlen.

Bijektionen erlauben es, unendliche Größen zu ordnen. Auf diese Weise fand Cantor heraus, dass die Menge aller Teilmengen (Potenzmenge $P(M)$ genannt, siehe »Kurz erklärt«) einer unendlichen Menge M stets größer ist als M

selbst ($M < P(M)$). Das heißt, man kann die Elemente von $P(M)$ unmöglich eins zu eins auf jene von M abbilden. Die Menge der natürlichen Zahlen $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ ist daher kleiner als ihre Potenzmenge $P(\mathbb{N})$, zu der unter anderem \mathbb{N} selbst, alle geraden Zahlen oder alle Primzahlen gehören. $P(\mathbb{N})$ enthält zu viele Elemente, als dass man jeder natürlichen Zahl einen einzigen Partner aus $P(\mathbb{N})$ zuweisen könnte.

Mit der Potenzmengen-Operation lassen sich immer größere Mengen aufbauen. Dadurch entsteht eine Hierarchie von Unendlichkeiten, etwa: $\mathbb{N} < P(\mathbb{N}) < P(P(\mathbb{N})) < P(P(P(\mathbb{N}))) < \dots$ Tatsächlich entsprechen die natürlichen Zahlen \mathbb{N} der kleinstmöglichen Unendlichkeit, man nennt sie abzählbar. Ebenso ist jede andere Menge abzählbar,

wenn sie sich eins zu eins auf \mathbb{N} abbilden lässt, wie die ganzen oder die rationalen Zahlen. Die reellen Zahlen \mathbb{R} sind dagegen größer, denn es existiert eine Bijektion zwischen ihnen und $P(\mathbb{N})$ (siehe »Unendlich ist nicht immer gleich unendlich«).

Wenn man weiß, dass $P(\mathbb{N})$ und \mathbb{R} größer als \mathbb{N} sind, stellt sich folgende Frage: Gibt es Unendlichkeiten, die zwischen \mathbb{N} und \mathbb{R} liegen? Weil man keine Menge finden konnte, die größer als \mathbb{N} und kleiner als \mathbb{R} ist, ging Cantor davon aus, eine solche könne nicht existieren. Das ist die berühmte Kontinuumshypothese. Der Begriff Kontinuum bezieht sich dabei auf die reellen Zahlen, die den Punkten auf einem Zahlenstrahl entsprechen. Glaubt man der Konti-

Unendlich ist nicht immer gleich unendlich

Wie vergleicht man die Größen zweier unterschiedlicher Mengen M_1 und M_2 , die jeweils unendlich viele Elemente enthalten? Mathematiker nutzen dafür eine bestimmte Art von Abbildungen, so genannte Bijektionen, die jedem Element von M_1 genau eines von M_2 zuordnen. Wenn es eine solche Bijektion gibt, heißen M_1 und M_2 gleichmächtig.

Eine unendliche Menge, die gleichmächtig zur Menge der natürlichen Zahlen $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots\}$ ist, heißt abzählbar. Es lässt sich leicht erkennen, dass die geraden Zahlen **a**, Vielfache von 5 **b** und die ganzen Zahlen **c** abzählbar sind. Man kann zudem beweisen, dass es eine Bijektion zwischen den natürlichen und den rationalen Zahlen (Brüche p/q , wobei p und q ganze Zahlen sind) gibt. Gleiches gilt für die Menge der Paare (p, q) ganzer Zahlen, Drillings (u, v, w) rationaler Zahlen und so weiter.

Anders verhält es sich bei reellen Zahlen. Bereits der Bereich zwischen null und eins ist nicht abzählbar. Das lässt sich durch einen so genannten Widerspruchsbeweis zeigen, bei dem man mit der Annahme startet, das Intervall $[0, 1]$ sei abzählbar und daraus einen Widerspruch herleitet. Als logische Konsequenz muss die Annahme falsch sein, wodurch man bewie-

sen hat, dass es keine Bijektion zwischen den natürlichen Zahlen und $[0, 1]$ geben kann.

Wäre das Intervall zwischen null und eins abzählbar, dann könnte man die darin enthaltenen Elemente einzeln aufzählen, was zu einer unendlichen (aber abzählbaren) Liste führen würde:

0, $d_{1,1}$ $d_{1,2}$ $d_{1,3}$ $d_{1,4}$ $d_{1,5}$ $d_{1,6}$ $d_{1,6}\dots$
 0, $d_{2,1}$ $d_{2,2}$ $d_{2,3}$ $d_{2,4}$ $d_{2,5}$ $d_{2,6}$ $d_{2,6}\dots$
 0, $d_{3,1}$ $d_{3,2}$ $d_{3,3}$ $d_{3,4}$ $d_{3,5}$ $d_{3,6}$ $d_{3,6}\dots$
 0, $d_{4,1}$ $d_{4,2}$ $d_{4,3}$ $d_{4,4}$ $d_{4,5}$ $d_{4,6}$ $d_{4,6}\dots$
 ...

a Die Menge der geraden Zahlen ist abzählbar.



c Die Menge der ganzen Zahlen ist abzählbar.



Dezimalstelle unterscheidet sich immer von der n -ten Dezimalstelle der n -ten Zahl in der Liste. Der Wert von x ist aber eine reelle Zahl zwischen null und eins, was bedeutet, dass die obige abzählbare Liste nicht existieren kann.

Das Intervall der reellen Zahlen zwischen null und eins ist also nicht abzählbar. Ihre Unendlichkeit ist daher von höherer Ordnung als die von der natürlichen Zahlen, man spricht von einer überabzählbaren Menge – der Unendlichkeit des

b Die Menge der durch fünf teilbaren Zahlen ist abzählbar.



d Die Menge eines Liniensegments der Länge 1 ist gleichmächtig wie die Menge eines Liniensegments der Länge 5.



wobei $d_{i,j}$ die Ziffern der Dezimalentwicklung der i -ten Zahl in der Liste sind (dabei schließt man Darstellungen aus, die mit unendlich vielen Neunen enden).

Wenn man eine Zahl $x = 0, d_1 d_2 d_3 d_4 \dots$ konstruiert, mit $d_1 \neq d_{1,1}$, $d_2 \neq d_{2,2}$, $d_3 \neq d_{3,3}$, und so weiter, dann erscheint sie nirgends in der ursprünglichen Liste. Denn ihre n -te

Kontinuums. Daraus lässt sich leicht erkennen, dass das Intervall $[0, 1]$ gleichmächtig ist wie das zwischen null und fünf: Sie haben die gleiche Unendlichkeit von Punkten **d**. Überraschenderweise ist auch die Fläche eines Quadrats oder das Volumen eines Würfels gleichmächtig wie ein solches Liniensegment.

Eine oder viele mathematische Welten?

In der Philosophie der Mathematik gehen Realisten davon aus, die mathematische Welt sei real. Weil diese auf der Mengenlehre basiert, existieren demnach auch Mengen – insbesondere unendliche Mengen.

Dass die Kontinuumshypothese (KH) jedoch mit den üblichen Axiomen der Mengenlehre unentscheidbar ist, stellt Philosophen vor eine Herausforderung. Einige Realisten behaupten deshalb, das Universum der Mathematik existiere in vielen unterschiedlichen Formen: In einigen Fällen sei die Kontinuumshypothese wahr, in anderen falsch. Diese Ansicht einer »multiversen Mengenlehre« macht es überflüssig, nach einer definitiven Antwort auf die Kontinuumshypothese zu suchen.

Der Logiker Hugh Woodin konnte aber zeigen, dass es im Multiversum keinen zufrieden stellenden Wahrheitsbegriff gibt. Wie damals Kurt Gödel ist er ebenfalls der Ansicht, es existiere nur ein Mengenuniversum, dessen Axiome man noch finden muss. Das »ultimative L« könnte einen Weg dahin ebnen und dabei die Kontinuumshypothese ein für alle Mal lösen.

numshypothese, dann lässt sich jede unendliche Teilmenge von \mathbb{R} entweder eins zu eins auf \mathbb{N} (wenn sie »klein« ist) oder auf \mathbb{R} selbst abbilden (wenn sie »groß« ist).

Die Vermutung zählt zu den bedeutendsten Fragen des Fachs. Bereits im Jahr 1900 setzte der deutsche Mathematiker David Hilbert sie an die Spitze seiner Liste von 23 Problemen, die er auf dem Internationalen Mathematikerkongress in Paris vorstellte. Mehr als ein Jahrhundert später ist sie noch immer ungelöst: Bisher ist niemand auf eine unendliche Teilmenge von \mathbb{R} gestoßen, die man nicht \mathbb{N} oder \mathbb{R} zuordnen kann – aber ebenso wenig ließ sich nachweisen, dass eine solche Teilmenge nicht existiert.

Zwei Erkenntnisse des 20. Jahrhunderts erschweren die Aufgabe zusätzlich. Die damals entwickelte und bis heute größtenteils akzeptierte Version der Mengenlehre fußt auf Axiomen, die unter anderem die deutschen Logiker Ernst Zermelo und Abraham Fraenkel formulierten. Dieses Axiomensystem wurde nach ihren Initialen ZFC benannt, wobei C für das Auswahlaxiom (englisch: axiom of choice) steht. Es besagt, dass für eine Sammlung nichtleerer Mengen immer eine Menge existiert, die genau ein Element mit jeder der Mengen gemeinsam hat.

Für endliche Mengen lässt sich die Aussage einfach nachvollziehen, auf unendliche Mengen angewandt ist das Auswahlaxiom weniger intuitiv. Deshalb ist es unter manchen Experten umstritten und sie bevorzugen es, bloß mit dem System ZF ohne C zu arbeiten.

Aus den Axiomen der ZFC lässt sich die moderne Mathematik ableiten. Doch wie der österreichische Logiker Kurt Gödel in den 1930er Jahren herausfand, gibt es einige Aussagen, die sich in diesem Rahmen weder beweisen noch widerlegen lassen. Insbesondere hat er gezeigt, dass sich mit der Mengenlehre – vorausgesetzt sie ist nicht widersprüchlich – nicht beurteilen lässt, ob die Kontinuumshypothese (KH) falsch ist. Das heißt, es ist unmöglich, Nicht-KH (»es gibt eine Unendlichkeit zwischen der von \mathbb{N} und \mathbb{R} «) aus den Axiomen der ZFC abzuleiten.

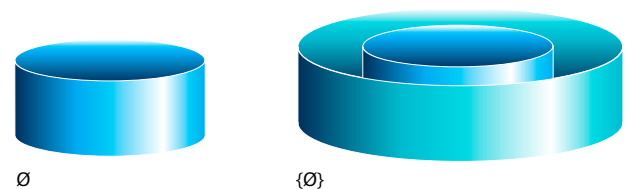
In der Hoffnung die Kontinuumshypothese sei wahr, versuchten Wissenschaftler daraufhin, sie zu beweisen. 1963 wurden diese Anläufe jedoch zunichtegemacht, als der US-amerikanische Mathematiker Paul Cohen (1934–2007) zeigte, dass man aus der Mengenlehre ebensowenig KH (»es gibt keine Unendlichkeit zwischen \mathbb{N} und \mathbb{R} «) folgern kann. Die Kontinuumshypothese ist also unabhängig von den ZFC-Axiomen und damit unentscheidbar.

Was ist wahr, was ist falsch?

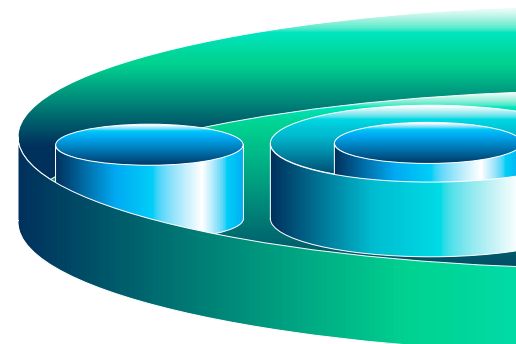
Weil man nicht ermitteln kann, ob sie richtig oder falsch ist, könnte man entweder KH oder Nicht-KH als Axiom der Mengenlehre hinzufügen, ohne einen Widerspruch zu erzeugen. Die meisten Logiker halten allerdings nichts davon – denn es passt nicht zu ihrer Vorstellung, der zufolge es nur eine mathematische Realität gibt (siehe »Eine oder viele mathematische Welten?«).

Gödels zweiter Unvollständigkeitssatz von 1931 verdeutlicht, warum Experten unentscheidbare Aussagen als Axiome ablehnen. Er besagt, mit einem aussagekräftigen Axiomensystem S (wie der Mengenlehre) ließe sich nicht beweisen, dass S konsistent ist. Das heißt, man könnte »S ist widersprüchlich« als Axiom zu S hinzufügen, ohne einen Widerspruch herbeizuführen. Das wäre natürlich absurd, aber nicht falsch.

Deswegen sind sich Mathematiker einig, ein Axiom müsse stets eine wahrnehmbare Eigenschaft widerspiegeln, die sich mit unserer Vorstellung über Mengen deckt. Anders ausgedrückt, sollte es intuitiv sein, was viele Anhänger ausschließt, darunter KH und Nicht-KH: Anders als



INTERPRETATION VON ZAHLEN
Eine Darstellung der natürlichen Zahlen, wenn man sie durch Mengen definiert.



Strukturen und relative Konsistenz

Wenn man an axiomatischen Systemen arbeitet, spielt der Vollständigkeitssatz, den Kurt Gödel 1929 in seiner Doktorarbeit bewies, eine entscheidende Rolle. Er besagt, dass eine durch logische Axiome definierte Theorie genau dann nicht widersprüchlich ist, wenn es mindestens eine Struktur gibt, die alle ihre Axiome erfüllt. Wenn man zum Beispiel die natürlichen Zahlen \mathbb{N} betrachtet, dann bestätigen sie die Aussage: »Für jedes x gibt es ein y , so

dass $x < y$.« Daher ist dieses einfache Axiom nicht widersprüchlich.

Bei komplizierteren Systemen aus mehreren Axiomen ist es nicht so einfach, eine Struktur zu finden, die allen gleichzeitig gerecht wird. Für die gewöhnliche Mengenlehre greift man daher auf die Methode der so genannten relativen Konsistenz zurück: Man nimmt an, ein axiomatisches System S sei nicht widersprüchlich. Dann leitet man mit Hilfe des Vollständigkeitssat-

zes ab, dass es eine Struktur M gibt, die alle Axiome von S erfüllt. Anschließend modifiziert man M zu M' , wobei M' ein weiteres Axiom X überprüft. Weil M' existiert, ist das System $S + X$ konsistent, solange S selbst zu keinen Widersprüchen führt. Diese Methode nutzten Kurt Gödel und Paul Cohen, um zu zeigen, dass sowohl ZFC + KH (Gödel, 1938) als auch ZFC + Nicht-KH (Cohen, 1963) widerspruchsfrei sind, falls ZFC konsistent ist.

Aus den Ordinalzahlen und der Potenzmengen-Operation kann man daher eine Folge wachsender Mengen definieren, die eine zentrale Rolle in der Mathematik spielen:

$$\begin{aligned} V_0 &= \emptyset; \\ V_1 &= P(V_0) = \{\emptyset\}; \\ V_2 &= P(V_1) = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}; \\ &\dots \end{aligned}$$

...
 $V_{\alpha+1} = P(V_\alpha)$, falls $\alpha + 1$ den Vorgänger α hat;
 V_β die Vereinigung aller V_α , wobei $\alpha < \beta$, falls β eine Grenzzahl ist.

Tatsächlich liegt jede Menge, die sich mit der ZFC definieren lässt, in einem V_α . Zum Beispiel sind die natürlichen Zahlen \mathbb{N} in V_ω enthalten, während sich die Menge der reellen Zahlen \mathbb{R} in einer größeren befindet. Vereinigt man alle V_α , erhält man das so genannte Mengenuniversum V , das der gesamten mengentheoretischen Welt entspricht. Interessanterweise besteht diese bloß aus der leeren Menge, verknüpft mit der Potenzmengen-Operation.

Um zu beweisen, dass man KH nicht mit den ZFC-Axiomen widerlegen kann, nutzte Gödel bestimmte Eigenschaften von V aus. Die zu Grunde liegende Idee lässt sich einfach nachvollziehen – wenn auch nicht in allen Details. Er begann mit der Annahme, die ZFC-Axiome seien nicht widersprüchlich. Seinem 1929 veröffentlichten Vollständigkeitssatz zufolge existiert in so einem Fall eine Struktur S , in welcher die Axiome erfüllt sind. Eine solche Struktur kann zum Beispiel ein Zahlenraum sein, in dem die Zahlen und Rechenregeln die entsprechenden Axiome widerspiegeln (siehe »Strukturen und relative Konsistenz«).

Von S ausgehend leitete Gödel eine weitere Struktur S' ab, in der auch die Kontinuumshypothese realisiert ist. Wenn ZFC also nicht widersprüchlich ist, dann ist es ZFC + KH genauso wenig. Das bedeutet, man kann unmöglich aus den ZFC-Axiomen auf Nicht-KH schließen. Wäre das möglich, ließe sich Nicht-KH ebenso im System ZFC + KH ableiten, was einen Widerspruch erzeugen würde.

In seinem Beweis wählte Gödel das Mengenuniversum V als Struktur S , welche die ZFC-Axiome überprüft. Daraus

konstruierte er eine Unterstruktur S' , die er L nannte und folgendermaßen definierte:

$$\begin{aligned} L_0 &= \emptyset; \\ L_{\alpha+1} &= P_{\text{def}}(L_\alpha), \text{ falls } \alpha + 1 \text{ den Vorgänger } \alpha \text{ hat;} \\ L_\beta &= \text{die Vereinigung aller } L_\alpha, \text{ wobei } \alpha < \beta, \text{ falls } \beta \text{ eine} \\ &\text{Grenzzahl ist.} \end{aligned}$$

Die Konstruktion ähnelt der von V stark. Doch $P_{\text{def}}(M)$ bezeichnet nicht die gewöhnliche Potenzmenge von M , sondern bloß die Menge aller »konstruierbaren Teilmengen«. Dazu zählen nur solche, die sich durch eine Formel definieren lassen. Die natürlichen Zahlen enthalten zum Beispiel die konstruierbare Teilmenge X , mit allen Elementen x aus \mathbb{N} , welche die Gleichung $x + y = 5$ erfüllen, wobei y aus \mathbb{N} ist. In diesem Fall ist $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$.

Mengen lassen sich aber nicht immer durch eine Formel beschreiben. Die natürlichen Zahlen besitzen zum Beispiel bloß abzählbar viele konstruierbare Teilmengen (weil es nur abzählbar viele entsprechende Formeln gibt). Weil ihre Potenzmenge aber überabzählbar ist, gibt es überabzählbar viele nicht definierbare Teilmengen von \mathbb{N} .

Verschiedene Universen unendlich großer Mengen

Die Vereinigung aller L_α bildet das Universum der konstruierbaren Mengen L , das in V enthalten ist. In dieser Struktur sind alle ZFC-Axiome gültig. Zudem entpuppt sich die Kontinuumshypothese in L als wahr, wie Gödel zeigen konnte. Anschaulich lässt sich das erklären, weil L weniger Mengen enthält. Erst dadurch kann man beweisen, dass es keine Menge zwischen den natürlichen und den reellen Zahlen gibt. Ausgehend von V , in dem ZFC-Axiome gelten, existiert also eine Substruktur L , in der ZFC + KH verwirklicht sind. Deshalb kann ZFC + KH nicht widersprüchlich sein – vorausgesetzt die ZFC-Axiome sind konsistent.

Das legt den Gedanken nahe, dass das Mengenuniversum V , mit dem Mathematiker arbeiten, zu groß sein könnte. Im Prinzip kann man es einschränken, damit die Kontinuumshypothese gilt. Dafür muss man der gewöhnlichen Mengenlehre bloß ein simples Axiom hinzufügen: »Alle Mengen



FAMILIEALBUM DER FAMILIE GÖDEL (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKYFILE:1925_NURF_GÖDEL.PNG)



CANTOR UND GÖDEL Der deutsche Mathematiker Georg Cantor (links, 1845–1918) begründete die Mengenlehre, auf der die heutige Mathematik fußt. Sein österreichischer Kollege Kurt Gödel (1906–1978) formulierte die berühmten Unvollständigkeitssätze, aus denen unter anderem folgt, dass sich nicht jede Aussage mit den Werkzeugen der Mengenlehre beweisen lässt.

sind konstruierbar«, was durch $V = L$ beschrieben wird. Alle nicht konstruierbaren Mengen, die sich durch die gewöhnliche Potenzmengen-Operation ergeben, wären dann nicht mehr zulässig.

Auf den ersten Blick wirkt $V = L$ wie das gesuchte Axiom, das die ZFC vervollständigen und die Unentscheidbarkeit der Kontinuumshypothese beseitigen würde. Dass sich jede Menge durch die ihr vorausgehenden Mengen definieren lässt, scheint intuitiv richtig. Aber leider ist $V = L$ als Axiom nicht tragbar, denn es verhindert unter anderem die Existenz bestimmter Unendlichkeiten.

Logiker streiten zwar darüber, wann man eine Behauptung als Axiom akzeptieren kann, doch bei einem Punkt sind sich die meisten einig: Wenn eine Aussage unendliche Mengen vorhersagt, ohne einen Widerspruch herbeizuführen, dann sollte man sie annehmen. Denn das Mengenuniversum sollte Mengen nicht in ihrer Größe einschränken.

Seit den Anfängen der Mengenlehre formulieren Mathematiker solche Axiome. Am ältesten ist das Unendlichkeitsaxiom, das besagt, dass es eine unendliche Menge gibt

(eine mögliche Version lautet: »Es existiert eine Menge, die sich mit einem ihrer eigenen Teile in Bijektion bringen lässt«). Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Aussagen über »große Kardinalzahlen« (siehe »Kurz erklärt«), die verschiedene Arten extrem großer Mengen vorhersagen. Die ZFC-Axiome genügen dabei nicht, um zu beweisen, dass diese Mengen tatsächlich existieren. Daher muss man die entsprechenden Axiome der gewöhnlichen Mengenlehre hinzufügen.

Als Mathematiker große Kardinalzahlen genauer untersuchten, machten sie eine unerwartete Entdeckung: Obwohl die Eigenschaften, die sie definieren, nicht direkt zusammenhängen und es prinzipiell möglich wäre, dass sich unterschiedliche große Kardinalzahlen nicht vergleichen lassen, geschieht das nie. Man kann bisher jede große Kardinalzahl danach ordnen, wie stark sie eine ZFC-Theorie erweitert.

Woodin und viele andere seiner Kollegen sehen das als Argument dafür, dass Mengen wirklich existieren: Warum sollten sich große Kardinalzahlen ordnen lassen, wenn sie nicht real sind? Deshalb hofften Forscher, eine große Kardinalzahl zu finden, die etwas über die Kontinuumshypothese aussagt. Doch das stellte sich als unmöglich heraus. Die Kontinuumshypothese ist unabhängig von den bisher definierten Axiomen über große Kardinalzahlen.

1961 kam dann der nächste Schlag: Der US-amerikanische Mathematiker und Informatiker Dana Scott bewies damals, dass die Aussage $V = L$ eine bestimmte Art großer Kardinalzahlen verbietet, so genannte messbare Kardinalzahlen. Wenn man also wie Woodin an große Kardinalzahlen glaubt, dann muss $V = L$ falsch sein.

Um einen Weg aus dieser verzwickten Lage zu finden, schraubten Logiker an der Definition von L . Ähnlich wie Gödel definierten sie Mengen $L_{\alpha+\tau}$, die sich aus den vorhergehenden L_α ergeben, versuchten dabei jedoch L weniger einzuschränken. Dadurch sollte das Mengenuniversum größer ausfallen als das von Gödel betrachtete.

Und tatsächlich fand der US-amerikanische Logiker Robert Solovay 1976 ein passendes L , das messbare Kardinalzahlen zulässt. Aber leider widerspricht seine erarbeitete Version anderen großen Kardinalzahlen, die in der Hierarchie weiter oben stehen als die messbaren. In den folgenden Jahren versuchten Forscher daher L weiter zu vergrößern, allerdings ohne Erfolg. Es war stets mit bestimmten

Kurz erklärt: Große Kardinalzahlen

Die Anzahl der Elemente einer endlichen Menge – also quasi ihre Größe – entspricht der so genannten Kardinalzahl. Dieser Begriff lässt sich darüber hinaus auch auf unendliche Mengen erweitern.

Große Kardinalzahlen tauchen dagegen in der gewöhnlichen Mengenlehre nicht auf, das heißt, die ZFC-Axiome genügen nicht, um ihre Existenz zu beweisen. Deshalb fügt man sie künstlich durch zusätzliche Axiome zur Theorie hinzu.

Für Hugh Woodin sind diese Zahlen ebenso natürlich wie ganze Zahlen. Er ist davon überzeugt, dass sie niemals zu Widersprüchen führen werden. Weil große Kardinalzahlen konkrete Aussagen über natürliche Zahlen treffen, haben die Axiome handfeste Konsequenzen.

Forcing

Paul Cohen entwickelte die Methode des »Forcing«, um zu zeigen, dass Nicht-KH (die Negation der Kontinuumshypothese) mit der gewöhnlichen Mengenlehre kompatibel ist. Beim Forcing erweitert man das mengentheoretische Universum zu einem noch größeren und beweist, dass darin eine Aussage erfüllt oder widerlegt ist.

Die Technik erweist sich als extrem mächtig: Sie beweist darüber hinaus ebenfalls, dass KH mit der gewöhnlichen Mengenlehre zu keinerlei Widersprüchen führt. Aus dem Forcing folgt also, dass die Kontinuumshypothese mit den ZFC-Axiomen unentscheidbar ist.

Das Forcing lässt sich darüber hinaus auf andere wichtige mathematische Aussagen anwenden, etwa die so genannte Whitehead-Vermutung aus der Gruppentheorie, die Kaplansky-Vermutung aus der Analysis, die Suslin-Hypothese aus der Kombinatorik oder die Borel-Vermutung aus der Maßtheorie. Dabei stellt sich heraus, dass diese Probleme in der gewöhnlichen Mengenlehre ebenfalls unentscheidbar sind.

Deshalb möchten Forscher das ZFC-System um weitere Axiome ergänzen, die das Forcing außer Kraft setzen. Ein Axiom X macht das Forcing unwirksam, wenn man

nicht mehr nachweisen kann, dass sowohl KH (oder eines der anderen genannten Probleme) als auch seine Negation mit ZFC+X kompatibel ist. Man braucht also ein X, das entscheidet, ob KH (oder eines der anderen Probleme) wahr ist.

Hugh Woodin fand heraus, dass $V = \text{ultimatives L}$ mit den Axiomen der großen Kardinalzahlen kompatibel ist, während es gleichzeitig das Forcing unwirksam macht. In einer solchen neuen Mengenlehre wäre die Kontinuumshypothese wahr. Deshalb suchen Mathematiker nun ein »ultimatives L« und machten dabei in den letzten Jahren viel versprechende Fortschritte.

großen Kardinalzahlen unvereinbar. Die Situation schien festgefahren.

Das änderte sich im Jahr 2010, als Woodin ein spektakulärer Durchbruch gelang: Er bewies, dass Varianten von $V = L$, die superkompakte Kardinalzahlen zulassen, zwangsläufig mit allen anderen großen Kardinalzahlen kompatibel sind. Nun suchen Mathematiker nach einem solchen »ultimativen L«. Damit ließe sich zudem beweisen, dass die Kontinuumshypothese wahr ist. In den letzten Jahren entwickelten sie viel versprechende Ansätze, die zu diesem L führen könnten.

Das Axiom $V = \text{ultimatives L}$ hätte zudem einen weiteren Vorteil. Wie Woodin 2015 zeigte, würde es das so genannte Forcing unwirksam machen (siehe »Forcing«). Dank dieser Methode konnte Cohen in den 1960er Jahren eine Struktur ableiten, die mit Nicht-KH und den ZFC-Axiomen kompatibel ist. Außerdem lässt sich durch das Forcing eine weitere Struktur bilden, die ZFC + KH erfüllt. Das Forcing allein kann also beweisen, dass die Kontinuumshypothese in der gewöhnlichen Mengenlehre unentscheidbar ist.

Doch es hat auch über die Mengenlehre hinaus weit reichende Auswirkungen. Zum Beispiel bedingt das Forcing, dass etliche Aussagen anderer Gebiete, von der Algebra bis hin zur Analysis, unentscheidbar sind.

Solche Unentscheidbarkeiten sind Woodin ein Dorn im Auge. Wie kann es sein, dass eine exakte Wissenschaft wie die Mathematik für so viele Aussagen nicht beurteilen kann, ob sie wahr oder falsch sind? Daher ist ein Axiom besonders willkommen, wenn es das Forcing unwirksam macht. $V = \text{ultimatives L}$ besäße genau diese Eigenschaft. Es würde somit eine ganze Reihe unentscheidbarer Fragen in der ZFC-Theorie beantworten. Das motivierte Mathematiker umso mehr, ein ultimatives L zu suchen. Momentan loten sie dazu mehrere viel versprechende Ansätze aus.

Es ist bemerkenswert, was Logiker im letzten Jahrzehnt erreicht haben. Ihre Ergebnisse verdeutlichen, dass Unendlichkeiten selbst nach mehr als 100 Jahren noch nicht verstanden sind – und man noch immer einiges von ihnen lernen kann. Mathematik besteht eben nicht nur darin, Beweise aus den bisher akzeptierten Axiomen herzuleiten oder zu erweitern. Stattdessen kann man das gesamte Fundament auf die Probe stellen, indem man zum Beispiel die bisherige Vorstellung von Unendlichkeit hinterfragt.

Woodin und einige Kollegen betonen immer wieder, der abstrakte Forschungsbereich bringe auch »spürbare« Konsequenzen mit sich – selbst wenn es auf den ersten Blick nicht immer so wirkt. Aussagen über große Kardinalzahlen lassen sich beispielsweise durch eine Folge von Symbolen ausdrücken, die sich in eine Äußerung über natürliche Zahlen übersetzen lässt. Je mehr Unendlichkeiten es gibt, desto mehr erfährt man daher über das uns vertraute Endliche. ◀

QUELLEN

Cavitt, J.: Set-theoretic geology, the ultimate inner model, and new axioms. Harvard University, 2017

Heller, M., Woodin, H.: Infinity: New Research Frontiers. Cambridge University Press, 2011

Rittberg, C.: How Woodin changed his mind: New thoughts on the Continuum Hypothesis. Archive for History of Exact Sciences 69, 2015

Woodin, H.: In search of ultimate-L. Bulletin of Symbolic Logic 23, 2017

Woodin, H.: Strong axioms of infinity and the search for V. Proceedings of the International Congress of Mathematicians 2010, World Scientific, 2011

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



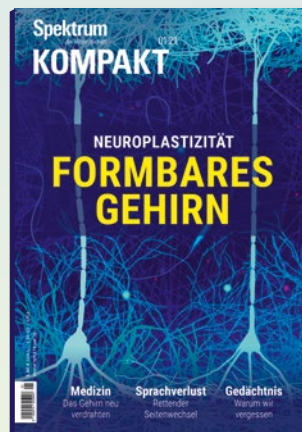
Neurodiversität: Vom Wert des Andersseins • Des einen Störung, des anderen Talent • Ursachen: Welche Rolle spielen Allergien? • Förderung: Was Kindern mit Autismus hilft • Die missverständliche Störung • € 8,90 ab 29.01. 2021



Bewusstsein: Wie Yoga das Gehirn verändert • Hautpflege: Bloß nicht zu oft waschen! • Training: »Sport macht klug« • Reizdarm: Wenn der Bauch ständig rumpelt und rumort • € 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



Neuroanatomie: Selbst ist das Hirn • Gaming: Eine eigene Hirnregion für Pokémon • Medizin: Das Gehirn neu verdrahten • Wachtherapie: Durchmachen gegen Depression • Gedächtnis: Warum wir vergessen • € 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

Hier bestellen:

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



EVOLUTION PLÖTZLICH HAARE AN UNÜBLICHEN STELLEN

In bestimmten Bereichen des Erbguts können Mutationen schlagartig neue Körpermerkmale hervorbringen.

► Schon kleine Veränderungen im Genom bewirken manchmal, dass heranwachsende Lebewesen höchst ungewöhnliche Eigenschaften ausprägen. Von einer Generation auf die nächste können so plötzlich neue Körpermerkmale entstehen. Die gängige Synthetische Evolutionstheorie tut sich schwer damit. Denn sie setzt den Gradualismus voraus, nimmt also an, dass evolutionäre Anpassungen über diverse Zwischenschritte erfolgen und nicht auf einen Schlag.

Manche Beobachtungen widersprechen dieser Sichtweise. Ein bekanntes Beispiel ist die Polydaktylie, das Auftreten zusätzlicher Finger oder Zehen bei Neugeborenen. Unvermittelt erscheinen hier bei den Nachkommen komplexe, neue morphologische Strukturen mit Haut, Knochen, Muskeln, Blutgefäßen und Nerven. Und das ohne Zwischenschritte, denn den Betroffenen wachsen ja keine halben oder viertel Finger.

So etwas kann eintreten, wenn sich regulatorische Abschnitte der DNA verändern. Das sind Bereiche im Erbgut, die kontrollieren, wie aktiv bestimmte Gene sind. Mutieren solche Regulationselemente, dann erhöht oder erniedrigt sich häufig die Menge gewisser Proteine in der Zelle. Betrifft das Eiweiße, die Entwicklungsprozesse steuern, prägt der heranwachsende Organismus oft deutlich veränderte Merkmale aus. Das Fachgebiet der Evolutionären Entwicklungsbiologie (»Evo-Devo« von englisch evolutionary developmental biology) befasst sich mit solchen Vorgängen: Evo-Devo-Forscher untersuchen, was die individuelle Entwicklung der Lebewesen reguliert und welche Rolle es im evolutionären Geschehen spielt.

Neue Erkenntnisse dazu liefern nun Wissenschaftler um Timothy Fuqua und Justin Crocker vom Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg. Die Forscher

IM ANGESICHT DER FLIEGE
Taufliegen (*Drosophila melanogaster*) dienen in der Genforschung sehr häufig als Versuchstiere.

haben an Taufiegen (*Drosophila melanogaster*) getestet, wie sich Veränderungen in einem regulatorischen DNA-Abschnitt auf die Entwicklung der Larven auswirken. Konkret ging es um einen Bereich namens E3N, der zu den so genannten Enhancern gehört – DNA-Sequenzen, die helfen, Gene anzuschalten. E3N kontrolliert, wie aktiv das Gen *Shavenbaby* ist. Dieses sorgt unter anderem dafür, dass die Fliegenlarven auf ihrer Bauchseite behaarte Streifen bilden. »Je aktiver *Shavenbaby* in einer bestimmten Körperregion, umso mehr Haare wachsen den Larven dort«, sagt Fuqua.

Das Team um Fuqua und Crocker erzeugte mehr als 700 Mutationen im Enhancer E3N und beobachtete je-

weils, wie sich die Insekten anschließend entwickelten. Zu ihrer Überraschung wirkten sich fast alle Mutationen stark aus. »Sobald wir auch nur einen DNA-Baustein veränderten, bekamen die Tiere ein deutlich anderes Erscheinungsbild«, berichtet Fuqua. Die Fliegen mit genetisch veränderter E3N-Sequenz prägten oft dünnere und lichtere Haarstreifen aus; unter anderem deshalb, weil bestimmte Proteine, die für das Ablesen von Genen wichtig sind – auch Transkriptionsfaktoren genannt –, nicht mehr so stark an den Enhancer koppelten. Bei anderen Mutationen wiederum trat das Gegenteil ein: Den Tieren wuchsen Haare an Stellen, wo es normalerweise keine gibt, etwa auf den Flügeln. »Eingriffe in den Enhancer scheinen zu beeinflussen, wo, wann und in welchem Ausmaß das Gen *Shavenbaby* in den Fliegenlarven aktiv ist«, folgert Fuqua.

Weiter stellten die Forscher fest, dass fast alle Mutationen mehrere Effekte zugleich hatten. Den betroffenen Insekten wuchsen beispielsweise kräftiger ausgeprägte behaarte Streifen – und gleichzeitig Haare in Körperregionen, die normalerweise

nackt bleiben. »Der Evolution scheinen Schranken auferlegt zu sein«, erläutert Fuqua. »Viele Körpermerkmale können sich nur gemeinsam mit anderen verändern.«

Schon wenige Mutationen im Enhancer E3N können somit dazu führen, dass sich Fliegen deutlich anders entwickeln – und von einer Generation auf die nächste ein

sprunghaft verändertes Erscheinungsbild zeigen. »Unseren Ergebnissen zufolge haben Enhancer, die an Entwicklungsvorgängen in Organismen mitwirken, einen viel höheren Informationsgehalt als bisher angenommen«, sagt Justin Crocker.

Um hunderte verschiedene Mutationen im E3N-Abschnitt zu erzeugen und jeweils die Auswirkungen zu beobachten, mussten die Forscher tausende Fliegenembryonen auf immer gleiche Weise präparieren. Das gelang ihnen mit einem selbst entwickelten Roboter, der diese Arbeiten größtenteils eigenständig durchführte. Mit einem abgeänderten PCR-Verfahren erzeugten die Forscher zufällige Mutationen im Erbgut der Tiere; eine automatische Vorrichtung nahm später Mikroskopbilder der heranwachsenden Insekten auf.

Mäuse mit zusätzlichen Gliedmaßen

Andere Arbeiten haben ähnliche Ergebnisse geliefert. Ein Team um den Entwicklungsbiologen Evgeny Kvon von der University of California in Irvine untersuchte kürzlich, wie ein bestimmter menschlicher Enhancer die Entwicklung der Finger und Zehen beeinflusst. Die Forscher führten zahlreiche mutierte Varianten dieses Enhancers in das Erbgut von Mäuseembryonen ein und stellten fest, dass den Nagern daraufhin oft zusätzliche Gliedmaßen

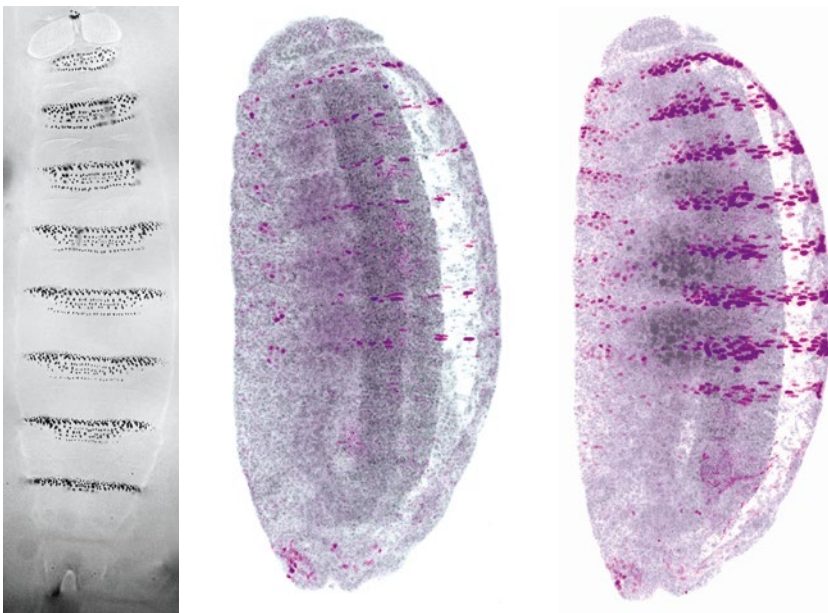
Glossar

Synthetische Evolutionstheorie: Theorie, die den Artenwandel erklärt. Sie vereint die Ideen Charles Darwins und Alfred Russel Wallaces mit Erkenntnissen aus der Genetik, Populationsbiologie und anderen biologischen Fachgebieten.

Regulatorische DNA-Abschnitte: Bereiche des Erbguts, die an der Regulation von Genen mitwirken. Sie können etwa als so genannte Enhancer dazu beitragen, dass ein Gen stärker abgelesen wird, und dieses somit aktiver machen.

PCR: Polymerase-Kettenreaktion, ein Verfahren, um DNA-Moleküle zu vervielfältigen. Ein spezielles Enzym, die DNA-Polymerase, dupliziert die Moleküle hier in aufeinander folgenden Zyklen immer wieder und vermehrt sie so sehr stark.

TIMOTHY FUQUA, EUROPEAN MOLECULAR BIOLOGY LABORATORY (EMBL)



HAARRIGE SACHE Tauflieden-Larven wachsen auf der Bauchseite behaarte Streifen (links). Schon wenige Mutationen in einem regulatorischen DNA-Abschnitt bewirken, dass die Fliegenembryonen deutlich schwächer ausgeprägte Haaranlagen bilden (Mitte) als normal (rechts).

wuchsen. Auch hier führten kleine Abwandlungen einer regulatorischen DNA-Region zu einem deutlich anderen Körperbau der Tiere.

Der Biologe Ralf Sommer vom Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie lobt die Studie von Fuqua und Crocker: »Ich kenne keine Arbeit, die derart umfangreich untersucht hat, wie sich Änderungen in einem regulatorischen DNA-Abschnitt auf Entwicklungsvorgänge auswirken.« Ihn überrascht ebenfalls, wie empfindlich die Fliegenlarven auf Mutationen im Enhancer E3N reagierten. Wenn das bei anderen regulatorischen Abschnitten ähnlich sei, sagt er, dann bedeute

das, dass die Evolution weniger Freiheiten habe als gedacht.

»*Shavenbaby* ist allerdings ein ungewöhnliches Gen, das von extrem vielen verschiedenen Faktoren kontrolliert wird«, erläutert Sommer. »Es könnte daher sein, dass die Ergebnisse nicht repräsentativ sind.« Die Studie unterstreiche aber, dass die gängige Synthetische Evolutionstheorie entwicklungsbiologische Vorgänge nicht hinreichend stark berücksichtige. »Sprunghaft auftretende Veränderungen von Organismen verstehen wir bislang nur lückenhaft. Die Evolutionstheorie sollte deshalb um entwicklungsbiologische Ansätze erweitert

werden, mit denen sich so etwas besser erklären lässt.« ◀

Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum«.

QUELLEN

Fuqua, T. et al.: Dense and pleiotropic regulatory information in a developmental enhancer. *Nature*, doi.org/10.1038/s41586-020-2816-5, 2020

Kvon, E.Z. et al.: Comprehensive In Vivo Interrogation Reveals Phenotypic Impact of Human Enhancer Variants. *Cell* 180, 2020

Stern, D.L., Frankel, N.: The structure and evolution of cis-regulatory regions: the shavenbaby story. *Philosophical Transactions B* 368, 2013

INFORMATIK DIE OPTIMALE REISE

Ein Händler möchte auf einer möglichst kurzen Route mehrere Städte besuchen und anschließend wieder heimkehren – das berühmte »Problem des Handlungsreisenden«. Nach 44 Jahren gibt es erstmals einen Fortschritt dazu.

Als Nathan Klein 2018 zu promovieren begann, schlugen ihm seine Betreuer ein ambitioniertes Projekt vor: die Mitarbeit an einem der bekanntesten Probleme der theoretischen Informatik. Selbst wenn sie es nicht lösen sollten, würde der Student viel dabei lernen. Daher schloss er sich der Idee spontan an. »Mir war nicht ganz klar, welche Tragweite das hatte«, gibt er zu. »Ich war schließlich in meinem ersten Promotionsjahr – ich hatte keine Ahnung.«

Im Juli 2020 hat Klein schließlich gemeinsam mit seinen Betreuern Anna Karlin und Shayan Oveis Gharan von der University of Washington ein Ergebnis veröffentlicht, dem Computerwissenschaftler seit fast einem halben Jahrhundert nachjagen: Sie haben einen Algorithmus entwickelt, der bessere Lösungen für das so genannte Problem des Handlungsreisenden findet.

Ziel ist es hierbei, den kürzesten Rundweg zwischen einer vorgegebenen Menge an Städten – oder

allgemein Orten – zu bestimmen. Die Aufgabe hat Anwendungen, die von der DNA-Sequenzierung bis zur Logistik einer Mitfahrzentrale reichen. Im Lauf der Jahrzehnte hat das Problem zu etlichen grundlegenden Fortschritten in der Informatik geführt und dazu beigetragen, bekannte Techniken wie die lineare Programmierung zu beleuchten. Dennoch haben Wissenschaftler das gesamte Potenzial der Optimierungsaufgabe noch lang nicht ausgeschöpft – was nicht daran liegt, dass sie es nicht eingehend untersucht hätten.

Ob überhaupt ein Algorithmus existiert, der das Problem des Handlungsreisenden in annehmbarer Zeit exakt löst, ist unklar. Die meisten Experten glauben es nicht. Doch 1976 gelang es dem zypriotischen Mathematiker Nicos Christofides (1942–2019), ein Programm zu entwickeln, das Rundreisen berechnet, die um höchstens 50 Prozent länger sind als die optimale Route. Damals nahmen Informatiker an, jemand würde seine Methode bald

verbessern und der wahren Lösung näherkommen. Doch der erwartete Fortschritt blieb aus. »Viele verbrachten vergeblich unzählige Stunden damit«, sagt Amin Saberi von der Stanford University.

Nun haben Karlin, Klein und Oveis Gharan eine Möglichkeit entdeckt, um kürzere Routen zu finden – auch wenn ihr Algorithmus die Methode des zypriotischen Mathematikers um nur 0,2 Milliardstel eines Billionstel eines Billionstel Prozents unterbietet. Aber selbst diese winzige Verbesserung durchbricht eine theoretische und psychologische Barriere. Die Informatiker hoffen, damit die Tore für weitere Fortschritte geöffnet zu haben. »Ein solches Ergebnis wünsche ich mir schon meine ganze Karriere«, sagt David Williamson von der Cornell University, der sich seit den 1980er Jahren mit dem Thema beschäftigt.

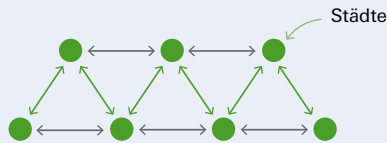
Das Problem des Handlungsreisenden ist eines der berühmtesten in der Informatik. Selbst wenn es höchstwahrscheinlich keine effiziente Mög-

Rekordverdächtiger Algorithmus

Nach 44 Jahren intensiver Suche haben Informatiker erstmals einen Fortschritt beim Problem des Handlungsreisenden gemacht. Dabei geht es darum, den kürzesten Rundweg durch verschiedene Städte zu finden.

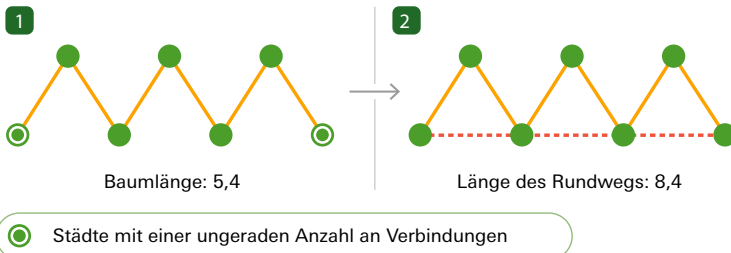
Der ursprüngliche Algorithmus erstellt eine Route für die vorgegebenen Städte:

Entfernungen
 ←→ 1
 ←→ 0.9

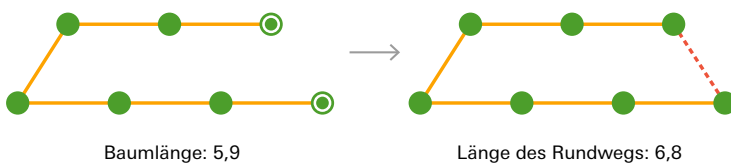


Ursprüngliche Methode

Nicos Christofides' Algorithmus wählt den kürzesten Baum (ein Netzwerk ohne Schleifen) aus, der die Städte miteinander verbindet (siehe 1). Anschließend fügt er Kanten hinzu, bis jede Stadt eine gerade Anzahl davon hat, wodurch ein Rundweg entsteht (2). In diesem Fall muss man die beiden entferntesten Städte verbinden.

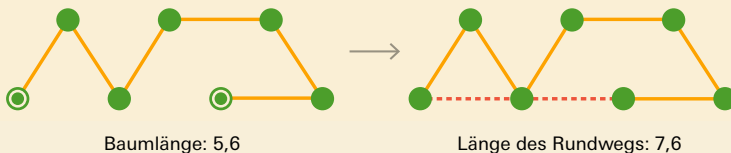


Für dieses Beispiel ist es einfach, einen anderen Baum zu finden, der zu einem Rundweg wird, wenn man seine Endpunkte verbindet.



Neue Methode

Normalerweise ist es schwer, den geeigneten Baum zu finden. Deshalb verwendet der neue Algorithmus einen zufälligen Ansatz, der einen Baum erzeugt, bei dem Städte nahe gelegene Partner haben. Im zweiten Schritt geht es dann zur ursprünglichen Methode über.



Auch wenn der Ansatz nicht immer den kürzesten Weg liefert, ist das Ergebnis besser als Christofides' Resultat.

lichkeit gibt, die kürzeste Verbindung zwischen vorgegebenen Städten zu finden, nutzte Christofides ein Ergebnis aus der Graphentheorie, um näherungsweise Lösungen zu bestimmen. Dafür stellte er die Städte als Punkte in einer zweidimensionalen Ebene dar. Mit mathematischen Mitteln verband er sie zum so genannten kürzesten Baum, also zu einem Netzwerk, in dem es keine Schleifen gibt: Wie bei der Pflanze gibt es ein Wurzel (der Startpunkt), von dem aus ein Stamm und viele Verästelungen folgen, die irgendwann enden. Wie in der Natur können die Zweige sich untereinander nicht verbinden, das heißt man kann von einem Punkt nicht mehr zur Wurzel zurückkehren.

Einen Rundweg schaffen

Deshalb musste der Mathematiker zusätzliche Kanten hinzufügen, um einen Rundweg zu schaffen. Der Baum stellt zwar die kürzeste Distanz für einen einfachen Weg durch die Punkte dar, doch die anschließend entwickelte Schleife, über die der Handlungsreisende wieder nach Hause zurückkehrt, ist nicht unbedingt die optimale Lösung. Hierfür müssen alle Städte eine gerade Anzahl von Kanten aufweisen, da auf eine Ankunft stets eine Abreise folgt. Dem kürzesten Baum fehlt diese Eigenschaft, da jede Stadt am Ende eines Zweigs nur mit der vorigen verbunden ist. Um einen Rundweg zu erzeugen, fand Christofides eine Möglichkeit, solche Städtepaare miteinander zu verbinden. Wie er bewies, ist der daraus entstehende Weg nie über 50 Prozent länger als die bestmögliche Route.

Dabei entwickelte der Mathematiker einen der berühmtesten Approximationsalgorithmen der theoretischen Informatik, der in zahlreichen Büchern und Kursen gelehrt wird. »Jeder kennt die Methode«, sagt Alantha Newman von der Universität Grenoble Alpes und dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS) in Frankreich. Und damit war man auch auf dem neuesten Stand der Technik – bis zum vergangenen Juli.

Experten denken schon lange, Christofides' Ergebnis müsste sich

verbessern lassen. Denn sein intuitiver Ansatz ist nicht immer effektiv. Vielleicht ist der kürzeste Baum, der die Städte verbindet, gar nicht der beste Ausgangspunkt für das Problem. Wenn es etwa viele Zweige gibt, muss man jede Stadt an den entsprechenden Enden mit anderen zusammenführen, was teilweise viele neue Verbindungen bildet – und das Resultat vergrößert.

Daher wandten sich Oveis Gharan, Saberi und Mohit Singh vom Georgia Institute of Technology 2010 zufällig erzeugten Bäumen zu. Dafür ließen sie sich von einer abgewandelten Version des Problems inspirieren, bei welcher der Handlungsreisende seine Wege kombinieren kann: Um beispielsweise Denver zu erreichen, kann er drei Viertel der Strecke zwischen Chicago und Denver plus ein Viertel des Pfads von Los Angeles nach Denver nehmen.

Im Gegensatz zum Original lässt sich diese Variante exakt lösen. Zwar machen solche gebrochenzahlige Routen in der realen Welt keinen Sinn, Informatiker sind aber schon länger der Meinung, der beste derartige Weg könnte dabei helfen, das Problem des Handlungsreisenden anzugehen.

Ein in der Realität nicht umsetzbarer Weg

Dieser Intuition folgend erzeugten Oveis Gharan, Saberi und Singh eine zufällige Sammlung von Bäumen. Ob eine Stadt dabei mit einer anderen verbunden ist, hängt von der Bruchzahl ab, die für die entsprechende Kante in der optimalen Lösung des abgewandelten Problems auftaucht. Besitzt eine Verbindung dabei beispielsweise den Wert $\frac{1}{3}$, dann erzeugt das Programm der drei Informatiker die Kante zwischen beiden Städten mit einer Wahrscheinlichkeit von $\frac{1}{3}$. Aus all den erstellten Bäumen, müssen die Forscher nun zufällig einen auswählen – das geht auf viele Arten. Sie entschieden sich für eine Methode, die Netzwerke mit vielen gleichmäßig verbundenen Städten bevorzugt. Anschließend fügt der Algorithmus den Baum in Christofides' Programm ein, der zusätzliche Kanten schafft, damit eine Rundreise entsteht.

Die Arbeit der Informatiker schien viel versprechend. Sie mussten aber beweisen, dass sie bessere Ergebnisse liefert als die Methode des zyprischen Mathematikers. Im folgenden Jahr gelang ihnen das – zumindest für einen Spezialfall: Für »grafische« Probleme des Handlungsreisenden übertrifft ihr Ansatz die klassische Variante. In dieser Version sind alle Städte gleich weit voneinander entfernt. Die Forscher konnten jedoch nicht herausfinden, wie sich ihr Ergebnis auf den allgemeinen Fall erweitern lässt.

»Ich hatte das Gefühl, an etwas wirklich Wichtigem beteiligt zu sein«

Nathan Klein

Dennoch war Oveis Gharan davon überzeugt, ihr Algorithmus müsse auch für den allgemeinen Fall Christofides' Methode übertreffen. »Ich hatte nie einen Zweifel«, betont er. In den nächsten Jahren ließ ihn das Thema nicht los. Er setzte seine Hoffnung in die so genannte Geometrie der Polynome, eine in der theoretischen Informatik wenig bekannte Disziplin. Als Karlin 2018 den angehenden Doktoranden Klein kennen lernte, der Mathematik und Violoncello studiert hatte, schlug sie ihm vor, mit Oveis Gharan und ihr an dem Problem des Handlungsreisenden zu arbeiten. Karlin zufolge war es nicht zuletzt eine Gelegenheit, mehr über die Geometrie von Polynomen zu erfahren. »Ich ging nicht wirklich davon aus, dass wir das Problem tatsächlich lösen«, erzählt sie.

Die drei Forscher stürzten sich daraufhin in eine intensive Zusammen-

arbeit. Das erste Jahr widmeten sie sich einer vereinfachten Version des Problems, um ein Gefühl für die Herausforderungen zu bekommen, die sie erwarteten. Aber selbst nachdem sie diese Aufgabe lösen konnten, wirkte der allgemeine Fall wie ein Ding der Unmöglichkeit, so Klein.

Dennoch bekamen sie einen Einblick in die verfügbaren mathematischen Methoden – insbesondere in die Geometrie von Polynomen. Ein Polynom ist eine Kombination von Zahlen und potenzierten Variablen, etwa $3x^2y + 8xz^7 + 21$. Um das Problem des Handlungsreisenden zu untersuchen, stellten die Forscher die Bäume als Terme eines Polynoms dar, wobei die darin auftretenden Variablen einer Verbindung zwischen den Städten entsprachen. Anschließend gewichteten sie die Terme mit gewissen Faktoren, die den Wert jeder Kante in der gebrochenzahligen Lösung widerspiegeln.

Wie sie herausfanden, sind die so entstehenden Polynome so genannte Hurwitzpolynome. Diese sind in den verschiedensten wissenschaftlichen Bereichen nützlich, denn man kann mit ihnen untersuchen, ob Systeme stabil sind. Dabei zeichnet sich ein Hurwitzpolynom durch seine Nullstellen aus, also den Zahlen x , y und so weiter, für die der Ausdruck null wird. Lässt man nicht nur reelle, sondern auch komplexe Werte (das heißt Wurzeln aus negativen Zahlen) $ai + b$ zu, wobei a und b reell sind, haben die Nullstellen von Hurwitzpolynomen negative Realteile: Die Variable b ist stets kleiner als null. Selbst wenn man das zu Grunde liegende Polynom nach gewissen Regeln verändert, bleibt dieses Merkmal gleich – Hurwitzpolynome sind daher extrem stabil. Falls sich die Forscher beispielsweise bloß auf einige Städte konzentrieren möchten, können sie den Wert aller Verbindungen, die sie nicht interessieren, auf eins setzen, ohne die grundlegenden Eigenschaften des Polynoms zu verändern. Das ermöglichte es ihnen, die mathematischen Strukturen genau zu untersuchen.

Die Informatiker haben auf diese Art viele ihrer Fragen beantwortet, etwa wie häufig der Algorithmus gezwungen ist, zwei weit entfernte Städte miteinander zu verbinden. Damit konnten sie beweisen, dass ihre Methode die von Christofides für das allgemeine Problem des Handlungsreisenden übertrifft. Andere Experten müssen die knapp 80 Seiten lange Arbeit noch begutachten, aber viele Fachleute zeigen sich zuversichtlich.

Ein neues Werkzeug

Selbst wenn die Forscher den Ansatz der 1970er Jahre nur um einen winzigen Bruchteil verbessert haben, hoffen Computerwissenschaftler, dies werde zu weiteren Fortschritten führen. Die Hoffnung ist nicht unbegründet: Als Oveis Gharan, Saberi und Singh 2010 ihr Ergebnis für den grafischen Fall vorstellten, entwickelten andere Forscher innerhalb eines Jahrs neuartige Algorithmen, welche die ursprüngliche 50-Prozent-Marke auf 40 senkten.

In den vergangenen Jahrzehnten hat das Problem des Handlungsreisenden viele neue mathematische und computerwissenschaftliche Methoden in den Vordergrund gerückt. Oveis Gharan glaubt, das könnte ebenso für die Geometrie der Polynome gelten. Die Disziplin habe seine Karriere geprägt; in zehn Jahren gelang es ihm, damit zahlreiche Theoreme zu beweisen. Das kürzlich veröffentlichte Ergebnis unterstreicht die Kraft des Ansatzes, sagt Newman.

Klein wird nun eine neue Herausforderung finden müssen, die ihn in seinen Bann zieht. Aber er hätte sich keine bessere Einführung in die Forschung der Informatik wünschen können. »Ich hatte das Gefühl, an etwas wirklich Wichtigem beteiligt zu sein.« ◀

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

QUELLEN

Karlin, A. L. et al.: A (slightly) improved approximation algorithm for metric TSP. ArXiv 2007.01409, 2020

Mömke, T., Svensson, O.: Approximating graphic TSP by matchings. ArXiv 1104.3090, 2011

Sebö, A., Vygen, J.: Shorter tours by nicer ears: 7/5-approximation for graphic TSP, 3/2 for the path version, and 4/3 for two-edge-connected subgraphs. ArXiv 1201.1870, 2012

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Computer Scientists Break Traveling Salesperson Record« 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



Die **Spektrum** eBookFlat

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

www.Spektrum.de/ebookflat



ASTROPHYSIK DER RADIOBLITZ DES MAGNETARS

Sie sind eines der großen Rätsel des Universums: extrem helle Strahlungsausbrüche im Radiowellenbereich. Nun haben Forscher herausgefunden, woher sie kommen.

► Für die Sternleiche SGR J1935+2154 ist das Extreme eigentlich alltäglich, doch vor 31000 Jahren übertraf sie sich selbst: Für den Bruchteil einer Sekunde schleuderte sie nicht nur das für sie übliche Maß an Gamma- und Röntgenstrahlen ins All, sondern flutete unsere Galaxie auch mit Radiowellen. Am 28. April 2020 der menschlichen Zeitrechnung erreichten sie die Erde – und helfen hier nun dabei, ein großes Rätsel der Astrophysik zu lösen.

Täglich blitzen irgendwo im All extrem helle Quellen von Radiostrahlung auf, nur um nach ein paar Millisekunden wieder zu verschwinden. Lange konnten Forscher bloß spekulieren, was hinter diesen »Fast Radio Bursts« steckt. Denn stets fanden die Ausbrüche in fernen Galaxien statt, in einer Distanz von vielen Millionen Lichtjahren; zu weit entfernt, um etwas über den Auslöser zu erfahren.

Bei den Radiowellen vom 28. April 2020 ist das anders. Sie gingen von einem schon länger bekannten Sternsystem in der Milchstraße aus, wie verschiedene Forscherteams im November berichteten: Die 31000 Lichtjahre entfernte Region ist Heimat des Magnetars SGR J1935+2154.

Magnetare sind eine seltene Unterklasse der Neutronensterne; gerade mal 30 von ihnen sind in unserer Galaxie bekannt. Sie entstehen, wenn ein Riesenstern seinen Brennstoff aufgebraucht hat und in einer Supernova explodiert. Der Stern verliert dabei seine Hülle, gleichzeitig zieht sich sein Kern dicht zusammen. Am Ende bleibt eine 20 Kilometer große Kugel zurück, die die Masse unserer Sonne (oder etwas mehr) in sich vereint. Die Schwerkraft saugt die Materie dabei so stark an, dass Elektronen in ihre Atomkerne gedrückt werden, wodurch sich Neutronen bilden.

Nach ihrer Geburt drehen sich Neutronensterne zuweilen sehr schnell um sich selbst. Da sich in ihrem Kern auch geladene Teilchen wie Protonen und Elektronen befinden, entstehen ähnlich wie bei einem Dynamo Magnetfelder. Bei Magnetaren, die besonders flott rotieren, sind die Felder milliardenfach stärker als das Erdmagnetfeld.

Mikrowelle als Störfaktor

Das hat Folgen für das Umfeld: Driften Trümmer aus der Sternexplosion in die rotierenden Magnetfelder, werden geladene Teilchen beschleunigt. Sie geben dabei Röntgen- und Gamastrahlung ab. Passiert das regelmäßig,

hinterlässt der Magnetar immer wieder Spuren in den Daten spezieller Forschungssatelliten, Astrophysiker sprechen in diesem Fall von »soft gamma-ray repeatern« (SGR).

Experten vermuten seit Jahren, dass das Umfeld solcher Magnetare nicht nur Röntgen- und Gammaquanten ins All feuert, sondern zuweilen auch stoßartig Radiowellen emittiert – die wir auf der Erde dann als Fast Radio Burst wahrnehmen. Mit der Entdeckung aus dem Sternsystem SGR J1935+2154 ist die Vermutung Gewissheit geworden, schließlich hat man hier einen Magnetar quasi in flagranti beim Radioblitz erwischt: »Nachdem wir uns ein Jahrzehnt lang den

BERSTENDER MAGNETAR Manche Neutronensterne sind von sehr starken Magnetfeldern umgeben, die immer wieder Beben auf der Oberfläche auslösen. Bekommt die Sternkruste dabei Risse, entweichen große Mengen Strahlung, wie diese Illustration zeigt.



Kopf über die Sache zerbrochen haben, ist das auf jeden Fall ein großer Fortschritt«, sagt Jason Hessels von der Universität Amsterdam, der zu den Experten auf dem Gebiet zählt und nicht an den aktuellen Arbeiten beteiligt war.

Für manchen Radioblitzjäger dürfte die Entdeckung auch eine Genugtuung darstellen. Schon 2001 hatte das australische Parkes-Radioteleskop einen der Ausbrüche beobachtet, damals in der Kleinen Magellanschen Wolke, einer Satellitengalaxie der Milchstraße, wie Forscher beim Sichten von Archivdaten im Jahr 2007 feststellten. Doch die Fachwelt blieb lange skeptisch: Die 64-Meter-Schüssel des Parkes-Observatoriums fing damals immer wieder rätselhafte Signale auf, meist in der Mittagspause. Wie später herauskam, steckten in vielen Fällen die Mikrowellenöfen im Besucherzentrum der Anlage dahinter.

Im Jahr 2013 flackerten dann allerdings vier Radioblitze auf, die zweifellos aus dem Kosmos stammten. Und Astronomen stießen in einer fernen Galaxie auf eine Quelle, die immer wieder Fast Radio Bursts absetzt. 2017 weithen Forscher schließlich eine Anlage ein, die auf die Suche nach den flüchtigen Ausbrüchen spezialisiert ist: Das Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) besteht aus vier je 100 Meter langen Halbzylindern. Mit ihnen haben die Wissenschaftler stets einen guten Teil des Firmaments im Blick und können Radioblitze aus ganz unterschiedlichen Richtungen nachweisen. Mehr als 1000 Signale hat die Anlage laut dem CHIME-Team schon aufgespürt. Bei 20 handelt es sich sogar um Wiederholungstätter, deren Ursprung jedoch stets außerhalb unserer Galaxie lag.

Nicht so am 28. April 2020: Hier prasselten binnen einiger Sekundenbruchteile ungewöhnlich starke Radiowellen auf CHIME ein. Bereits am Vortag hatten Forschungssatelliten aus dem Erdorbit beobachtet, dass der Magnetar SGR J1935+2154 mal wieder heiß lief: Wie schon öfters in der Vergangenheit entwichen aus seinem Umfeld große Mengen Röntgen- und Gammastrahlen.



ANDRÉ HENARD / CHIME COLLABORATION

CHIME-OBSERVATORIUM Die nach oben geöffneten Halbzylinder stehen auf einer Wiese in der kanadischen Provinz British Columbia. Fast täglich fängt die Anlage einen Radioblitz aus dem Weltall auf.

Derweil registrierte nicht nur CHIME einen Radioblitz: Auch das deutlich kleinere STARE2-Projekt wies die Wellen nach. Die drei über den Südwesten der USA verteilten Low-Tech-Antennen sind Teil der Doktorarbeit von Christopher Bochenek vom California Institute of Technology. Er hat sie mit dem Ziel aufgestellt, galaktische Radioblitze aufzufangen – und rechnete keineswegs damit, wirklich Erfolg zu haben. »Die Erfolgchance lag bei gerade mal zehn Prozent«, erzählt Bochenek. Denn statistisch gesehen sollte es in der Milchstraße bloß alle 50 Jahre zu einem Radioblitz kommen.

Mit Detektivarbeit zum Magnetar Zunächst zweifelten Forscher allerdings noch, ob das Signal wirklich aus unserer Galaxie stammte. Weder CHIME noch STARE2 konnten den genauen Ursprung der Wellen orten. Daher waren weitere Beobachtungen nötig, um einen eindeutigen Zusammenhang mit dem Sternsystem SGR J1935+2154 herzustellen.

Ihn lieferte letztlich das derzeit weltgrößte Radioteleskop FAST in der chinesischen Provinz Guizhou. Die 500-Meter-Schüssel wies zwei Tage nach dem ersten Radioblitz einen schwächeren Ausbruch nach, der aus Richtung des Magnetars kam.

Damit besteht aus Sicht von Experten nur noch wenig Zweifel daran, dass die Magnetsterne etwas mit Fast Radio Bursts zu tun haben. »Insgesamt sind das schon gute Indizien für diesen

Zusammenhang«, sagt Laura Spitler, die am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn eine Forschungsgruppe zu Radioblitzen leitet.

Das Rätsel der Strahlungsausbrüche ist mit der neuen Entdeckung aber womöglich nur zum Teil gelöst, findet ihr Kollege Michael Kramer, Direktor an dem Bonner Max-Planck-Institut. »Man kann darüber streiten, ob es sich bei diesem Ausbruch wirklich um einen klassischen Fast Radio Burst handelt«, sagt er.

So setzte der Magnetar zwar binnen weniger Millisekunden so viel Energie im Radiowellenbereich frei, wie unsere Sonne in einer halben Minute insgesamt abstrahlt. Das ist für die bisher nachgewiesenen Radioblitze jedoch sehr wenig: Die Ausbrüche in anderen Galaxien feuern im Schnitt 10- bis 100-mal mehr Strahlung ins All.

Entsprechend könnte es sich bei dem Magnetarblitz bloß um einen kleinen Cousin der mächtigen extragalaktischen Fast Radio Bursts handeln, sagt Kramer. Oder anders formuliert: Hinter manchem Ausbruch außerhalb unserer Galaxie steckt womöglich etwas anderes als ein Magnetar.

Das gilt insbesondere für die Fälle, in denen sich ein Radioblitz nicht wiederholt. Sie lassen sich aus Sicht der Experten nicht gut mit Magnetkugeln wie SGR J1935+2154 erklären. Denn von diesen würde man wegen ihrer schnellen Rotation immer wieder Teilchenauswürfe – und damit Radiowellen – erwarten. »Dass sich manche Ausbrüche wiederholen und andere

nicht, spricht aus meiner Sicht dafür, dass wir es mit verschiedenen Arten von Quellen zu tun haben«, sagt Jason Hessels.

Die Einzeltäter lassen sich daher womöglich besser durch kollabierende Riesensterne oder kollidierende Neutronensterne erklären. Seit Jahren wissen Forscher, dass diese kosmischen Katastrophen extrem helle Explosionen hervorbringen, die Fast Gamma-ray Bursts. Im Grunde sollten diese Ausbrüche auch Radiowellen freisetzen – wovon Astronomen bisher allerdings nichts gesehen haben. Daher diskutieren Theoretiker nach wie vor etliche andere Theorien als Ursache der nicht wiederkehrenden Radioblitz: Von Kometeneinschlägen auf Neutronensternen über kollidierende Weiße Zwerge bis hin zu plötzlich verdampfenden Schwarzen Löchern.

Magnetare könnten solche Gedankenspiele im Grunde überflüssig machen und die ganze Bandbreite der Radioblitz erklären. Dazu müsste es allerdings verschiedene Varianten der magnetisierten Sternleichen geben, argumentiert Bing Zhang von der University of Nevada: Zum einen eine große Zahl eher zahmer Exemplare wie die in unserer Milchstraße, deren

Radioemissionen vergleichsweise schwach sind und die sich womöglich nur in großen zeitlichen Abständen wiederholen. Zum anderen eine kleine Gruppe besonders aktiver Magnetsterne, die nach einer turbulenten Geburt eine Zeit lang regelmäßig Fast Radio Bursts von sich geben – und diese durch das halbe Universum feuern.

Wie ein gigantischer Laser

Bisher haben die Forscher nur in groben Zügen verstanden, auf welchem Weg Magnetare überhaupt Fast Radio Bursts hervorbringen. Eine populäre Theorie sieht hier die mit dem Stern rotierenden Magnetfelder am Werk, die sich immer wieder verheddern. Das würde die Kruste unter Spannung setzen, dort Beben auslösen und die Sternoberfläche zuweilen aufplatzen lassen. Dabei würden geladene Teilchen ins All geschleudert, die bei der Kollision mit Materie im Umfeld Radiopulse aussenden. Denkbar ist aber auch, dass die Strahlung direkt aus der Magnetosphäre der exotischen Sterne entweicht, wie man es bei den entfernt verwandten Pulsaren vermutet.

Eine Herausforderung für die Experten ist, dass die Wellenpakete von

Fast Radio Bursts überraschend gut geordnet sind; Physiker sprechen hier von Kohärenz. Sie ähneln damit dem, was ein gigantischer Laser ins All schießen würde. Wie das chaotische Umfeld eines geborstenen Magnetars das genau hinkriegen soll, ist unklar.

Um diese und andere Fragen zu beantworten, müssen die Forscher weitere der Ereignisse beobachten, bevorzugt in unserer Galaxie. Nicht wenige Fachleute würden es dabei wohl begrüßen, wenn sich möglichst viele der bereits aufgespürten Ausbrüche irgendwann wiederholen. Denn das würde man in erster Linie von Magnetaren erwarten. ◀

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum«.

QUELLEN

Bochenek, C. et al.: A fast radio burst associated with a Galactic magnetar. *Nature* 587, 2020

The CHIME/FRB Collaboration.: A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar. *Nature* 587, 2020

Zhang, B.: The physical mechanisms of fast radio bursts. *Nature* 587, 2020

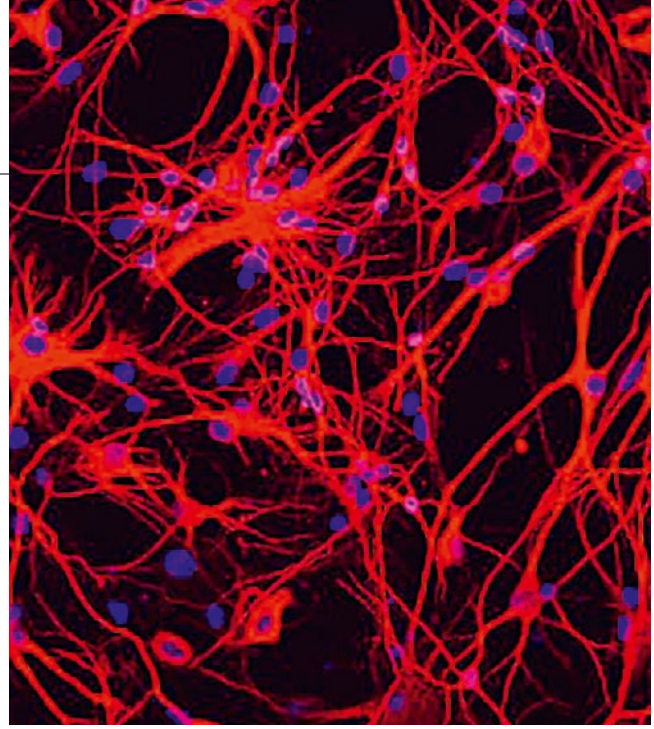
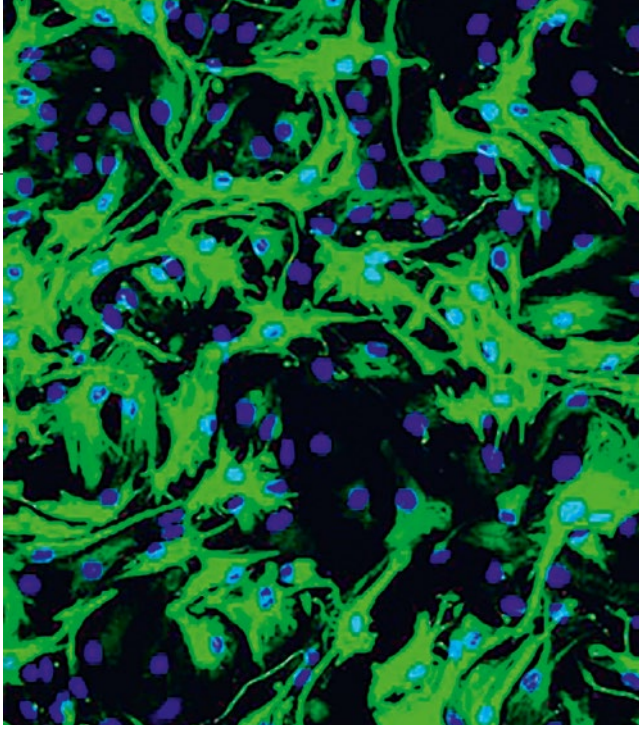
PARKINSONKRANKHEIT ASTROZYTEN MIT POTENZIAL

Durch Ausschalten eines Proteins lassen sich nichtneuronale Astrozyten in funktionsfähige Nervenzellen verwandeln. Damit steht ein neuer Weg zur Behandlung der Parkinsonkrankheit offen.

Wie lassen sich die Hirnzellen ersetzen, die bei der Parkinsonkrankheit in der Substantia nigra des Mittelhirns zu Grunde gehen? Eine faszinierende Möglichkeit wäre, nicht-neuronale Zellen wie Astrozyten, die massenhaft im Gehirn vorkommen, einfach in Neurone umzuwandeln. Genau das gelang zwei Arbeitsgruppen unabhängig voneinander bei Mäusen. Damit erscheint die Reprogrammierung von Zellen als viel versprechende Strategie, um neurodegenerative Krankheiten zu behandeln.

Mit Hilfe so genannter Transkriptionsfaktoren, welche die Genablesung kontrollieren, konnte man bereits zuvor Hirnzellen herstellen, die den Neurotransmitter Dopamin produzieren – also just solche Zellen, die bei Morbus Parkinson ausfallen. Das funktioniert inzwischen auch bei lebenden Mäusen, wie etwa unsere Arbeitsgruppe 2017 nachwies: Aus Astrozyten des Striatums erzeugten wir »induzierte Dopamin freisetzende Neurone« (induced dopamine-releasing neurons oder kurz iDA), die tatsächlich motori-

sche Defekte der Nager zumindest teilweise behoben. Allerdings verknüpften sich diese iDA-Neurone nicht wie in einem gesunden Gehirn mit weiter entfernt liegenden Zellen; und die Tiere erhielten auch nicht ihre volle Beweglichkeit zurück. Daher wählten nun die beiden Forschergruppen – einerseits um Xiang-Dong Fu von der University of California in San Diego, andererseits um Haibo Zhou von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Schanghai – einen anderen Weg: Sie reprogrammierten nichtneu-



VERWANDLUNG Mittels Blockade eines Proteins im Mäusegehirn werden aus Astrozyten (links, grün) funktionsfähige Nervenzellen (rechts, rot).

ronale Zellen durch Ausschalten eines bestimmten Proteins.

Die Wissenschaftler um Fu begannen ihre Experimente *in vitro*, indem sie Astrozyten aus dem Kortex und dem Mittelhirn von Mäusen sowie aus menschlichem Hirngewebe isolierten. In diesen Zellen zerstörten die Forscher mittels einer so genannten Haarnadel-RNA die Boten-RNA, welche die Information des Gens *Ptbp1* enthielt. Jener Erbfaktor codiert wiederum für das Protein PTB (polypyrimidine tract-binding protein), das normalerweise die neuronale Differenzierung von Astrozyten hemmt. Den gleichen Effekt erzielten die Wissenschaftler um Zhou über die Gentechnikschere CRISP-CasRx – eine Methode, deren Entwicklerinnen 2020 den Chemie-nobelpreis erhielten (siehe »Spektrum« Dezember 2020, S. 29).

Im zweiten Schritt erfolgte die Anwendung *in vivo* bei ausgewachsenen gesunden Mäusen. Dabei verwendeten beide Forschergruppen Viren, um die gegen *Ptbp1* gerichteten RNA-Moleküle beziehungsweise die CRIS-CasRx-Maschinerie in die Versuchstiere einzuschleusen. Nachdem sich in beiden Fällen Astrozyten erfolgreich in neuronale Zelltypen

umgewandelt hatten, testeten die Forscher Mäuse, die als Modell für die Parkinsonkrankheit dienen. Wie bei einem Parkinsonpatienten mangelt es diesen Tieren in ihrer Substantia nigra an Dopamin freisetzenden Neuronen, so dass es im damit verbundenen Striatum zu einem Dopaminmangel kommt, was wiederum motorische Defizite verursacht. Während Fu und seine Kollegen das Protein PTB in den Astrozyten der Substantia nigra attackierten, zielten die Wissenschaftler um Zhou auf die Zellen des Striatums – jeweils mit dem gleichen Resultat: Die mit dem Virus infizierten Zellen wurden zu Neurone, die den fehlenden Hirnzellen ähnelten, so dass die Mäuse sich wieder besser bewegen konnten.

Spezifische Transkriptionsfaktoren

Beide Gruppen demonstrierten somit, dass sich Astrozyten durch Unterdrückung von PTB in die der Hirnregion entsprechenden neuronalen Zelltypen umwandeln. Worauf beruht eine solche Spezifität? Wie Fu und seine Kollegen herausfanden, produzieren die Astrozyten des Mittelhirns geringe Mengen der Transkriptionsfaktoren *Lmx1a* und *Foxa2*. Diese kommen normalerweise in den Vorläufern der Dopamin freisetzenden Neurone vor und sorgen während der Entwicklung des Mittelhirns für deren Reifung zu funktionsfähigen Nervenzellen. Die Ausschaltung von PTB forcierte im Mittelhirn die Produktion jener Transkriptionsfaktoren. Im Kortex erhöhte

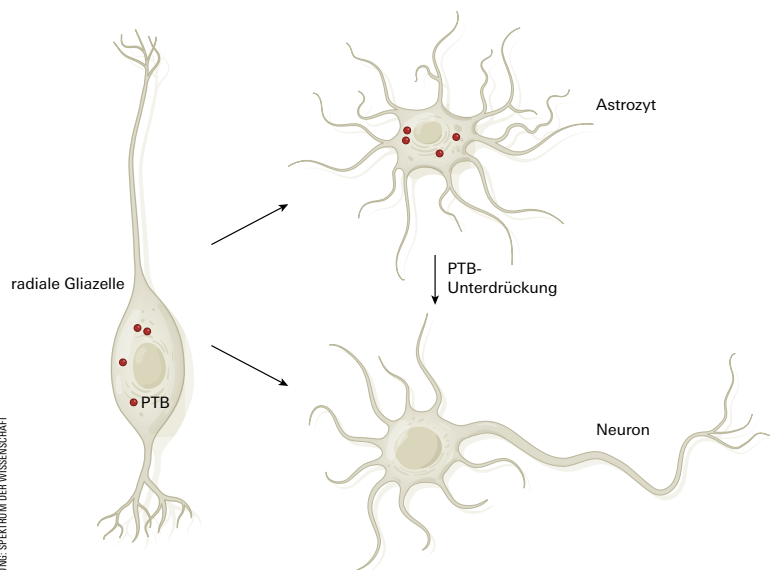
sich dagegen die Konzentration anderer Proteine (*Ctip2* und *Cux*), auf die wiederum kortikale Zellen ansprechen. Darüber hinaus führte die Reprogrammierung von Astrozyten in der Substantia nigra oder im benachbarten ventralen tegmental Areal zu verschiedenen Subtypen von iDA-Neuronen mit abermals spezifischen Transkriptionsfaktoren wie *Sox6* und *Aldh1a1* beziehungsweise *Otx2*.

Demnach scheinen hirnregionenspezifische Transkriptionsfaktoren für die Umwandlung von Astrozyten in iDA-Neurone verantwortlich zu sein. Ein solcher Mechanismus erklärt jedoch nicht, warum die Forscher um Zhou in der Lage waren, Astrozyten des Striatums in iDA-Neurone umzuwandeln, da hier ganz andere Transkriptionsfaktoren vorkommen. Welcher Mechanismus steckt in dieser Hirnregion dahinter?

In den Experimenten von Zhou Arbeitsgruppe verlief die iDA-Konversion einen Monat nach der Behandlung bei Parkinson-Mäusen fast dreimal so effektiv wie bei gesunden Kontrolltieren. Das deutet darauf hin, dass entweder die Astrozyten selbst oder benachbarte Zellen auf den Verlust Dopamin freisetzender Neurone reagieren, indem sie Proteine herstellen, welche die Umwandlung von Astrozyten in iDA-Neurone fördern. Fu und seine Kollegen registrierten wiederum im Mäusegehirn eine höhere Umwandlungsrate als bei isolierten Astrozyten, was ebenfalls

Ein Weg zum Neuron

Radiale Gliazellen sind Stammzellen, aus denen im sich entwickelnden Mittelhirn entweder Astrozyten oder Neurone entstehen können. Sie produzieren aus dem Gen *Ptbp1* eine Boten-RNA, die für das Protein PTB codiert. Das geschieht auch in den Astrozyten, nicht jedoch in den Nervenzellen. Wird die Bildung von PTB in ausgereiften Astrozyten unterdrückt, können sich diese zu Dopamin freisetzenden Neuronen umwandeln und damit Parkinsonsymptome bei Mäusen lindern.



MATURE ARENAS. E. UNLEASHING THE NEURONAL SIDE OF ASTROCYTES. NATURE SZ. 2020, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

auf den Einfluss lokaler Faktoren bei der iDA-Konversion deutet. Solche lokalen oder krankheitsspezifischen Faktoren gilt es zu identifizieren, um damit die Effizienz der Astrozyten-Reprogrammierung zu steigern.

Hier stellt sich die faszinierende Frage, warum überhaupt Astrozyten neuronale Gene hemmen. Eine Erklärung dürfte im Ursprung der Zellen liegen: Astrozyten und Neurone stammen von den gleichen Vorläuferzellen ab, den radialen Gliazellen. Diese Stammzellen differenzieren sich zunächst zu Neuronen und danach zu Astrozyten oder zu anderen die Neurone unterstützenden Gliazellen. Im sich entwickelnden Mittelhirn der Maus wird bei allen radialen Gliazellen das Gen *Ptbp1* abgelesen, während das bei sich differenzierenden Neuronenvorläufern und den Neuronen selbst nicht der Fall ist. Vielleicht haben die Astro-

zyten des Mittelhirns – als Abkömmlinge der radialen Gliazellen – ein Programm zur Erzeugung von Neuronen geerbt, das ruht, solange das Protein PTB vorhanden ist (siehe »Ein Weg zum Neuron«). Das *Ptbp1*-Gen wird auch in anderen Zelltypen des Mittelhirns exprimiert, wie etwa bei Zellen der Blutgefäße, der Epithelien oder des Immunsystems. Künftige Studien sollten bei Parkinson-Mäusen klären, ob sich diese Zellen durch PTB-Unterdrückung ebenfalls zu iDA-Neuronen umwandeln lassen.

Um die Strategie medizinisch einzusetzen, muss ihre Effizienz aber noch gesteigert werden. So wurden aus 60 bis 65 Prozent der infizierten Astrozyten keine iDA-Neurone. Um die Ausfallquote zu verringern, sollte man die Astrozyten der Substantia nigra gezielter ansteuern oder mit Hilfe weiterer Faktoren andere Zellen außer-

halb der Substantia nigra zu iDA-Neurone umstricken. Wichtig wäre ebenfalls, die Qualität der iDA-Zellen individuell zu bestimmen sowie zu testen, ob unerwünschte Zellen entstehen. Beiden Arbeitsgruppen zufolge differenzierten sich Astrozyten nicht nur zu iDA-Neuronen, sondern auch zu anderen Zelltypen. Außerdem fanden Fu und seine Kollegen heraus, dass sich die konvertierten iDA-Neurone statt mit Zellen des Striatums eher mit denen im Septum des Gehirns verknüpften. Immerhin stammten mehr als die Hälfte der im Striatum eintreffenden Nervenfasern von iDA-Zellen. Das belegt zusammen mit dem erhöhten Dopaminspiegel sowie der verbesserten Beweglichkeit der Tiere eine bemerkenswerte funktionelle Wiederherstellung des nigrostriatalen Signalwegs durch iDA-Neurone.

Zukünftige Experimente werden zeigen, ob sich auch beim Menschen Astrozyten des Mittelhirns oder des Striatums in iDA-Neurone verwandeln lassen und ob diese sich dann mit den richtigen Zielzellen über einen längeren Zeitraum verknüpfen. Ebenfalls gilt es, die Sicherheit des Verfahrens sorgfältig zu überprüfen, um Nebenwirkungen an benachbarten Hirnzellen oder den umgewandelten Zellen zu vermeiden. Obgleich noch viele Fragen offen bleiben, besticht dieser gentherapeutische Ansatz zum Zellersatz durch seine Einfachheit und Effizienz. Damit könnte sich ein neues Kapitel in der regenerativen Medizin für neurologische Erkrankungen aufschlagen. ◀

Ernest Arenas ist Professor für Stammzell-neurobiologie an der Abteilung für Medizinische Biochemie und Biophysik des Karolinska-Instituts in Stockholm (Schweden).

QUELLEN

Qian, H. et al.: Reversing a model of Parkinson's disease with in situ converted nigral neurons. *Nature* 582, 2020

Zhou, H. et al.: Glia-to-neuron conversion by CRISPR-CasRx alleviates symptoms of neurological disease in mice. *Cell* 181, 2020

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 582, S. 489–490, 2020



SPRINGER'S EINWÜRFE WIE DIE IMPFSKEPSIS WÄCHST

Massenimpfungen versprechen ein Ende der Corona-Pandemie – vorausgesetzt, die Gegnerschaft nimmt nicht überhand.

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/1807505

Abstand halten! Hände waschen! Alltagsmaske tragen! Immer mehr Menschen sind der drei AHA-Regeln müde, und ganz vertreiben lässt sich das Coronavirus so eh nicht. Doch unterdessen hat eine weltweite und historisch einmalige Forschungskampagne gleich mehrere Impfstoffe bereitgestellt, welche die begründete Hoffnung auf ein absehbares Ende der Seuche wecken.

Der Haken an der Sache ist nur, dass viele Europäer und Nordamerikaner sich nicht impfen lassen wollen. Wenn deren Anteil an der Bevölkerung einen gewissen Wert übersteigt, vermag kein noch so potentes Vakzin das Virus auszurotten.

Wie kommt es eigentlich zur Ausbreitung von Impfskepsis? Das hat der Physiker und Komplexitätsforscher Neil F. Johnson von der George Washington University in Washington, D.C., am Beispiel der Masernepidemie von 2019 untersucht. Er versammelte ein Team von Informatikern, Politologen und Gesundheitsforschern, um aus dem globalen Pool der rund drei Milliarden Facebook-Nutzer diejenigen 100 Millionen herauszufischen, die zu der Frage, ob man sich impfen lassen sollte, irgendwelche Meinungen äußerten oder mit Hilfe des Gefällt-mir-Buttons bewerteten (*Nature* 582, S. 230–233, 2020).

Auf den ersten Blick mutet das Ergebnis eher beruhigend an: In einem Meer von Unentschlossenen (74 Millionen) schwimmt zwar eine Minderheit von 4 Millionen erklärten Impfgegnern, ihnen gegenüber befinden sich aber immerhin knapp 7 Millionen dezidierte Impfbefürworter. In deren Übergewicht spiegelt sich offensichtlich die in den verschiedenen Medien geleistete Aufklärungsarbeit wider.

Beunruhigend wird das Bild, wenn man die Meinungsklustern, ihre Vernetzung und ihre Ausbreitung genauer unter die Lupe nimmt. Die Impfbefürworter bilden zwar große, dafür wenige und relativ isolierte Gruppen, während sich die Skeptiker sehr mobil zwi-

schen den Unentschlossenen umherbewegen und intensiv mit diesen interagieren. Die hochgradige Vernetzung fördert den Vormarsch der Impfskepsis, während die Befürworter in ihren separaten Clustern mehr oder weniger unter sich bleiben und so den falschen Eindruck gewinnen, ihre Meinung herrsche unangefochten. In der Tat wuchsen manche Gruppen von Impfgegnern im Lauf der Masernepidemie um das Dreifache, die der Befürworter hingegen nur selten auf das Doppelte.

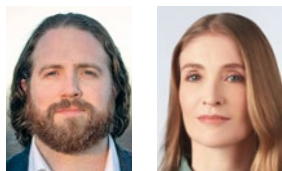
Wie kommt das? Das Argumentieren gegen die Impfskepsis droht an deren Vielgestaltigkeit zu scheitern: Mancherorts herrscht Misstrauen gegen die Apparatedizin, anderswo wird das Profitstreben der Pharmakonzerne verurteilt, wieder andere Gruppen propagieren »alternative« Heilmethoden oder vermeintlich immunstärkende Wundermittel, überall kursieren Anekdoten über Impfschäden, und »die da oben«, ob Politiker oder Mediziner, machen doch ohnedies, was sie wollen.

Wie die Forscher um Neil F. Johnson betonen, verschwindet in dem Fall die minoritäre Meinung keineswegs mit der Zeit von selbst. Ihren Modellrechnungen zufolge wachsen zwar die Cluster der Befürworter – die der Impfgegner vergrößern sich allerdings schneller. In etwa zehn Jahren, so der alarmierende Befund, schneiden sich die beiden Kurven, und von da an haben die Skeptiker Oberwasser.

Gewiss, die Modelle der Studie sind grob vereinfacht und mit Vorsicht zu genießen. Jedenfalls räumen sie mit der Illusion auf, die in den sozialen Medien kursierenden Abstrusitäten ließen sich allein durch die Überzeugungsarbeit vor allem der Massenmedien aus der Welt schaffen. Mit Facebook, Twitter und Co entsteht eine kompakte Gegenöffentlichkeit, die tendenziell ihre eigene Wirklichkeit erzeugt.

NEUROWISSENSCHAFTEN SOZIALE LANDKARTEN IM GEHIRN

Dieselben neuronalen Schaltkreise, die zur Navigation in Raum und Zeit dienen, befähigen uns offenbar auch dazu, uns im Dickicht der zwischenmenschlichen Beziehungen zurechtzufinden.



Matthew Schafer promoviert an der Icahn School of Medicine am New Yorker Mount Sinai Hospital im Fach Neurowissenschaften über die neuronalen Mechanismen der sozialen Kognition im menschlichen Gehirn. **Daniela Schiller** ist dort Associate Professor für Neurowissenschaften und Psychiatrie und erforscht neuronale Mechanismen der emotionalen Kontrolle bei der Anpassung an ständig wechselnde Umweltbedingungen.

► spektrum.de/artikel/1807457

► Es heißt, im Leben gebe es keine Abkürzungen. Doch schon das Gehirn einer Ratte straft diese Sentenz Lügen. Tatsächlich ist es geradezu getrimmt darauf, kürzeste Wege zu finden.

Das erste Indiz dafür fand 1948 Edward Tolman (1886–1956) an der University of California in Berkeley. In einem seiner Experimente musste eine hungrige Ratte von einem runden Tisch aus in einen dunklen, engen Tunnel laufen, dort einmal links und zweimal rechts abbiegen und schließlich einem gut beleuchteten schmalen Korridor folgen, um an eine Schale mit Futter zu gelangen. Dabei blieb ihr die Qual der Wahl zwischen verschiedenen Routen erspart: Es gab nur den einen gewundenen Pfad. Diesen Weg nahm das Tier vier Tage lang wieder und wieder.

Als die Ratte am fünften Tag erneut in den vertrauten Tunnel lief, stieß sie jedoch auf eine Wand: Der Weg war blockiert. Das Tier kehrte also zum Tisch zurück, um nach einem alternativen Zugang zum Futter zu suchen. Dabei sah es sich einer völlig neuen Topografie gegenüber: Statt des einen Tunnels gab es nun 18 Gänge, die sich von den Rändern der hell beleuchteten Tischplatte radial in alle Richtungen erstreckten. Nachdem die Ratte in mehrere davon ein

**MITMENSCHEN
IM KOPF**
Wie repräsentiert das Gehirn unser soziales Beziehungsgeflecht? Jüngste Forschungen geben faszinierende Einblicke.





paar Zentimeter weit hineingeschaut hatte, entschied sie sich für Korridor Nummer sechs – und der führte geradewegs zum Futter.

Dass das Tier auf Antrieb und ohne vorherige Erkundung des veränderten Labyrinths den direkten Weg zum Fressnapf fand, erstaunte umso mehr, als damals der Behaviorismus die vorherrschende Lehrmeinung in der Psychologie war. Nach diesem Paradigma ist das Verhalten einer Ratte im Labyrinth allein das Ergebnis einfacher Reiz-Reaktions-Muster: Das Tier antwortet unmittelbar auf einen äußeren Stimulus und wenn die Antwort erfolgreich ist, verstärkt sich die neuronale Verbindung, die den Zusammenhang zwischen Reiz und Reaktion repräsentiert.

Das Gehirn agiert dabei lediglich als Schaltzentrale, die immer wieder diejenigen Verknüpfungen zwischen eingehenden Signalen aus den Sinnesorganen (den Stimuli) und ausgehenden Befehlen an die Muskeln (den Reaktionen) herstellt, die sich als zielführend erwiesen haben. Damit lässt sich jedoch nicht erklären, wie es der Ratte gelang, auf Antrieb die optimale Route zu wählen, obwohl sie diese nie zuvor erkundet und mit anderen verglichen hatte. Dagegen passt das Ergebnis des Experiments – ebenso wie spätere, ähnliche Beobachtungen – zu einer alternativen Theorie. Sie besagt, dass das Gehirn einer Ratte im Zuge der räumlichen Orientierung eine Art topografische Skizze erstellt. Tolman, selbst ein Verfechter dieser neuen Idee, prägte dafür den Begriff der kognitiven Karte.

Seine Versuche belegten, dass das Gehirn eines Nagers mehr als nur unmittelbare Zusammenhänge zwischen Reizen und Reaktionen zu erkennen vermag. Solche direkten Assoziationen sind wegen stetiger Veränderungen der Umwelt ohnehin fragil und schnell überholt. Wie Neuropsychologen in den Jahrzehnten seit Tolmans bahnbrechenden Experimenten herausfanden, erstellt, speichert und nutzt das Gehirn tatsächlich mentale Karten. Diese Repräsentationen der Umgebung dienen zur Orientierung in einer kom-

plexen, veränderlichen Welt und bieten die nötige Flexibilität für Abkürzungen sowie, falls erforderlich, Umgehungen. Die hungrige Ratte in Tolmans Versuchsaufbau hatte sich offenbar nicht nur den Weg zum Futternapf eingeprägt, sondern auch dessen Standort. Trotz der plötzlich radikal veränderten Umgebung vermochte sie die Richtung zu ihrem Ziel auszumachen und denjenigen Weg einzuschlagen, der sie direkt hinführen würde.

Wie aber erzeugt und speichert das Gehirn solche Karten? Erste Antworten auf diese Frage lieferten in den 1970er Jahren Untersuchungen am Hippocampus von Mäusen. In jenem Hirnareal entdeckte John O'Keefe vom University College London zusammen mit seinem Studenten Jonathan Dostrovsky Neurone, die aktiv wurden, wenn sich ein Tier an einem bestimmten Ort in seinem Käfig befand. Andere Nervenzellen wiederum feuerten, wenn die Maus den nächsten markanten Punkt auf ihrer Route erreichte. Anscheinend war diese Klasse von Neuronen darauf spezialisiert, die jeweilige Position des Tiers im Käfig zu registrieren. Anhand der Abfolge von Aktivitäten solcher Ortszellen konnten die Forscher rekonstruieren, welchen Weg die Maus genommen hatte.

Wie das Gehirn Navigation betreibt

Forschungen aus den letzten Jahrzehnten bestätigten die Existenz von Ortszellen auch bei anderen Tieren und beim Menschen. Dabei kam zugleich eine Vielzahl von Zelltypen ans Licht, die ebenfalls an der Codierung räumlicher Beziehungen im Gehirn beteiligt sind.

Eine weitere Entdeckung machte ein Team unter Leitung von Edvard Moser und May-Britt Moser, damals Postdoktoranden und Gaststipendiaten in O'Keefes Labor. Die Forscher fanden im entorhinalen Kortex, einer Region der Hirnrinde mit enger Verbindung zum Hippocampus, einen neuartigen Typ von Neuronen, der den Ortszellen stark ähnelte. Diese Neurone feuerten ebenfalls, wenn sich ein Tier an einer bestimmten Position befand. Allerdings wurden sie auch dann aktiv, wenn es sich an anderen, regelmäßig im Käfig verteilten Stellen aufhielt. Ordnete man das Erregungsmuster solcher Gitterzellen den jeweiligen Positionen des Tieres zu, ergab sich ein Muster aus gleichseitigen Dreiecken, das den Käfig wie ein Raster überzog. Wann immer das Tier einen der Schnittpunkte dieses Rasters überquerte, feuerten die betreffenden Neurone (siehe »Physische Navigation mittels Ortszellen und Gitterzellen«).

Die Entdeckung des neuartigen Zelltyps löste große Resonanz aus, weil sich nun erkennen ließ, wie das Gehirn Navigation betreibt. Gemeinsam können Orts- und Gitterzellen Positionen, Richtungen und Entfernungen bestimmen. Damit bilden sie die Grundlage für das Erstellen mentaler Karten. O'Keefe und das Ehepaar Moser erhielten für ihre Untersuchungen 2014 den Nobelpreis für Medizin oder Physiologie.

Eine mentale Karte enthält eine Vielzahl nützlicher Informationen, und das hippocampal-entorhinale System codiert einen großen Teil davon. Ein Beispiel für den praktischen Nutzen des Systems ist die Zielfindung: Steuert ein Tier auf einen bestimmten Ort zu, feuern Hippocampus-Neurone in Abhängigkeit von Bewegungsrichtung und Entfernung von dem anvisierten Punkt: Je näher er ist, desto rascher folgen die Salven aufeinander.

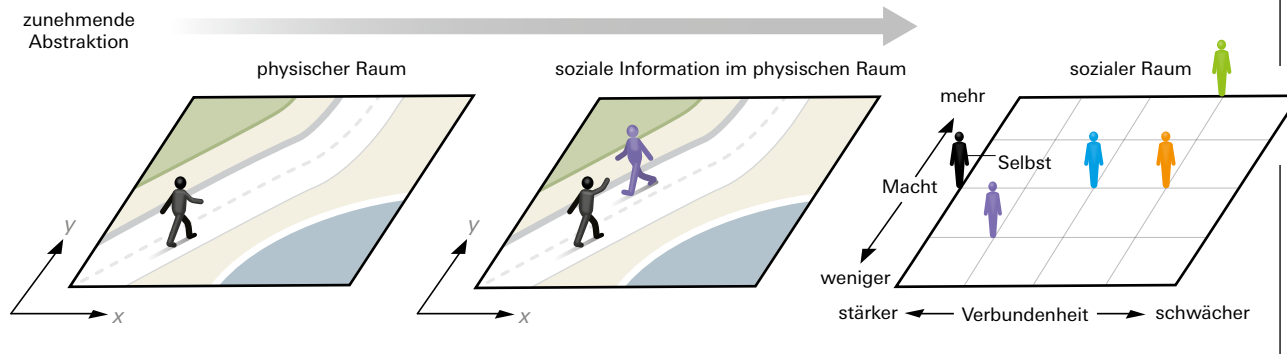
AUF EINEN BLICK ORIENTIERUNG IM BEZIEHUNGSGEFLECHT

- 1** Höhere Lebewesen einschließlich des Menschen nutzen mentale Modelle ihrer Umwelt, um im Geist Routen durchzuspielen und dabei den günstigsten Weg zu einem Ziel zu finden.
- 2** Neuronale Modelle der Umwelt scheinen auch bei komplexeren geistigen Funktionen wie Gedächtnis, Vorstellungskraft, logischem Schließen und abstraktem Denken eine zentrale Rolle zu spielen.
- 3** Laut neuen Erkenntnissen bilden mentale Karten sogar die Dynamik zwischenmenschlicher Beziehungen ab. Als Koordinaten dienen dabei unter anderem die soziale Distanz und die hierarchische Position.

Vom Konkreten zum Abstrakten

Mentale Karten bringen Unmengen sensorischer und kognitiver Daten in ein geeignetes Format zur Navigation in der Umwelt, wodurch Abkürzungen und Umgehungen ersichtlich sind, die schneller zum Ziel führen. Aber sie eignen sich nicht nur zur Orientierung in Raum und Zeit, sondern auch zur Darstellung von Informationen auf höheren Abstraktionsebenen: von der Begegnung mit einem Bekannten unterwegs bis zum Umgang mit anderen Menschen im komplexen sozialen Raum, der durch Machtverhältnisse und persönliche Verbundenheit charakterisiert ist.

JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2020



Dabei treten weitere Neuronentypen auf den Plan. Einer davon repräsentiert lohnende Ziele in der Umgebung und liefert so ein Leitsignal für die Navigation (man denke an das Kreuz, das den Schatz auf einer Piratenkarte markiert). Andere Zellen registrieren Geschwindigkeit und Richtung. Damit wirken sie quasi als Tachometer und Kompass, die gemeinsam anzeigen, wie das Tier auf seinem Weg zum Ziel vorankommt. Noch andere Neurone repräsentieren besonders markante Orte, die als Referenzpunkte dienen, um Abweichungen von der Route zu erkennen und zu korrigieren. Nicht zuletzt hat eine Karte auch Begrenzungen. Deshalb gibt es Zellen, die öfter feuern, wenn sich das Tier diesen Rändern nähert.

Beim Menschen ist die Bedeutung solcher kartografischen Informationen offensichtlich: Unser Gehirn muss die Lage von Wohnung und Arbeitsplatz, von Straßen und Sackgassen, von Lieblingsgeschäften und dem Laden an der Ecke kennen. Zwar ist immer noch unklar, wie es all die neuronal codierten Daten zu einer kohärenten Karte zusammenfügt, doch die genannten Zelltypen liefern zumindest das Rohmaterial dafür.

Das hippocampal-entorhinale System leistet indes mehr als reine Kartografie, und seine Karten sind mehr als nur Mittel zur Orientierung im Raum – sie dienen auch zum aktiven Planen von Handlungen. Wenn eine Ratte in einem ihr vertrauten Labyrinth an eine Wegkreuzung kommt, hält sie inne. Die Ortszellen in ihrem Gehirn geben dann Salven ab, welche die Optionen repräsentieren, die sich beim Abbiegen nach rechts oder links ergeben – ganz, als denke das Tier über die anstehende Entscheidung nach.

Ähnliches geschieht im menschlichen Gehirn. In einer Studie navigierten Probanden in einer virtuellen Umwelt, während ein Scanner ihr Gehirn mittels funktioneller Magnetresonanztomografie durchleuchtete. Der Hippocampus zeigte dabei Aktivitäten, die zu räumlichem Planen passen,

also beispielsweise zum Austüfteln oder Abwägen von Routen.

Mit Plänen befassen wir uns sogar noch im Schlaf. Dabei laufen im Gehirn Sequenzen von Ortszellaktivitäten ab, die entweder Vergangenes rekapitulieren oder Künftiges simulieren. Ohne die Fähigkeit, bisher unerprobtes Verhalten mental durchzuspielen, müsste der Mensch eine Vielzahl von Möglichkeiten real erkunden, bevor er sich für eine entscheidet. Wir wären also reine Empiriker, die nur auf der Grundlage von Versuch und Irrtum agieren könnten.

Mentale Repräsentation von Zeit

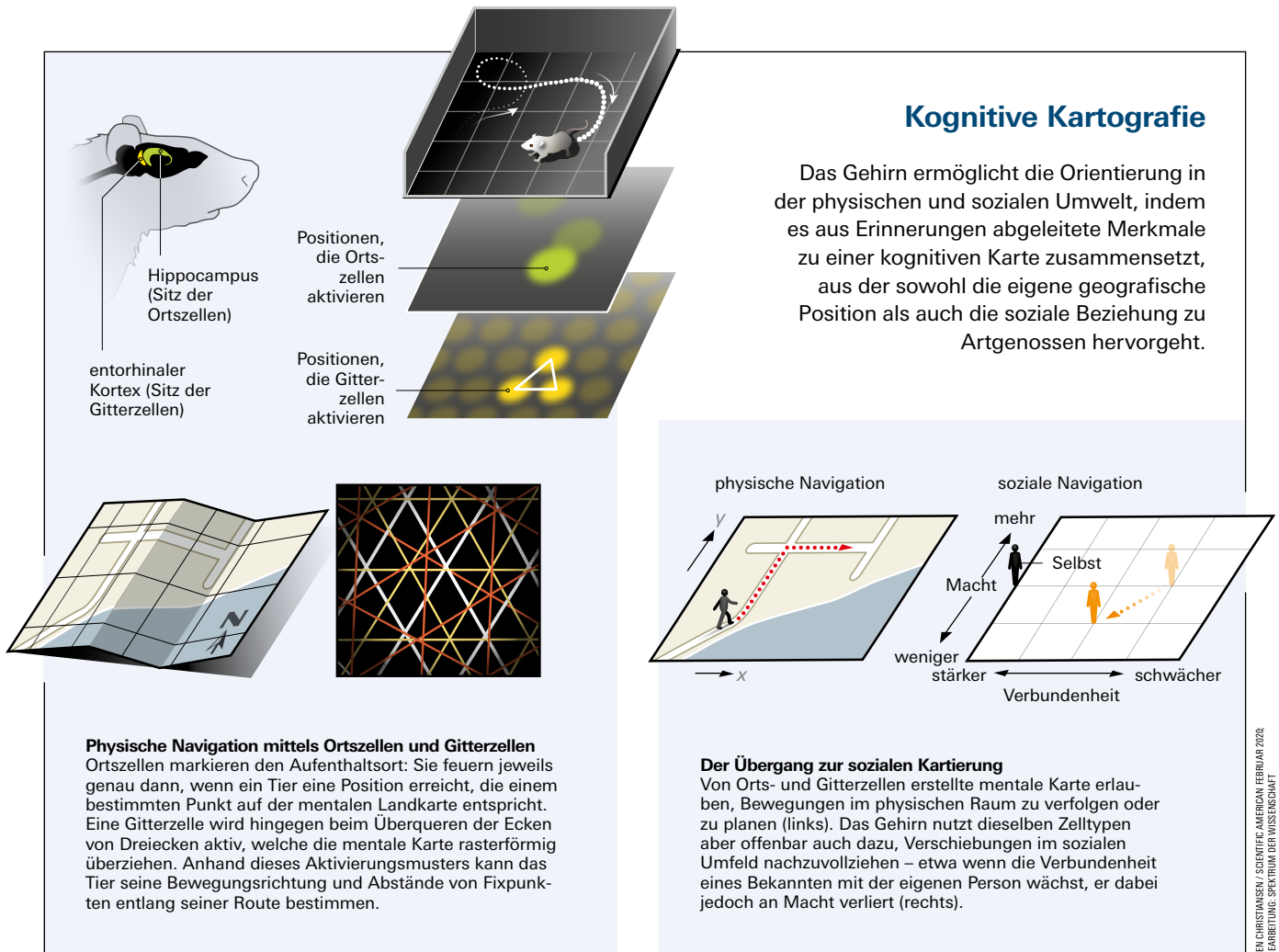
Nun sind Zeit und Raum für uns untrennbar verbunden. Es ist fast unmöglich, über Zeit zu sprechen, ohne räumliche Metaphern zu verwenden: Die Zeit geht vorbei, während wir uns durch sie bewegen. Wir blicken vorwärts in die Zukunft und zurück in die Vergangenheit. Von daher überrascht es nicht, dass das hippocampal-entorhinale System auch Bewegungen durch die Zeit verfolgt. Tatsächlich ließen sich bei Untersuchungen, die größtenteils im Labor von Howard Eichenbaum (1947–2017) an der Boston University durchgeführt wurden, Neurone im hippocampal-entorhinalen System ausmachen, die den zeitlichen Verlauf der Erlebnisse eines Tiers codieren.

Solche Zeitzellen feuern in aufeinander folgenden Momenten, verfolgen die Zeit allerdings nicht linear wie eine Uhr. Stattdessen markieren sie den zeitlichen Kontext: Zum Beispiel verlängern oder verkürzen sich ihre Salven, wenn sich die Dauer einer Aufgabe ändert. Einige codieren gleichzeitig auch räumliche Informationen. Anscheinend sind Angaben zu Raum und Zeit im Gehirn also eng miteinander verquickt.

Und noch für eine andere geistige Fähigkeit ist der Hippocampus zuständig, was sogar schon wesentlich früher entdeckt worden war. 1953 entfernten Neurochirur-

Kognitive Kartografie

Das Gehirn ermöglicht die Orientierung in der physischen und sozialen Umwelt, indem es aus Erinnerungen abgeleitete Merkmale zu einer kognitiven Karte zusammensetzt, aus der sowohl die eigene geografische Position als auch die soziale Beziehung zu Artgenossen hervorgeht.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2012
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

gen bei dem Amerikaner Henry Molaison einen großen Teil dieser Hirnregion, um wiederkehrende lebensbedrohliche epileptische Anfälle zu unterbinden. Damit hatten sie zwar Erfolg, doch eine unerwünschte Nebenwirkung machte den Patienten, der jahrzehntelang in der wissenschaftlichen Literatur nur unter seinen Initialen H. M. bekannt war, zu einem der berühmtesten Fälle in der Geschichte der Hirnforschung.

Molaison war nämlich nach der Operation praktisch nicht mehr fähig, sich neue Dinge zu merken, obwohl er sich weiterhin an die meisten seiner Erfahrungen und Erlebnisse aus der Zeit davor erinnern konnte – an Menschen, die er kannte, oder an Ereignisse aus Kultur und Politik. Nur bestimmte Arten von Lernen blieben unangestastet. So konnte der Amerikaner mit genügend Übung immer noch gewisse manuelle Fertigkeiten erwerben. Erinnerungen an Menschen, denen er zum ersten Mal begegnete, oder an neue Fakten und Ereignisse gingen dagegen gleich wieder verloren.

Anhand von Molaisons Krankengeschichte erkannten Neurowissenschaftler, dass der Hippocampus für die Bildung »episodischer Erinnerungen« entscheidend ist – also für Gedächtnisinhalte, die Fakten und vergangene Ereignisse betreffen. In der Folge explodierte die Forschung über die Bedeutung dieser Hirnregion für die Merkfähigkeit

geradezu – weitgehend parallel zu den Studien über seine Funktion bei der Kartierung von Raum und Zeit.

Die Entdeckungen zur Rolle des Hippocampus und des entorhinalen Kortex bei der räumlichen Navigation und beim episodischen Gedächtnis führten zu mindestens zwei wichtigen Erkenntnissen. So ließ sich durch die Arbeiten zur Wegfindung bei Nagetieren erstmals eine kognitive Funktion höherer Komplexität – jenseits elementarer sensorischer Prozesse – bestimmten neuroanatomischen Strukturen zuordnen. H. M. dagegen machte klar, dass es mehrere Arten von Gedächtnis gibt, an denen zumindest teilweise unterschiedliche neuronale Systeme mitwirken. Unter ihnen spielt der Hippocampus offenbar eine zentrale Rolle beim Bilden und Speichern neuer episodischer Erinnerungen.

Wenn nun all die genannten geistigen Fähigkeiten mit ein und derselben Hirnregion in Verbindung stehen, dann sollten ihnen – so der nahe liegende Schluss – auch dieselben neuronalen Mechanismen zu Grunde liegen. Am besten lässt sich das durch jene Hypothese erklären, die einst Tolman bereits für die räumliche Navigation formuliert hatte. Demnach könnte das episodische Gedächtnis ebenfalls auf kognitiven Karten im Gehirn beruhen.

Solche Karten sind freilich keine originalgetreuen Abbilder der Welt in ihrer vollen Komplexität. Vielmehr repräsentieren sie Beziehungen: Entfernungen und Routen zwischen

definierten Orten sowie Angaben dazu, was sich wo befindet. Karten reduzieren die Schwundel erregende Menge an Informationen aus der realen Welt auf ein vereinfachtes, leicht lesbares Format, das für eine effektive, flexible Navigation nutzbar ist. Die oben erwähnten Zelltypen (Orts-, Gitter- und Randzellen) setzen die räumlichen Beziehungen von Objekten zu einer mentalen Karte zusammen. Andere Hirnregionen können diese für Navigationszwecke auslesen und zur adaptiven Entscheidungsfindung nutzen. Ein solche Kartierung erlaubt es, Zusammenhänge zu erkennen, die nicht unmittelbar erlebt wurden. Sie ermöglicht im Prinzip aber auch mentale Verknüpfungen, die über die räumlich-zeitliche Dimension hinausgehen. Tatsächlich könnte das Denken in abstrakten Kategorien auf denselben neuronalen Grundlagen beruhen.

Dafür sprechen beispielsweise vor fünf Jahren durchgeführte Untersuchungen von Alexandra Constantinescu, Jill O'Reilly und Timothy Behrens, damals alle an der University of Oxford. Sie baten Versuchsteilnehmer, sich die Zuordnung verschiedener Symbole zu Strichzeichnungen von Vögeln mit unterschiedlichen Hals- und Beinlängen zu merken. Ein Vogel mit langem Hals und kurzen Beinen etwa gehörte zu dem Bild einer Glocke, einer mit kurzem Hals und langen Beinen dagegen zu einem Teddybär. Diese Verknüpfungen bildeten einen zweidimensionalen Assoziationsraum.

Obwohl das Auflösungsvermögen neurobiologischer Bildgebungsverfahren nicht ausreicht, um einzelne Gitterzellen im menschlichen Gehirn darzustellen, zeigten die Aufnahmen während des Abfragens der gelernten Zuordnungen ein gitterartiges Erregungsmuster im entorhinalen Kortex. In derselben Hirnregion hatten Christian Doeller am Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig und Neil Burgess am University College London bei Probanden, die sich in einem virtuellen Labyrinth bewegten, zuvor ebenfalls schon rasterförmig angeordnete neuronale Aktivitäten gefunden.

Gitterartig organisierte Darstellung von Beziehungen

In der Tat ist eine gitterartig organisierte Darstellung für jegliche Art von Beziehungen – seien sie physisch oder abstrakt – bestens geeignet. Durch die effiziente Verknüpfung von topografischen Daten oder geistigen Inhalten macht sie diese leicht und schnell für weitergehende Schlüsse und Überlegungen zugänglich. Und wie im physischen Raum ermöglicht eine solche Architektur auch im gedanklichen Bereich Abkürzungen, etwa in Form von Assoziationen, Analogien oder Verallgemeinerungen. Damit bildet sie vermutlich sogar den Grundstein der menschlichen Kreativität.

Was für topografische Bezüge und abstrakte Zusammenhänge gilt, sollte ebenso auf die Art und Weise zutreffen, wie das Gehirn soziale Beziehungen repräsentiert. Aus dem Grund gehen seit einiger Zeit Forscher der Frage nach, ob der Mensch mentale Karten konstruiert, welche die Nähe von Beziehungen innerhalb einer Gruppe und die Positionen ihrer Mitglieder in der sozialen Hierarchie anzeigen (siehe »Vom Konkreten zum Abstrakten«). Wie sich

dabei zeigte, führt unser Gehirn tatsächlich auf diese Weise verschiedenartige Informationen über eine Person zu einem mentalen Gesamtbild zusammen. Ob wir die Fotografie eines Menschen sehen oder seinen Namen hören oder lesen, stets feuern dieselben Hippocampuszellen, unabhängig von der Art des sensorischen Inputs. Ihr Aktivierungsmuster repräsentiert gewissermaßen den neuronalen Steckbrief eines Individuums.

Außerdem gibt es bei Säugetieren soziale Ortszellen, die nachverfolgen, wo in der physischen Welt sich andere Individuen befinden. Den Nachweis dafür erbrachten unter anderem David Omer von der Hebräischen Universität Jerusalem und Nachum Ulanovsky vom Weizmann-Institut in Rehovot. Sie führten gemeinsam mit Kollegen ein Experiment durch, bei dem Fledermäuse einen Artgenossen beobachteten, der einen Weg durch ein Labyrinth nahm, auf dem er zu einem Leckerbissen gelangte. Dabei prägten sie sich dessen Flugbahn ein und folgten anschließend derselben Route, um ebenfalls eine Belohnung zu erhalten. Tatsächlich feuerten, wie Hirnscans zeigten, im zuschauenden Tier die Hippocampuszellen entsprechend der Position der anderen Fledermaus.



FOTOLIA / KIKERNAIZ

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Weitere Versuche ergaben, dass neuronale Schaltkreise in bestimmten Teilregionen des Hippocampus (insbesondere in den Bereichen CA1 und CA2) zu sozialen Erinnerungen beitragen. So beeinflusst die künstliche Stimulation oder Hemmung dieser Regionen die Fähigkeit eines Tiers, andere Individuen zu erkennen. Beim Menschen lassen Schädigungen des Hippocampus das Gedächtnis für individuelle Gesichter oft intakt, doch die Beziehung zwischen diesem wichtigsten Identifikationsmerkmal einer Person und ihrem zwischenmenschlichen Verhalten kann verloren gehen. Demnach scheint der Hippocampus nicht einfach nur ein Gesicht oder andere körperliche Merkmale einer Person zu speichern, sondern in deren »Steckbrief« zusätzlich die sozialen Eigenschaften einzubinden.

In dem Zusammenhang berücksichtigt er auch Hierarchien: Die Ansprüche des Chefs oder eines Mitarbeiters beispielsweise werden ungleich bewertet, weil die beiden einen unterschiedlichen beruflichen Status haben. Gebräuchliche Metaphern illustrieren die quasi räumlichen Dimensionen der Hierarchie: Eine Person versucht, die soziale Leiter hinaufzuklettern oder sie schaut auf jemanden von oben herab. Andere Faktoren wie die biologische Verwandtschaft, gemeinsame Ziele der eigenen Gruppe, die erinnerte Geschichte von Gefälligkeiten und Zurückweisungen bestimmen dagegen die gefühlsmäßige Nähe oder

Distanz. Menschliche Beziehungen lassen sich somit als geometrische Koordinaten im sozialen Raum auffassen, der durch die Dimensionen hierarchische Stellung und Grad der persönlichen Verbundenheit definiert ist.

In unserem Arbeitskreis haben wir uns in den letzten Jahren gezielt mit diesen Ideen beschäftigt. Wir wollten herausfinden, ob der Hippocampus soziale Beziehungen tatsächlich ebenso wie räumliche Koordinaten in einem kartenähnlichen Format organisiert. Dazu ließen wir bei einem Experiment Probanden in einem virtuellen Rollenspiel mit Zeichentrickfiguren interagieren und Entscheidungen treffen, während ein Scanner ihre Gehirnaktivität aufzeichnete.

Die Spieler waren – so die Ausgangssituation – gerade in eine neue Stadt umgezogen und mussten dort mit den Comicfiguren verhandeln, um sich einen Arbeitsplatz und eine Wohnung zu beschaffen. Dabei entschieden sie eigenständig über die Art, den fiktiven Ansprechpartnern gegenüberzutreten. Sie konnten selbstbewusst Forderungen an sie richten, als stünden sie höher auf der sozialen Leiter, oder sich unterwürfig nach deren Wünschen richten. Anschließend durften sie außerdem entscheiden, ob sie mit einer freundschaftlichen Geste ihre Verbundenheit mit dem virtuellen Gegenüber zum Ausdruck bringen oder lieber kühle Distanz wahren wollten.

Virtuelle Interaktion mit Comicfiguren

Anhand dieser Entscheidungen ordneten wir den Comicfiguren Koordinaten auf einer Karte zu, die ihre Position entlang der Dimensionen Status und Verbundenheit darstellte. Bei nachfolgenden Begegnungen konnten die Teilnehmer je nach dem Ergebnis der vorangegangenen Interaktionen ihre Entscheidungen und ihr Verhalten anpassen. Jedes Mal zeichneten wir dabei eine Verbindungslinie (genauer: einen Vektor) vom Probanden zur fiktiven Figur. Auf diese Weise stellten wir die sich im Spielverlauf entwickelnden Beziehungen als Pfade im sozialen Raum dar und ermittelten die Winkel und Längen der zugehörigen Vektoren.

Dann suchten wir nach neuronalen Signalen, die diese Informationen repräsentierten, indem wir die Hirnaktivität der einzelnen Probanden mit den errechneten Vektoren für jede Entscheidung verglichen. Tatsächlich spiegelte das Muster, in dem bestimmte Neurone im Hippocampus feuerten, die Orientierung der jeweiligen Verbindungslinie wider. Außerdem entsprach das Ausmaß, in dem die Hirnaktivität die Verschiebungen der Vektoren während des Spiels nachzeichnete, den eigenen Angaben der Probanden zu ihren sozialen Fähigkeiten.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass der Hippocampus die Dynamik zwischenmenschlicher Beziehungen in derselben Weise abbildet wie einfache Bewegungsabläufe, indem er die Relationen zwischen Punkten im mehrdimensionalen Raum codiert. Das hippocampal-entorhinale System scheint also bei jeder beliebigen Dimension, in der wir Informationen ordnen können, gleich ob physisch oder abstrakt, eine zentrale Rolle zu spielen.

Etlche Aspekte der mentalen Kartierung von sozialen Koordinaten sind freilich noch ungeklärt – zum Beispiel wie

dieses System mit anderen Hirnregionen interagiert. In unserer Rollenspielstudie fanden wir etwa heraus, dass der hintere posteriore cinguläre Kortex – eine Region der Hirnrinde, die ebenfalls an der Repräsentation von räumlichen Informationen beteiligt ist – die Länge des sozialen Vektors aufzeichnet, also die »soziale Distanz« misst. Außerdem fand sich ein gitterförmiges Signalmuster in Hirnregionen, die mit dem hippocampal-entorhinalen System verbunden sind und vielfach zusammen mit ihm aktiv werden. Offenbar handelt es sich um ein Netzwerk von Hirnregionen mit gemeinsamer Funktionalität.

In dem Maß, wie die Erforschung dieser Systeme voranschreitet, stellt sich auch die Fragen nach der medizinischen Bedeutung – etwa ob fehlerhafte Kartierungsprozesse für psychische Störungen verantwortlich sein könnten. Zudem lassen sich die aus der Gehirnarchitektur gewonnenen Erkenntnisse womöglich im Bereich der künstlichen Intelligenz nutzbringend anwenden. Sinnvoll organisierte interne Modelle der Umwelt sind vielleicht der Schlüssel zum Entwurf immer klügerer Maschinen.

Wenn ein und dasselbe neuronale System der Navigation durch Raum und Zeit, dem logischen Denken, dem Gedächtnis, der Vorstellungskraft und sogar der sozialen Dynamik zu Grunde liegt, erscheint die Fähigkeit des Menschen, geistige Modelle der Welt zu konstruieren, als entscheidend für die enorme Anpassungsfähigkeit unserer Spezies. Überall und jederzeit haben wir es mit physischen und abstrakten Zusammenhängen zu tun. Straßenpläne und mentale Karten von geistigen Dingen helfen uns, die Welt zu verstehen, indem wir zusammenhängende Informationen extrahieren, organisieren und speichern. Ein frisch eröffnetes Café in einer bekannten Straße lässt sich ganz einfach in die bestehende Karte unseres Heimatorts einfügen. Innovative Ideen werden mit älteren in Beziehung gesetzt. Und eine neue Bekanntschaft kann unseren sozialen Raum umgestalten.

Generell ermöglichen es uns Karten, Optionen zu simulieren und Vorhersagen zu treffen, ohne sie in der Realität erproben zu müssen. Und so helfen sie uns nicht nur, Abkürzungen im physischen Raum ausfindig zu machen, sondern ganz allgemein, uns im Leben mit seinen vielfältigen Anforderungen zurechtzufinden. ◀

QUELLEN

Omer, D.B. et al.: Social Place-Cells in the Bat Hippocampus. *Science* 359, 2018

Schafer, M., Schiller, D.: Navigating Social Space. *Neuron* 100, 2018

Behrens, T.E.J. et al.: What is a cognitive map? Organizing knowledge for flexible behavior. *Neuron* 100, 2018

Bellmund, J.L.S. et al.: Navigating cognition: Spatial codes for human thinking. *Science* 362, eaat6766, 2018

LITERATURTIPP

Moser, M.-B. Moser, E.I.: Das GPS im Gehirn. *Spektrum der Wissenschaft* 10/2016, S. 12

Bericht der beiden Nobelpreisträger über die Entdeckung der Orts- und Gitterzellen



FRANZISCHÄDEL, FLORIAN FREISTETTER: DE PRESSE // CC BY-SA 4.0 / CREATIVE COMMONS ORG.U/US/ES/BY/SA/4.0/LEGALCODE

FREISTETTERS FORMELWELT DIE LEGOSTEIN- WISSENSCHAFT

**Manchmal stößt man in einfachem Spielzeug
auf höchst komplexe Mathematik.**

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

» spektrum.de/artikel/1807508

Zu den allerersten Spielsachen, mit denen sich Kleinkinder beschäftigen, gehören Bausteine. Sie sind simpel genug, um sie ohne große motorische Fähigkeiten nutzen zu können – und bieten zugleich Raum für jede Menge kreative Gestaltung. Darüber hinaus demonstrieren sie ein wichtiges Prinzip der Wissenschaft, dem zufolge sich komplexe Systeme aus einfachen Bausteinen zusammensetzen. Das kann man in der Natur an Atomen, Molekülen oder Genen beobachten – und ebenso in noch abstrakterer Form: Aus den natürlichen Zahlen und ein paar simplen Rechenoperationen lässt sich das gesamte Gebäude der Mathematik konstruieren.

Es ist daher nicht überraschend, dass auch die spielerischen Bausteine selbst in der mathematischen Forschung auftauchen. Zum Beispiel in dieser Formel, die mit einem der größten Spielzeughersteller der Welt zu tun hat:

$$t_n = 2^{n-1} + \frac{1}{2} (46^{n-1} - 2^{n-1})$$

Es geht um die Frage, wie viele Objekte man aus n identischen Legosteinen bilden kann. Seit 1974 gibt Lego 102981500 als Anzahl der möglichen Konstruktionen an, die sich aus sechs 2×4 -Steinen bauen lassen. Berechnet hat sie damals Jørgen Kirk Kristiansen, ein Enkel des Firmengründers. Die Zahl entspricht einer Untergrenze der Kombinationen; doch in der Werbung des Konzerns wurde daraus der exakte Wert aller Möglichkeiten. Man begegnet der Zahl auch heute noch, wenn es um die kreative Vielfalt des Spiels geht.

Kristiansen berücksichtigte dabei nur Objekte, die aus sechs übereinandergestapelten Steinen bestehen, nicht jedoch die zusätzlichen Möglichkeiten, bei denen niedrigere Strukturen entstehen. Zieht man diese ebenfalls in Betracht, ergeben sich 915103765 Variationen, wie dänische Mathematiker 2005 herausfanden.

Søren Eilers von der Universität Kopenhagen hat sich 2016 der Sache noch einmal angenommen und unter anderem die Formel links für die Stapelung der Bausteine abgeleitet. Wenn man von nur zwei 2×4 -Steinen ausgeht, gibt es 46 Arten, sie aufeinanderzusetzen. Allerdings entstehen dabei keine 46 verschiedenen Gebilde. Lediglich zwei unterscheiden sich unter jedem Blickwinkel eindeutig von allen anderen. Die übrigen 44 Konstruktionen sind paarweise symmetrisch, das heißt, man kann sie durch eine Drehung in eine jeweils andere überführen. Wenn man solche Objekte, die sich durch Rotation ineinander umwandeln lassen, als gleich ansieht, kommt man auf 24 unterschiedliche Konstruktionsmöglichkeiten.

Das Ergebnis dient als Grundlage für die angegebene Formel: Fixiert man einen Stein als Basis, hat man 46^{n-1} Möglichkeiten, die restlichen Klötze übereinander zu platzieren. 2^{n-1} davon unterscheiden sich von allen anderen, der Rest $(46^{n-1} - 2^{n-1})$ gruppiert sich in Paaren. Für sechs Steine kommt man auf 102981504 Kombinationen, was bis auf einen Rundungsfehler mit dem Wert von Lego übereinstimmt.

Damit hat man sich allerdings ausschließlich auf gestapelte Strukturen beschränkt. Die volle Bandbreite an Möglichkeiten haben Eilers und seine Kollegen mit einem Computer berechnet. Die 2016 erschienene Arbeit von Eilers mit dem Titel »The LEGO Counting Problem« ist ohne fortgeschrittene Mathematik-Kenntnisse leider kaum verständlich.

Doch glücklicherweise braucht man diese nicht, um Spaß am Spiel zu haben. Genau das ist ja das Schöne: Simple Bausteine stecken voller Potenzial, das Kleinkinder ebenso wie ausgewachsene Mathematiker begeistern kann. Und was gibt es Besseres, als die aus einfachen Regeln entstehende Komplexität der Natur in Spiel und Forschung nachzuvollziehen? Ich jedenfalls werde mich nun zu ein paar »Berechnungen« zurückziehen.

WELTRAUMMEDIZIN »DER GRENZWERT WIRD DEUTLICH ÜBERSCHRITTEN«

Wenn Menschen ins All fliegen, bekommen sie dort energiereiche Strahlung ab. Die Strahlenbiologin Christine Hellweg erklärt, was das für Folgen haben kann – und wo diesbezüglich noch große Wissenslücken klaffen.

► spektrum.de/artikel/1807460

Die Strahlung im Weltall ist großteils ionisierend, erzeugt also Ionen, wenn sie auf Materie trifft. Das macht sie sehr gesundheitsschädlich. Bei langen Weltraummissionen, etwa zum Mars, kann das für die Besatzung zum Problem werden. Christine Elisabeth Hellweg leitet die Abteilung Strahlenbiologie am Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Im Interview spricht sie über Weltraumstrahlung, damit verbundene medizinische Risiken und Strahlenschutz.

Spektrum: Frau Hellweg, wie ungesund ist es, ins Weltall zu fliegen?

Hellweg: Wir wissen, dass die vermehrte Strahlenbelastung eine Trübung der Augenlinse verursachen kann. Außerdem dürfte sie das Risiko erhöhen, später an Krebs zu erkranken. Versuche mit Nagetieren, die in den USA durchgeführt wurden, legen noch eine weitere mögliche Spätfolge nahe: Bei ihnen bewirken die energiereichen schweren Atomkerne, die im Weltraum umherschwirren, Schäden im Gehirn. Astronauten könnten dadurch bleibende kognitive Einschränkungen davontragen, was bei den bisherigen Bewohnern der Internationalen Raumstation ISS glücklicherweise nicht aufgetreten ist. Generell fehlt es an Langzeituntersuchungen hinsichtlich der gesundheitlichen Folgen von Weltraumreisen.

Wie hoch ist die Strahlendosis bei einem mehrmonatigen Aufenthalt auf der ISS?

Das hängt unter anderem von der Flughöhe der ISS ab – sie schwankt zwischen 320 und 430 Kilometern – und der Sonnenaktivität. Interessanterweise kann sich die Strahlenbelastung sogar innerhalb der Raumstation teils um bis zu

Christine Elisabeth Hellweg

Die studierte Veterinärmedizinerin leitet die Abteilung Strahlenbiologie am Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Bei ihren Forschungen interessiert sie sich besonders dafür, wie Säugerzellen auf schädliche Umwelteinflüsse reagieren und welche Rolle dabei der molekulare Stoffwechsel, die Signalübertragung, die Genexpression und DNA-Reparatur sowie der programmierte Zelltod spielen.



MELANIE HABERKORN

50 Prozent unterscheiden, je nachdem, wie viel Abschirmung sich zwischen den Astronauten und dem umgebenden Weltall befindet.

Eine gebräuchliche Maßeinheit, um das Gesundheitsrisiko ionisierender Strahlen abzuschätzen, ist das Sievert. Es dient als Einheit der Äquivalent- und der effektiven Dosis, in denen die biologische Wirksamkeit der jeweiligen Strahlenart berücksichtigt ist (siehe »Zerstörung im Gewebe – Wie Strahlen wirken«). Wie viel Sievert bekommt ein ISS-Astronaut ab?

Im Mai 2016 betrug die tägliche Dosis auf der Raumstation 0,647 Millisievert. Das zeigen Messungen, die wir durchgeführt haben. Bei einer sechsmonatigen Mission summiert sich das auf ungefähr 120 Millisievert. Im Durchschnitt liegt die empfangene Strahlungsdosis auf der ISS rund 250-mal höher als während eines gleichlangen Aufenthalts in Köln.

Ist das bereits bedenklich für die Gesundheit?

Der Grenzwert für beruflich exponierte Personen, etwa den Mitarbeitern von Kernkraftwerken, liegt bei 20 Millisievert pro Jahr. Er wird auf der ISS also deutlich überschritten. Rein rechnerisch erhöht sich das Krebsrisiko bei einer ISS-Mission um bis zu zwei Prozentpunkte. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass ehemalige US-Astronauten der Space Shuttle-Missionen sowie der ersten ISS-Missionen seltener Krebs bekommen als Menschen aus der Normalbevölkerung.

Wie kann das sein?

Die Astronauten durchlaufen ein strenges Auswahlprogramm und erfreuen sich einer überdurchschnittlich guten Gesundheit, wenn sie ins All starten. Im Vergleich zu ihren Kollegen, die am Space Center am Boden arbeiten, sind bei ihnen zwar etwas mehr Krebserkrankungen aufgetreten. Die Häufung ist jedoch statistisch nicht signifikant und somit nur bedingt aussagekräftig. Um belastbare Aussagen zu treffen, bräuchte man viel mehr Astronauten.

Sie und Ihr Team versuchen, die Strahlengefahr im Weltall besser abzuschätzen. Wie gehen Sie dabei vor?

Zum einen ermitteln wir, wie sich die Weltraumstrahlung zusammensetzt und wie intensiv sie auf Astronauten einwirkt. Zum anderen untersuchen wir Strahleneffekte auf Zellen und Organe. Über die Strahlung an sich wissen wir schon recht genau Bescheid, unter anderem deshalb, weil es mittlerweile sehr gute Dosimeter gibt, also Messgeräte, mit denen sich die Dosis bestimmen lässt. Wir selbst entwickeln im Auftrag der europäischen Weltraumorganisation ESA solche Geräte für die europäischen ISS-Astronauten. Die Raumfahrer tragen diese dann während ihrer Mission in der Hosentasche oder am Gürtel.

Wie funktioniert so ein Dosimeter?

Kleine Kristalle darin nehmen die Energie eintreffender Strahlungsteilchen auf und speichern sie. Wenn wir die Kristalle nach der Mission erhitzen, geben sie Licht ab – in

AUF EINEN BLICK HIMMELFAHRTSKOMMANDO

- 1** Wenn Astronauten in den Weltraum fliegen, sind sie dort gesundheitsschädlicher Strahlung ausgesetzt.
- 2** Bei größeren Expeditionen, etwa zum Mars, wird die Strahlenbelastung inakzeptabel hoch, sofern es nicht gelingt, die Reisedauer zu minimieren.
- 3** Weltraumstrahlung lässt sich nur bedingt abschirmen. Immerhin könnte man einzelne Sektoren eines Raumschiffs, etwa den Schlafbereich, besser schützen als andere.

einer Menge, die proportional zur aufgenommenen Strahlungsenergie ist. So lässt sich die Dosis abschätzen.

Damit wissen Sie allerdings noch nicht, wie schädlich die Strahlung für den menschlichen Körper ist.

Richtig. Um die Wirkung auf biologisches Gewebe zu bewerten, müssen wir wissen, mit welcher Strahlenart wir es jeweils zu tun haben. Das Strahlenfeld im Weltall ist komplex. Es handelt sich um diverse Teilchen mit enorm unterschiedlichen Energien – von Wasserstoff- über Eisen- bis hin zu Uranionen. Sie bewegen sich äußerst schnell und bergen auf Grund ihrer stark voneinander abweichenden Eigenschaften sehr unterschiedliche Gesundheitsrisiken.

Woher kommen diese Teilchen eigentlich?

Teils von der Sonne, teils von außerhalb unseres Sonnensystems – in letzterem Fall wahrscheinlich von explodierenden Sternen. Art und Energie der Teilchen lassen sich im Dosimeter mit speziellen Plastikfolien ermitteln. Die Strahlungspartikel hinterlassen im Molekülgitter der Folien kleine Schäden, die charakteristisch für die jeweilige Teilchenart sind und sich somit genau zuordnen lassen.

Und aus dem Teilchenmix folgt dann, wie gesundheitsschädlich die Strahlung ist?

Mit den Informationen darüber, wie sich die Strahlung zusammensetzt, und mit so genannten Qualitäts- oder Wichtungsfaktoren für jede Strahlenart können wir den gesundheitlichen Effekt recht gut abschätzen. Konkret: Wir rechnen die Energiedosis, die wir mit dem Dosimeter gemessen haben, in eine Äquivalentdosis um. Die Wichtungsfaktoren, die wir dabei nutzen, berücksichtigen beispielsweise, dass ein energiereiches Eisenion mehr Schaden im Gewebe anrichtet als ein Röntgenphoton. Sie sind aber natürlich mit Unsicherheiten behaftet.

Und dann müssen Sie noch die Strahlungsdosen bestimmen, die einzelne Organe abbekommen.

Hier kommt eine menschenähnliche Puppe ins Spiel, die meine Abteilung für den Einsatz auf der ISS entworfen

hat. Wir nennen sie Matroschka. Spezielle Kunststoffe im Innern dieses Phantoms ahmen das Absorptionsverhalten menschlicher Gewebe und Organe nach, und Sensoren zeichnen die Strahlendosen in unterschiedlichen Körperregionen auf. Aus den Organdosen haben wir die biologisch gewichtete Gesamtdosis, die so genannte effektive Dosis, für den menschlichen Körper berechnet und in Bezug gesetzt zur Dosis an der Körperoberfläche. Mit Hilfe dieser Zusammenhänge können wir aus den Messwerten der Astronauten-Dosimeter letztlich die persönliche effektive Dosis in Sievert bestimmen, die ein einzelner Raumfahrer auf einer Mission abbekommen hat. Daraus lässt sich weiter ableiten, wie das strahlungsbedingte Risiko für Krebs, Erkrankungen des Herzkreislauf-Systems sowie des Nervensystems steigt. Auch auf geplanten Orion-Flügen zum Mond werden Phantome wie Matroschka an Bord sein, darunter erstmals welche, die den weiblichen Körper nachbilden. Die erste derartige unbemannte Mission soll noch im Jahr 2021 stattfinden. Hinterher werden wir mehr wissen über die Strahlenbelastung außerhalb des schützenden Erdmagnetfelds.

Wir haben bisher von der Strahlenbelastung auf der ISS gesprochen. Bei weiterführenden Missionen, etwa zum Mars, wird das Problem aber deutlich größer sein, weil die Raumfahrzeuge die Magnetosphäre der Erde verlassen müssen.

Richtig. Auf der ISS beträgt die Strahlenbelastung nur rund ein Drittel derjenigen weiter draußen im All. Hinzu kommt, dass eine Mission zum Mars bis zu drei Jahre dauern dürfte, viel länger als ein typischer Aufenthalt auf der ISS.

Welche Folgen hätte das auf die Gesundheit der Astronauten?

Vermutlich würde das zusätzliche Krebsrisiko um mehr als drei Prozentpunkte ansteigen, also über den Wert klettern, den Weltraumagenturen gerade noch für vertretbar halten. Bei einer Missionsdauer von drei Jahren und einer Abschirmung von vier Gramm Aluminium pro Quadratzentimeter plus einer Wasserschicht von 10 Zentimeter Dicke gehen Modellrechnungen – die mit großen Unsicherheiten behaftet sind – von einem bis zu 4,5 Prozentpunkte höheren Krebsrisiko aus. Die Gefahr ist für Frauen dabei größer als für Männer.

Krank im Weltraum

Astronauten, die sich längere Zeit im All aufhalten, müssen mit diversen Gesundheitsproblemen rechnen. Typisch sind Knochen- und Muskelschwund, ein geschwächtes Immunsystem sowie Leber- und Herzkreislaufkomplikationen. Sie folgen vor allem aus der erhöhten Strahlenbelastung und der fehlenden Schwerkraft, doch wie genau, ist nicht ganz klar.

Ein fachübergreifendes Forscherteam hat herausgefunden, dass all diese Beschwerden etwas gemeinsam haben, nämlich gestörte Abläufe in den Mitochondrien. Mitochondrien sind Zellorganellen mit einer Doppelmembran, die eigene Erbanlagen besitzen. Sie spielen eine zentrale Rolle im Energiestoffwechsel.

Der Biologe William da Silveira von der Queens University Belfast (Nordirland) und seine Kollegen werteten Messdaten von diversen Organismen aus, die Raumflüge absolviert hatten. Dazu zählten vier menschliche Zelllinien, 13 verschiedene Gewebetypen von Menschen

und Nagern, Tiere zweier Mausstämmen und 59 Astronauten. Zugriff darauf bekamen die Forscher unter anderem über die Datenbank »GeneLab« der NASA und die NASA-Zwillingsstudie.

Demnach ändern sich bei einem Weltraumaufenthalt die Aktivitäten etlicher Gene, die am Energiestoffwechsel mitwirken. Davon tangiert ist das Erbgut in den Zellkernen und das in den Mitochondrien, interessanterweise oft gegenläufig: Genaktivitäten in den Kernen sinken, wahrscheinlich verursacht von oxidativem Stress, worauf mitochondriale Gene aktiver werden. Tatsächlich zeigen die betroffenen Zellen typische Stresszeichen; sie produzieren etwa mehr Antioxidantien wie Glutathion. Die veränderten Abläufe in den Mitochondrien, schreiben die Forscher, können das Immunsystem, den Stoffwechsel und den Schlaf-wach-Rhythmus beeinflussen.

Messdaten von Astronauten bestätigen das. Im Blut und im Urin aktiver Raumfahrer finden sich

Biomarker, die oxidativen Stress im Organismus anzeigen, darunter Prostaglandine. Zudem mehren sich Anzeichen für entzündliche Prozesse. In diversen Körpergeweben sowie in Immunzellen sind Effekte auf Mitochondrien nachweisbar.

Von allen Körperorganen reagiert die Leber am stärksten auf einen Weltraumaufenthalt, wie das Team schreibt. In ihr verändern sich Genaktivitäten besonders deutlich. Zudem gerät ihr Lipidstoffwechsel aus dem Gleis, was mit der gestörten Mitochondrienfunktion zusammenhängt sowie mit Muskelschwund und Entzündungen. Dies wiederum kann Herzkreislaufprobleme verschärfen.

Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLE

da Silveira, W.A. et al.: Comprehensive multi-omics analysis reveals mitochondrial stress as a central biological hub for spaceflight impact. Cell 183, 2020

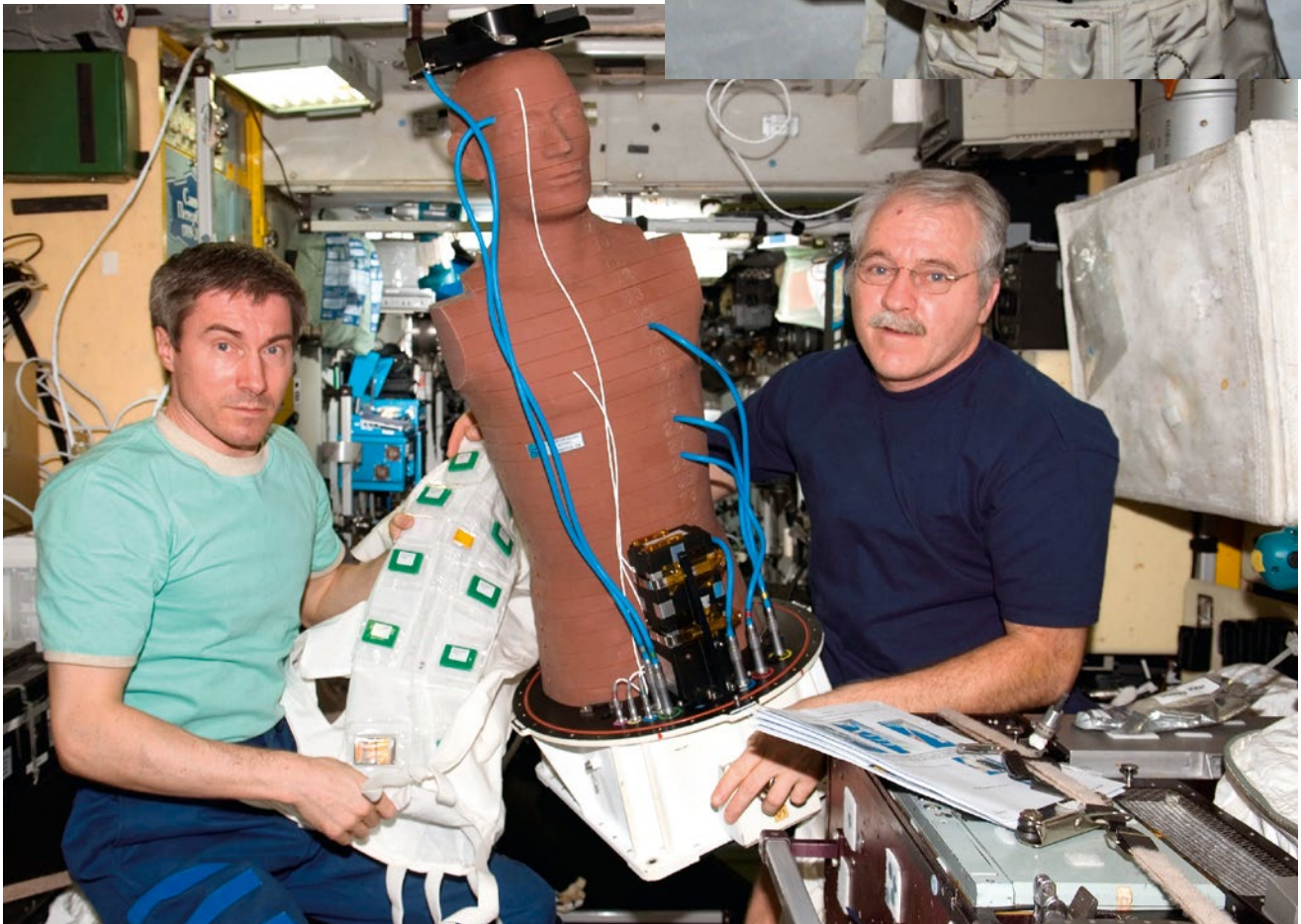
Das hört sich nach ziemlich viel an.

Die Planer von Weltraummissionen stimmen weitgehend überein, dass solche Strahlungsdosen nicht akzeptabel sind. Das heißt jedoch nicht, dass sich entsprechende Missionen nicht durchführen lassen; mit geeigneten Freiwilligen wären sie trotzdem möglich. Für einen einzelnen Marsastronauten ist ein Krebsrisiko zunächst etwas Abstraktes, dessen eventuelle Folge vielleicht gar nicht eintritt. Die Missionsverantwortlichen müssten ihre Freiwilligen natürlich intensiv aufklären. Und sie müssten die Reisedauer so kurz wie möglich halten – das ist der beste Weg, die Strahlungsdosis zu minimieren und das Risiko für Spätfolgen herabzusetzen.

Das US-Raumfahrtunternehmen SpaceX plant eine bemannte Marsmission in den 2020er Jahren. Der Flug soll demnach nur rund fünf Monate dauern. Wäre das aus medizinischer Sicht vertretbar?

Je weniger Zeit im freien Weltraum, umso besser. Bei einer fünfmonatigen Marsmission kommen wir auf eine Strahlen-

PHANTOM IM ALL Der Kosmonaut Sergei Krikaljow (links) und der Astronaut John Phillips posieren auf diesem Bild von 2005 mit einer Phantompuppe (unten). Sie dient dazu, die Strahlenbelastung von Raumfahrern zu messen, und wird hierfür sogar eingekleidet (rechts).



NASA, JOHNSON SPACE CENTER (JSC)

belastung ähnlich der zweier sechsmonatiger ISS-Aufenthalte, genug Abschirmung vorausgesetzt. Hier wäre also eine zentrale Forderung des Strahlenschutzes – die Einwirkzeit so weit wie möglich zu mindern – sehr gut umgesetzt.

Wie kann man denn die großen Unsicherheiten beim Einschätzen von Strahlenrisiken verkleinern?

Für präzise Abschätzungen bräuchten wir die Daten von zehn- bis hunderttausenden Menschen, die der Weltraumstrahlung ausgesetzt waren. Eine solche Datenbasis gibt es nicht und wird es so bald auch nicht geben. Bislang stützen sich Strahlenmediziner stark auf die Erkenntnisse aus den Atombombenabwürfen über Japan im Jahr 1945. Unser Wissen über die Spätfolgen einer Strahleneinwirkung

Zerstörung im Gewebe – Wie Strahlen wirken

Strahlung besteht aus Photonen oder anderen Teilchen, die Energie mit sich führen. Trifft sie auf biologisches Gewebe, kollidieren die Strahlungspartikel mit Biomolekülen und übertragen Energie auf sie. Sind die Stöße hinreichend intensiv, schlagen sie Elektronen aus den Atomhüllen heraus und verwandeln dadurch die Moleküle in Ionen, die sich chemisch aggressiv verhalten und Zerstörungen in ihrer Umgebung anrichten. Die Strahlungsdosis sagt aus, wie stark ionisierende Strahlung auf einen Organismus einwirkt. Sie lässt sich auf verschiedene Weise bestimmen.

Ein häufig verwendetes Maß ist die Energiedosis. Sie gibt an, wie viel Energie die einfallende Strahlung auf das Gewebe überträgt – beispielsweise, indem sie dessen Moleküle ionisiert. Die Einheit der Energiedosis ist das Gray (Gy); es beschreibt die pro Masse absorbierte Energie, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Wie ein Organismus auf ionisierende Strahlen reagiert, hängt aber nicht nur davon ab, wie viel Energie er empfängt, sondern auch in welcher Form und wo. Durchqueren energiereiche Strahlungsteilchen ein Objekt, verwandeln sie hin und wieder eines seiner Atome oder Moleküle in ein Ion. Bei manchen Strahlenarten geschieht das häufiger als bei anderen: Sie lösen pro Wegstrecke mehr Ionisationsvorgänge aus. Alphateilchen (Heliumkerne) sowie Neutronen gehören zu solchen dicht ionisierenden Partikeln und schädigen biologisches Gewebe daher stärker als locker ionisierende Röntgen- oder Gammaphotonen.

Die so genannte Äquivalentdosis dient dazu, diese unterschiedliche biologische Wirksamkeit auszudrücken. Sie ergibt sich durch Multiplizieren der Energiedosis mit einem Wichtungsfaktor, der von der Strahlenart abhängt. Für Alphateilchen beträgt er 20, für Neutronen um die 10, für Röntgenphotonen 1. Ein weiteres Maß ist die effektive Dosis, die nicht nur die Strahlenart berücksichtigt, sondern – über zusätzliche Wichtungsfaktoren – weiterhin die Empfindlichkeit des jeweils betroffenen Organs. Keimdrüsen etwa reagieren sensibler auf eine Bestrahlung als Muskeln. Sowohl die Äquivalent- als auch die effektive Dosis haben die Einheit Sievert (Sv), $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Ionisierende Strahlen können in einem Organismus stochastische und deterministische Schäden anrichten. Für stochastische Strahlenschäden gibt es vermutlich

keine Schwellendosis, das heißt, sie können immer entstehen – egal, wie gering die empfangene Strahlenergie. Mit steigender Dosis wächst zwar die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens, ihr Schweregrad hängt davon jedoch nicht ab. Zu ihnen zählen DNA-Mutationen, die mitunter zu Krebserkrankungen, Erbkrankheiten oder Fehlbildungen beim Embryo führen.

Deterministische Strahlenschäden sind solche, deren Schwere mit der Dosis zunimmt. Zu ihnen gehört die akute Strahlenkrankheit. Je nach empfangener Dosis kann sie höchst unterschiedlich verlaufen, von vorübergehenden Symptomen wie Fieber und Erbrechen bis hin zum raschen Tod. Der Organismus leidet hier unter Zerstörungen im Blut bildenden System, in der Haut, in den Schleimhäuten vor allem des Verdauungstrakts und – bei sehr hoher Strahlenbelastung – auch im Zentralnervensystem. Die so genannte $LD_{50/30}$, also die Dosis, an der 50 Prozent der Verstrahlten binnen 30 Tagen sterben, beträgt für den Menschen rund 4 Gray (bei kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung).


Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum«.

QUELLEN

Bundesamt für Justiz: Strahlenschutzverordnung. www.gesetze-im-internet.de/strlrschv_2018

Bundesamt für Strahlenschutz: Ionisierende Strahlung. www.bfs.de/DE/themen/ion/ion_node.html

Eder, H. et al.: Grundzüge der Strahlenkunde für Naturwissenschaftler und Veterinärmediziner. Parey, Berlin 1986



TÖDLICHE EXPLOSIONEN Sonnen-eruptionen setzen große Mengen stark beschleunigter Teilchen frei, die für Raumfahrer lebensbedrohlich werden können.

basiert wesentlich darauf. Mit jenen Erkenntnissen war es beispielsweise möglich, Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Entstehung verschiedener Tumorarten und die Wahrscheinlichkeit tödlich verlaufender Krebserkrankungen zu ermitteln.

Und dieses Wissen versuchen Sie auf die Situation im All zu übertragen?

Ja, allerdings haben wir es im Weltraum mit anderen Strahlenarten zu tun als bei den Atombombenabwürfen. Zudem bekamen die Betroffenen in Japan in sehr kurzer Zeit – binnen weniger Stunden – eine sehr hohe Dosis ab. Im Weltraum hingegen wirkt schwächere Strahlung über einen viel längeren Zeitraum ein. Um das zu berücksichtigen, nutzen wir weitere Korrekturfaktoren, die aber natürlich erneut mit Unsicherheiten behaftet sind.

Also weiß man eigentlich nichts Konkretes?

Wissenschaftler haben viele biologische Experimente an Schwerionenbeschleunigern durchgeführt. Dort bringt man Atomkerne auf Geschwindigkeiten, wie sie auch in der Weltraumstrahlung vorkommen, und schießt sie auf biologisches Gewebe. Diese Versuche haben uns eine relativ gute Vorstellung davon vermittelt, wie Zellen auf eintreffende Ionen reagieren und welche Schäden in Gewebe und Organen entstehen. Die Unsicherheiten beziehen sich eher darauf, wie ein komplexes Gemenge verschiedener Strahlenarten wirkt, inwiefern kurzzeitige mit langfristigen Strahlenbelastungen vergleichbar sind, und welche konkreten Risiken in bestimmten Organen bestehen, etwa dem Gehirn. Wir versuchen, die Unwägbarkeiten weiter zu verkleinern – durch Experimente mit verschiedenen Zelltypen oder, indem wir analysieren, wie bestrahlte Zellen untereinander kommunizieren.

Kann man Raumfahrer nicht einfach besser gegen kosmische Strahlung abschirmen?

Ein wenig besser als jetzt praktiziert geht es wahrscheinlich schon – aber bei Weitem nicht vollständig. Die kosmische Strahlung aus den Tiefen der Galaxis besteht unter anderem aus Teilchen mit sehr hohen Energien, welche die Außenwände der Raumschiffe ohne Weiteres durchdringen.

Und dicker machen hilft nicht?

Da haben die Raumfahrtingenieure einen begrenzten Spielraum, weil sich mit Raketen nicht beliebig viel Gewicht ins All schießen lässt. Man kann aber beispielsweise einen kleinen Schlafbereich im Raumschiff besser abschirmen als den Rest – oder auch Wasservorräte so platzieren, dass sie Strahlung von bestimmten Arealen abhalten. Doch einen hundertprozentig dichten Schild gibt es nicht, allein deshalb, weil die Partikel der kosmischen Strahlung mit dem Abschirmmaterial wechselwirken, wobei Schauer von Teilchen mit niedrigeren Energien entstehen. Die fliegen einfach weiter – und sind oft noch gefährlicher für den Organismus als das ursprüngliche Geschoss. Einfach nur ein bisschen mehr abzuschirmen, kann unter Umständen mehr schaden als nutzen.

Angenommen, Astronauten schaffen es zum Mars und landen. Ist die Strahlenbelastung dort immer noch gesundheitsschädlich?

Ja, die Strahlendosis auf dem Mars beträgt ungefähr ein Drittel derjenigen im freien Weltraum – und ist damit so hoch wie auf der ISS. Das liegt daran, dass der Mars nur eine sehr dünne Atmosphäre besitzt und kein Magnetfeld. Man bräuchte also auch dort ein sehr gut abgeschirmtes Habitat, in dem sich die Astronauten die meiste Zeit aufhalten müssten. Lediglich bei Außeneinsätzen wären sie relativ hohen Dosen ausgesetzt. Gefährlich dabei wären unter anderem Sonneneruptionen, die sporadisch auftreten. Sie setzen große Mengen enorm stark beschleunigter Teilchen frei.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/thema/unsere-sonnensystem/1414842



NASA / STS-130 CREW MEMBER

Können solche Eruptionen mitunter lebensbedrohlich werden?

Die empfangene Strahlungs-dosis pro Zeit kann tatsächlich Werte erreichen, die für einen Menschen tödlich sind, sofern er sich gerade mit einem Raumanzug draußen im ungeschützten Bereich aufhält. Aber in einem Schutzraum im Raumschiff oder in einem abgeschirmten Habitat ließe sich das gut überstehen.

Kann man Sonneneruptionen mit einigem zeitlichen Abstand vorhersagen und Astronauten entsprechend alarmieren?

Das ist sehr, sehr schwierig. Doch Forschende weltweit arbeiten intensiv daran, unsere Möglichkeiten hierbei zu verbessern. Mit der richtigen Technik – etwa mit sonnen-nahen Satelliten – lassen sich Raumfahrer vor solchen Ausbrüchen warnen. Und meist bekommt ein Astronaut nicht binnen weniger Minuten eine tödliche Dosis ab, sondern in Stunden oder Tagen. Da ist schon noch Zeit zum Reagieren.

Was glauben Sie: Landen die ersten Menschen schon in einigen Jahren auf dem Mars?

Ein Flug zum Mars war in den vergangenen Jahrzehnten gefühlt immer 30 Jahre entfernt. In letzter Zeit sieht es allerdings so aus, als kämen die Dinge tatsächlich in Bewegung. Nach den aktuellen Planungen führt der Weg zum Roten Planeten über den Mond, wo wir viel über geeignete Habitate, Abschirmung und Warnsysteme lernen können. Die befrachte und bemannte Marsmission wird dadurch mehr »Science« als »Fiction«.

Janosch Deeg ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

KLIMASZENARIOEN FÜNF WEGE IN WÄRMERE WELTEN

Wie wird sich das Klima bis zum Ende des Jahrhunderts entwickeln? Bisherige Projektionen basieren auf unterschiedlichen, teilweise umstrittenen Annahmen zum Ausstoß von Treibhausgasen. Ein neuer Satz von Modellen soll Lücken schließen – in Form von Narrativen, also Erzählungen.



Jeff Tollefson ist Wissenschaftsjournalist in New York.

► spektrum.de/artikel/1807463

► Als die Staats- und Regierungschefs der Welt 2050 zusammenkamen, blickten sie auf die Corona-Pandemie 30 Jahre zuvor als einen Wendepunkt zurück – auch für die globale Erwärmung. Indem die Nationen die Krankheit gemeinsam besiegten, leiteten sie eine neue Ära der Zusammenarbeit ein, mit der sie auch eine Klimakatastrophe verhinderten. Mit Investitionen in regenerative Energien und neue Technologien senkten sie die Emissionen von Kohlenstoffdioxid und legten so eine gute Grundlage dafür, die globale Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts tatsächlich auf rund 1,5 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.



GETEILTE AUSSICHT Welche technologischen, politischen und ökonomischen Entscheidungen werden die globalen Gesellschaften zukünftig treffen? Die ökologischen Auswirkungen können grundverschieden sein.

Oder auch nicht. Alternativ könnte die Pandemie 2020 nur eine kurze Episode in einem langen und letztlich vergeblichen Versuch gewesen sein, den Klimawandel einzudämmen. Nach einem anfänglichen, pandemiebedingten Rückgang der Emissionen 2020 wandten sich die Länder nach der Krise billigen fossilen Brennstoffen zu, um ihre Volkswirtschaften wieder anzukurbeln. Die CO₂-Werte in der Atmosphäre stiegen dramatisch an – und mit ihnen die Temperaturen. Das führte die Welt auf den Weg zu zusätzlichen fünf Grad bis 2100.

Das sind nur zwei mögliche Entwicklungen für die Zukunft. Obwohl niemand weiß, was geschehen wird, müssen Klimaforscher trotzdem vorab untersuchen, welche Probleme unterschiedliche denkbare Stufen der globalen Erwärmung verursachen können. Deshalb haben sie eine Reihe von Szenarien entwickelt. Diese sollen eine Bandbreite hypothetischer Zukünfte darstellen, mit denen sich die Menschheit vielleicht konfrontiert sehen wird. Die Wissenschaftler wollen herausfinden, wie sich verschiedene gesellschaftliche Weichenstellungen auf die Treibhausgasemissionen auswirken könnten – und wie der Planet darauf wiederum reagieren wird.

Am optimistischen Ende des Spektrums beschreiben die Szenarien eine Welt, in denen die Regierungen mit vereinten Kräften grüne Technologien voranbringen und soziale Ungleichheiten verringern. Am anderen Ende streben die Länder wirtschaftliches Wachstum um jeden Preis an und intensivieren ihre Nutzung billiger fossiler Brennstoffe.

Forschungsteams haben solche Szenarien mit den wichtigsten globalen Klimamodellen durchgespielt und Projektionen dazu erstellt, wie die Welt je nach »sozioökonomischem Entwicklungspfad« vielleicht aussehen wird (siehe Grafik »Ein Spektrum der Zukunft«). Die Simulationen werden die Klimawissenschaft der nächsten Jahre beeinflussen und sind ein zentraler Aspekt des sechsten Sachstandsberichts des Weltklimarats IPCC von 2021 und 2022. Die Ergebnisse könnten auch eine Schlüsselrolle bei internationalen Verhandlungen über Maßnahmen spielen, um die Emissionen auf die im Pariser Klimaabkommen von

2015 vereinbarten Werte zu reduzieren. Die sozioökonomischen Entwicklungspfade aktualisieren eine Reihe von Szenarien aus dem vergangenen Jahrzehnt. Zu diesen gehört eine extreme – und umstrittene – Version, die bis 2100 einen Temperaturanstieg von etwa fünf Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau prognostiziert. Kritiker halten dieses spezielle Szenario, das lange eine zentrale Rolle in Studien gespielt hat, für irreführend, weil es eine unrealistisch hohe, bis 2100 auf das Fünffache gesteigerte Nutzung von Kohle als Energieträger beinhaltet. Doch viele Fachleute weisen die Kritik zurück. Ihrer Ansicht nach sind selbst solche Szenarien wertvoll, solange die Menschen die ihnen zu Grunde liegenden Annahmen und Einschränkungen verstehen. Und statt einer enorm gestiegenen Verfeuerung fossiler Brennstoffe könnten andere Einflüsse ähnliche Auswirkungen haben, beispielsweise in großen Mengen aus dem arktischen Permafrost freigesetztes Methan.

Übergeordnete Szenarien für genauere Blicke auf konkrete Folgen

So bekräftigt der Atmosphärenexperte Donald Wuebbles von der University of Illinois, koordinierender Hauptautor des ersten Bands des 2017 veröffentlichten nationalen Klimaberichts der USA: »Wir versuchen, Risiken zu verstehen, nicht die Zukunft vorauszusehen.« Die Szenarien sind nicht darauf ausgelegt, Emissionen zu prognostizieren, sondern verschiedene Stufen der Erwärmung und Arten der wirtschaftlichen Entwicklung zu untersuchen. Sie helfen einer Vielzahl von Spezialisten: Klimamodellierer überprüfen damit ihre Simulationen und die Auswirkungen steigender Treibhausgasemissionen, Ökonomen untersuchen die Kosten politischer Entscheidungen, und Umweltwissenschaftler ermitteln die Veränderungen von Ökosystemen.

»Das ist keine Sciencefiction«, meint auch die Epidemiologin Kristie Ebi von der University of Washington. Sie ist Expertin für die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels und gehört zum Vorsitz des Ausschusses, der die neuen Szenarien entwickelt hat. »Nur mit diesen Simulationen verstehen wir, welche Auswirkungen unsere Entscheidungen haben. Genau das können wir jetzt untersuchen.«

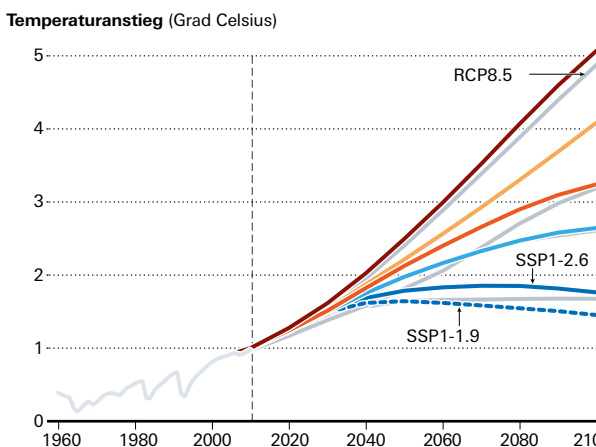
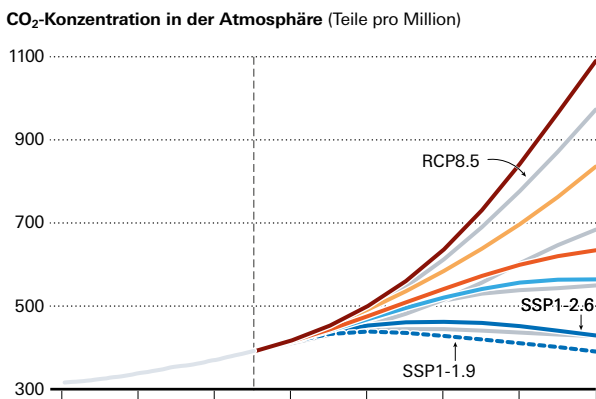
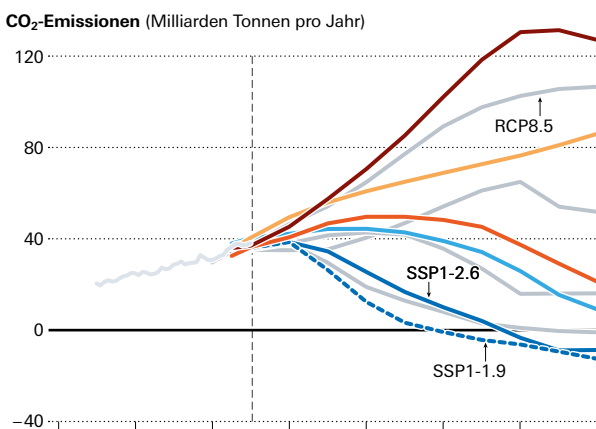
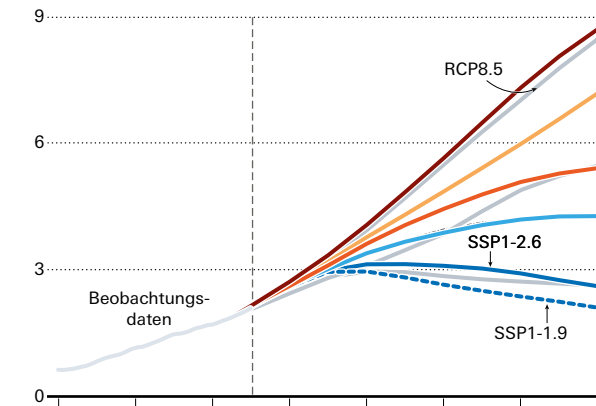
Die Praxis, für die Berichte des Weltklimarats verschiedene mögliche Zukünfte zu modellieren, reicht bis in den April 1989 zurück. Zu dieser Zeit traf sich eine Gruppe von Experten im niederländischen Bilthoven, um die erste Bewertung des IPCC vorzubereiten, die im folgenden Jahr veröffentlicht werden sollte. Die Fachleute zeichneten vor, wie viel Kohlendioxid, Methan und weitere klimawirksame Gase die Länder im nächsten Jahrhundert produzieren könnten. Diese denkbaren Welten – von den extrem verschmutzten bis zu den außerordentlich sauberen – lieferten das Rohmaterial für Klimamodellierer, die projizierten, wie der Planet darauf reagieren könnte.

Seither hat der IPCC die wichtigsten Emissionsszenarien mehrmals erneuert. 2006 jedoch beschloss der Weltklimarat, keine weiteren möglichen Entwicklungen der globalen Gesellschaften zu erarbeiten. Die USA und weitere Länder hatten eingewendet, die Organisation solle lediglich den Stand der Wissenschaft zusammentragen – und nicht ihren Gang beeinflussen.

AUF EINEN BLICK DREHBÜCHER FÜR DIE ERDE

- 1 Die Simulationen im letzten, fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats zeigen die Auswirkungen bestimmter Treibhausgaskonzentrationen – aber nicht, welche sozioökonomischen Veränderungen zu diesen führen.
- 2 Inzwischen haben Forscher fünf grundsätzliche Richtungen, welche die globalen Gesellschaften einschlagen könnten, in Form von Erzählungen ausgearbeitet.
- 3 Klimapolitische Maßnahmen bleiben bei diesen Narrativen zunächst außen vor und werden erst später einbezogen. So können Forscher im nächsten, sechsten Bericht Szenarien flexibler entwickeln und vergleichen.

Strahlungsantrieb (Watt pro Quadratmeter)
Treibhausgase in der Atmosphäre ändern die Energiebilanz der Erde, indem sie Wärmestrahlung absorbieren. Die SSPs und die RCPs verlaufen ähnlich.



EIN SPEKTRUM DER ZUKUNFT Die sozioökonomischen Entwicklungspfade (SSPs) sollen in fünf Basis-szenarien verschiedene Wege für die Gesellschaften der Welt darstellen. Sie ergänzen dabei die älteren Szenarien der repräsentativen Konzentrationspfade (RCPs), bei denen die Treibhausgasmengen in der Atmosphäre im Fokus stehen.

— SSP1 — SSP2 — SSP3 — SSP4 — SSP5 — RCPs

Deswegen veröffentlichte eine Gruppe unter der Leitung des Klimawissenschaftlers Richard Moss von der University of Maryland 2010 eine alternative Herangehensweise, auf deren Basis Klimatologen Szenarien für den fünften IPCC-Bericht von 2013 und 2014 erstellten. Das Team um Moss lieferte vier Projektionen des zukünftigen Eintrags von Treibhausgasen in die Atmosphäre, die so genannten repräsentativen Konzentrationspfade (representative concentration pathways, RCPs). Darauf griffen dann Modellierer auf der ganzen Welt für ihre Rechnungen zurück.

Die RCPs sollten jeweils einen verschieden starken so genannten Strahlungsantrieb darstellen. Die Zahl spiegelt wider, wie viel zusätzliche Erwärmung durch bestimmte Mengen ausgestoßener Treibhausgase entsteht. Die RCPs waren ausdrücklich nicht dazu gedacht, technologische oder wirtschaftliche Entwicklungen zu beschreiben, die solchen Emissionen zu Grunde liegen. Die Aufgabe, später eine Reihe von Szenarien zu erstellen, wie Treibhausgase auf eine den RCPs entsprechende Weise in die Atmosphäre gelangen könnten, wurde anderen Forschern überlassen.

Moss betont, die RCPs seien so konzipiert worden, dass sie das in der wissenschaftlichen Literatur gängige Spektrum der möglichen Erwärmungen abbilden. Sie sollten eine große Bandbreite zwischen den hohen und niedrigen Projektionen schaffen, damit die Klimamodellierer gut zwischen ihnen unterscheiden können. Dabei rief das RCP8.5 genannte Szenario mit einem globalen Temperaturanstieg von fünf Grad Celsius viel Kritik hervor. Doch gerade wegen der starken Auswirkungen ist es im Vergleich der Modelle nützlich. »Wir wollten genügend Details liefern, damit die Simulationsexperten ihre Arbeit tun können«, sagt Moss und fügt in Bezug auf die Szenarien hinzu: »Wir hatten nie vor, einzelnen ein besonderes Gewicht beizumessen.«

Mit der Zeit entwickelten die repräsentativen Konzentrationspfade jedoch ein Eigenleben. Zwar waren die jeweiligen Einschränkungen und möglichen Fallstricke der RCPs für all diejenigen nachzulesen, die wussten, wo sie suchen mussten. Bloß: Viele, selbst Wissenschaftler, beschäftigten sich nicht mit dem Kleingedruckten und stellten RCP8.5 als Szenario für eine Welt ohne aggressive Maßnahmen zum Klimaschutz dar.

»Es ist aus einer ganzen Reihe von Gründen sehr verlockend, RCP8.5 dafür herzuzehmen, aber es ist zugleich ziemlich unrealistisch«, merkt Glen Peters an. Der Forscher am Center for International Climate Research in Oslo ist Mitautor eines 2020 im Fachjournal »Nature« erschienenen Kommentars zum Thema. »Entscheidend ist, die Szenarien angemessen zu gewichten und klar zu kommunizieren,

Die SSP-Szenarien

Die so genannten sozioökonomischen Entwicklungspfade erzählen mögliche Richtungen, welche die Weltgemeinschaft in den kommenden Jahrzehnten einschlagen könnte. Sie entsprechen verschiedenen Projektionen der Klimaentwicklung und liefern gewissermaßen deren gesellschaftliche und wirtschaftliche Begründungen. Fünf Basisszenarien beschreiben die wichtigsten Trends. Dabei bleiben konkrete klimapolitische Maßnahmen zunächst außen vor – sie werden erst in speziellen, ergänzenden Szenarien einbezogen.

SSP1: Nachhaltigkeit

Die Welt blickt weniger auf Wirtschaftswachstum und mehr auf globales Wohlergehen und einen ressourcenschonenden Konsum. Investitionen in Bildung und Gesundheit fördern den demografischen Übergang zu einer global bald wieder sinkenden Bevölkerungsgröße. Ungleichheiten in sowie unter den Staaten sinken.

SSP2: Der mittlere Weg

Bisherige gesellschaftliche, ökonomische und technologische Muster setzen sich ähnlich in die Zukunft fort. Die Nationen machen ungleichmäßig verteilte Fortschritte. Trotz allmählich weniger intensiver Nutzung von Rohstoffen kommt es zu weiteren Umweltveränderungen. Soziale und ökologische Verwundbarkeiten bestehen länger fort und sind schwerer zu beseitigen.

SSP3: Regionale Rivalitäten

Aufkommende nationalistische Tendenzen lassen regionale Sicherheitsfragen wichtiger erscheinen als globale Probleme. Der Wunsch zur lokalen Selbstversorgung mit Energie und Nahrungsmitteln hemmt zwischenstaatliche Kooperation, Entwicklungen sind langsamer und kostspieliger, protektionistische Maßnahmen behindern den Handel und stehen gemeinsamen Zielen entgegen. In weniger wohlhabenden Teilen der Welt gibt es starkes Bevölkerungswachstum und Umweltzerstörungen.

SSP4: Ungleichheiten

Die ökonomische und politische Macht verteilt sich zunehmend verschieden, sowohl innerhalb von Staaten als auch zwischen ihnen. Es entsteht eine Kluft: einerseits eine gut vernetzte, internationalisierte Gesellschaftsschicht als Treiberin eines wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Aufschwungs, andererseits global fragmentierte Milieus mit schlechter Ausbildung und begrenzten finanziellen Möglichkeiten, die davon kaum profitieren. Der soziale Zusammenhalt schwindet, und es kommt häufig zu Unruhen. Umweltschutzmaßnahmen konzentrieren sich auf das Umfeld der Elite.

SSP5: Fossil befeuerte Entwicklung

Die Welt setzt darauf, mit Innovationen, gemeinsamen Wirtschaftsräumen und gesellschaftlicher Teilhabe schnelle Fortschritte hervorzubringen, die wiederum eine nachhaltige Entwicklung ermöglichen. Die Prozesse werden jedoch von der intensiven Nutzung fossiler Energiequellen sowie einer energieintensiven Lebensführung angetrieben. Die Weltwirtschaft wächst rasch. Lokale Umweltprobleme wie Luftverschmutzung lassen sich bewältigen, und auch Risiken durch einen starken Klimawandel sollen technologisch in den Griff bekommen werden.

Mike Beckers ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Spektrum der Wissenschaft, nach O'Neill, B.C. et al.: The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways Describing World Futures in the 21st Century, Global Environmental Change 42, 2017, Fig. 1

AUSMASS UND KONSEQUENZEN DES KLIMAWANDELS

In den Szenarien gelingt es der Welt unterschiedlich leicht, den Klimawandel zu begrenzen oder sich an dessen Folgen anzupassen. Bei SSP1 ist beides gut umsetzbar; bei SSP3 sind sowohl die Klimaänderungen stark als auch die Auswirkungen kaum zu bewältigen. Die Fälle SSP5 und SSP4 sind asymmetrisch. Während die Erderwärmung bei SSP5 extrem ausfällt, es aber technologische Lösungen zum Umgang damit gibt, ist sie bei SSP4 zwar beschränkt, ihre Folgen treffen jedoch viele Menschen schwer. Bei SSP2 schließlich ist beides mittelstark ausgeprägt.

wofür sie stehen.« Auch Roger Pielke Jr. von der University of Colorado Boulder beklagt die häufig falsche Charakterisierung von RCP8.5, bei dem die Emissionen weiter in die Höhe schnellen. Pielke zufolge verwenden es selbst groß angelegte Untersuchungen wie der nationale Klimabericht der USA faktisch als Basisszenario. Das überzeichne die Abschätzungen zu den Auswirkungen der globalen Erwärmung sowie den Kosten bei Untätigkeit.

Wuebbles hingegen verteidigt die Entscheidung, in dem US-Bericht RCP8.5 zu verwenden. Das Dokument bezeichnet es lediglich als »höheres« Szenario und hält fest, dass der Emissionsverlauf 15 bis 20 Jahre lang dazu passte, bis die Kurve um 2014 abflachte. Darüber hinaus bietet RCP8.5 den Wissenschaftlern eine Hochrisikovariante, die für das Verständnis der Auswirkungen von Klimaextremen wertvoll ist. Viele Forscher argumentieren: Selbst ohne einen enorm steigenden Verbrauch fossiler Energieträger könnte es durch andere Einflüsse dennoch zu einer Erwärmung um fünf Grad Celsius kommen.

Nach der Veröffentlichung der RCPs 2010 war geplant, innerhalb von zwei Jahren eine neue Reihe von ausgefeilten sozioökonomischen Szenarien zu erstellen. Diese wären in die Berichte des IPCC von 2013 und 2014 eingeflossen. Dort stellte der Weltklimarat fest, dass die seit den 1950er Jahren stattfindende globale Erwärmung ein über die Zeiträume von Jahrhunderten bis Jahrtausenden beispielloser Vorgang ist. Die Dokumente bildeten die Grundlage für das Klimaabkommen von Paris 2015.

Jeder Pfad erzählt eine umfassende Geschichte zu den wichtigsten demografischen Trends

Aber der Prozess war viel schwieriger und dauerte viel länger als erwartet. Die neue Generation von sozioökonomischen Entwicklungspfaden (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) war 2015 fertig. Somit erlangten sie erst Bedeutung für die Klimaforschung, als die wichtigsten Rechenzentren auf der ganzen Welt begannen, die Simulationen für den nächsten, sechsten IPCC-Bericht von 2021 und 2022 durchzuführen.

Zwar orientieren sich die neuen Szenarien an den alten RCPs, dennoch liefern sie zum ersten Mal vollständig ausgearbeitete Narrative zur möglichen Entwicklung der Welt. Jeder Pfad erzählt eine umfassende Geschichte zusammen mit Zahlen zu den wichtigsten demografischen Trends aller Länder. Darauf greifen dann die Modellierer für die Projektionen von Emissionen und Auswirkungen auf den Planeten zurück.

Die Teams haben beim Erstellen der SSPs absichtlich darauf verzichtet, konkrete klimapolitische Maßnahmen einzubeziehen. Kristie Ebi erläutert, warum: Der Ansatz ermöglicht es den Wissenschaftlern, im Rahmen eigener Simulationen die Auswirkungen verschiedener gesellschaftlicher und administrativer Entscheidungen zu testen.

Beispielsweise können Ebi und andere Gesundheitsforscher dank dieser Flexibilität die epidemiologischen Vorteile verschiedener Klimaschutzmaßnahmen einander gegenüberstellen, die gleichzeitig Emissionen reduzieren und zu besserer Luft führen. »So etwas war in der Zeit davor nicht möglich«, meint Ebi. »Nun kann die Gemeinschaft der

Klimawissenschaftler Fragen stellen, die vorher nicht zu beantworten waren.«

Obwohl die SSP-Szenarien erst wenige Jahre alt sind, entstanden sie in einer Welt, die sich in einiger Hinsicht von der heutigen unterscheidet. Sie kamen vor den politischen Umbrüchen von 2016, als das Vereinigte Königreich den Austritt aus der Europäischen Union beschloss und Donald Trump Präsident der USA wurde und im Rahmen seiner »America First«-Doktrin versprach, dass sich das Land aus dem Pariser Klimaabkommen zurückziehen würde.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



SEPPFRIEDHUBER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Doch sogar solche Entwicklungen in einigen wichtigen Nationen schreibt das SSP-Szenario in einem möglichen Pfad fort. Das Narrativ SSP3 »Regionale Rivalitäten – ein steiniger Weg« definiert sich durch ein Wiederaufleben des Nationalismus, bei dem die Sorge um Wettbewerbsfähigkeit und Sicherheit in Handelsstreits mündet (siehe Kasten »Die SSP-Szenarien«). In einer solchen Welt wäre es schwierig, den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren und sich an den Klimawandel anzupassen. Hier würde die globale Durchschnittstemperatur wohl um mehr als vier Grad Celsius über das vorindustrielle Niveau steigen.

Für Ebi ist das eine wichtige Lektion, denn den Experten erschien dieses Narrativ bei der Ausarbeitung eher unwahrscheinlich. Das ist genau der Punkt. »Als wir anfangen, uns damit zu beschäftigen, gab es weder einen Brexit noch einen Handelskonflikt zwischen den Vereinigten Staaten und China«, resümiert sie. »Es ist eine unangenehme Aussicht, aber auch so ein Pfad gehört dazu. Wir wissen schließlich nicht, wie die Zukunft bringt.« ◀

QUELLEN

Hausfather, Z., Peters, G.P.: Emissions – the ›business as usual‹ story is misleading. *Nature* 577, 2020

Keywan, R. et al.: The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42, 2017

Moss, R.H. et al.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 2010

O'Neill, B.C. et al.: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42, 2017

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 580, S. 444–446, 2020

PHYSIK

DIE ZWEI GESICHTER DES WASSERS

Wasser hat einige außerordentliche Eigenschaften. Lassen sie sich besser erklären, wenn man es als Gemisch zweier verschiedenartiger Flüssigkeiten betrachtet?



Rachel Brazil Wissenschaftsjournalistin in London.

» spektrum.de/artikel/1807466

VERWANDLUNGSKÜNSTLER

Je nach Umgebungsbedingungen wechselt Wasser zwischen zahlreichen Formen. So gibt es neben dem gewöhnlichen Eis glasartige Varianten.

PEEPO / BETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Wasser ist ebenso allgegenwärtig wie ungewöhnlich. In Bezug auf etliche Eigenschaften unterscheidet es sich von den meisten anderen Flüssigkeiten drastisch, etwa bei seiner Oberflächenspannung, Wärmekapazität, Kompressibilität sowie den Schmelz- und Siedepunkten. Einige Wissenschaftler erklären das seltsame Verhalten, indem sie Wasser nicht als einen komplizierten Stoff betrachten, sondern gewissermaßen als ein Gemisch zweier einfacher Substanzen mit einer komplizierten Beziehung. Andere Experten widersprechen vehement: So eine Aussage passe nicht zu den Grundprinzipien der physikalischen Chemie.

Im Lauf des letzten Jahrzehnts sind die Emotionen in dem akademischen Streit hochgekocht. Der renommierte Wasserforscher Anders Nilsson von der Universität Stockholm meint, die Frage bringe »sehr starke, fast religiöse Ansichten zum Vorschein«. Wissenschaftler schreiben die seltsamen Eigenschaften des Wassers im Allgemeinen den Bindungen durch so genannte Wasserstoffbrücken zu. Allerdings ist umstritten, was dabei genau vor sich geht, insbesondere, wenn sich das Wasser in einem unterkühlten Zustand befindet. Dann sollte es eigentlich gefrieren, dazu kommt es aber nicht.

Wie viele Chemiker dachte Nilsson zu Anfang seiner Laufbahn, die Struktur des Wassers müsste doch gut verstanden sein. Dann erkannte er, dass dem nicht so war. Seit vielen Jahren widmet er sich ganz den Eigenarten der Substanz. Seine neueren Arbeiten verleihen einer in Fachkreisen umstrittenen Hypothese Gewicht: In Wasser existieren zwei verschiedene Flüssigkeitsstrukturen getrennt voneinander.

»Bezüglich ihrer einfachen thermodynamischen und kinetischen Eigenschaften verhalten sich alle Flüssigkeiten bei Druck- und Temperaturänderungen gleich«, erklärt Nilsson. So nimmt beim Abkühlen die Dichte zu, und die Wärmekapazität und Kompressibilität sinken. »Fast jede Flüssigkeit auf der Erde verhält sich so. Bloß Wasser nicht.« Wasser hat seine größte Dichte bei vier Grad Celsius, bei

niedrigeren Temperaturen wird sie wieder geringer. Wer Chemie studiert, lernt als Begründung dafür: Die Moleküle in Flüssigkeiten sind ungeordnet und richten sich ständig neu aus, wohingegen Wasser ein Netzwerk relativ stabiler Wasserstoffbrückenbindungen bildet. Deren Stärke liegt – im Vergleich zu den üblichen zwischenmolekularen Wechselwirkungen – zwischen den festeren kovalenten Bindungen und den schwächeren Dipolkräften. Im Gegensatz zu Letzteren sind sie gerichtet; jedes Wasserstoffatom wendet sich einem Elektronenpaar eines Sauerstoffatoms zu.

Während sich Wasser bei höheren Temperaturen wie die meisten Flüssigkeiten verhält, spielt diese spezielle Art der Bindung bei Abkühlung eine wichtigere Rolle. »Für ein so kleines Molekül sind das eine Menge Wasserstoffbrückenbindungen«, meint der Chemiker und Wasserforscher Martin Chaplin von der London South Bank University. »Sie erzwingen einen strukturierten, geordneten Zustand.«

Erzeugen unterschiedlich dicht gepackte Moleküle zwei völlig andere Flüssigkeiten?

Seit Langem gibt es immer wieder Hypothesen zu den exotischen Eigenschaften des Wassers. In den 1960er Jahren vermuteten sowjetische Chemiker sogar, seine Moleküle könnten in dünnen Kapillarröhrchen besonders stabile Polymerstrukturen bilden. Sie wurden als Polywasser bekannt; auch westliche Wissenschaftler nahmen die Idee ernst. Weltweit beschäftigten sich Labore intensiv damit, bis sich etwa zehn Jahre später herausstellte, dass die Ergebnisse wohl auf Verunreinigungen zurückzuführen waren.

Die Vorstellung von zwei verschiedenartigen Molekülanordnungen in flüssigem Wasser ist ebenfalls nicht neu, sondern reicht mehr als 100 Jahre zurück. 1892 vermutete Wilhelm Röntgen, der Entdecker der nach ihm benannten Strahlung, Wasser bestehe aus zwei verschiedenen Phasen, die in einer Mischung koexistieren. In den 1990er Jahren erlebte der Gedanke eine Renaissance, als Computersimulationen das tatsächliche Verhalten von Wasser nachbilden sollten.

Die beiden hypothetischen Formen entsprechen unterschiedlich kompakt sortierten Wassermolekülen. Diejenige mit niedriger Dichte (englisch: low density liquid, LDL) ähnelt Eis. Hier sind die meisten Moleküle von vier anderen umgeben, was eine relativ offene Tetraederstruktur herbeiführt. In der Flüssigkeit höherer Dichte (high density liquid, HDL) sind die Moleküle enger gepackt (siehe Kasten »Wenn Wasser nicht kristallisiert«). Die Wasserstoffbindung wird dabei verzerrt, und weniger gerichtete, schwächere molekulare Wechselwirkungen kommen zum Tragen.

Laut der Idee zweier Komponenten ändert sich deren jeweiliger Anteil mit der Temperatur. Sinkt diese, entsteht mehr LDL-Wasser. So kommt es beim Abkühlen sowohl zu der bei Flüssigkeiten üblichen Zunahme der Dichte als auch zur vermehrten Bildung von Wasser niedriger Dichte. Unter dem Strich führt das zum beobachteten Maximum bei vier Grad und zu weiteren Anomalien von Wasser.

Zum Verständnis solcher Eigenschaften helfen Computersimulationen. Der Mathematiker John Russo von der Universität La Sapienza in Rom erklärt die Herangehens-

AUF EINEN BLICK WUNDERSAMER STOFF

- 1** Wasser verhält sich in vielerlei Hinsicht anders als die meisten Substanzen. So steigt seine Dichte beim Abkühlen nicht immer mehr, sondern es dehnt sich unterhalb von vier Grad Celsius wieder aus.
- 2** Laut Computersimulationen liegt das möglicherweise an einem Nebeneinander zweier molekularer Ordnungen im Wasser: Es bildet individuelle Flüssigkeiten mit verschiedener Dichte.
- 3** Um das zu überprüfen, dringen Forscher allmählich in einen experimentell lange unzugänglichen Bereich vor. Erste Daten scheinen die Idee zu stützen, doch die Interpretation ist umstritten.

weise: »Man entwirft ein atomistisches Modell und passt die Ladungen und die Verteilung der Elektronen so genau wie möglich an, um das reale Verhalten des Wassers zu reproduzieren.« Russo hat zusammen mit Kollegen von der Universität Tokio ein Modell erstellt, in dem sie die für Wasser typischen molekularen Wechselwirkungen herunterregeln können. Das soll zum Ursprung der anomalen Eigenschaften führen. »Ich will Wasser gewissermaßen weniger wässrig machen und versuche, graduell von dessen typischem Verhalten zu dem einer gewöhnlichen Flüssigkeit überzugehen«, berichtet er.

Der Schlüssel dabei ist es, die Stärke der Wasserstoffbrückenbindung zu verändern, die zur tetraedrischen Anordnung führt. Indem die Wechselwirkungen künstlich mehr oder weniger in diese Form gezwungen werden, wandelt sich Russo zufolge das makroskopische Verhalten von Wasser. Dabei können viele Anomalien verschwinden. Erhöht man zum Beispiel den Tetraedercharakter der Flüssigkeit, steigert also den Anteil der Moleküle mit genau vier nächsten Nachbarn, schwimmt Eis als fester Aggregatzustand nicht mehr obenauf, sondern sinkt ab – wie bei normalen Substanzen, die erstarren.

Russo verwendet ein Zwei-Zustände-Modell, das Wasser als eine ständige Mischung seiner beiden Formen mit hoher und niedriger Dichte behandelt. Falls es diese wirklich gibt – könnten sie dann als einzelne, voneinander getrennte Flüssigkeiten auftreten? Bereits 1992 deuteten Simulationen von Eugene Stanley von der Boston University darauf hin, dass das bei unterkühltem Wasser bei sehr niedrigen Temperaturen passiert.

Obwohl Wasser unter Atmosphärendruck bei null Grad Celsius gefriert, braucht es dazu Verunreinigungen als Kristallisationskeime. Ohne sie lässt sich flüssiges Wasser bis auf etwa 232 Kelvin (minus 41 Grad Celsius) bringen. Kühlt man weiter, wird es allerdings sehr schnell zu Eis. Wasser existiert unter 136 Kelvin (minus 137 Grad Celsius) außerdem in einem glasartigen Zustand, gefriert aber oberhalb dieser Temperatur rasch. In dem weiten Tempera-

turbereich dazwischen ist in Experimenten keine flüssige Phase feststellbar. Wasserexperten wie Nilsson bezeichnen die Region als Niemandsland.

Auf Grundlage von Stanleys Modell könnte sich unterkühltes Wasser im Niemandsland tatsächlich in zwei verschiedene Phasen aufteilen. Und es würde ein bisher unbekannter »kritischer Punkt« existieren. An einem solchen verschwindet die Grenze zwischen zwei Phasen. Wasser hat beispielsweise bei 647 Kelvin und einem Druck von 221 Bar (22 Megapascal, 1 Bar entspricht etwa Atmosphärendruck) einen kritischen Punkt. Von dort an sind die Eigenschaften zwischen dem flüssigen und dem dampfförmigen Zustand ununterscheidbar. Am hypothetischen kritischen Punkt im Niemandsland würde die Trennung zwischen beiden Flüssigkeiten verschwinden. Doch die Suche nach Belegen dafür ist alles andere als einfach. Russo meint: »Wir können keine Gläser mit den zwei Arten von Wasser füllen. Aber bei einigen Experimenten gab es zumindest indirekte Hinweise auf solche Übergänge.«

Ein Ansatz geht von Wasser in seinem amorphen Zustand – das heißt, es ist fest, allerdings auf molekularer Ebene nicht kristallin geordnet – bei niedrigen Temperaturen aus. Unterhalb von 136 Kelvin gibt es zwei Typen von einem solchen glasartigen Wasser, einen mit geringer Dichte und einen mit hoher. Entsprechen diese vielleicht dem hypothetischen LDL- und HDL-Wasser bei höheren Temperaturen? Dann könnte es unter den richtigen Versuchsbedingungen möglich sein, die flüssigen Phasen getrennt voneinander zu beobachten – und vielleicht auch einen Übergang zwischen ihnen. Russo erklärt: »Kollegen suchen auf diesem Weg Beweise. Sie fangen beim Glas an, erhitzen es ein wenig und versuchen, eine Umwandlung zu den Flüssigkeitstypen zu erkennen, bevor alles kristallisiert.«

Extrem kurze Röntgenpulse beschießen winzige Tropfen im Vakuum

Nilsson nähert sich von der anderen Seite. Er will die beiden Flüssigkeiten mittels Röntgenstreuung an ultrakalten Wassertropfchen nachweisen. »Wir haben Techniken entwickelt, um alles sehr schnell ablaufen zu lassen«, erläutert er. »Wenn die Experimente nur noch eine Dauer im Bereich von Mikrosekunden haben, lässt sich die Grenze zum Niemandsland zu immer tieferen Temperaturen verschieben.« Sein Team hat zwischen 10 und 20 Mikrometer kleine Wassertropfchen in ein Vakuum injiziert, wo sie blitzartig abkühlen. Mit Hilfe von lediglich 50 bis 100 Femtosekunden langen Strahlungsimpulsen eines Röntgenlasers vermaßen die Wissenschaftler dann Struktureigenschaften des flüssigen Wassers in einem Tropfen. »Wir konnten bis auf 227 Kelvin heruntergehen und ein Stück weit ins Niemandsland schauen«, sagt Nilsson.

2017 veröffentlichten die Forscher um den Stockholmer ein Ergebnis, das ihrer Ansicht nach ebenfalls auf die zwei Zustände des Wassers hindeutet und dessen seltsames Verhalten erklärt. Sie fanden im Phasendiagramm Hinweise auf einen nach dem US-Chemiker Benjamin Widom von der Cornell University benannten Kurvenverlauf.

Die Widom-Linie beginnt bei einem kritischen Punkt. Im Fall des Wassers unterteilt sie die flüssige Phase in zwei

Regionen, wobei sich auf der Seite der höheren Temperaturen und Drücke die Flüssigkeit eher wie die HDL-Phase verhält und auf der anderen Seite eher wie LDL-Wasser (siehe Kasten »Wenn Wasser nicht kristallisiert«). In der Nähe der Widom-Linie wechselt die Flüssigkeit am stärksten zwischen ihren beiden Formen hin und her. Außerdem sind die Phasen nicht mehr streng getrennt, sondern es kann sich eine innerhalb der anderen bilden. Nilsson zufolge entstehen bei sinkender Temperatur winzige, geschlossene

Bereiche von Flüssigkeit mit niedrigerer Dichte. Das würde erklären, warum die Dichte von Wasser von vier Grad bis zu seinem Gefrierpunkt abnimmt.

Auf Basis seiner Röntgenstreuexperimente an den Tröpfchen hat Nilsson die Schwankungen in der Elektronendichte berechnet und einen Maximalwert für die Kompressibilität von Wasser bei 229 Kelvin im Vakuum identifiziert. Dieser stimmt mit dem erwarteten Verhalten nahe der Widom-Linie überein: Die Struktur der Flüssigkeit fluktuiert

Wenn Wasser nicht kristallisiert

Bei hohen Temperaturen und Drücken ist jenseits eines so genannten kritischen Punkts kein Unterschied mehr zwischen flüssigem und gasförmigem Wasser festzustellen (linkes Diagramm). Manche Wissenschaftler vermuten einen ähnlichen Punkt im experimentell kaum zugänglichen »Niemandland«. Es liegt unterhalb der Temperaturen, bei denen Wasser unterkühlt ist, es also eigentlich gefrieren sollte, und oberhalb der

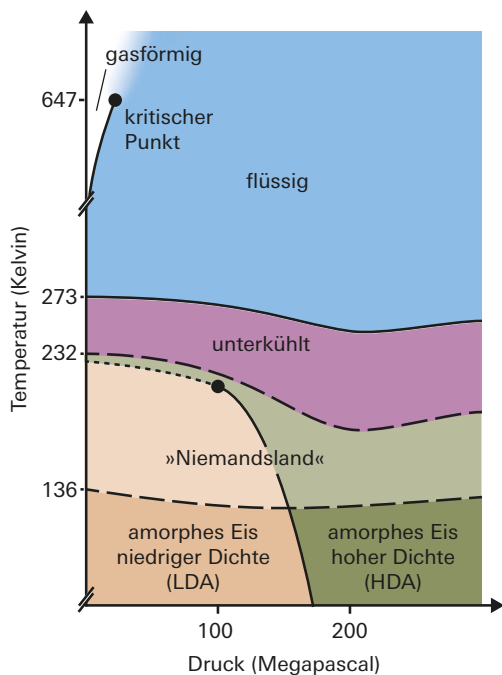
Bedingungen, unter denen Wasser einen von zwei exotischen glasähnlichen Zuständen einnimmt (»amorphes Eis«).

Hypothetisch lässt sich die Trennung beider amorpher Phasen bis ins Niemandland fortführen (rechtes Diagramm). Dort sollte das Glas zu zwei Flüssigkeiten werden, die sich eindeutig durch ihre Dichte unterscheiden – bis zu einem kritischen Punkt. Jenseits davon mischen sie sich, und es entstehen

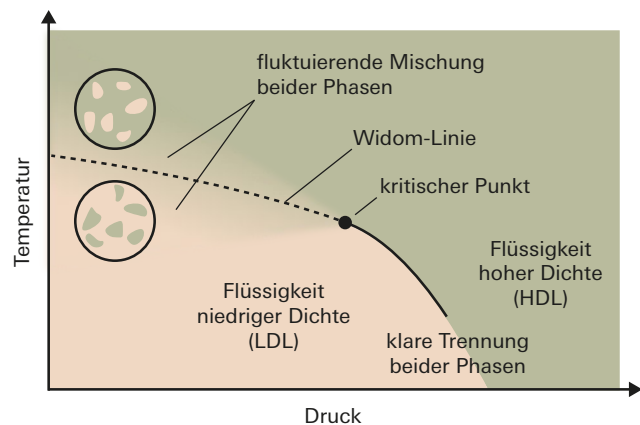
in einer der Flüssigkeiten wechselnde Bereiche der jeweils anderen. Entlang der »Widom-Linie« sind die Fluktuationen am stärksten. Das Nebeneinander soll das anomale Verhalten von Wasser erklären.

Auf molekularer Ebene ordnen sich je nach Art der Flüssigkeit Gruppen von Wassermolekülen unterschiedlich kompakt an, indem sie sich mittels Wasserstoffbrückenbindungen verknüpfen (rechts unten).

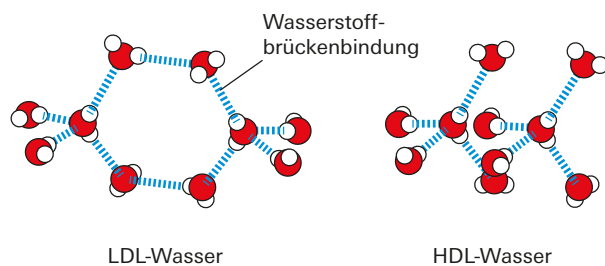
Phasen des nichtkristallinen Wassers



hypothetische Zustände im Niemandland



Anordnung der Moleküle



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS, LINUS NACH MILLER, J.L. SUPERCOOLED WATER GOES SUPERCRITICAL, PHYSICS TODAY 71, 2018, FIG. 1

dort am stärksten, und wegen dieser Variabilität lässt sie sich besonders einfach zusammendrücken. Nilsson sucht weiter nach der genauen Position des kritischen Punkts: »Wir vermuten ihn im Temperaturbereich von 210 Kelvin nahe einem Kilobar Druck.«

Allerdings können sich viele seiner Kollegen mit der Hypothese grundsätzlich nicht anfreunden. »Zahlreiche Fachleute stehen der Annahme, Wasser sei eine Mischung aus zwei Flüssigkeiten, äußerst skeptisch gegenüber«, bekräftigt der Strukturforscher Alan Soper vom Rutherford Appleton Laboratory in Oxfordshire, Großbritannien. »Ich persönlich habe Schwierigkeiten, mir zwei verschiedenartige Wassermoleküle vorzustellen.« Soper bestreitet nicht die mögliche Existenz eines zweiten kritischen Punkts irgendwo im Niemandsland. Aber für ihn impliziert der Gedanke, Wasser könne bis hin zu Normalbedingungen getrennte Bereiche zweier Arten von Flüssigkeit enthalten, separate Phasen. »Und getrennte Phasen oberhalb eines kritischen Punkts ergeben keinen Sinn. Sonst ist es ja kein kritischer Punkt. Man kann nicht beides haben.«



ISTOCK / STEVEN_KRIEMADIS

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Gäbe es Regionen mit verschiedenen Arten von Wasser, müssten diese Soper zufolge bei den Experimenten mit Röntgenstrahlung deutlich hervortreten. »Die Streuung wäre viel stärker, und davon ist nichts zu sehen.« Üblicherweise sei bei Mischungen, beispielsweise bei Mizellenstrukturen von Öl und Wasser, der Kontrast enorm, und die Dichtefluktuationen zwischen den verschiedenen Regionen würden erhebliche Anteile des Lichts streuen. Das ist bei Wasser nicht zu erkennen.

Doch Nilsson gibt zu bedenken, die Bereiche oberhalb des kritischen Punkts seien keinesfalls zwei scharf getrennte Phasen. »Es sind vielmehr dynamisch veränderliche Regionen in der Flüssigkeit – das ist etwas anderes.« Dabei handle es sich möglicherweise um nur 50 oder 100 Moleküle, die ständig mit solchen aus der Umgebung im Austausch wären. Er vergleicht die Situation mit der auf einer Party, bei der die Menschen an einer Stelle der Festhalle tanzen und an einer anderen an Tischen sitzen. Das sind zwar verschiedene Bereiche, aber einzelne Personen bewegen sich ständig zwischen ihnen hin und her. Ein einfacheres Flüssigkeitsmodell erkläre die anomalen Eigenschaften des Wassers schlicht nicht.

Die Ergebnisse einer 2019 veröffentlichten Untersuchung mit Röntgenstreuung unter der Leitung von Alexander Föhlisch vom Helmholtz-Zentrum Berlin deuten allerdings eher auf eine kontinuierliche Verteilung hin. Unter Normalbedingungen hätte flüssiges Wasser demnach eine Ord-

nung, bei der es durchschnittlich 1,74 Wasserstoffbrückenbindungen pro Molekül gäbe. Die Forscher um Föhlisch halten in ihrer Studie ein Zwei-Zustände-Modell bei Normalbedingungen für unwahrscheinlich, selbst wenn in der Nähe der Phasengrenze Schwankungen auftreten.

Laut Soper wiederum erhält Wasser seine einzigartigen Eigenschaften beim Abkühlen weniger durch ein Nebeneinander zweier Flüssigkeiten, sondern eher dadurch, dass die Orientierung der Wassermoleküle allmählich regelrecht in tetraedrischer Ausrichtung einfriert, sogar bereits dann, wenn sie sich noch flüssigkeitstypisch bewegen. »Diese spezielle Ordnungsänderung im Wasser kommt in allen Diskussionen zu kurz«, bemängelt er.

Eine molekulare Anomalie mit globalen Konsequenzen

Ein Konsens über die Ursachen des seltsamen Verhaltens von Wasser ist unter Physikochemikern noch nicht in Sicht. Außenstehenden mag die Debatte geradezu esoterisch erscheinen. Aber die ungewöhnlichen Eigenschaften dieses ungemein wichtigen Lösungsmittels wirken sich entscheidend auf zahlreiche Forschungsfelder aus, vor allem bei sehr niedrigen Temperaturen – von Klimamodellen bis zu möglichen Bedingungen im Weltall. Für die Biologie sind die genauen molekularen Abläufe von grundlegender Bedeutung. »Wasser verleiht den Nukleinsäuren ihre interessante Struktur und ihre Eigenschaften, ebenso den Proteinen«, betont Martin Chaplin. Und Seen sowie Meere bieten nicht zuletzt deshalb so günstige Lebensbedingungen, weil Organismen wegen der geringeren Dichte von Eis selbst unter zugefrorenen Oberflächen überleben.

»Es ist schon interessant«, findet Nilsson, »dass wir es dort, wo das anomale Verhalten von Wasser eine Rolle spielt, häufig auch mit lebensfreundlichen Bedingungen zu tun haben.« Seinem Konzept zweier Zustände zufolge wird Wasser erst bei Temperaturen unter 50 Grad Celsius zu einer Mischung aus Flüssigkeiten niedriger und hoher Dichte. Das ist ausgerechnet der typische Temperaturbereich des Lebens. »Ist das ein Zufall, oder steckt etwas Bedeutsames dahinter, das wir noch nicht verstanden haben?« ◀

QUELLEN

Kim, K.H. et al.: Maxima in the thermodynamic response and correlation functions of deeply supercooled water. *Science* 358, 2017

Niskanen, J. et al.: Compatibility of quantitative X-ray spectroscopy with continuous distribution models of water at ambient conditions. *PNAS* 116, 2019

Poole, P.H. et al.: Phase behaviour of metastable water. *Nature* 360, 1992

Russo, J. et al.: Water-like anomalies as a function of tetrahedrality. *PNAS* 115, 2018

Sellberg, J.A. et al.: Ultrafast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature. *Nature* 510, 2014

Nutzung genehmigt von der Royal Society of Chemistry, aus Chemistry World (www.chemistryworld.com/features/the-weirdness-of-water/4011260.article)

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN OSZILLIERENDE REAKTIONEN MIT EISENSTÄBEN

In Physik und Biologie sind periodische Vorgänge lange bekannt. Doch erst Mitte des 20. Jahrhunderts zeigte sich, dass auch chemische Reaktionen wellenartig ablaufen können. Ein experimentell leicht nachvollziehbares Beispiel ist die Auflösung von Eisenstäben in Säuren.



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

» spektrum.de/artikel/1807469

► Früher galten chemische Reaktionen als Einbahnstraßen. Es schien selbstverständlich, dass die Umsetzung von Substanzen so lange stetig weitergeht, bis die Reaktanden verbraucht beziehungsweise komplett zu neuen Stoffen umgewandelt sind. Selbst ein chemisches Gleichgewicht hielt man für undenkbar.

Erst die umfassenden Arbeiten zum zeitlichen Ablauf der Reaktion von Essigsäure mit Ethanol zu Essigsäureethylester und Wasser, die Marcelin Pierre Eugène Berthelot (1827–1907) gemeinsam mit Léon Péan de Saint Gilles (1832–1863) im Jahre 1862 durchführte, verhalfen der Idee des Gleichgewichtszustands zum Durchbruch. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Konzentrationen der Ausgangs- und Endsubstanzen ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr ändern. Die Gesamtreaktion scheint zu ruhen. Tatsächlich aber laufen die Hin- und Rückreaktion weiterhin ab – nur eben mit derselben Geschwindigkeit.

Als Gustav Theodor Fechner (1801–1887) im Jahre 1828 über periodische Erscheinungen bei der Auflösung von Eisen in einer salpetersauren Silbernitratlösung berichtete, war die Fachwelt deshalb skeptisch und sah die Ursache des merkwürdigen Phänomens in unbekanntem externen Einflüssen. Auch spätere, ähnliche Entdeckungen blieben lange Zeit unbeachtet. Oszillierende Reaktionen schienen nämlich dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu widersprechen, wonach der Ordnungsgrad eines geschlossenen Systems (wie eine Ansammlung von Molekülen in einem Glaskolben) ohne Austausch von Energie mit der Umgebung nur abnehmen kann. Laut Rudolf Clausius (1822–1888), der diesen Hauptsatz begründete, strebt

sogar die Entropie (Unordnung) des Universums einem Maximum zu.

Erst die zukunftsweisenden Arbeiten von Ilya Prigogine (1917–2003; Nobelpreis 1977) zeigten, dass in offenen, gleichgewichtsfernen Systemen sehr wohl Ordnung entstehen und bestehen bleiben kann. Zum Ausgleich erhöht sich die Entropie in der Umgebung. Prigogine sprach von dissipativen Systemen, da sie auf Kosten einer ständigen Dissipation von nutzbarer Energie (Entwertung durch Umwandlung in Wärme) einen hohen Ordnungsgrad annehmen und aufrechterhalten können. Das ermöglicht selbstorganisierende, strukturbildende Systeme, zu denen insbesondere alle Lebewesen gehören – einschließlich uns Menschen.

In dissipativen Systemen lassen sich drei Arten von Strukturen unterscheiden:

- ▶ zeitliche Fluktuationen
- ▶ stationäre räumliche Muster
- ▶ raum-zeitliche Oszillationen.

Zeitliche Fluktuationen treten zum Beispiel bei der bekannten Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (BZ-Reaktion) auf (»Spektrum« Mai 1980, S. 131, und Mai 1983, S. 98). Dabei wechselt die Farbe der Reaktionslösung bei konstantem Rühren zwischen rot und blau. Ein anderes Beispiel, die periodische Aktivierung und Passivierung eines Eisenstabes, betrachten wir weiter unten genauer.

Zu stationären räumlichen Strukturen zählen unter anderem die Liesegangschen Ringe, die auf der periodischen Ausfällung schwerlöslicher Salze in Reaktions-Diffusionssystemen beruhen (»Spektrum« Januar 2018, S. 52). Ebenfalls in jene Kategorie fallen die 1990 von einer Ar-



EISEN IN SALPETERSÄURE In verdünnter Salpetersäure ist Eisen »aktiv«, es löst sich auf und entwickelt Wasserstoff (oben). In konzentrierter Salpetersäure reagiert es nicht, sondern verhält sich »passiv« (unten).

beitsgruppe aus Bordeaux unter Patrick DeKepper experimentell gefundenen Turingmuster. Der Mathematiker Alan Turing (1912–1954) hatte schon 1952 einen theoretischen Mechanismus entwickelt, wie Reaktions-Diffusionssysteme spontan räumliche Strukturen ausbilden können. Dieser Mechanismus dient heute meist dazu, die Morphogenese farbiger Muster auf dem Fell von Tieren wie dem Zebra zu erklären.

Raum-zeitliche Oszillationen als dritte Kategorie lassen sich unter bestimmten Bedingungen auch im schon er-

wähnten BZ-Reaktionssystem beobachten. Bringt man die rote Versuchslösung in eine flache Kristallierschale, bilden sich – ausgehend von verschiedenen Reaktionszentren – nach einigen Minuten wandernde Wellen in Form sich ausdehnender konzentrischer blauer Ringe.

Für das Auftreten strukturbildender Prozesse müssen, wie sich gezeigt hat, drei Bedingungen erfüllt sein:

- ▶ Das System muss weit vom Gleichgewichtszustand entfernt sein.
- ▶ Es muss ein Feedback existieren, so dass ein Produkt eines beliebigen Schrittes in der Reaktionsfolge seine eigene Bildungsgeschwindigkeit beeinflusst (Rückkopplungskonzept). Das bedeutet zugleich, dass das System einen Reaktionsschritt beinhaltet, dessen Verlauf nicht linear ist (Nichtlinearität). Beispiele hierfür sind chemische Umsetzungen, bei denen einzelne Produkte entweder katalytisch die eigene Bildung fördern (Autokatalyse) oder hemmen (Autoinhibition).
- ▶ Das System muss unter den gleichen äußeren Bedingungen mindestens zwei stabile Zustände einnehmen können.

Die Mechanismen, die strukturbildenden Reaktionen zu Grunde liegen, sind in der Regel ziemlich komplex. Im Folgenden stellen wir dagegen ein von uns entdecktes oszillierendes System vor, das sich mit nur wenigen Teilgleichungen befriedigend erklären lässt.

Schon 1790 war dem schottischen Chemiker und ersten industriellen Seifenfabrikanten James Keir (1735 bis 1820) aufgefallen, dass sich Eisen in Salpetersäure merkwürdig verhält. Salpetersäure hat die chemische Formel HNO_3 und spaltet sich in wässrigen Lösungen in Wasserstoffionen (H^+) und Nitrationen (NO_3^-) auf (Dissoziation).

In der verdünnten Säure löst sich das unedle Metall gemäß dem üblichen Mechanismus der Säurekorrosion unter Wasserstoffentwicklung auf. Die Reaktionsgleichung hierzu lautet (die Symbole »s«, »aq« und »g« stehen für »fest«, »in Wasser gelöst« und »gasförmig«):



Außerdem bilden sich durch eine in geringem Umfang ablaufende Nebenreaktion – die Oxidation von Eisen durch Nitrationen (siehe weiter unten) – bräunliche Schlieren aus Stickoxiden in der Lösung. Erhöht man die Säurekonzentration, wird erwartungsgemäß die Reaktion immer heftiger, und das Eisen löst sich umso schneller. In stark konzentrierter Salpetersäurelösung passiert jedoch völlig Überraschendes: Plötzlich bleibt das Eisen metallisch blank, und es steigen keine Wasserstoffblasen mehr auf (siehe »Eisen in Salpetersäure«).

Noch Jahrzehnte nach der Beobachtung dieses Phänomens durch Keir war der deutsche Chemiker Christian Friedrich Schönbein (1799–1868), Entdecker des Ozons und Erfinder der Brennstoffzelle, fasziniert davon. So schrieb er im Jahre 1836: »Ein noch viel räthselhafteres Verhalten zeigt unter gewissen Umständen das Eisen gegen die Salpetersäure; ein Verhalten, das, wie die Folge lehren wird, in hohem Grade verdient von wissenschaftli-

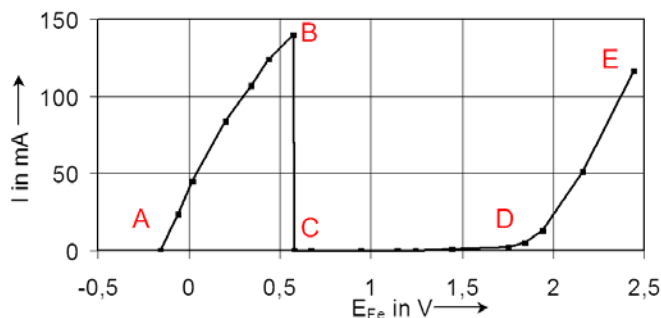
chen Chemikern seiner Ursache nach genauer erforscht zu werden.« Schönbein schlug als Erster vor, das derart veränderte Metall »passiv« zu nennen: »Der Einfachheit des Ausdrucks wegen, will ich in der Folge einen gegen Salpetersäure indifferent gewordenen Eisendraht einen passiven, einen von ihr angreifbaren aber einen activen nennen.«

Seinerzeit wurden viele Theorien zur Deutung dieses Phänomens aufgestellt und wieder verworfen. Schließlich gelang dem englischen Chemiker und Physiker Michael Faraday (1791–1867) mit seiner Oxidhauthypothese eine Erklärung, die bis heute gilt. Demnach rührt die Passivität von einem äußerst dünnen, vom Auge nicht wahrnehmbaren Eisenoxidfilm her. Doch wie und warum bildet sich eine solche Schutzschicht?

Grundlegende Einblicke in die Vorgänge bei der Passivierung eines Metalls liefern so genannte Strom-Potenzial-Kurven. Diese werden gewöhnlich mit potentiostatischen oder galvanostatischen Verfahren aufgezeichnet. Es gibt aber eine wesentlich einfachere Methode, die ohne teure Geräte auskommt (siehe »Versuchsaufbau zur Aufnahme von Strom-Potenzial-Kurven«).

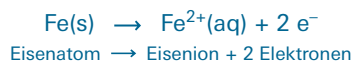
Dabei wird das zu untersuchende Metall, hier ein drei Millimeter breiter Eisenstab, zwei bis drei Millimeter tief in Schwefelsäurelösung eingetaucht und mit dem Pluspol einer Spannungsquelle verbunden, das heißt als Anode geschaltet. Als Kathode dient eine Platinelektrode. Während der Messung erhöht man schrittweise die angelegte Spannung und misst mit einem Amperemeter den Korrosionsstrom. Gleichzeitig wird mit einer Bezugshalbzelle das ansteigende Potenzial des Eisens (E_{Fe}) ermittelt. Die so erhaltenen Strom-Potenzial-Wertepaare lassen sich zu einer Kurve verbinden (siehe »Strom-Potenzial-Diagramm«).

Diese Kurve steigt zunächst an, weil sich das Eisen bei zunehmender anodischer Polarisation immer schneller

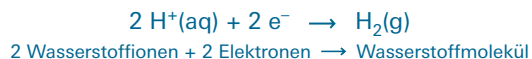


STROM-POTENZIAL-DIAGRAMM In einer einmolaren Schwefelsäurelösung steigt ab einem bestimmten Potenzial (etwa -0,2 Volt, Punkt A) der Stromfluss an der Eisen­elektrode zunächst an. Doch bei rund 0,6 Volt bricht er plötzlich ab (B) und sinkt auf null (C). Trotz weiterer Potenzial­erhöhung bleibt er auf diesem Wert und nimmt erst ab etwa 1,7 Volt (D) wieder zu.

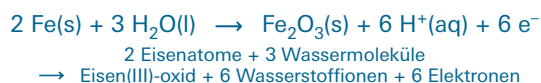
auf­löst. Die Reaktionsgleichung lautet:



Die Elektronen fließen zur Platinelektrode, an der Wasserstoff freigesetzt wird.



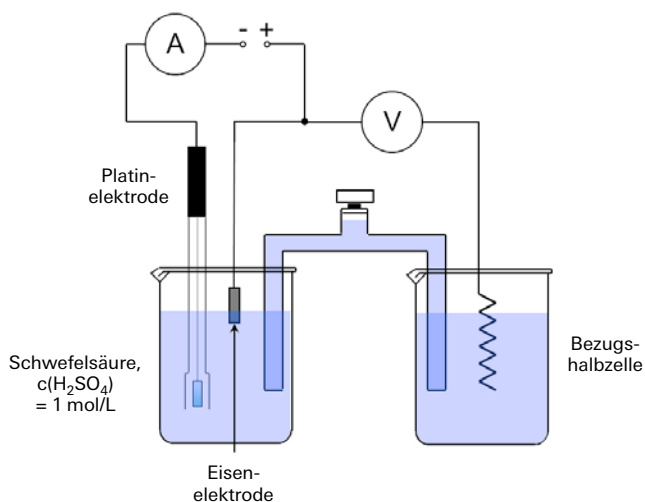
Bei einem Potenzial E_{Fe} von etwa 0,6 Volt sinkt der Stromfluss jedoch plötzlich auf null ab, weil nun eine weitere Umsetzung thermodynamisch möglich ist: die Passivierungsreaktion. Dabei bildet sich an der Oberfläche des Eisenstabs ein fester, undurchlässiger Film aus Fe_2O_3 (das Symbol »l« steht für »flüssig«).



Während die Wasserstoffionen in der Lösung verbleiben, treten die Elektronen in den positiv geladenen Eisenstab über.

In der Folge fließt kein oder kaum noch Strom; denn der Oxidfilm verhindert sowohl die weitere Auflösung von Eisen als auch sein eigenes Wachstum. Dies ist demnach ein nichtlinearer Reaktionsschritt, eine Autoinhibition.

Dass der Strom bei anhaltender anodischer Polarisation des Eisenstabs schließlich wieder zu fließen beginnt, beruht auf der elektrochemischen Oxidation des Wassers an der passiven Eisenoberfläche, bei der gasförmiger Sauerstoff entsteht. Dieser Bereich spielt für unsere Betrachtungen allerdings keine Rolle. Im Übrigen ist die Passivierung von Metallen durch Anlegen einer anodischen Spannung keineswegs nur ein theoretisch interessanter Laboreffekt; sie hat auch große technische Bedeutung beim Korrosionsschutz.

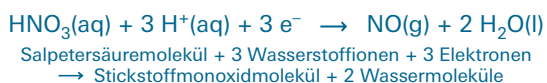


VERSUCHSAUFBAU ZUR AUFNAHME VON STROM-POTENZIAL-KURVEN Das Amperemeter (A) misst den Strom, das Voltmeter (V) die Spannung, die schrittweise erhöht wird.



OSZILLIERENDE EISEN-STÄBE In schwefelsaurer Wasserstoffperoxidlösung durchläuft Eisen aktive und passive Phasen. Im linken Bild ist der linke Stab in einem aktiven Zustand, der rechte hingegen in einem passiven. Auf dem rechten Bild ist es umgekehrt.

Anhand der geschilderten Zusammenhänge lässt sich nun auch die Passivierung von Eisen in konzentrierter Salpetersäurelösung erklären. HNO_3 reagiert nämlich nicht nur sauer, sondern wirkt zugleich stark oxidierend. Es hat also eine ausgeprägte Tendenz, gemäß folgender Gleichung Elektronen anzuziehen:



Damit übernimmt es quasi die Funktion der Spannungsquelle bei der Passivierung durch anodische Polarisation. Indem die Salpetersäure dem Eisenstab Elektronen entzieht, hebt sie das Eisen-Potenzial an. Ab einer bestimmten HNO_3 -Konzentration übersteigt es so schließlich das Passivierungspotenzial. Dadurch bildet sich plötzlich der Eisen(III)-oxidfilm auf der Metalloberfläche. Dieser bleibt durch die Autoinhibition seiner Bildungsreaktion äußerst dünn, so dass das Eisen seinen typischen Glanz behält.

Schon 1825 hatte der englische Naturforscher John Frederick William Herschel (1792–1871) entdeckt, dass im Bereich zwischen den »wirksamen« und »unwirksamen« Konzentrationen der Salpetersäurelösungen »intermediäre Zustände« des Eisens auftreten: »Die Wirkung [der Salpetersäure] hört für einen Augenblick auf, beginnt dann auf's Neue, hört wieder auf und so fort; solche convulsive Intermittenzen folgen einander zuweilen ziemlich langsam in Zwischenräumen von 0,5 oder 0,4 Sekunden, zuweilen aber mit ungemeiner Schnelligkeit, so daß man sie nicht mehr zählen kann.«

Herschel hatte damit als einer der Ersten eine oszillierende Reaktion beobachtet. Das Eisen schwankt zwischen dem aktiven Zustand mit Gasentwicklung und der passiven Phase hin und her. Dieses periodische Verhalten spiegelt sich auch in seinem elektrischen Potenzial wider, das zwischen hohen (passiver Zustand) und niedrigen Werten (aktiver Zustand) wechselt.

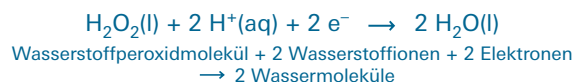
Solche spontan auftretenden Schwankungen werden als Eigenoszillationen bezeichnet. Inzwischen ist außer Salpetersäure eine Reihe von anderen Elektrolyten bekannt, in denen das Phänomen beim Eintauchen von Eisen auftritt. Hierzu zählen schwefelsaure Kaliumbromat- und Kaliumdichromatlösungen. Auch andere Metalle, wie Kupfer, zeigen unter bestimmten Bedingungen analoge Schwankungen. Die Konzentrationsfenster, in denen

Eigenoszillationen von Metallen auftreten, sind jedoch sehr klein und schwer aufzufinden.

Wir selbst haben im Jahr 2000 einen weiteren Elektrolyten entdeckt, in dem Eisen oszilliert: eine schwefelsaure Wasserstoffperoxidlösung. Damit lässt sich das Experiment auch etwa in der Schule durchführen, weil die eingesetzten Chemikalien im Gegensatz zu den oben aufgeführten vergleichsweise harmlos und leicht zu entsorgen sind. Als Eisenelektrode dient ein Reineisenstab (Länge zirka 2 Zentimeter, Durchmesser 3,2 Millimeter, Bezugsquelle: www.goodfellow.com, Artikel-Nr. FE007920). Dieser muss entfettet und intensiv geschmirgelt werden. Der Elektrolyt hat folgende Zusammensetzung: 32,5 Milliliter Wasser; 8,5 Milliliter einmolare Schwefelsäurelösung und 9,5 Milliliter 30-prozentige Wasserstoffperoxidlösung. Die Ausgangslösungen sind dabei exakt einzustellen. In eine Petrischale mit dem Elektrolyten werden schließlich ein oder zwei Eisenstäbe gelegt. Nach wenigen Augenblicken setzt eine pulsierende Gasentwicklung ein – was besonders gut beobachtbar ist, wenn die Schale auf einem Tageslichtprojektor steht.

Falls sich keine Oszillationen einstellen (zunächst abwarten, die Schwankungen können auch niederfrequent sein!), sollte der Eisenstab herausgenommen, kurz abgespült, abgetrocknet und erneut geschmirgelt werden. Anschließend legt man ihn wieder in die Lösung. Falls die Oszillationen immer noch ausbleiben, wiederholt man den Vorgang und fügt vor dem erneuten Eintauchen des Eisenstabs in den Elektrolyten weitere 0,1 bis 0,5 Milliliter der Schwefelsäurelösung hinzu. Bleibt der Stab dagegen ausschließlich im aktiven Zustand, befindet sich zu wenig Wasserstoffperoxid in der Lösung. Fügen Sie in diesem Fall unter Rühren ein paar Tropfen hinzu. Heben Sie den Eisenstab zwischendurch mit einer Pinzette heraus und tauchen ihn wieder ein.

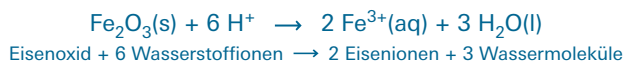
Das Prinzip hinter den Oszillationen in unserem System entspricht weitgehend dem von Eisen in Salpetersäure. Im aktiven Zustand geht das Metall gemäß dem üblichen Mechanismus der Säurekorrosion unter Wasserstoffentwicklung in Lösung. Zusätzlich wird aber an der Oberfläche des Eisenstabs Wasserstoffperoxid zu Wasser reduziert. Die dazu nötigen Elektronen liefert das Metall.



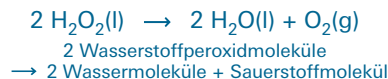
Der Stab wird dadurch positiv aufgeladen und genauso polarisiert, als sei er mit dem Pluspol einer Spannungsquelle verbunden. Infolgedessen steigt das Eisenpotenzial an. Bei den gewählten Konzentrationen erreicht es aber nicht ganz das zur Passivierung in diesem Elektrolyten nötige Potenzial EP. Entscheidend ist nun, dass die Lage dieses Potenzials vom pH-Wert abhängt. Es besteht der folgende Zusammenhang:

$$EP = 0,58 \text{ V} - 0,059 \text{ V} \times \text{pH}$$

Gemäß Gleichung (S. 62 unten) verbraucht die Reduktion von Wasserstoffperoxid Wasserstoffionen. Dadurch steigt der pH-Wert an der Phasengrenze zwischen Metall und Elektrolyt an, wodurch das Passivierungspotenzial absinkt und schließlich das aktuelle Eisenpotenzial erreicht. So kann sich ein Schutzfilm aus Fe_2O_3 abscheiden. Das Eisen wechselt folglich in den passiven Zustand. Die Oxidschicht blockiert nun alle bislang ablaufenden Reaktionen. Daher gleicht sich das Konzentrationsgefälle an Wasserstoffionen zwischen der Phasengrenze Eisen/Elektrolyt und dem Innern der Lösung aus. Das Passivierungspotenzial nimmt folglich wieder zu, und die Deckschicht löst sich auf:



Das Eisen befindet sich demnach erneut im aktiven Zustand, und der Zyklus beginnt von vorn. Als Nebenreaktion zerfällt ein Teil des Wasserstoffperoxids in Wasser und Sauerstoff.



Dieser Vorgang wird vom aktiven Eisen an dessen Oberfläche katalysiert. Dadurch bildet sich dort außer Wasserstoff ebenfalls Sauerstoff, was die Gasentwicklung verstärkt. Somit ist diese oszillierende Reaktion nicht nur messbar, sondern auch optisch sehr eindrucksvoll. ◀

QUELLEN

Ducci, M.: Periodische und chaotische Oszillationserscheinungen an Metallelektroden und elektrochemische Modellexperimente zur Erregungsleitung am Nerven. Dissertation, Universität Oldenburg 2000 (online verfügbar unter: <http://oops.uni-oldenburg.de/377/>)

Ducci, M., Uchtrup, H., Oetken, M.: Period-doubling and chaos of spontaneous oscillatory phenomena on iron, Monatshefte für Chemie 132, 2001

Spektrum PLUS+

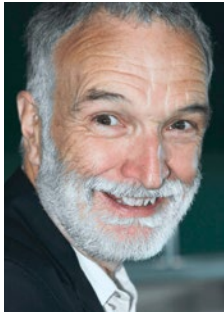
Ihre Vorteile als Abonnent

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

- ▶ Virtueller Vortrag von Redakteur Lars Fischer »Der Ursprung des Lebens« am 27. Januar 2021
- ▶ Virtueller Redaktionsbesuch **Spektrum** der Wissenschaft am 9. Februar 2021
- ▶ Verlosungen von Büchern und **Spektrum** Kompakts
- ▶ Rabatt für den Onlinekurs: **Spektrum** Schreibwerkstatt
- ▶ Preisnachlass auf diverse Leserreisen
- ▶ Kostenlose und ermäßigte digitale Produkte und weitere Vorteile:
 - kostenfreier Download des Monats im Januar: **Spektrum** Geschichte 1.20
 - reduzierte Digitalpakete »Gesunde Ernährung«, »Joballtag« und »Quantenphysik«
 - Englischkurs von Gymglish zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

SCHLICHTING! VERBORGENE MUSTER IM EIS



Wenn eine mit Wasser bedeckte Eisschicht schmilzt, entsteht auf ihr eine regelmäßige Struktur. Dabei spielt Wärmeübertragung durch Konvektion eine wichtige Rolle – und die besondere Dichteanomalie der Flüssigkeit.

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/1807511

Das Sichtbare erschließt den Blick in das Unsichtbare

Anaxagoras (499–428 v. Chr.)

Manche Phänomene prägen einem großen Gegenstand ein Muster auf und sind dennoch leicht zu übersehen. Dann kann ein Hilfsmittel sie visualisieren, so wie Eisenfeilspäne das Feld eines Magneten. In der Natur ist das oft ein anderer, etwas profaner und allgegenwärtiger Farbstoff: Schmutz. Bei einem speziellen Zusammentreffen von Eis und Wasser lenkt er den Blick auf eine Struktur, die sonst eher unscheinbar bliebe.

Der Vorgang spielt sich auf einem über mehrere Zentimeter zugefrorenen Regenwasserbehälter ab. Wenn Tauwetter einsetzt, bedeckt ihn bald eine Wasserschicht aus schmelzenden Schnee- und Eisresten vom Dach eines Hauses. Schaut man sich die unter Wasser liegende Eisschicht genauer an, so fällt etwas Seltsames auf: Der mitgeführte Schmutz ordnet sich darauf in einem Punktmuster an (siehe Bild »Schmelzmulden«). Dabei haben die Flecke durchweg einen etwa gleichen Abstand voneinander. Beim Abtasten mit den Fingern lassen sich unter den Partikelhäufchen jeweils Vertiefungen erfühlen. Das Eis scheint insgesamt durch ein Gitter von sonst unsichtbaren Mulden strukturiert zu sein – mit oder ohne Verunreinigungen.

Während der Entstehung des Musters bewegen sich einige Schmutzpartikel. Sie hüpfen auf der Stelle, als versuchten sie, ihre Kuhle zu verlassen. Der Vorgang erinnert an die Wirbel in einer Tasse Tee nach dem Umrühren. Sofern sich noch Blattstücke im Getränk befin-

H. JOACHIM SCHLICHTING



SCHMELZMULDEN Die dunklen Punkte in einer dünnen Wasserschicht auf einer Eisdecke weisen auf kleine Vertiefungen hin. Hier strömen Wirbel, in denen sich Schmutzteilchen gesammelt haben.

den, sammeln sie sich in der Mitte, und solange die Drehung anhält, wandern die Teilchen leicht auf und ab. Sie würden eigentlich der Flüssigkeitsströmung folgen und mit ihr einen dreidimensionalen Wirbel durchlaufen, scheitern jedoch an ihrer Schwere (siehe »Spektrum« Juni 2018, S. 62).

Die bewegten Partikel über den Mulden zeigen also an, dass hier das Wasser lokal rotiert. Die Ursache ist

allerdings eine andere als in der Teetasse. Die Wirbel erinnern vielmehr an die so genannte Rayleigh-Bénard-Konvektion. Diese ist manchmal in einer Pfanne mit heißem Fett zu beobachten, wenn sich darin enthaltene Schwebeteilchen zu einem polygonalen Muster anordnen. Ein solches lässt sich außerdem auf einfache Weise gezielt und effektiv erzeugen. Dazu bedeckt man eine flache Schale, etwa den Metalldeckel einer Cremedose, mit einer dünnen Schicht Silikonöl. Beigegebenes Kupfer- oder Aluminiumpulver hebt die Bewegungen hervor. Heizt man das Behältnis zum Beispiel mit einer Kerzenflamme von unten, bildet sich aus vielen kleinen Wirbeln eine zellenartige Struktur (siehe Bild »Konvektionszellen«).

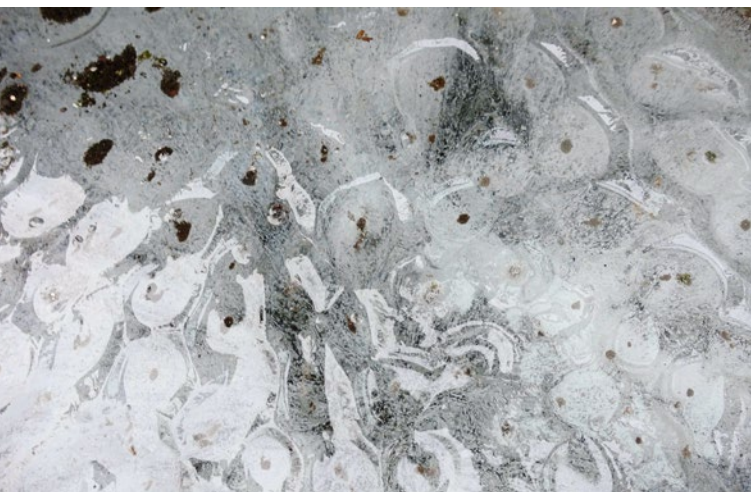
Scharf umgrenztes Auf und Ab

In dem Experiment verringert das Erhitzen der Flüssigkeit deren Dichte. Die entsprechend leichter gewordenen Portionen steigen vom Untergrund auf und strömen, sobald sie an der Oberfläche angekommen sind, radial zu den Seiten weg. Dabei geben die Pakete einen Teil ihrer Wärme an die kühlere Umgebung ab. Dadurch nimmt ihre Dichte zu, woraufhin sie wieder sinken. Zwischen benachbarten Zellen kommen sie auf die Art Flüssigkeitsmengen entgegen. Wo sie zusammenstoßen, entsteht die Grenze zwischen den Polygonen.

Genau genommen begleitet ein weiterer Vorgang die Rayleigh-Bénard-Konvektion. Er kommt durch die Abhängigkeit der Oberflächenspannung von der Temperatur zu Stande: Die oben ankommende warme Flüssigkeit hat eine geringere Oberflächenspannung als die kältere aus der Umgebung und wird deswegen regelrecht auseinandergerissen. Das unterstützt den durch Schwerkraft bedingten Transport in Richtung der kühleren Bereiche zusätzlich.

Das Geheimnis dieser besonderen Form der Strömung ist das flache Medium. Hier stellt sich statt eines einzigen, übergreifenden ein ganzes System kleiner, lokaler Wirbel ein, deren Größenordnung in etwa der Dicke der Schicht entspricht. Beispielsweise ist die Erdatmosphäre ebenfalls viel breiter als hoch; darum sind derartige Konvektionszellen ein wichtiger Grundprozess der Wetterabläufe.

KUHLENPOLYGONE Einen Tag später zeichnen sich in der Eisdecke die Grenzen der Zellen deutlich ab.



KONVEKTIONSZELLEN In einer wenige Millimeter dicken, von unten geheizten Ölschicht macht beigegebenes Kupferpulver Strukturen sichtbar, in deren Mitte jeweils erwärmte Flüssigkeit aufsteigt. Sie sinkt an den Grenzen zu den Nachbarbereichen wieder ab.

Das Geschehen auf dem gefrorenen Sammelbecken ähnelt diesen Phänomenen strukturell sehr. Das legt nahe, dass auch im Wasser über dem Eis ein System solcher dreidimensionaler Zellen aktiv ist. Allerdings sind hier die Temperaturverhältnisse gerade umgekehrt: Unten ist es kalt, oben ist es warm. Genau das ist die nötige Voraussetzung für eine Konvektionsbewegung im Temperaturbereich zwischen null Grad Celsius an der Eisschicht und einigen Grad mehr in der Umgebungsluft. Zwar verhält sich die Dichte von Wasser oberhalb von vier Grad wie bei den meisten anderen Flüssigkeiten. Aber unterhalb dieser Temperatur gibt es einen entscheidenden Unterschied: Hier nimmt die Dichte zu, wenn es wärmer wird. Physiker sprechen von der Dichteanomalie des Wassers. Darum bildet sich Eis an der Oberfläche eines Gewässers – eine für das Leben auf der Erde wesentliche Konsequenz der Anomalie.

Daher wird in dem besonderen Fall des Ablaufbeckens die Konvektion nicht durch das Aufheizen des Bodens angetrieben, sondern durch dessen Abkühlung. An der Oberfläche leicht erwärmtes Wasser sinkt und wird am Untergrund kälter. Seine Dichte nimmt ab, wodurch es wieder aufsteigt und so weiter. Infolgedessen kommt die Eisschicht zyklisch mit Wasser mit leichten Plusgraden in Kontakt, und die Konvektionsbewegung schmilzt eine zunehmende Vertiefung hinein (siehe Bild »Kuhlenpolygone«). Entlang der gesamten Eisfläche entsteht darum ein Muster aus vielen Mulden. Ohne diesen äußerst effektiven Wärmetransportmechanismus würde es viel länger dauern, bis das Eis unter einer Wasserschicht geschmolzen ist.

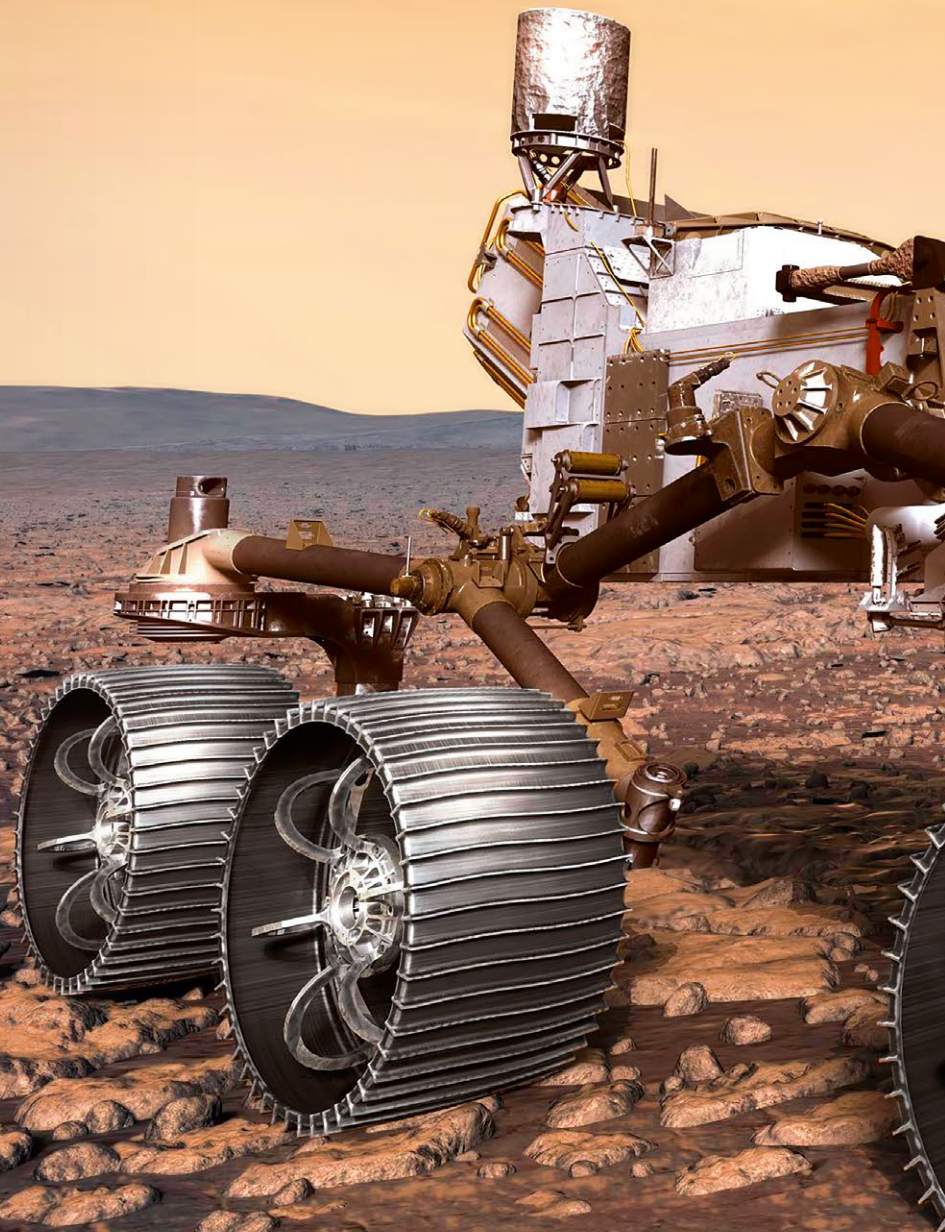
RAUMFAHRT MISSION: MARS

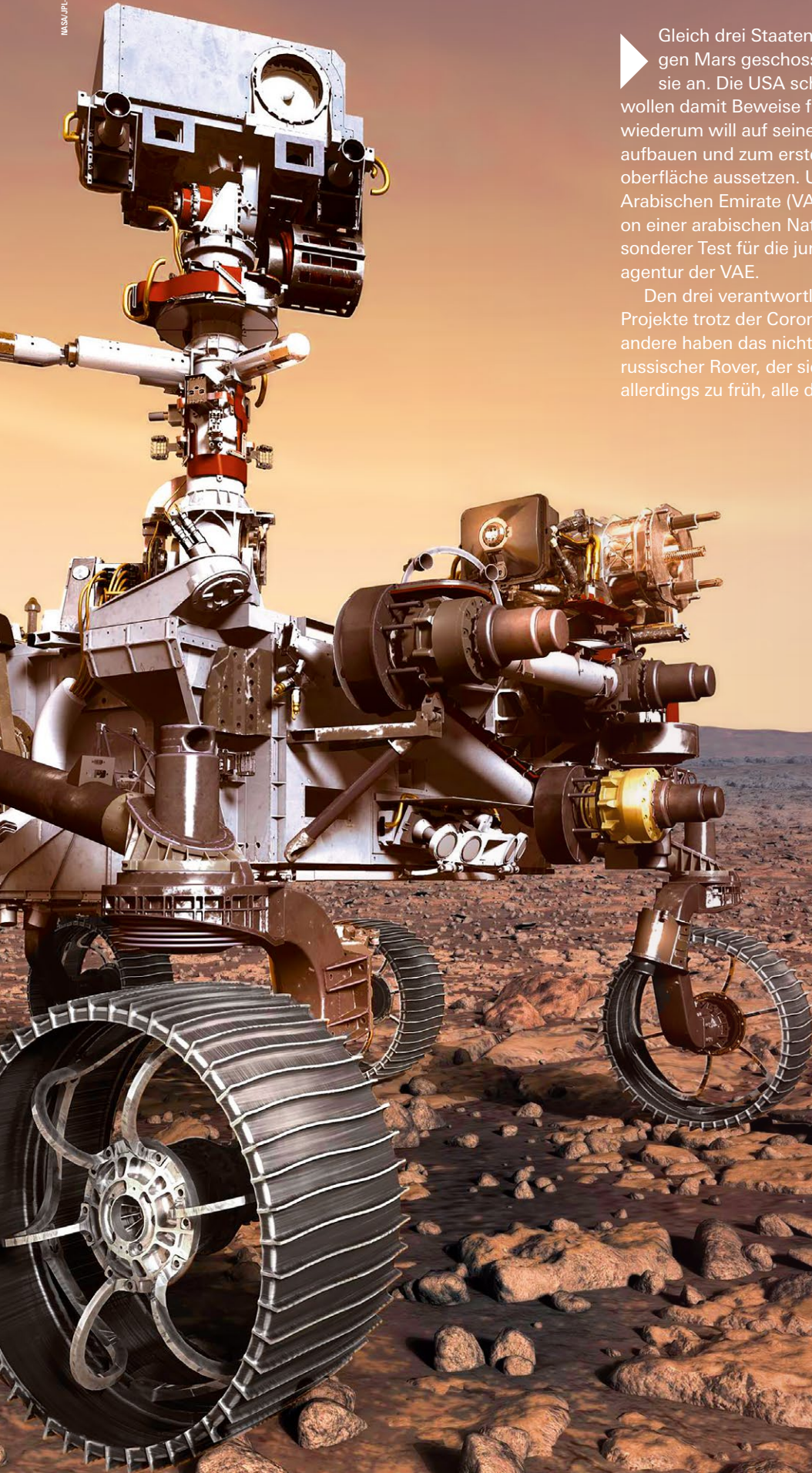
Im Februar 2021 werden Raumsonden von drei Nationen den Mars erreichen. Ihre Missionsziele sind unterschiedlich – aber alle sollen unser Wissen über den Roten Planeten maßgeblich erweitern.



Alexandra Witze (links), Smriti Mallapaty (Mitte) und Elizabeth Gibney arbeiten als Reporterinnen für das Wissenschaftsmagazin »Nature«.

» [spektrum.de/artikel/1807472](https://www.spektrum.de/artikel/1807472)





► Gleich drei Staaten haben im Sommer 2020 Sonden gen Mars geschossen – und diesen Februar kommen sie an. Die USA schicken ihren fünften Rover und wollen damit Beweise für vergangenes Leben finden. China wiederum will auf seinen erfolgreichen Mondmissionen aufbauen und zum ersten Mal ein Gefährt auf der Marsoberfläche aussetzen. Und der Orbiter der Vereinigten Arabischen Emirate (VAE) ist die erste interplanetare Mission einer arabischen Nation überhaupt – und ein ganz besonderer Test für die junge, aber ehrgeizige Raumfahrtagentur der VAE.

Den drei verantwortlichen Teams ist es gelungen, ihre Projekte trotz der Corona-Pandemie ins All zu starten. Viele andere haben das nicht geschafft, darunter ein europäisch-russischer Rover, der sich bis 2022 verzögert. Noch ist es allerdings zu früh, alle drei gestarteten Missionen zum

PERSEVERANCE Der Rover ist bereits das fünfte ferngesteuerte Gefährt, das die NASA auf dem Mars absetzt. Er soll unter anderem Bodenproben sammeln.

Erfolg zu erklären: Knapp die Hälfte aller Marsmissionen sind bisher gescheitert, insbesondere die Landung auf unserem Nachbarplaneten gilt als außerordentlich heikel. Das musste zuletzt die europäische Mission ExoMars erfahren: Ihr Landemodul Schiaparelli zerschellte 2016 auf der Oberfläche der roten Welt.

Sollte es den aktuellen Expeditionen besser ergehen, werden sie unser Wissen über den Planeten maßgeblich erweitern: Der amerikanische und der chinesische Rover sollen jeweils in Regionen des Mars aufsetzen, die noch kein irdisches Gefährt erforscht hat (siehe Grafik »Landestellen«). Der Orbiter der VAE wiederum wird die Marsatmosphäre in bisher nicht erreichter Genauigkeit untersuchen.

Der drei Meter lange NASA-Rover namens Perseverance, zu Deutsch »Ausdauer«, stellt außerdem den Beginn des wohl bisher ambitioniertesten Forschungsprojekts auf dem Mars dar. Wenn alles nach Plan verläuft, wird er im Lauf seiner Mission Gesteinsproben aufsammeln. Diese soll das Gerät so lange aufbewahren, bis eine künftige Mission das Material abholen und zur Erde bringen kann. Solch eine Sample-Return-Mission wäre ein Novum bei der Erforschung des Mars und könnte Wissenschaftler in entscheidenden Fragen voranbringen.

Bei den vier bisherigen Marsrovern der NASA – Sojourner im Jahr 1997, Spirit und Opportunity 2004 sowie Curiosity 2012 – ging es dagegen lediglich um die Erkundung des Planeten. Die Verantwortlichen auf der Erde steuerten die Geräte einfach zu interessant erscheinenden Plätzen. Perseverance hingegen wird auf dem Mars eine konkrete Aufgabe verfolgen: Er soll eine breite Palette an Gesteinen sammeln und analysieren, die möglichst detaillierte Informationen über die geologische Entwicklung der Region liefern. Seine Mission soll der Rover dabei innerhalb eines Marsjahrs erfüllen, was knapp zwei Erdjahren entspricht. Die Gesteinsproben könnten Wissenschaftler dann in Laboren auf der Erde untersuchen und dabei vielleicht sogar potenzielle Signaturen von Leben entdecken, sofern es dieses auf dem Mars einmal gegeben hat.

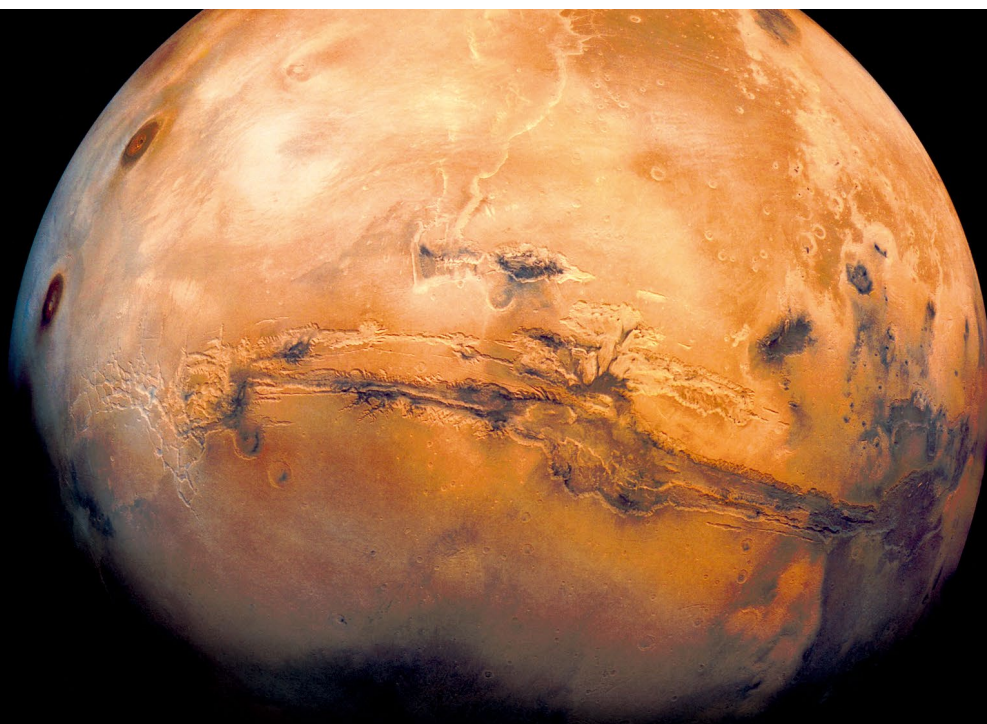
Bei Perseverance handelt es sich im Grunde um eine Kopie des Rovers Curiosity, der in den vergangenen acht Jahren den Gale-Krater erforscht hat. Das macht deutlich, dass es der NASA bei der neuen Mission auch darum ging, Geld zu sparen. Die Ingenieure haben das Design von Curiosity nur leicht verändert. Sie entwickelten zum Beispiel ein System zur Lagerung von Proben und verpassten dem Rover bessere Räder, die bei Curiosity eine Schwachstelle darstellen. Trotz solcher Sparmaßnahmen stiegen die Kosten der Mission auf 2,7 Milliarden US-Dollar, unter anderem wegen Problemen bei der Entwicklung einiger der Messinstrumente. Letztlich liegt die Summe fast 360 Millionen US-Dollar über dem anvisierten Budget.

Eine 3-D-Kamera und Mikrofone

Der Rover ist nun mit besseren Sensoren ausgestattet, darunter ein chemisches Analysegerät, das mit einem Laser die atomaren und molekularen Bestandteile von Gesteinsproben identifiziert. Das eingebaute Kamerasystem kann auf interessante Bereiche zoomen und sogar 3-D-Bilder aufnehmen. Außerdem ist der Rover mit Mikrofonen ausgerüstet, die Geräusche an der Oberfläche des Mars aufzeichnen können. Auch wird Perseverance von einer besseren Software gesteuert, die weniger Kommandos von der Erde erfordert und das Gefährt autonomer machen soll. Daneben wird er versuchen, Sauerstoff von CO₂-Molekülen abzuspalten, die den Großteil der Marsatmosphäre ausmachen. Mit der Technik könnten künftige Raumfahrer flüssigen Sauerstoff gewinnen, der als Treibstoff für Raketen dienen würde. Darüber hinaus hat der Rover einen kleinen solarbetriebenen Hubschrauber an Bord – der als erstes Fluggerät auf dem Mars abheben soll (siehe Interview ab S. 73).

Auch das System zur Probenentnahme haben die Ingenieure neu entwickelt. Wenn der Rover Steine entdeckt, die Missionswissenschaftler interessant finden, streckt der Roboter seinen 2,1-Meter-Arm aus und bohrt ein ein Zentimeter breites und sechs Zentimeter langes Stück aus dem Gestein. Mittels eines Röntgen- sowie eines Ultraviolett-spektrometers kann Perseverance die Proben dann im

DER ROTE PLANET
55 Jahre nach dem ersten Vorbeiflug einer Raumsonde fasziniert der Mars mehr denn je. Wie und wann verlor er das Wasser, das tiefe Canyons in seine Oberfläche fräste? Und hat sich dort einst primitives Leben entwickelt?



Detail analysieren, bevor er sie in einer von insgesamt 43 röhrenförmigen Kapseln versiegelt. Mindestens 20 dieser Röhren soll der Rover füllen und auf der Marsoberfläche zwischenlagern, bis ein künftiger Roboter eintrifft, um sie abzuholen. Die NASA plant hierfür eng mit der ESA zusammenzuarbeiten. Gemeinsam will man 2026 eine Mission zum Mars starten, die die Döschen aufsammeln und im Jahr 2031 zur Erde zurückbringen soll.

Die US-Mission wird am 18. Februar im 45 Kilometer breiten Jezero-Krater landen, etwas nördlich des Marsäquators und an einer Stelle, an der es wohl in ferner Vergangenheit einen See und ein Flussdelta gab. Die Region bietet eine große Vielfalt an geologischen Landschaften, von denen Perseverance möglichst viele erkunden soll. Die Ingenieure des Jet Propulsion Laboratory im kalifornischen Pasadena haben dazu bereits mehrere 15 Kilometer lange Routen ausgearbeitet, die der Rover im Lauf seiner Mission abfahren könnte.

Auch Chinas Pläne sind ehrgeizig. Seine Mission besteht aus drei Teilen: einem Orbiter, einer Landesonde und einem Rover, die zusammen 13 wissenschaftliche Instrumente an Bord haben. Die Mission trägt den Namen Tianwen-1, was so viel wie »Fragen an den Himmel« bedeutet. Sie ist Chinas bislang ambitionierteste Reise ins All. Nach der Ankunft im Februar wollen die Wissenschaftler einerseits die Marsatmosphäre umfassend untersuchen, andererseits die innere Struktur und Oberfläche des Planeten. Auch eine Suche nach Wasser und Spuren von einstigem Leben stehen auf der Agenda.

Für die Volksrepublik ist es der zweite Versuch einer Reise zum Mars: 2011 ging ein Orbiter, der an Bord einer russischen Raumsonde reiste, in den Weiten des Alls verloren. Nach diesem Rückschlag konnte China jedoch andere Erfolge im Weltraum vermelden: Im Jahr 2013 war es das dritte Land, dem eine sanfte Landung auf dem Mond gelang. 2019 setzte eine chinesische Landesonde erstmals auf der »dunklen« Seite des Mondes auf, die von der Erde aus nie zu sehen ist. Und im Mai 2020 testete China schließlich ein Raumschiff, das die Besatzung zur neuen Raumstation des Landes bringen soll, die man im Jahr 2022 fertig stellen will.

Das Marsprojekt ist aus Sicht von Ingenieuren noch ein Stück ambitionierter. Schließlich ist die Strecke zum Mars 1000-mal länger als die zum Mond. Zudem hat der Planet eine doppelt so große Schwerkraft, eine Atmosphäre und ist mit dichtem Gestein übersät, was eine Landung riskant macht. Generell hält sich die chinesische Regierung sehr bedeckt, was das Vorhaben angeht: Die meisten öffentlichen Informationen stammen aus Artikeln und Berichten der staatlichen Medien, in denen jedoch wichtige Details fehlen, etwa das Budget. Auch das genaue Startdatum und der Ort, an dem die Sonde auf dem Planeten landen soll, waren lange Zeit unbekannt.

Tianwen-1 ist dabei die erste Marsmission, die aus einem Dreiklang aus Orbiter, Landesonde und Rover besteht. Mitte Februar soll das Raumschiff eine Marsumlaufbahn erreichen, später werden dann Rover und Lander vom Orbiter getrennt. Im April sollen diese dann auf der Oberfläche landen. Das chinesische Team hat sich hier auf Gebiete

AUF EINEN BLICK NEUE BESUCHER FÜR DEN ROTEN PLANETEN

- 1** Drei neue Raumsonden sollen in den kommenden Wochen den Mars erreichen, sie stammen aus den USA, China und den Vereinigten Arabischen Emiraten.
- 2** Sowohl die NASA als auch die chinesische Raumfahrtbehörde planen, fahrende Roboter auf der Oberfläche abzusetzen.
- 3** Der NASA-Rover Perseverance wird dabei Gesteinsproben sammeln. Eine spätere Mission soll sie zur Erde bringen. China hat langfristig ähnliche Pläne.

nördlich des Äquators auf den Ebenen von Utopia Planitia festgelegt. Die Landesonde ist mit einem Fallschirm ausgestattet. Nach dem Aufsetzen des Moduls soll der zirka 200 Kilogramm schwere Rover Solarpaneele ausfahren und eine Rampe hinunterrollen. Für den Rest seiner Lebensdauer von etwa 90 Marstagen, die jeweils 24 Stunden und 37 Minuten dauern, kann er dann autonom die Umgebung erkunden. Während der Mission dient der Orbiter als Kommunikationsverbindung zur Erde. Die Planer wollen ihn in eine nahe Umlaufbahn bringen und von dort den Planeten ein ganzes Marsjahr lang beobachten.

Dünen, Gletscher, Vulkane – sie alle soll der chinesische Orbiter genau kartieren

Das chinesische Team hat den Orbiter mit insgesamt acht und den Rover mit fünf Instrumenten ausgestattet. Das Radarsystem des Orbiters kann geologische Strukturen bis 100 Meter unter der Oberfläche kartieren und nach Wasser und Eis suchen. Hochauflösende Kameras sollen außerdem Bilder von geologischen Merkmalen wie Dünen, Gletschern und Vulkanen sammeln und Hinweise auf deren Entstehung liefern. Sowohl der Orbiter als auch der Rover werden Spektrometer mitführen, um geologische Strukturen und die Zusammensetzung von Boden und Gestein zu untersuchen. Das Team plant zudem, atmosphärische Daten wie Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und -richtung zu sammeln sowie Magnet- und Gravitationsfelder auf dem Mars aufzuzeichnen.

»Ähnliche Instrumente wurden bereits auf früheren Missionen zum Mars geschickt«, sagt Raymond Arvidson, ein Planetengeologe an der Washington University in St. Louis im US-Bundesstaat Missouri. »Aber der Mars ist groß und hat eine komplizierte geologische Geschichte, so dass die von Tianwen-1 generierten Daten Informationen über Regionen liefern werden, die bisherige Beobachtungen nicht abdecken.«

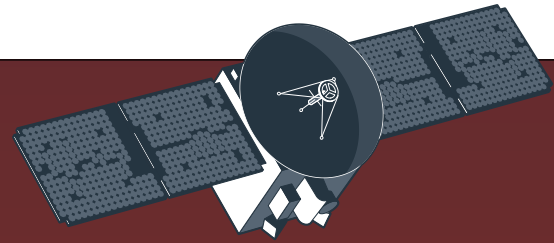
Arvidson würde es daher begrüßen, wenn die Chinesen die Daten der internationalen Wissenschaft zur Verfügung

Achtung, Erdlinge!

Drei Raumsonden werden im Februar 2021 am Roten Planeten ankommen und eine große Bandbreite neuer Informationen zur Erde funken.

Noch nie haben binnen eines Monats so viele und zugleich so vielseitige Raumsonden den Mars erreicht. Die drei Missionen von den USA, China und den Vereinigten Arabischen Emiraten umfassen zwei Orbiter, zwei Rover, ein stationäres Oberflächenlabor – und sogar einen kleinen Hubschrauber. Sie sollen verborgenen Wasservorkommen auf dem Mars nachspüren und die dünne Atmosphäre unseres Nachbarplaneten untersuchen. So können sie vielleicht Hinweise auf vergangenes Leben aufspüren.

Von Richard Monastersky (Text) und Jasiak Krzysztofciak (Design)

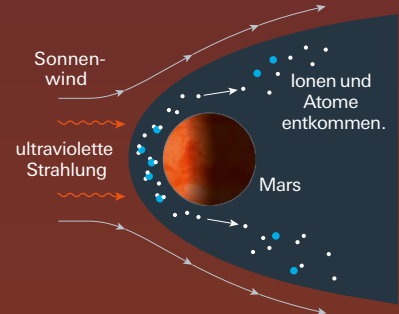


Die Raumsonde Hope (Al-Amal)

Die Mission der Vereinigten Arabischen Emirate (VAE) soll in einem elliptischen Orbit in einem Abstand von 22 000 bis 44 000 Kilometer um den Planeten fliegen. Al-Amal hat zwei Spektrometer an Bord und eine Kamera, die Informationen über die Atmosphäre sammelt.

Die flüchtige Atmosphäre

Der Mars hatte einst eine dichte Atmosphäre und eine beträchtliche Menge an flüssigem Wasser auf der Oberfläche. Doch über Millionen von Jahren hat sich ein Großteil der Atmosphäre verflüchtigt. Hope wird untersuchen, wie Sauerstoff- und Wasserstoffatome und -ionen in das Weltall entkommen.



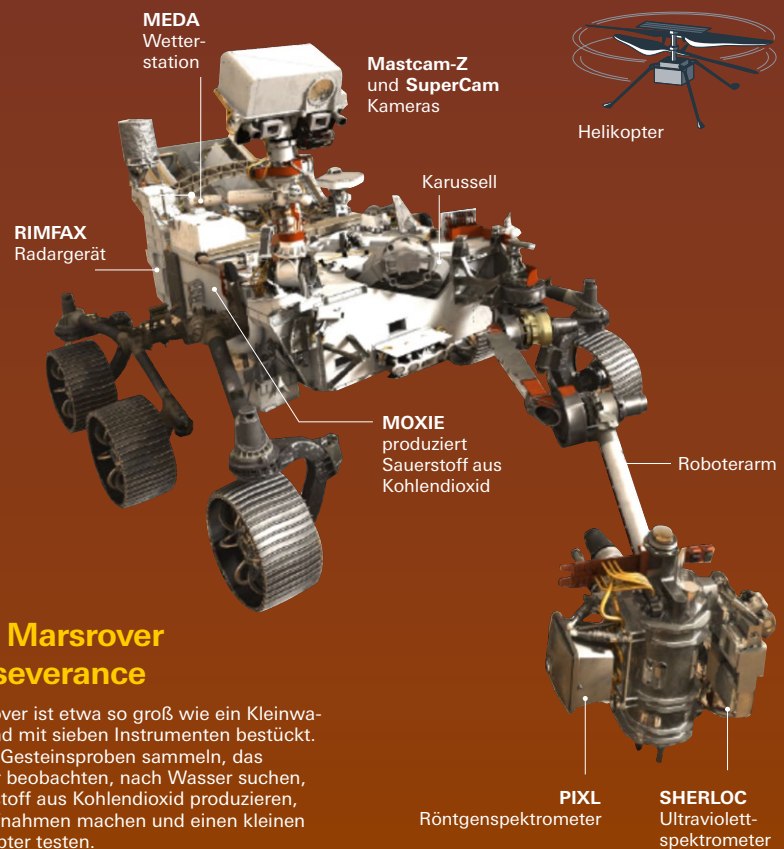
Landestellen

Der US-Rover Perseverance wird im Jezero-Krater landen, in der Nähe eines ehemaligen Flussdeltas. Es gilt als idealer Ort, um mögliche Spuren von vergangener Leben zu finden – falls es jemals existierte. Die chinesische Landesonde soll dagegen in der Region Utopia Planitia aufsetzen.

● Tianwen-1 mögliche Landestellen



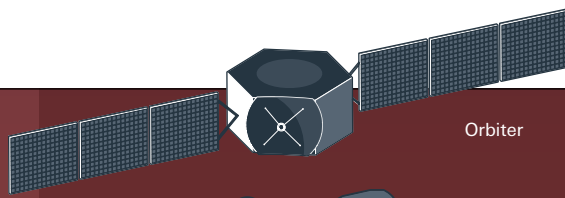
● vorherige Missionen



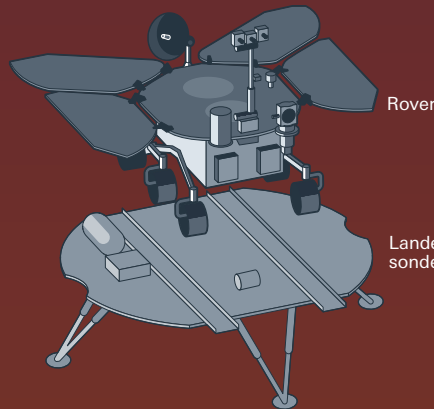
Der Marsrover Perseverance

Der Rover ist etwa so groß wie ein Kleinwagen und mit sieben Instrumenten bestückt. Er soll Gesteinsproben sammeln, das Wetter beobachten, nach Wasser suchen, Sauerstoff aus Kohlendioxid produzieren, Tonaufnahmen machen und einen kleinen Helikopter testen.

NATURE, LANDESTELLEN: MACH, E. LANDAVALL/PLANETARY SOCIETY; MARSKARTE: USGS; FLÜCHTIGE ATMOSPHERE: MACH, ESA; (GO NATURE.COM/ZD/20/10/AL); PERSEVERANCE MIT HELIKOPTER: MASA/JPL/CALTECH; WITZE, A. ET AL.; COUNTDOWN TO MARS: THREE DARING MISSIONS TAKE AIM AT THE RED PLANET; NATURE S&C, 2020; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



Orbiter



Rover

Lande-sonde

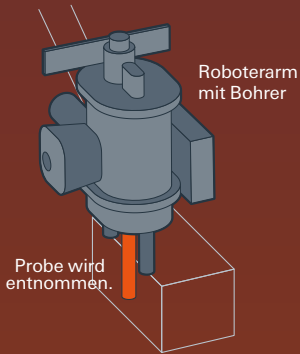
Tianwen-1

Chinas Mission wird einen Orbiter, einen Rover und eine Landesonde zum Mars bringen. Sowohl der Rover als auch die Landesonde haben Instrumente an Bord, die Wasser und Eis auf der Oberfläche oder im Boden aufspüren können.

Der Roboter-Geologe

Perseverance soll Gestein sammeln und bis zu 43 Proben aufbewahren. Eine spätere Mission soll sie zur Erde bringen. Dort könnte das Marsgestein den ersten definitiven Beweis dafür liefern, dass es einst Leben auf unserem Nachbarplaneten gab.

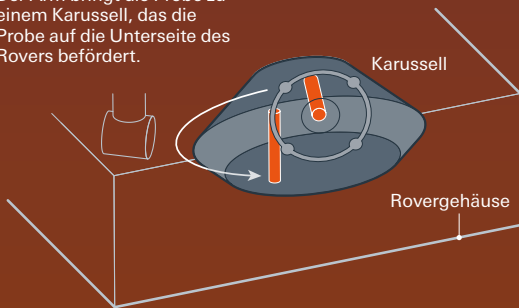
1 Der 2,1 Meter lange Arm kann Gesteinsproben entnehmen.



Roboterarm mit Bohrer

Probe wird entnommen.

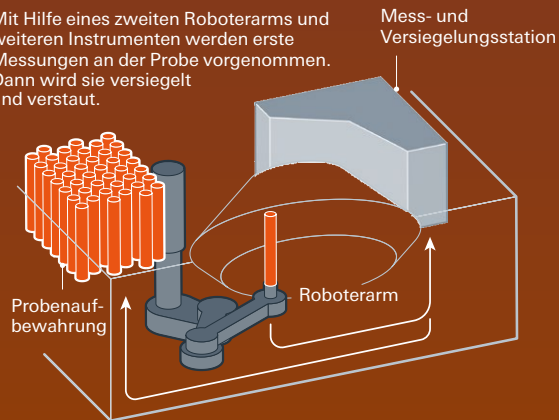
2 Der Arm bringt die Probe zu einem Karussell, das die Probe auf die Unterseite des Rovers befördert.



Karussell

Rovergehäuse

3 Mit Hilfe eines zweiten Roboterarms und weiteren Instrumenten werden erste Messungen an der Probe vorgenommen. Dann wird sie versiegelt und verstaut.



Mess- und Versiegelungsstation

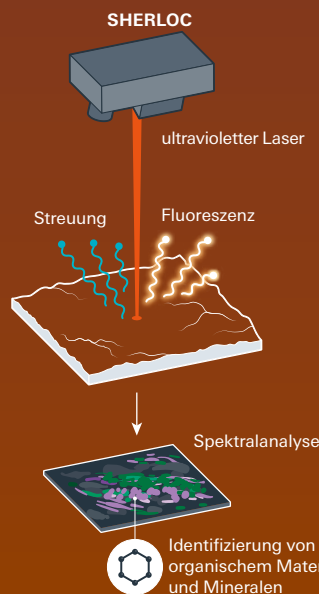
Probenaufbewahrung

Roboterarm

4 Eine künftige Mission soll versuchen, die Gesteinsproben auf die Erde zu bringen.

Suche nach Leben

Perseverance hat verschiedene Instrumente an Bord, die nach Spuren von Leben suchen sollen. Eines davon ist SHERLOC. Damit lässt sich Gestein mit einem ultravioletten Laser bestrahlen. Die reflektierten Strahlen und die Lumineszenz werden anschließend analysiert. Darin könnten sich Signale von organischen Molekülen und Mineralen finden lassen, die einst in Wasser entstanden sind.



SHERLOC

ultravioletter Laser

Streuung

Fluoreszenz

Spektralanalyse

Identifizierung von organischem Material und Mineralen

- Sowjetunion/Russland
- USA
- Europa
- andere

⊗ fehlgeschlagene Mission

← Vorbeiflug ↓ Landemodul

○ Orbiter ⚙️ Rover

..... 1960

⊗ ⊗ ⊗

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ← **Mariner 4** erster Vorbeiflug

Mars 3 erstes Landemodul, das Daten zur Erde gefunkt hat

..... 1970

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 1980

..... 1990

..... 2000

..... 2010

..... 2020

..... geplante Missionen

⊗ ⊗

..... 1990

⊗

..... 2000

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2010

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2020

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2030

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2040

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2050

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2060

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2070

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2080

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2090

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2100

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2110

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2120

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2130

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

..... 2140

⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗

MATURE WITZE, A. ET AL., COUNTDOWN TO MARS: THREE DARING MISSIONS THE AIM AT THE RED PLANET. NATURE 593, 2020. BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

stellen würden. Ein Vorbild könnte hier ein kostenloses Archiv geowissenschaftlicher Daten sein, wie es seine Universität und die NASA verwalten. Es enthält Details zu vielen früheren Planetenerkundungen und steht allen Wissenschaftlern offen.

Der chinesische Orbiter könne durchaus einige »Veteranen« unter den Marsmissionen überdauern, sagt Dmitrij Titov, Projektwissenschaftler für den im Jahr 2003 gestarteten ESA-Orbiter Mars Express. Einige der heutigen Satelliten nähern sich dem Ende ihrer Lebensspanne – darunter Mars Express und der Mars Reconnaissance Orbiter sowie der Orbiter Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) der NASA. Tianwen-1 kommt daher aus Sicht von Fachleuten zu einem guten Zeitpunkt. Im Idealfall wird er Marsforscher auf aller Welt weiter mit Daten versorgen, während westliche Raumfahrtbehörden mit der Planung der Sample-Return-Mission beschäftigt sind und selbst nur wenige Missionen im Orbit haben. Interessanterweise verfolgt China ähnliche Pläne: Bis zum Jahr 2030 will die Volksrepublik Proben vom Mars sammeln und zur Erde bringen. Ob das realistisch ist, ist unklar.



NASA, J. BELL (CORNELL U.) AND M. WOLFF (SSI)

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Für die Vereinigten Arabischen Emirate war die Reise zum Mars stets ein großer Traum. Dementsprechend wählten sie den Namen »Hope« (arabisch »Al-Amal«) für ihren Orbiter, also »Hoffnung«. Sollte er intakt sein Ziel erreichen, wäre es das erste interplanetare Unternehmen einer arabischen Nation. Al-Amal soll dort die erste globale Wetterkarte des Mars erstellen. Die Sonden anderer Nationen haben sich bisher stets in Orbits bewegt, von denen aus sie jeweils nur Teilbereiche der Atmosphäre zu begrenzten Tageszeiten beobachten konnten. So ließ sich mit der Zeit ein Bild der Atmosphäre zusammensetzen. Die lang gezogene, elliptische Umlaufbahn von Hope wird es dem Orbiter dagegen erlauben, große Marsregionen sowohl tagsüber als auch nachts im Blick zu behalten.

In einem der 55-stündigen Umläufe erfassen die Sensoren des Satelliten dabei fast den kompletten Planeten. »Wir werden in der Lage sein, den gesamten Mars zu allen Tageszeiten ein ganzes Marsjahr lang zu beobachten«, sagt Sarah Al Amiri, wissenschaftliche Leiterin des Projekts und Ministerin für Advanced Science. Die Kamera für das sichtbare Licht und das Infrarotspektrometer der Sonde werden dabei die Marswolken und Staubstürme in der unteren Atmosphäre untersuchen. Das Ultraviolettpektrometer der Sonde soll dagegen Gase in der oberen Atmosphäre überwachen. »Dies ist die erste Mission, die ein globales Bild der Atmosphärendynamik des Mars liefern

wird«, sagt Hessa Al Matroushi, Mitglied des Wissenschaftsteams der Mission.

Während der zweijährigen Mission wird Hope die täglichen Wetterschwankungen und den Wechsel der Jahreszeiten verfolgen. Der Orbiter soll damit nicht nur zur Vorbereitung einer künftigen Reise von Astronauten beitragen, sondern auch aufzeigen, wie Wasserstoff und Sauerstoff aus der Atmosphäre in den Weltraum entweichen. Das könnte Forschern helfen, das Marsklima zu verstehen und zu rekonstruieren, wie der Mars seine einst dicke Atmosphäre verloren hat.

Ein Geschenk zum 50. Geburtstag

Für seine wissenschaftlichen Ziele arbeitete das Team mit internationalen Kollegen zusammen. Die gewonnenen Daten würden der weltweiten Forschergemeinschaft ohne Einschränkung zur Verfügung gestellt werden, sagt Al Amiri. »Die Vereinigten Arabischen Emirate waren sehr daran interessiert, dass dies nicht nur ein Technologiedemonstrator wird, sondern dass es zum wissenschaftlichen Verständnis des Mars beiträgt«, sagt Richard Zurek, der das Marsprogramm am Jet Propulsion Laboratory der NASA leitet.

Die Konstruktion des Raumfahrzeugs war ein gewaltiger Schritt für die Emirate. Sie stellten dazu erfahrene Ingenieure von früheren NASA-Missionen ein, hauptsächlich von der University of Colorado Boulder. Diese Partnerschaft hat das ausdrückliche Ziel, dem Team im Mohammed Bin Rashid Space Centre, mit dem die ausländischen Ingenieure zusammenarbeiten, Knowhow zu vermitteln. »Wir sind ein junges Land, und ohne Partner und internationale Zusammenarbeit hätten wir all das nicht erreicht«, sagt Bildungsminister Ahmad Belhoul, der auch Vorsitzender der Raumfahrtbehörde des Landes ist.

Die Idee für das Projekt kam dabei überraschenderweise nicht von Wissenschaftlern, sondern von der Regierung selbst. Und sie setzte für dessen Umsetzung gleich eine nicht verhandelbare Frist bis zum 2. Dezember 2021, dem 50. Geburtstags der Nation. »Ein solches kühnes Vorhaben sollte nicht nur junge Menschen in der Region inspirieren, sondern auch den Übergang der VAE zu einer wissensbasierten Wirtschaft in Gang bringen«, sagt Omran Sharaf, Projektleiter der Marsmission der Emirate.

Die Universitäten des Landes bieten bereits fünf neue wissenschaftliche Studiengänge an, und die Begeisterung der Jugend für den Weltraum wächst. Und so dürften auch in den Vereinigten Arabischen Emiraten viele Menschen die Daumen drücken, dass in den nächsten Wochen und Monaten alles gut geht, dort draußen, dutzende Millionen Kilometer von uns entfernt. ◀

LITERATURTIPP

Lakdawalla, E.: Ein Roboter-Geologe für Mars. Spektrum der Wissenschaft 7/2018, S. 56–63.

Alles über die Mission von Curiosity

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 583, S. 184–188, 2020

INTERVIEW

»WIR WERDEN UNS FÜHLEN WIE DIE GEBRÜDER WRIGHT«

Der neue NASA-Rover »Perseverance« hat eine besondere Fracht an Bord: einen kleinen Helikopter. Bob Balaram hat das eigenwillige Fluggerät erfunden. Hier erzählt er, wie es dazu kam.

» [spektrum.de/artikel/1807475](https://www.spektrum.de/artikel/1807475)

Spektrum: Herr Balaram, wie kommt man auf die Idee, einen Mars-Helikopter zu bauen? Das klingt, nun ja, ein bisschen ...

Bob Balaram: ... verrückt? Sagen Sie es ruhig, das bekomme ich ständig zu hören.

Mit einem Minihubschrauber über den Mars zu fliegen, ist zumindest nicht sehr naheliegend.

Ausschlaggebend war eine Konferenz in den 1990er Jahren. Ein Professor aus Stanford stellte dort seine Idee winziger Hubschrauber vor, nicht größer als eine Münze. Ich unterhielt mich mit ihm, und mir fiel auf, dass große Hubschrauber auf dem Mars eine ähnliche Aerodynamik haben sollten wie solch kleine Helikopter auf der Erde.

Wie das?

Das liegt an der geringen Dichte der Marsatmosphäre. Ihr Druck entspricht etwa einem Prozent des irdischen Werts. Somit verhalten sich größere Fluggeräte dort ähnlich wie winzige auf der Erde.

Und das haben Sie dann einfach Ihrem Arbeitgeber, der NASA, vorgeschlagen?

Nicht nur. Wir hatten zuvor auch noch ein Experiment gemacht: Eine unserer Vakuumkammern hier am Jet Propulsion Laboratory (JPL) füllten wir mit Kohlendioxidgas, brachten sie auf Mars-Druck und ließen darin einen einfachen Propeller rotieren. Der erzeugte sogar Auftrieb. All das packten wir in den Antrag.

Dieser ist sicherlich auf Skepsis gestoßen, oder?

Ganz im Gegenteil, der Vorschlag wurde sehr gut aufgenommen. Leider war bei der NASA damals Sparen angesagt, so dass kein Geld für das Projekt zur Verfügung stand. Der Antrag lag dann 15 Jahre bei mir im Regal, bis unser damaliger JPL-Chef 2013 auf einer Konferenz einen Vortrag über Drohnen hörte. Sein spontaner Gedanke: Hey, können wir so etwas nicht auf dem Mars machen?



NASA/JPL/CALTECH

Bob Balaram

Die NASA war weit weg, als Bob Balaram in den 1960er Jahren im Süden Indiens aufwuchs. Doch sie war auch ganz nah – in Form glänzender Prospekte, die sein weltraumverrückter Onkel bei der US-Botschaft angefordert hatte. Balaram hat die Hefte, wie er sagt, verschlungen. Er verfolgte die Mondlandung im Radio, studierte Maschinenbau, promovierte in den USA und landete schließlich bei der NASA: Am Jet Propulsion Laboratory in Pasadena wirkte der Robotiker an verschiedenen Marsmissionen mit, bevor er als Cheffingenieur den Mars-Helikopter »Ingenuity« entwickelte.

Nun war Ihre Stunde gekommen.

Ja, zum Glück erinnerte sich jemand an mich und sagte dem Chef: »Bob hatte sich das doch schon in den 1990er Jahren angeschaut. Reden Sie mal mit ihm.« Innerhalb weniger Wochen schrieben wir einen neuen Antrag, und plötzlich floss das Geld.

Was war die größte Herausforderung beim Bau dieses Helikopters?

Die geringe Dichte der Marsatmosphäre, ganz klar. Das ist, als würde man hier auf der Erde in 30 000 Meter Höhe fliegen – dort sieht man für gewöhnlich keine Helikopter.

Auf dem Mars ist allerdings auch die Anziehungskraft kleiner.

Ja, zum Glück, sie liegt bei etwa 40 Prozent der Gravitation hier auf der Erde. Das macht unsere Aufgabe etwas leichter. Das große Problem bleibt trotzdem der nötige Auftrieb, schließlich können wir die Rotorblätter nicht einfach schneller rotieren lassen. Sobald deren Spitzen Schallgeschwindigkeit erreichen, bekommen wir allerhand störende Effekte.

Wie soll sich Ihr Helikopter dann in der Luft halten?

Das Wichtigste ist extremer Leichtbau. Der allerdings bringt wieder ganz andere Probleme mit sich: Trotz der filigranen Bauweise muss das Fluggerät die Vibrationen und Beschleunigungskräfte beim Start überstehen. Es muss dem Vakuum des Weltalls trotzen, der kosmischen Strahlung, den Marsnächten, in denen es minus 90 Grad Celsius kalt werden kann. Natürlich könnten wir alles besonders stabil bauen. Aber dann hätten wir am Ende einen Ziegelstein, der nie und nimmer auf dem Mars abheben würde.

Doch die Leichtbauweise macht den Helikopter anfällig für die teilweise recht starken Winde auf der Marsoberfläche.

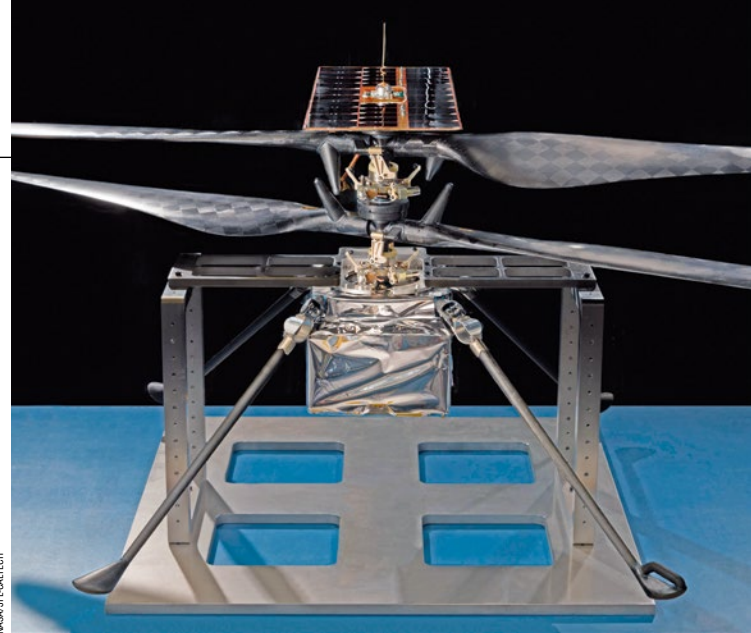
Die Winde sind, anders als es der Film »Der Marsianer« zeigt, nicht sonderlich gefährlich: Ein Mars-Sturm mit 100 Kilometern pro Stunde entspricht wegen der geringen Dichte etwa einem Wind von zehn Kilometern pro Stunde auf der Erde. Trotzdem mussten wir unsere Flugsoftware so auslegen, dass sie Böen ausgleichen kann. Außerdem

MARS-MISSION INGENUITY Sollte das kleine Fluggerät wirklich abheben, wäre es eine Premiere, ein Moment für die Geschichtsbücher. Scheitert das Vorhaben, haben die Ingenieure der NASA immerhin etwas gelernt.



Minihubschrauber

Das Foto zeigt den Mars-Helikopter in einem Reinraum des Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena, Kalifornien. »Ingenuity« wiegt insgesamt 1,8 Kilogramm. Die Technologie, die in den 1,2 Meter langen Rotorblättern steckt, wird auch bei robusten Drohnen verwendet, die in der Landwirtschaft zur Vermessung von Feldern zum Einsatz kommen. Die Aluminiumplatte, die Seitenstreben und der Querträger sollen den Hubschrauber schützen, wenn er am Bauch des NASA-Rovers »Perseverance« hängen wird. Wenn alles planmäßig verläuft, wird der Helikopter im Februar 2021 auf dem Mars landen. Der erste Flugversuch soll dann im Frühjahr erfolgen.



ist überall Staub, in der Atmosphäre und am Boden, der mechanische Probleme bereiten kann.

Klingt nach einer gewagten Mission. Konnten Sie die Marsbedingungen vor dem Start denn irgendwie simulieren?

Es gibt leider kein Lehrbuch: »So testen Sie einen Mars-Helikopter«. Das mussten wir alles selbst erfinden. Ich habe zum Beispiel im ganzen Land nach einem Vakuum-Windkanal mit niedrigen Geschwindigkeiten gesucht. Erfolglos. Letztlich habe ich dann hier am JPL in der großen Vakuumkammer 900 Computerlüfter installiert, die einen leichten Seitenwind erzeugten. Damit musste unser Helikopter klarkommen. Nie im Leben hätte ich gedacht, dass ich jemals einen Windkanal bauen würde.

Wie wird das Flugprogramm auf dem Mars aussehen?

Etwa zwei Monate nach seiner Landung wird der Rover »Perseverance« einen geeigneten Flugplatz für den Helikopter suchen, ihn absetzen und sich selbst in Sicherheit bringen. Dann haben wir 30 Marstage Zeit, um unser Experiment durchzuziehen – mit wahrscheinlich fünf Flügen. Der erste Hopper wird dabei sehr ähnlich zu dem sein, was wir auf der Erde getestet haben: abheben, drei oder vier Meter fliegen, 30 Sekunden schweben, zurückkehren. Schließlich müssen wir die Flugbedingungen auf dem Mars erst kennen lernen.

Eingreifen können Sie dabei nicht?

Nein, die Funksignale zum Mars sind fast 20 Minuten unterwegs. Daher muss alles autonom ablaufen. Wir laden vorher Kommandos, Wegpunkte und einen Startzeitpunkt hoch. Um 11 Uhr Ortszeit auf dem Mars legt der Helikopter automatisch los.

Warum um 11 Uhr?

Dann haben unsere Solarzellen die Akkus wieder aufgeladen – nach der kalten Nacht, in der viel Batterieleistung zum Heizen des Hubschraubers verbraucht wird. Zudem

haben die Winde noch nicht aufgefrischt. Beim vierten oder fünften Flug gehen wir aber vielleicht ein höheres Risiko ein.

Haben Sie Sorge, dass dabei etwas schiefgehen kann?

Das Ganze läuft unter dem Motto: hohes Risiko, hohe Chancen. Der Mars-Helikopter ist ein Technologiedemonstrator, entwickelt von einem kleinen Team ohne all die Sicherheitsanforderungen einer großen Mission. Wir nutzen zum Beispiel kommerzielle Elektronikkomponenten. Wenn die zum falschen Zeitpunkt von kosmischer Strahlung getroffen werden, so dass sich im Speichermedium des Helikopters ein Bit umdreht, war es das. Nichts ist garantiert bei solch einer Mission – noch dazu bei der Ersten ihrer Art.

Sie könnten Geschichte schreiben mit dem allerersten Flug auf einem anderen Himmelskörper als der Erde.

Ja, sollten wir erfolgreich sein, dann werden wir uns fühlen wie damals die Gebrüder Wright nach ihrem Motorflug in Kitty Hawk, nur auf einem anderen Planeten. Und wir werden bei all dem hoffentlich genug Daten sammeln können, um unser Fluggerät künftig zu vergrößern.

So groß, dass eines Tages Astronauten mit Hubschraubern über den Mars fliegen werden?

Das höchstwahrscheinlich nicht, dafür ist der Auftrieb dann doch zu gering. Helikopter bis 30 Kilogramm sollten aber machbar sein. Solche Marsdrohnen könnten eines Tages Astronauten aus der Luft den Weg weisen, sie könnten Bodenproben einsammeln und wissenschaftliche Instrumente mit sich tragen. Vor allem aber könnten sie all die Orte erkunden, zu denen nie ein Rover gelangen wird. ◀

Die Fragen stellte Alexander Stirn, Wissenschaftsjournalist in München.

INFORMATIK MATHEMATIKER AUS SILIZIUM

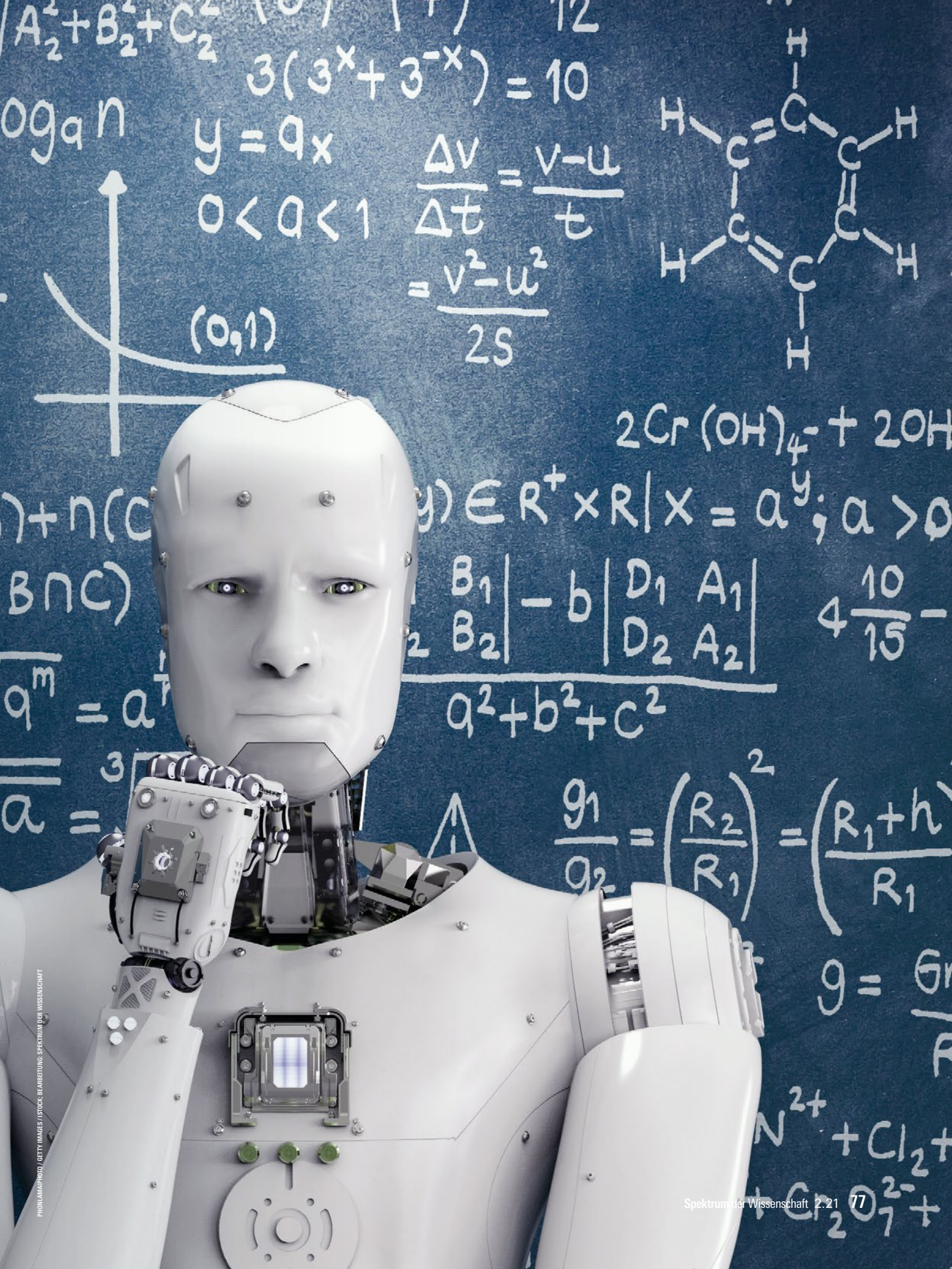
Ein Computer, der eigenständig mathematische Vermutungen formuliert und diese auch beweist – davon träumen viele Wissenschaftler. Neue Methoden der künstlichen Intelligenz könnten die Zukunftsvision ein Stück näher bringen.



Stephen Ornes ist Wissenschaftsjournalist in Nashville, Tennessee.

» spektrum.de/artikel/1807475

DENKENDE MASCHINEN Schon lange versuchen Informatiker ihren Programmen logische Schlussfolgerungen beizubringen. Inzwischen unterstützen Algorithmen Mathematiker bei ihrer Arbeit – und führen zu beeindruckenden Durchbrüchen.



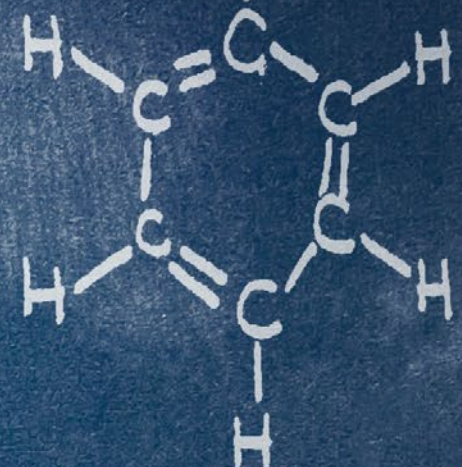
$$A_2^2 + B_2^2 + C_2^2 = 10$$

$$3(3^x + 3^{-x}) = 10$$

log a n

$$y = ax$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v-u}{t}$$
$$= \frac{v^2 - u^2}{2s}$$



\cap + n(C
B n C)

$$y) \in \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R} \mid x = a^y; a > 0$$

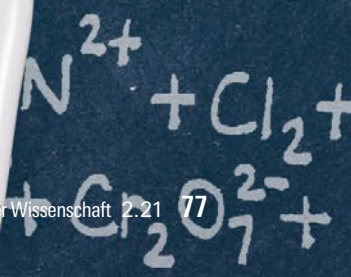
$$\begin{array}{c|c|c|c} B_1 & -b & D_1 & A_1 \\ \hline B_2 & & D_2 & A_2 \end{array}$$
$$q^2 + b^2 + c^2$$

$$4 \frac{10}{15}$$

$$a^m = a^n$$
$$a = 3$$

$$\frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 = \left(\frac{R_1 + h}{R_1} \right)^2$$

$$g = \frac{Gm}{R^2}$$



»Zu einem unbestimmten zukünftigen Zeitpunkt werden Mathematiker durch Computer ersetzt.« Die gewagte Vorhersage soll der renommierte Mathematiker Paul Cohen (1934–2007) Berichten zufolge in den 1970er Jahren gemacht haben. Bis heute stößt die Äußerung bei seinen Kollegen auf Gegenwind. Cohen war schon immer ein Querdenker: Seine revolutionären Methoden in der Mengenlehre brachten ihm die Fields-Medaille ein, damit ist er die erste und bisher einzige Person, welche die begehrte Auszeichnung für Arbeiten in der Logik erhalten hat. Zudem vertrat er die kontroverse Meinung, die gesamte Mathematik ließe sich automatisieren, einschließlich des Führens von Beweisen.

Anders als man durch die Erfahrungen aus dem Mathematikunterricht vielleicht denken mag, besteht die Arbeit eines Mathematikers nicht darin, zu rechnen. Seine Hauptaufgabe ist es, formale Aussagen unwiderruflich zu belegen. Ein Beweis ist ein schrittweise geführtes logisches Argument, das überprüft, ob eine Vermutung wahr ist. Sobald sie bewiesen ist, wird eine Vermutung zu einem Theorem (auch Satz genannt). Darüber hinaus erklären Beweise, warum eine Aussage gültig – oder falsch – ist. Gleichwohl sind sie schwer zu fassen, denn die Argumente bewegen sich in einer extrem abstrakten Welt, die nichts mit unseren alltäglichen Erfahrungen zu tun haben. »Wir Menschen sind für die Art von Aufgabe nicht geeignet«, sagt der Kognitionswissenschaftler Simon DeDeo von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh.

Bisher setzt man Computer meist ein, um große Berechnungen durchzuführen. Aber Mathematik erfordert etwas anderes. Vermutungen entstehen durch induktives Denken, eine Person muss sich intuitiv über ein interessantes Problem Gedanken machen. Beweise folgen meist einer deduktiven, schrittweisen Logik. Dazu verbindet man häufig komplizierte Zusammenhänge auf kreative Weise und füllt mühsam anschließend alle vorhandenen Argumentationslücken. Maschinen können solche Aufgaben bisher noch nicht meistern.

Dennoch gibt erste Ansätze, wie Algorithmen die Arbeit von Mathematikern unterstützen können. Sie lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: Automatisierte Theorembeweiser (englisch: automated theorem proving, kurz: ATP) verwenden in der Regel Brute-Force-Methoden, um große Berechnungen zu tätigen, etwa wenn man zahlreiche Fallunterscheidungen abarbeiten möchte. Interaktive Theorembeweiser (interactive theorem proving, ITP) nehmen dagegen die Rolle eines Assistenten an, der prüft, ob ein logisches Argument richtig ist. Damit kann man mit solchen Algorithmen nach Fehlern in bestehenden Beweisen suchen. Weder ATPs noch ITPs sind allerdings in der Lage, eine logische Argumentationskette zu erzeugen – nicht einmal neuere Theorembeweiser, die beide Ansätze miteinander verbinden. Darüber hinaus stoßen die Programme bei vielen Wissenschaftlern auf Ablehnung. »Sie sind sehr umstritten«, sagt DeDeo. »Den meisten Mathematikern gefällt die Idee nicht.«

Zunächst stellt sich die Frage, inwieweit sich die Beweisführung überhaupt automatisieren lässt: Kann ein Computer eine interessante Vermutung hervorbringen und diese dann auf nachvollziehbare Art belegen? Forschungseinrichtungen auf der ganzen Welt haben in den letzten Jahren die Fortschritte im Bereich der künstlichen Intelligenz genutzt, um der Frage nachzugehen. Josef Urban vom tschechischen Institut für Informatik, Robotik und Kybernetik in Prag nutzt beispielsweise unterschiedliche Ansätze des maschinellen Lernens, um bestehende Beweisprüfer leistungsfähiger zu machen. Im Juli 2020 gelang es ihm und seinen Kollegen, mehrere Vermutungen und Beweise von Computern generieren und überprüfen zu lassen. Bloß einen Monat früher hatten Forscher von Google Research unter

AUTOMATISIERTE FEHLERSUCHE Mit Hilfe von Algorithmen haben Mathematiker schon zahlreiche Fehler in ihren Arbeiten finden – selbst Newtons »Principia« wies Ungenauigkeiten auf.



der Leitung von Christian Szegedy ihre jüngsten Ergebnisse veröffentlicht, in denen sie natürliche Sprachverarbeitung nutzten, um die von Computern geführten Beweise verständlicher zu machen.

Einige Experten sehen Theorembeweiser als potenziellen Wendepunkt in der Mathematik. Andere entgegnen, Computer seien wahrscheinlich niemals in der Lage, selbstständig stichhaltige Argumentationsketten zu erstellen. Mathematiker, Logiker und Philosophen streiten schon lange darüber, welche Schritte beim Führen eines Beweises menschliche Fähigkeiten benötigen. Die Debatten dauern bis heute an, insbesondere in den Forschungsbereichen, welche die reine Mathematik mit der Informatik verbinden.

Für Informatiker dagegen sind Theorembeweiser keineswegs umstritten. Sie verfolgen das ehrgeizige Ziel der automatisierten Beweisführung weiter, denn es könnte auch ihr Fachgebiet maßgeblich beeinflussen. Wäre ein System in der Lage, eine bisher unbekannte Vermutung vorherzusagen oder ein neues Theorem zu belegen, hätte man einen neuen Meilenstein erreicht: eine maschinelle Version des Verstehens, so Szegedy. Damit ließe sich vielleicht irgendwann die menschliche Vernunft automatisieren (siehe »Spektrum« November 2020, S. 68).

KI entwickelt effiziente Verschlüsselung

Darüber hinaus können bereits existierende Theorembeweiser überprüfen, ob ein Programm funktioniert. Die philosophischen Bedenken, ob eine Maschine so intuitiv und kreativ wie ein Mensch handeln kann, spielen für Computewissenschaftler eine eher untergeordnete Rolle. Stattdessen konzentrieren sie sich darauf, einen effizienten Weg zum Lösen mathematischer Probleme zu finden. Am Massachusetts Institute of Technology hat zum Beispiel der Informatiker Adam Chlipala einen Theorembeweiser entworfen, der kryptografische Algorithmen erzeugt, um digitale Transaktionen zu sichern. Solche Programme haben bisher sonst immer Menschen geschrieben. Inzwischen nutzt der Google-Browser Chrome den computergenerierten Code für den Großteil der darüber stattfindenden Kommunikation.

In der Mathematik haben Algorithmen dazu beigetragen, komplizierte und insbesondere zeitaufwändige Beweise auszuarbeiten, die sonst hunderte Jahre in Anspruch genommen hätten. Die keplersche Vermutung, bei der es um die dichteste Anordnung von Kugeln geht, bietet ein aufschlussreiches Beispiel dafür. Im Jahr 1998 fand Thomas Hales zusammen mit seinem Studenten Sam Ferguson einen Beweis für die Lösung des Problems – doch die Hauptarbeit erledigte ein Computer: Die Maschine spielte zahlreiche verschiedene Fälle durch, wie man die Kugeln stapeln könnte, und schloss so eine Möglichkeit nach der

»Irgendwann werden Mathematiker durch Computer ersetzt«

Paul Cohen

AUF EINEN BLICK COMPUTER ALS BEWEISFÜHRER

- 1** Bereits in den 1970er Jahren nutzten Mathematiker Algorithmen, um Theoreme zu beweisen. Doch damals wie heute zeigen sich viele Experten skeptisch.
- 2** Einerseits ist es aufwändig, mathematische Aussagen in eine für den Computer kompatible Form zu bringen. Andererseits lässt sich die Arbeit der Maschinen kaum von Menschen nachvollziehen.
- 3** Neuartige Methoden des maschinellen Lernens könnten Computern beibringen, ähnlich wie Menschen zu schlussfolgern und damit auch eigenständig Beweise zu führen.

anderen aus. Das Ergebnis war extrem umfangreich (es nahm 3 Gigabyte Speicherplatz in Anspruch), weshalb zwölf Mathematiker es jahrelang untersuchten, bevor sie verkündeten, es sei mit 99-prozentiger Sicherheit richtig.

Die keplersche Vermutung ist nicht die einzige berühmte Frage, die Computer beantwortet haben. Der Vier-Farben-Satz, demzufolge man nur vier verschiedene Farben braucht, um eine zweidimensionale Landkarte zu bemalen, ohne dass zwei angrenzende Regionen gleich gefärbt sind, lösten Heinrich Heesch, Kenneth Appel und Wolfgang Haken bereits 1976 mit Hilfe eines Computerprogramms. Dabei durchwühlte der Algorithmus alle möglichen Varianten von Karten mit fünf Farben und zeigte, wie sich jede von ihnen auf vier Farben reduzieren lässt.

Zudem verwendeten drei Mathematiker 2016 ein Computerprogramm, um das Problem der booleschen pythagoräischen Tripel zu beweisen. Dabei geht es um die Frage, ob es möglich ist, alle natürlichen Zahlen rot und blau einzufärben, wobei kein pythagoräisches Tripel (also alle Zahlen a , b und c mit $a^2 + b^2 = c^2$) aus rein roten oder blauen Gliedern bestehen darf. Wie die Forscher zeigten, ist das bloß bis zu der Zahl 7824 realisierbar. Die Lösung war extrem rechenintensiv, sie nahm in ihrer ersten Version über 200 Terabyte in Anspruch. Selbst mit einer Hochgeschwindigkeits-Internetverbindung dauerte es etwas mehr als drei Wochen, um das Ergebnis herunterzuladen.

Einige Wissenschaftler preisen die genannten Beispiele als Erfolge, doch die computergenerierten Beweise fachen die Debatte weiter an. Zum Beispiel ist der über 40 Jahre alte Algorithmus zum Nachweis des Vier-Farben-Satzes so umfangreich, dass ein Mensch ihn unmöglich allein überprüfen kann. »Seitdem streiten sich Experten, ob es sich dabei tatsächlich um einen Beweis handelt oder nicht«, sagt der Mathematiker und Blogger Michael Harris von der Columbia University.

Zudem führen die Algorithmen zu weiteren Schwierigkeiten. Möchte man einen Theorembeweiser verwenden, muss man dafür nicht nur programmieren können, sondern auch herausfinden, wie man ein mathematisches Problem

in computerfreundlicher Sprache ausdrückt. Das ganze Unterfangen ist sehr zeitaufwändig und lenkt von der eigentlichen Arbeit eines Forschers ab. »Bis ich meine Frage in eine passende Form gebracht habe, könnte ich das Problem einfach selbst lösen«, sagt Harris.

Viele Wissenschaftler sehen keinen Bedarf für Theoremlöser. »Wir haben bereits ein funktionierendes System: Es besteht aus Bleistift und Papier«, sagt Kevin Buzzard vom Imperial College London, der vor drei Jahren seine Arbeit von der reinen Mathematik auf computergestützte Theorembeweiser umstellte. »Computer haben für uns erstaunliche Berechnungen durchgeführt, aber sie haben noch nie ein schwieriges Problem ganz allein gelöst«, sagt er. »Solange sie das nicht tun, werden sich Mathematiker nicht darauf einlassen.«

Buzzard und einige seiner Kollegen finden trotzdem, man sollte den neuen Methoden eine Chance geben. Tatsächlich sind von Computern geführte Beweise vielleicht gar nicht so schwer nachzuvollziehen, wie viele annehmen, erklärt DeDeo. Kürzlich hat er zusammen mit Scott Viteri, einem Informatiker, der jetzt an der Stanford University studiert, mehrere berühmte klassische Beweise (darunter einen aus Euklids »Elemente«) mit dutzenden neuen Beweisen, die ein Algorithmus namens »Coq« erarbeitet hat, verglichen, um nach Gemeinsamkeiten zu suchen. Wie sie herausfanden, ähnelt die vernetzte Struktur der maschinengenerierten Ergebnisse den menschlichen Werken. Das könnte Forschern helfen, den Algorithmen beizubringen, ihr Vorgehen zu erklären.

Ein nützliches Lehrmittel, um Probleme strukturiert anzugehen

Andere Wissenschaftler sehen in Theorembeweisern nützliche Lehrmittel, die sich sowohl in der Informatik als auch in der Mathematik bezahlt machen könnten. An der Johns Hopkins University hat die Mathematikerin Emily Riehl beispielsweise Kurse konzipiert, in denen Studenten formale Aussagen mit einem Computer belegen. »Das zwingt sie, sehr organisiert zu sein und klar zu denken«, sagt sie. »Studenten, die zum ersten Mal einen Beweis führen, tun sich schwer damit, zu wissen, was sie brauchen, und die zu Grunde liegende logische Struktur zu erkennen.«

In ihrer eigenen Forschungsarbeit verwendet Riehl ebenfalls zunehmend Theorembeweiser. »Das ist nicht unbedingt etwas, das man ständig nutzen muss. Es wird niemals das Herumkritzeln auf einem Blatt Papier ersetzen«, sagt sie, »aber die Verwendung von Computerprogrammen hat meine Einstellung zum Schreiben von Beweisen verändert.«

Die Theoremlöser bieten darüber hinaus eine Möglichkeit, bekannte Arbeiten auf Fehler hin zu prüfen. 1999 entdeckte der russisch-amerikanische Algebraiker Vladimir Voevodsky mit einem solchen Programm beispielsweise eine Ungenauigkeit in einem seiner Beweise. Ab dem Zeitpunkt bis zu seinem Tod 2017 war Voevodsky daher ein lautstarker Befürworter von computergestützten Beweisassistenten. Hales sagt, er und Ferguson hätten Hunderte von Fehlern in ihrer Arbeit gefunden, als sie diese mit einem

»Bis ich mein Problem passend formuliert habe, kann ich es auch selbst lösen«

Michael Harris

Computer überprüfen. Selbst der erste Satz in Euklids »Elemente« ist nicht perfekt.

Wenn eine Maschine Mathematikern helfen kann, solche Fehler zu vermeiden, warum sollte man sie dann nicht nutzen? Ein häufig genannter Einwand – ob gerechtfertigt oder nicht – ist laut Harris: Wenn Wissenschaftler ihre Zeit damit verbringen, Mathematik zu formalisieren, damit ein Computer sie versteht, geht das von der Zeit ab, die sie mit neuer Forschung verbringen könnten.

Der Fields-Medaillengewinner Timothy Gowers von der Cambridge University ermuntert seine Kollegen dagegen, noch weiter zu gehen: Er träumt von einer Zukunft, in der Theorembeweiser menschliche Gutachter bei großen Fachzeitschriften ersetzen. »Ich kann mir vorstellen, dass es zum Standardverfahren wird, eine eingereichte Arbeit erst durch einen automatisierten Prüfer zu führen«, sagt er. Doch bevor Computer so weit sind, müssen Forscher eine bedeutende Hürde überwinden: die Kommunikationsbarriere zwischen Mensch und Maschine.

Heutige Algorithmen sind nicht mathematikerfreundlich konzipiert. Zwar kann man mit automatisierten Theorembeweisern (ATPs) aufwändige Fallunterscheidungen durchlaufen, wie im Beispiel der keplerschen Vermutung. Dazu programmiert man alle Regeln ein, die für das zu lösende Problem relevant sind, und fragt anschließend, ob eine bestimmte Vermutung den auferlegten Regeln folgt. Der Computer erledigt dann die gesamte Arbeit.

Aber hier liegt der Hund begraben: Ein ATP erklärt seine Arbeit nicht. Alle Berechnungen finden innerhalb der Maschine statt. Das menschliche Auge nimmt nur eine lange Kette von Nullen und Einsen wahr. Der Computerwissenschaftler Daniel Huang, der die University of California in Berkeley kürzlich für ein Start-up verlassen hat, sagt, es sei unmöglich, eine solche Argumentation nachzuvollziehen, weil sie wie ein Haufen zufälliger Daten aussieht. »Kein Mensch wird sich jemals derartige Beweise ansehen und sagen können: »Ich hab's verstanden«, betont er.

Interaktive Theorembeweiser (ITPs) funktionieren anders. Sie verfügen über riesige Datensätze mit bis zu Zehntausenden von Theoremen und Beweisen, auf die sie zurückgreifen, um zu überprüfen, ob ein Argument korrekt ist. Im Gegensatz zu ATPs, die wie eine Blackbox arbeiten und bloß eine Antwort ausspucken, benötigen ITPs menschliche Führung. »Damit lässt sich nachvollziehen, auf welchen Elementen ein generierter Beweis basiert«, sagt Huang.

ITPs sind in den letzten Jahren immer beliebter geworden. 2017 verwendeten die drei Mathematiker, die das Problem der booleschen pythagoräischen Tripel gelöst

haben, ein solches Programm namens »Coq«, um ihre Arbeit zu verifizieren. Darüber hinaus griff Georges Gonthier von Microsoft Research Cambridge im Jahr 2005 auf »Coq« zurück, um den Vier-Farben-Satz zu formalisieren. Für den Beweis der keplerschen Vermutung nutzte Hales gleich zwei ITPs namens »HOL Light« und »Isabelle« (siehe »Spektrum« März 2019, S. 66).

Die größte Herausforderung auf dem Gebiet der automatisierten Beweisführung ist, Computern logisches Schlussfolgern beizubringen. Informatiker kombinieren dazu ATPs mit ITPs und integrieren zudem Methoden des maschinellen Lernens, um die Theorembeweiser effizienter zu gestalten. Sie hoffen, künftig Programme entwerfen zu können, die ähnlich wie ein Mensch deduktive Schlüsse ziehen und damit mathematische Ideen entwickeln können.

Sprache zuerst, dann die Mathematik

Um logisches Denken zu automatisieren, muss man Szegedy zufolge aber erst herausfinden, wie man erfolgreich natürliche Sprache computergestützt verarbeitet. Die Aufgabe ist inzwischen ein wichtiger Forschungsbereich in der Informatik. Wenn es Algorithmen gelingt, Muster beim Verwenden von Wörtern und Sätzen zu erkennen, dann könnte man ihnen genauso beibringen, nützliche Beweise zu finden – und vor allem sie zu erklären. In den letzten Jahren haben Wissenschaftler in diesem Zusammenhang unter anderem neuronale Netze untersucht, also Algorithmen, die an die Funktionsweise von menschlichen Gehirnen angelehnt sind.

Inspiziert von der schnellen Entwicklung KI-gestützter Programme wie AlphaZero (dem Algorithmus von DeepMind, das Menschen beim Schach, Go und Shogi besiegte), wollen Szegedy und sein Team die jüngsten Fortschritte der Spracherkennung nutzen, um formale Beweise zu führen. Anhand vorausgehender Trainingsdaten sagen so genannte Sprachmodelle Zeichenfolgen vorher, die auf eine bestimmte Eingabe folgen könnten. Damit sind die Programme in der Lage, sinnvolle Texte oder Formeln zu generieren.

Szegedis Gruppe bei Google Research hat im Juni 2020 eine Möglichkeit vorgestellt, Sprachmodelle zu verwenden, um mathematische Inhalte zu generieren. Nachdem sie ihr Programm darauf trainiert hatten, eine baumartige Struktur in bereits etablierten Theoremen zu erkennen, ließen sie das Netzwerk ohne weitere Anleitung neue Sätze erzeugen und beweisen. Von den tausenden gefundenen Vermutungen waren etwa 13 Prozent sowohl beweisbar als auch neu (das heißt, sie duplizierten keine anderen Theoreme in der Datenbank). Damit könnten sich Algorithmen tatsächlich selbst beibringen, wie man korrekt Beweise führt. »Neuronale Netze sind in der Lage, eine künstliche Art der Intuition zu entwickeln«, davon ist Szegedy überzeugt.

Josef Urban verfolgt ebenfalls einen Ansatz, bei dem er ITPs, ATPs und künstliche Intelligenz miteinander verbindet. Im Juli 2020 trainierte er mit seiner Forschungsgruppe ein neuronales Netz mit Beispieldaten von mathematischen Beweisen, woraufhin es zahlreiche neue Vermutungen lieferte. Inspiriert hatte Urban die Arbeit des Informatikers Andrej Karpathy, der vor einigen Jahren ein neuronales Netz entwickelt hatte, das mathematisch anmutenden Unsinn

erzeugte. Anders als Karpathy wollte Urban aber sinnvollen Inhalt generieren. Deshalb entwarf er mit seiner Gruppe ein eigenes Netzwerk, das unter anderem das Sprachmodell GPT-2 von OpenAI verwendet. Urban und sein Team fütterten ihren Algorithmus mit etlichen Theoremen und dazugehörigen Beweisen und ließen es anschließend nach neuen Vermutungen suchen, deren Gültigkeit sie mit einer ATP namens »E« überprüften.

Tatsächlich schlug das Netzwerk mehr als 50000 Formeln vor, allerdings handelt es sich bei den meisten davon um Duplikate bereits bekannter Gleichungen. »Offenbar sind wir noch nicht in der Lage, wirklich interessante Zusammenhänge zu finden«, sagt Urban.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Trotz all der beeindruckenden Fortschritte ist noch unklar, ob sich die Prophezeiung Cohens von vor über 40 Jahren erfüllen wird. Auch Gowers ist überzeugt davon, Computer würden bis 2099 in der Lage sein, Mathematiker zu übertreffen. Harris ist da anderer Meinung. Er bezweifelt sogar, dass Theorembeweiser überhaupt nützlich seien. Falls Informatiker jemals eine Art synthetische Intuition schaffen sollten, so Harris, dann wird sie nicht mit der des Menschen konkurrieren können. »Selbst wenn Computer anfangen, Dinge zu verstehen, werden sie das niemals auf menschliche Art und Weise tun.« ◀

QUELLEN

Chlipala, A.: Proof assistants at the hardware-software interface. Proceedings of the 9th ACM SIGPLAN International Conference on Certified Programs and Proofs, 2020

Hales, T.C.: A proof of the Kepler conjecture. Annals of mathematics 162, 2005

Rabe, M.N. et al.: Mathematical reasoning via self-supervised skip-tree training. ArXiv 2006.04757, 2020

Urban, J., Jakubův, J.: First neural conjecturing datasets and experiments. In: Benzmüller C., Miller, B. (Hg.) Intelligent computer mathematics. Springer Cham, 2020

Viteri, S., DeDeo, S.: Explosive proofs of mathematical truths. ArXiv 2004.00055, 2020

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »How Close Are Computers to Automating Mathematical Reasoning?« 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.



ARCHÄOLOGIE

WIE DIE BAUERN EUROPA EROBERTEN

Als die ersten Bauern vor rund 9000 Jahren gen Europa zogen, begegneten sie den Ureinwohnern – Menschen, die als Jäger und Sammler lebten. Es entstand eine neue Gesellschaft, in der die Neolithiker die Wildbeuter oft knechteten.

GERALDINE ARISTEANU



Laura Spinney ist Wissenschaftsjournalistin und lebt in Paris.

► [spektrum.de/artikel/1807502](https://www.spektrum.de/artikel/1807502)



BENOIT COURIS

▶ Vor 8000 Jahren waren sie die einzigen Menschen in Europa: Kleine Gruppen von Jägern und Sammlern durchstreiften die dichten Wälder des Kontinents. Sie waren mobil, nur zeitweise hielten sie sich an einem Ort länger auf. Ihre Existenz bestätigten vor allem archäologische Grabungen in Höhlen. Dabei kamen Zeugnisse einer mesolithischen Werkzeugtechnologie ans Licht, denen zufolge die Wildbeuter mit Feuerstein bestückte Geräte nutzten, um zu fischen, Wild sowie Auerochsen zu jagen und Wildpflanzen zu sammeln. Wie Genstudien der letzten Jahre verriet, hatten viele der Jäger und Sammler dunkles Haar und blaue Augen. Anhand der wenigen Skelettreste rekonstruierten Anthropologen die Anatomie dieser Menschen, die offenbar relativ groß und muskulös waren. In welcher Sprache sie sich verständigten, bleibt hingegen ein Geheimnis.

Drei Jahrtausende später waren die Wälder, die sie einst bewohnten, stellenweise Feldern mit Weizen und Linsen gewichen. Bauern beherrschten den Kontinent. Die Veränderung war selbst den Archäologen des 19. Jahrhunderts nicht entgangen. Bei ihren Grabungen fanden sie Knochen von domestizierten Tieren, Tongefäße, die Getreidereste enthielten, und – besonders aufschlussreich – Friedhöfe. Den Skeletten darin versuchen Forscher bis heute Informationen über die jungsteinzeitlichen Europäer zu entlocken.

Ackerbau und Viehzucht waren nicht nur neuartige Wirtschaftsweisen, sondern sie brachten letztlich die Herstellung von Metallwerkzeugen auf den Weg. Die Landwirtschaft veränderte zudem die Ernährung und die Landnutzung – mit drastischen Folgen: Die Menschen eroberten einen neuen Platz in der Natur und griffen deutlich stärker in ihre Umwelt ein. Aber auch das Miteinander unter ihresgleichen hatte sich gewandelt.

Rund 150 Jahre lang diskutierten Forscher darüber, ob die Bauern die neolithische Lebensweise aus dem Nahen Osten nach Europa mitgebracht hatten oder ob es das Wissen über Ackerbau und Viehzucht war, das von Kultur zu Kultur weitergereicht wurde. Anfang der 2000er Jahre untersuchten Genetiker wie Martin Richards, der damals an der University of Oxford wirkte, Varianten in der Nukleinsäureabfolge heutiger Genome. Hierüber lieferten die Forscher den Nachweis, dass die Neolithiker über die Ägäis und den Bosphorus nach Griechenland und auf den Balkan eingewandert waren. Von dort aus waren sie weiter nach Norden und Westen gezogen. Weitere Erkenntnisse machten danach erst neue gentechnische Errungenschaften möglich. Eine Forschergruppe um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig entwickelte ein Verfahren, um DNA aus alten menschlichen Überresten zu gewinnen und zu entziffern. Ein neuer Wissenschaftszweig war geboren: die Paläo- oder Archäogenetik. Archäologen und Genetiker versuchen seither gemeinsam, die so genannte aDNA der Steinzeit-

MENSCHENOPFER? Um 4000 v. Chr. hatte man in Europa manche Tote zusammen mit anderen Menschen bestattet, die vermutlich geopfert und unachtsam ins Grab befördert wurden.

menschen auszulesen – von solchen, die einst Jäger und Sammler waren, und jenen, die als Bauern in Siedlungen gelebt hatten.

Im Jahr 2014 hat die Archäologin Cristina Gamba, die damals am Trinity College in Dublin lehrte, zusammen mit ihren Kollegen den Knochen eines Wildbeuters am Fundplatz einer frühen Ackerbaugemeinschaft in Ungarn entdeckt. Spätestens seit diesem Fund zeichnet sich ab, wie unterschiedlich die Begegnungen zwischen den Ureinwohnern und den Neuankömmlingen verlaufen sein müssen. An einigen Orten vermischten sich die beiden Gruppen bald nach ihrem Aufeinandertreffen. In anderen Regionen wiederum blieben sie für Jahrhunderte, ja sogar Jahrtausende auf Distanz. Manchmal waren die Bauern ihren Vorgängern wohlgesinnt, doch andere Male unterwarfen sie die Einheimischen. Mit der Zeit zeigte sich eine klare Tendenz: Die Zahl der Bauern wuchs, die Jäger und Sammler gingen in der neuen Bevölkerung auf. Wer nicht Teil der Bauernkultur wurde, den verdrängten die Eingewanderten in geografische und gesellschaftliche Randbereiche. Aus heutiger Sicht besonders verstörend: Die Ungleichheit zwischen Bauern und Wildbeutern gipfelte an einigen Fundplätzen darin, dass Menschen, die aus Jäger-und-Sammler-Kulturen stammten, offenbar versklavt, vielleicht sogar geopfert wurden, um ihre Herren ins Jenseits zu begleiten.

Auf der Suche nach neuem Ackerland

Vor ungefähr 11500 Jahren endete in Europa und im Nahen Osten die Eiszeit. Als sich das Klima allmählich erwärmte und die Natur mehr Nahrung bot, gingen Wildbeuter in der Region des Fruchtbaren Halbmonds – einem Gebiet, das von Euphrat und Tigris bis an die Mittelmeerküste und das Niltal reichte – langsam dazu über, sesshaft zu werden. Sie verbrachten weniger Zeit damit, Steinböcke und Wildschweine zu jagen oder Wildgräser zu pflücken, sondern verlegten sich mehr darauf, ihre eigenen domestizierten Nutztiere zu halten und Pflanzen zu kultivieren: Schafe, Ziegen, Weizen, Erbsen und Linsen. Archäobotaniker, die Pollenanalysen durchführten, und Archäozoologen, die neolithische Tierknochen untersuchten, kamen diesem Wandel der Lebensweise auf die Spur. In welcher Sprache sich die ersten Bauern unterhielten, ist unbekannt – Baskisch könnte aber ein Überbleibsel davon sein. Einigermaßen gesichert ist hingegen, dass die Pioniere vor ungefähr 9000 Jahren gen Europa wanderten, auf der Suche nach neuem Ackerland.

Über zwei Routen gelangten die Neolithiker dorthin: per Boot die Mittelmeerküste entlang sowie den Flusslauf der Donau hinauf. Auf dem Landweg erreichten sie vom Balkan aus Mitteleuropa. Radiokohlenstoffdatierungen von Funden ergaben, dass die Migranten um 5500 v. Chr. Siedlungen im Karpatenbecken errichtet hatten – in der heutigen Slowakei, in Ungarn und Rumänien. Sie fertigten Keramikgefäße, die Archäologen auf Grund der spiral- oder wellenförmigen Dekormotive als Linienbandkeramik bezeichnen. Daher rührt der moderne Name dieser frühen Siedler: Linienbandkeramische Kultur, kurz LBK.

Die Neuankömmlinge zogen relativ rasch nach Westen bis ins heutige Deutschland. Nach nur wenigen Jahrhun-

dernten, um 5300 v. Chr., hatten sie den Rhein erreicht. Detaillierte Untersuchungen von Keramiktypen und Stilformen, verknüpft mit C-14-Datierungen, legen nahe, dass die LBK nach einem bestimmten Besiedlungsmuster vorging: dem Leapfrog-Modell. Die Kolonisten sprangen quasi von Siedlungspunkt zu Siedlungspunkt. »Sie gingen schrittweise vor, sie legten bisweilen hunderte Kilometer zurück und besiedelten anschließend die Landschaft dazwischen«, erklärt der Archäologe Detlef Gronenborn vom Römisch-Germanischen Zentralmuseum in Mainz. Später fanden die Menschen heraus, wie sich Kupfer schmelzen ließ. Zwischen den Bauerngemeinschaften setzte der Handel mit wertvollen Metallobjekten ein – eine Entwicklung, die zirka 5200 v. Chr. begann.

Auf der Südroute betrieben die Einwanderer ihr Hopping entlang der Mittelmeerküste, vom heutigen Italien nach Frankreich und weiter auf die Iberische Halbinsel. Als die Gruppen um 5800 v. Chr. die Küste Frankreichs erreicht hatten, zogen sie auch in Richtung des Pariser Beckens. Dort steckten sie zunächst in einer geografischen Sackgasse fest, der Kontinent war im Grunde zu Ende. Doch in der Region zwischen Rhein und Atlantik trafen um zirka 5000 v. Chr. die beiden Migrationsströme schließlich zusammen.

Zu diesem Zeitpunkt hatte jede Kultur längst eigene Traditionen entwickelt – immerhin waren mehrere Jahrhunderte seit der Trennung vor den Toren Europas vergangen. Die Menschen dürften dennoch erkannt haben, dass sie auf gemeinsame Vorfahren zurückgingen und ihre Abstammung die gleiche war. Jedenfalls: Die Gruppen vermischten sich.

Im Süden des Pariser Beckens liegt die kleine französische Gemeinde Gurgy. Dort legten Archäologen in den 2000er Jahren Nekropolen aus dem 5. Jahrtausend v. Chr. frei. Was auf die Zusammenkunft beider Bauerngruppen folgte, konnten Forscher durch Genanalysen an den Toten aus einem dieser Friedhöfe nachvollziehen. Dazu betrachteten sie die mitochondriale DNA (mtDNA), die ausschließlich Mütter an ihre Kinder weitergeben. Die mtDNA von 50 Ver-

storbenen aus Gurgy stammte zu ungefähr gleichen Teilen aus der LBK und den Bauernkulturen Südwesteuropas. Diese neue Bevölkerung verharrte allerdings nicht im Pariser Becken. Sie machte sich erneut auf den Weg und verbreitete die bäuerliche Lebensweise in alle übrig gebliebenen Winkel des Kontinents.

Felder statt Wälder

Die ersten Bauern, die nach Europa kamen, waren offenbar als Familiengruppen unterwegs. Das ergab 2017 eine Genstudie von Forschern um die Evolutionsanthropologin Amy Goldberg von der Duke University, die damals an der Stanford University tätig war. Das Team hatte das X-Chromosom von 20 europäischen Neolithikern untersucht. Anders als das Y-Chromosom, das nur vom Vater vererbt wird, geben beide Elternteile das X-Chromosom weiter. Das Ergebnis der Studie: Männer wie Frauen der Bauernkulturen hatten gleichermaßen zum X-Chromosom der 20 analysierten Verstorbenen beigetragen – die eingewanderten Gruppen müssen demnach Männer und Frauen zu ungefähr gleichen Teilen umfasst haben. Sie waren vermutlich im Familienverbund unterwegs.

Andere Wissenschaftler gehen zudem davon aus, dass die Gesellschaften im Pariser Becken patrilokal beziehungsweise virilokal strukturiert waren. Soll heißen: Die Söhne erbten von den Vätern, und die Ehefrauen zogen von außerhalb zur Gemeinschaft zu. Darauf deuten zum einen die Analysen von Strontiumisotopen hin, die Forscher aus den Zähnen neolithischer Bäuerinnen gewonnen hatten. Aus dem ortsspezifischen Isotopensignal lässt sich rekonstruieren, wo ein Mensch aufgewachsen ist – und die Frauen stammten demnach nicht aus der Region des Fundplatzes. Zum anderen zeigt sich an den Tongefäßen der frühen Bauern, dass es immer wieder Einflüsse von außen gab, da die Ornamente kontinuierlich abgewandelt wurden. Auch das spricht für einen Zuzug der Frauen, da vermutlich diese die Keramik dekoriert hatten, wie es in späteren Agrargesellschaften üblich war.

In der Jungsteinzeit war das Klima in Europa feuchter und wärmer als heute. Dichte Wälder bedeckten weite Teile des Kontinents. Wie alle Migranten dürften auch die Bauern eine Weile gebraucht haben, um sich an ihre neue Umwelt anzupassen, doch allmählich fanden sie heraus, welche Pflanzen und Tiere in diesem Klima am besten gediehen. Sie holzten den Wald stellenweise ab oder schnitten ihn gemäß ihren Bedürfnissen zu – per Schneiteln und Stockausschlag. Wird ein Wald in Schneitelung bewirtschaftet, schneidet man immer wieder die oberen Äste zurück. Stockausschlag heißt, Bäume zu fällen, damit aus deren Stumpf zahlreiche neue Triebe sprießen.

Die Wirtschaftsweise der Bauern zeigte Erfolg: Ihre Bevölkerung wuchs. Sobald ein Gehöft nicht mehr genügend Platz für alle bot, zog die jüngere Generation weiter und ließ sich anderswo nieder – an scheinbar unbewohnten Stellen. »Die Neuankömmlinge hatten womöglich nicht den Eindruck, dass sie in Bereiche vorstießen, die irgendjemand gehörten«, sagt Céline Bon, Paläogenetikerin am Muséum national d'histoire naturelle in Paris. Doch genau das war der Fall.

AUF EINEN BLICK UNTERWORFEN UND VERSKLAVT?

- 1 Vor rund 7800 Jahren erreichten die ersten Bauern Mittel- und Westeuropa über zwei Routen: durch das Donautal und entlang der Mittelmeerküste.
- 2 Dabei stießen die Neuankömmlinge auf Jäger- und Sammler-Kulturen, die dort seit rund 40000 Jahren lebten. Anfangs tauschten sich die beiden Gruppen aus und vermischten sich.
- 3 Um 4500 v. Chr. bestimmte die bäuerliche Wirtschaftsweise das Leben in Europa. Die Gemeinschaften hatten Hierarchien ausgebildet, wobei die Menschen mit Wildbeuterabstammung offenbar auch den Status von Sklaven einnahmen.



BEAU, A. ET AL.: MULTI-SCALE ANCIENT DNA ANALYSES CONFIRM THE WESTERN ORIGIN OF MICHELBERG FARMERS AND DOCUMENT PROBABLE PRACTICES OF HUMAN SACRIFICE. PLOS ONE 12, E0179742, 2017, FIG. 1B (DOI.ORG/10.1371/JOURNAL.PONE.0179742) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)



DIE TOTEN VON GOUGENHEIM Auf einem Friedhof im Elsass waren zwischen 4100 und 3500 v. Chr. Menschen regelrecht entsorgt worden (oben). Sie waren anderer Abstammung als jene, die man regulär beisetzte (unten).

Früher oder später müssen die eingewanderten Bauern auf die einheimischen Jäger und Sammler gestoßen sein – und die Begegnungen dürften spannungsreich verlaufen sein. Fast 40000 Jahre waren vergangen, als ihre gemeinsamen Vorfahren getrennte Wege gingen auf ihrer Wanderung aus Afrika in die Welt. Damit war genügend Zeit verstrichen, dass sich die beiden Menschengruppen physisch, kulturell und sprachlich stark auseinanderentwickelt hatten. Gemäß genetischen Vergleichen waren die Bauern offenbar kleiner als die westlichen Wildbeuter, die in weiten Regionen Europas umherzogen – von der Iberischen Halbinsel bis Ungarn. Die Neolithiker hatten zudem dunkles Haar, dunkle Augen und vermutlich hellere Haut. Es gibt keine Belege für gewalttätige Auseinandersetzungen in der Frühphase der Koexistenz. Allerdings ist die Befundlage sehr dünn. Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass sich Wildbeuter und Bauern dennoch feindlich gesinnt waren. Was nach dem ersten Aufeinandertreffen geschah, zeichnet sich etwas klarer ab: In einigen Teilen Europas entwickelte sich ein zaghafter Austausch, in anderen rege Beziehungen oder gar keine – und dann wiederum verschwanden mancherorts die Jäger und Sammler und ihre mesolithischen Kulturen. Wohin waren sie gegangen?

Jahrzehntelang überlegten Archäologen, ob sich Wildbeuter angesichts der Vielzahl neuer Siedler in die Berge zurückgezogen hatten. Dort dürfte der Boden weniger ergiebig gewesen sein und sich daher kaum für den Ackerbau geeignet haben. Fühlten sie sich dort sicher vor den Bauern? Oder drangen sie tiefer in die Wälder vor, wo sie den Neolithikern ebenfalls nicht in die Quere kamen? »Vielleicht gab es dort Ansammlungen von Jägern und Sammlern, die nicht nur über eine Generation, sondern für 1000 oder 2000 Jahre nach Ankunft der Bauern dort überlebten«, vermutet Ron Pinhasi, Archäologe und Anthropologe an der Universität Wien.

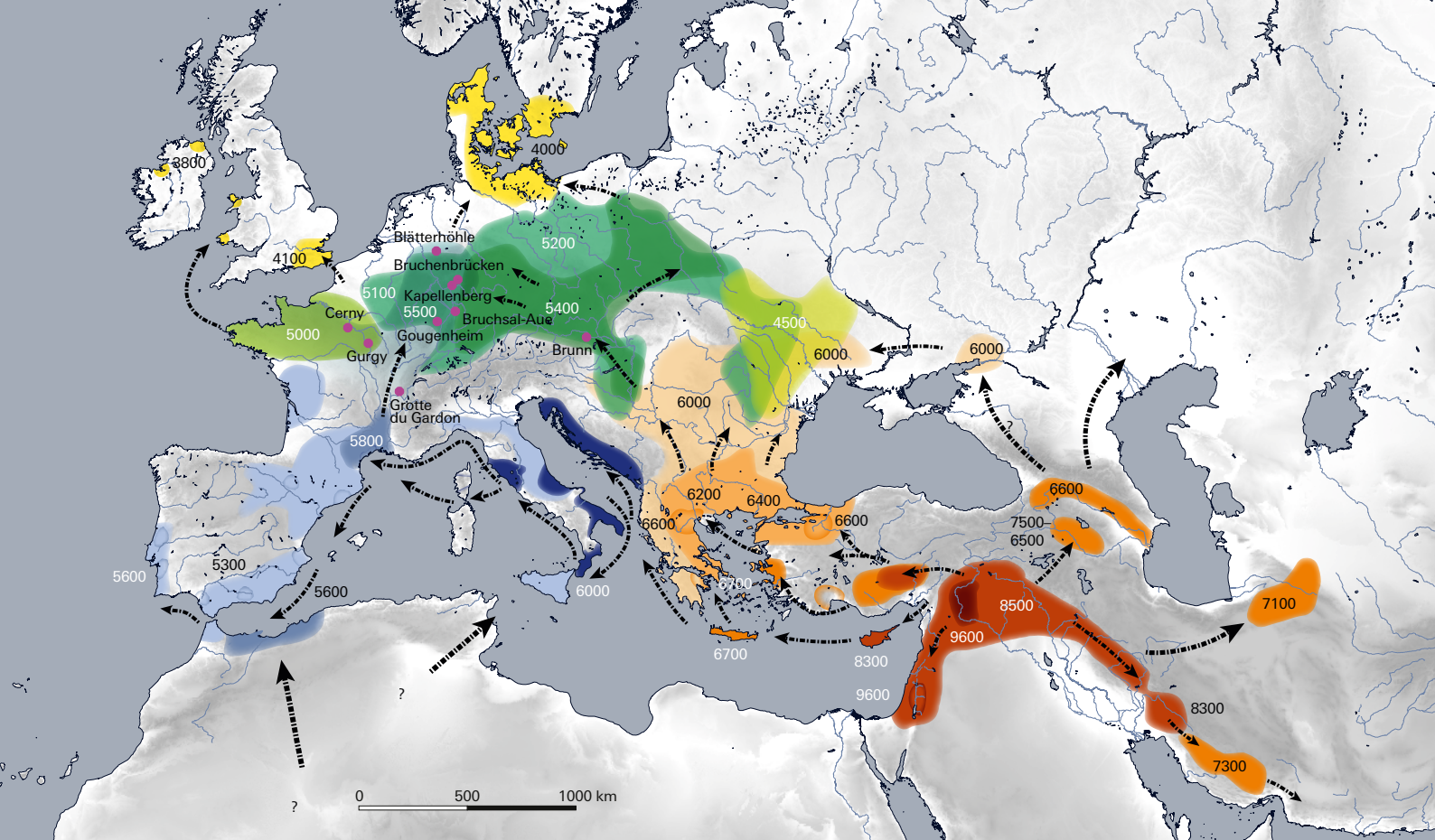
Doch die Jäger und Sammler waren nicht nur ausgewichen oder abgewandert. Denn alle heutigen Europäer tragen deren Gene in sich. Zudem haben Analysen von altem Erbgut, also von aDNA aus menschlichen Überresten aus ganz Europa gezeigt, dass um 4500 v. Chr. die mesolithische Bevölkerung wieder erstarkte. Jedenfalls kam es zu einem Wiederanstieg des Jäger-und-Sammler-Anteils im Genom der Bauern. Und die Rückkehr der Wildbeuter blieb nicht auf Erbfaktoren beschränkt: »Ungefähr um dieselbe Zeit sehen wir auch an den archäologischen Funden, dass die mesolithische Lebensart wieder aufblühte«, sagt der Archäologe Thomas Perrin von der Université Toulouse – Jean Jaurès. Vollends als Jäger und Sammler lebte zwar offenbar niemand mehr, bis auf diejenigen in den Rückzugsgebieten der Wälder, aber ihre Gene und ihre Technologien existierten weiter.

Ein Wildbeuter unter Sesshaften

Die Bauern zogen erneut weiter, raus aus dem Pariser Becken. Allerdings hatten sich diese Menschen genetisch verändert, verglichen mit den Neolithikern, die vom heutigen Ungarn aus das Donautal hinaufgewandert oder an den Küsten Südeuropas an Land gegangen waren. Denn inzwischen trugen sie ein Stück des alten Europas in sich. Und das wirft eine Frage auf: Was war bei den Begegnungen zwischen Wildbeutern und Sesshaften geschehen, zwischen diesen zwei grundverschiedenen Gruppen?

Im Fall der donauländischen Kulturen, also der LBK, gibt es einige wenige genetische Indizien, dass sich Bauern mit den Wildbeutern vermischt haben. Danach gab es ebenfalls Kontakte, aber die Gruppen zeugten keine Nachkommen. Erst wieder, als die Bauern die Region westlich des Rheins erreichten. Womöglich trafen die Menschen jedoch mit Beginn der Besiedlung Europas aufeinander. Als Fingerzeig gilt ein Fund aus der frühneolithischen Siedlung von Tiszaszólós-Domaháza in Ungarn. Dort stießen Cristina Gamba und ihr Team auf den erwähnten Knochen eines Wildbeuters. Sehr viel mehr fanden die Genetiker über diesen Menschen jedoch nicht heraus. War er Teil der Gemeinschaft? War er vielleicht eine Geisel? Oder durchstreifte er zufällig die Region, als er auf die Neolithiker stieß? Über Details lässt sich bisher nur spekulieren.

Funde aus späterer Zeit zeichnen ein deutlicheres Bild. Etwa in Bruchenbrücken, einem Stadtteil von Friedberg in der Wetterau nördlich von Frankfurt am Main: Dort lebten um 5300 v. Chr. Bauern und Wildbeuter gemeinsam in einer – wie es Detlef Gronenborn nennt – »multikulturellen«



Der Eroberungszug der Bauern

Im Fruchtbaren Halbmond (■) wurden um zirka 9600 v. Chr. aus Jägern und Sammlern allmählich Bauern und Viehzüchter. Um 6700 v. Chr. zogen diese Menschen gen Westen nach Griechenland und auf den Balkan (■). Sie wanderten über zwei Haupttrouten weiter: das Donautal hinauf (■) und entlang der Mittelmeerküste bis nach Südfrankreich und die Iberische Halbinsel (■). Die Zahlen in der Karte sind Zeitangaben v. Chr.

GRONENBORNSIEDLUNG ÜBER 2019. RIZZO/ORBIS
IM VERGLEICH MIT DEN FUNDSTÄTTEN
BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Siedlung zusammen. Offenbar waren die Jäger von weiter westlich in die Wetterau gekommen, um mit den Einwanderern Handel zu treiben. Wie die Funde zeigen, erwarben die Bauern von den Besuchern fein bearbeitete Pfeilspitzen aus Stein. Anscheinend legte man großen Wert auf die technologischen Kenntnisse der Mesolithiker. Und womöglich ließen sich einige von ihnen in der Siedlung nieder. Der Austausch florierte derart stark in Bruchsal-Brücken und an anderen Orten, dass er laut Gronenborn den Vorstoß der Bauern nach Westen für vielleicht zwei Jahrhunderte zum Stillstand brachte.

Zu Anfang könnten sich beide Gruppen hie und da vermischt haben, aber es war nicht die Regel. Am Fundort Brunn 2 in Österreich, der unweit von Wien in einem waldgesäumten Flusstal liegt, haben Archäologen um Peter Stadler vom Naturhistorischen Museum in Wien eine frühe LBK-Siedlung ausgegraben. Den Fundort datieren sie zwischen 5700 und 5100 v. Chr. Sie stießen auch auf drei ungefähr zeitgleiche Gräber. In zweien lagen Bandkeramiker, einer davon hatte vermutlich Jäger-und-Sammler-Vorfahren, während der andere von anatolischen Einwanderern abstammte. Der dritte Verstorbene war das Kind einer Wildbeuterin und eines Bauern. Alle drei waren auf gleiche

Weise in die Grabgruben gebettet worden: Sie lagen auf ihrer linken Körperflanke, den Kopf gen Nordosten gerichtet, das Gesicht nach Osten. Doch einzig beim »Jäger« fanden sich sechs Pfeilspitzen als Grabbeigabe.

Als die Archäologen 1990 in Brunn 2 zu graben begannen, stießen sie auf tausende Steinwerkzeuge, ferner auf Keramiktöpfe und Fragmente von Flöten sowie menschliche Figurinen aus Ton. Die Ausgräber vermuten daher, dass es sich um eine Ritualstätte oder einen Werk-beziehungsweise Handelsplatz gehandelt hatte – oder beides. Wenn Brunn 2 als Kultstätte diente, müssen die dort Bestatteten angesehene Menschen von hohem Status gewesen sein, sagt der Paläogenetiker und Grabungsmitarbeiter Alexey Nikitin von der Grand Valley State University in Allendale, Michigan. In seinen Augen belegt der Fundort, wie die beiden Kulturen voneinander profitierten. »Die Einwanderer brachten etwas mit, was die Einheimischen nicht hatten, aber die Einheimischen hatten etwas, was die Einwanderer nicht hatten – Kenntnis von der Landschaft«, erklärt Nikitin.

Entlang der Südroute dagegen scheinen sich die Einwanderer von Beginn an mit den Wildbeutern vermischt zu haben. »Aus den ersten beiden Jahrhunderten, als die Bauern Europa erreicht hatten, kennen wir Individuen, die

genetisch zu 55 Prozent Jäger und Sammler waren«, erklärt die Paläogenetikerin Maité Rivollat von der Universität de Bordeaux und dem Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena. Sie arbeitete mit Kollegen an einer Genstudie, die im Mai 2020 erschienen ist. Objekt der Untersuchung waren die Überreste von mehr als 100 Menschen, die von zwölf deutschen und französischen Fundplätzen aus der Zeit zwischen 7000 und 3000 v. Chr. stammten. Bei den frühneolithischen Toten in Südfrankreich stellte Rivollats Team fest, dass sie in ihrem Erbgut das Gensignal der Jäger und Sammler trugen. Laut diesen Funden zeugten Bauern und Wildbeuter damals bereits seit fünf oder sechs Generationen Nachkommen – womöglich schon seit kurz nach Ankunft der Pioniere in Westeuropa.

Was sich genetisch nachweisen ließ, harrt archäologisch noch seiner Entdeckung. Denn Fundorte in Frankreich, an denen die beiden Gruppen gemeinsam gelebt haben, fehlen – obwohl Archäologen wie Thomas Perrin beharrlich danach suchen. Bisher kennen er und seine Kollegen nur einen Fundplatz, an dem sich Wildbeuter und Bauern ungefähr zur selben Zeit aufgehalten haben: die Grotte du Gardon, eine Höhle im Jura östlich von Lyon. Direkt nacheinander hatten an dem Ort Neolithiker aus dem Süden und mesolithische Jäger gewohnt, wobei die Wildbeuter nach den Bauern kamen. »Angesichts des geringen Abstands zwischen beiden Belegungen gehen wir davon aus, dass die Gruppen zumindest in dieser Region koexistierten«, sagt Thomas Perrin.

Freund, Feind oder Tauschpartner?

Die bisherigen Ergebnisse sind uneinheitlich. Für Polly Wiessner von der University of Utah ergibt der Befund trotzdem Sinn. Die Anthropologin erforscht seit Langem Jäger-und-Sammler-Kulturen. Ihres Erachtens sind derartige regionale Unterschiede alles andere als überraschend. Auch aus der jüngeren Geschichte kennen Forscher Episoden, bei denen eingewanderte Bauern auf angestammte Wildbeuter trafen. Beide Gruppen nahmen Beziehungen auf – aber immer abhängig davon, was ihre Absichten waren und was ihnen einen wirtschaftlichen Nutzen versprach. Wiessner beobachtete zudem: »Wenn Neuankömmlinge ein Land oder Ressourcen kolonisieren, dann entmenschlichen sie die angestammten Einwohner. Falls es eine Möglichkeit zur Kooperation gibt, dann teilen sie die Beziehungen in bestimmte Kategorien ein, um sich den Austausch leichter zu machen« – das heißt, der andere wird entweder als Freund oder als Tauschpartner deklariert.

Von Ethnologen dokumentierte Situationen aus jüngerer Zeit, in denen Ackerbauern die Gebiete von Jäger und Sammlern kolonisierten, liefern zudem eine Blaupause dafür, warum es so lange gedauert hat, bis das mesolithische Gensignal wieder erstarkte – nämlich fast 1500 Jahre nach Ankunft der Neolithiker. Ein Vergleich: Als die Bantu-Bauern vor rund 3000 Jahren ins südliche Afrika vordrangen, trafen sie auf die als Jäger und Sammler in Wäldern lebenden Pygmäen. Genetisch sind die Bantu zu den Pygmäen so entfernt verwandt wie zu den Europäern. »Lange Zeit tauschten die Bantu und die Pygmäen Waren, aber sie

vermischten sich nicht«, erklärt der Evolutionsgenetiker Lluís Quintana-Murci vom Institut Pasteur in Paris, der die Geschichte der beiden Gruppen mit Hilfe von aDNA zusammengestückelt hat.

Doch dann zeugten sie Nachkommen – mehr als 2000 Jahre, nachdem sie erstmals aufeinandergetroffen waren. Frauen der Pygmäen heirateten Männer aus den Bantu-Gemeinschaften, in denen sie als sozial niedrig gestellte Menschen behandelt wurden – und es immer noch werden. Sie gehören einer unteren Gesellschaftsschicht an, die sich überdies äußerlich und biologisch von den anderen unterscheidet. »Die Bantu stehen in einem zwiefachen Verhältnis zu den Pygmäen«, sagt Quintana-Murci. »Einerseits behandeln sie die Pygmäen wie Diener, und andererseits haben sie Angst vor ihnen. In den Augen der Bantu sind die Pygmäen die Herren der Wälder. Und manche von ihnen wähen sie im Besitz von schamanischen Kräften.«

Warum sind die beiden Gruppen doch irgendwann zusammengekommen? Das weiß keiner so recht, meint Quintana-Murci. Aber es sei naheliegend, dass zuerst eine soziale Hürde fiel. Vielleicht entwickelten die Bantu-Angehörigen am unteren Ende der sozialen Leiter eine Nähe zu den ausgegrenzten Pygmäen, als die Gesellschaft der Bantu wohlhabender und damit vielschichtiger wurde.

Könnte es sich im Europa der älteren Jungsteinzeit ähnlich zugetragen haben? Hatte sich die frühe Bauerngesellschaft irgendwann so verändert und aufgefüchert, dass einige Siedler ihre Gefährten unter den Wildbeutern suchen mussten? Freilich lässt sich das nicht ohne Weiteres belegen, aber ein Fundplatz im Pariser Becken wirft womöglich etwas Licht ins Dunkel jener Zeit: Cerny südlich von Paris. Archäologen dokumentierten dort die letzten Überbleibsel der LBK – genauer gesagt hatten die Bandkeramiker dort viele neue Kulturelemente aufgegriffen und ihre Tradition fortentwickelt. Diese Menschen stammten also vermutlich ursprünglich von den frühen Bauern aus dem Karpatenbecken ab. Doch in ihren Nekropolen aus der Zeit um 4700 v. Chr. waren hochstehende Männer bestattet, die nicht mehr in Hockstellung auf der Seite, sondern auf dem Rücken liegend beigesetzt worden waren. Um sie herum hatte man Jagdwaffen, Schmuck aus Geweih, Eberzähne und Krallen von Greifvögeln platziert. »Diese Grabsitten bezeugen den Übergang in eine andere Lebenswelt«, sagt die Archäologin Aline Thomas vom Muséum national d'histoire naturelle in Paris. »Es entstehen Bezüge zum Bereich der Wildnis, zu Dingen, die sonst mit der mesolithischen Bevölkerung verbunden wurden.«

Aline Thomas und ihre Kollegin Céline Bon gingen der Herkunft der Bestattungssitten auf den Grund. Sie wollten wissen: Wer waren die Menschen der Cerny-Kultur gewesen? Waren es Bauern, die nun die mesolithische Lebensweise angenommen hatten und pflegten, oder waren es Jäger und Sammler, die ihre Wirtschaftsweise nie geändert hatten? Thomas und Bon untersuchten Proben von aDNA aus den Nekropolen von Cerny. Bisher gelang es ihnen, die mitochondriale DNA zu entschlüsseln. Ergebnis: Zum Teil war die mtDNA mesolithischer Herkunft. Das heißt, dass in Cerny Frauen von Wildbeuterkulturen in die ansässige Gemeinschaft eingeheiratet hatten. Dieser Einfluss könnte

ein Hinweis darauf sein, was auch in anderen neolithischen Gruppen geschah. Denn für die Zeit um 4700 v. Chr. markierten Genetiker einen Wiederanstieg mesolithischer Anteile im Genom der damals sesshaften Europäer. Doch wer sind die Männer der Cerny-Kultur gewesen? Momentan versuchen die Forscherinnen, die Information auf dem Y-Chromosom und das gesamte Erbgut der Menschen von Cerny zu entschlüsseln – in der Hoffnung, ihre genetische Herkunft endgültig aufzudecken.

Auch wenn die Angehörigen der Cerny-Kultur noch nicht vollends identifiziert sind, bezeugen ihre Toten, dass die mesolithische Lebensweise wieder auflebte. Zwar hatte nach nur wenigen Jahrhunderten fast ganz Europa die Ackerbaukultur adaptiert, doch das Erbgut der damaligen Bewohner des Pariser Beckens und die Grabsitten jener Zeit zeigen: Im Einzelnen verlief die gemeinsame Geschichte der Bauern und Wildbeuter weder einheitlich noch linear.

Dann um 4500 v. Chr. brach in Europa eine neue Zeit an. Zuvor waren bedeutende Personen wie etwa in Brunn 2 allein in Erdgruben bestattet worden. Nun häuften die Menschen große Erdhügel über kleinen Grabkammern auf, in denen sie jeweils ein oder zwei Verstorbene beisetzen. Archäologen sind davon überzeugt: Diese Veränderung kam einem Paukenschlag in der Geschichte gleich. Offenbar hatte sich die Gesellschaft grundlegend gewandelt. Das Ausmaß der Grablegen legt nahe, dass sich allmählich eine soziale Ungleichheit etabliert hatte. Die Bauerngemeinschaften hatten dauerhaft Überschüsse erwirtschaftet, die nicht gleichmäßig verteilt wurden. Wenn dem so war, dann gab es in diesen Gesellschaften jetzt Menschen mit einem hohen Anteil an Wildbeutergenen, die sich vielleicht auch äußerlich deutlich von ihren bäuerlichen Nachbarn unterschieden. Das dürfte ihre Leben nicht unbedingt zum Besseren gewendet haben.

Ein schlagendes Beispiel liefert die Michelsberger Kultur. Sie bildete sich sehr wahrscheinlich um 4400 v. Chr. im Pariser Becken heraus, bevor die Bauerngruppen ins Elsass und nach Deutschland zogen. Die Menschen dieser Kultur strukturierten ihr Territorium eindeutig wehrhaft. Im Zentrum lag für gewöhnlich eine große, befestigte Siedlung, in der mehrere tausend Menschen wohnen konnten. Im Umfeld verstreut lagen kleinere Weiler. Darauf folgte eine »Grenzzone«, wie es Gronenborn bezeichnet, die nur dünn mit »Kolonien« besiedelt war. Womöglich entstand dieses Siedlungsmuster, weil man mit den angrenzenden Gemeinschaften immer wieder aneinandergeriet – denn die Bevölkerung wuchs.

Die Gräber der Michelsberger Kultur zeugen davon, dass ihre Gesellschaft in Schichten gegliedert war. An einigen Fundstätten wie in Bruchsal-Aue bei Karlsruhe kam die Bestattung eines offenbar hochstehenden Mannes ans Licht. Man hatte ihn in der Tradition der LBK mit angezogenen Beinen und auf der Seite liegend beigesetzt – zusammen mit anderen Menschen, die allerdings weniger sorgsam in die Grabgrube befördert worden waren. Das Verhältnis der Strontiumisotope in den Zähnen der Toten verrät: Als Kinder hatten sie sich alle ähnlich ernährt, mit den Produkten einer Ackerbau- und Viehzüchtergesellschaft. Doch ihre DNA machte Unterschiede zwischen ihnen



kenntlich. Die Menschen, die neben dem seitlich positionierten Mann lagen, trugen ein sehr viel stärkeres Jäger- und-Sammler-Signal im Genom als jener. Auch anderswo im Siedlungsgebiet der Michelsberger Kultur wurden die Überreste von Wildbeutern in Abfallgruben oder Gräben regelrecht entsorgt. Laut Gronenborn zeugt dieser Befund von einer Gesellschaft, die Menschen aus sozialen und biologischen Gründen diskriminierte. Viel mehr noch: Wer zur untersten Schicht zählte, dessen Leben wurde offenbar wenig Wert beigemessen. Menschen, die verrenkt und achtlos in Gräber geworfen wurden, waren womöglich Sklaven oder Kriegsgefangene, die ihrem Herrn in den Tod folgen mussten. Gronenborn: »Ich vermute, dass sie getötet wurden, um in die Gräber zu kommen.«

Welches Schicksal die Kinder mit Wildbeutervorfahren erfuhren

2017 berichteten Maité Rivollat und ihre Kollegen von der »möglichen Durchführung von Menschenopfern« an einem anderen Fundort der Michelsberger Kultur: Gougenheim im Elsass. An einigen Gebeinen zeigte sich, dass Körperteile abgetrennt worden waren. Ein Skelett wies zudem Spuren von Verbrennungen auf. Wie die Forscher vermuten, waren diese Menschen bei Ritualen verstümmelt worden. Aus den Zähnen von 22 Toten in Gougenheim sequenzierte Rivollats Team die mtDNA. Zwischen den achtsam Bestatteten und den daneben »Deponierten« gab es Unterschiede: »Die ungewöhnlich positionierten Individuen wiesen ein mitochondriales Genprofil auf, das von Jäger und Sammlern abstammte, während die in der üblichen Positionierung beigesetzten dieses Profil nicht besaßen«, sagt Rivollat.



FUNDSTÜCKE In der Michelsberger Kultur (4400–3500 v. Chr.) besaßen Jagd und Krieg einen hohen Stellenwert, wie Pfeilspitzen vom Kapellenberg zeigen. Links ein typisches Gefäß der Linienbandkeramik (5400–4900 v. Chr.).

Allerdings gibt sie zu bedenken, dass die Studie nur vergleichsweise wenige Proben umfasste. Zudem muss der Umgang mit diesen Toten nicht automatisch mit ihrer Abstammung in Verbindung gestanden haben, gibt die mtDNA doch nur Auskunft über die mütterliche Seite. Immerhin zeigt die Genanalyse laut Rivollat, dass die Gesellschaft in mehrere Schichten gegliedert und dass eine Vermischung zwischen Angehörigen bestimmter sozialen Gruppen unerwünscht war.

Die Bevölkerung der Michelsberger Kultur erreichte um 3700 v. Chr. ihre größte Zahl – zu einem Zeitpunkt, als besonders oft Gewalt gegen andere verübt wurde, wie Gronenborn anmerkt. Die Menschen aus benachbarten Siedlungen griffen sich an und erschlugen sich gegenseitig. Archäologen schließen auf diese Entwicklung aus den ausgefeilten Verteidigungsanlagen, mit denen die Wohnstätten umwehrt wurden. Überdies waren Siedlungsplätze verlassen worden. Und punktuell fanden Forscher depotierte menschliche Körperteile. »Ähnlich wie in den finalen Szenen des Films ›Apokalypse Now‹ stelle ich mir Gesichter mit Kriegsbemalung und Körper verstreut in Bäumen hängend vor«, sagt Gronenborn. Auf dem Kapellenberg, einem Fundplatz der Michelsberger Kultur in der Nähe von Frankfurt am Main, hatten die Bewohner die Befestigung aus Palisaden, Wall und Graben zu jener Zeit erhöht und verstärkt. Die Erhebungen sind heute im Gelände noch gut sichtbar. Um 3500 v. Chr. haben die Siedler den Ort dann aufgegeben.

Was war geschehen – waren die Menschen niedergemetzelt worden, oder grassierte eine Seuche? Sicher ist: Fast 1000 Jahre lang blieb der Kapellenberg unbesiedelt. Dann, um 2800 v. Chr., kam eine neue Gruppe und errichtete dort zwei Grabhügel. Archäologen kennen sie unter dem Namen Jamnaja. Es handelte sich um halbnomadische Viehzüchter, die mit ihren Wagen aus den Steppen der Schwarzmeerebene zuwanderten. Die Jamnaja steuerten einen geringen Anteil von X-Chromosomen zum Genpool der Europäer bei, wie es die Studie von Amy Goldberg und ihren Kollegen aus dem Jahr 2017 bestätigte. Womöglich waren die Migranten hauptsächlich Männer gewesen. Forscher, darunter Kristian Kristiansen von der Universität Göteborg, spürten in den Zähnen der Einwanderer Reste von DNA des Pesterregers *Yersinia pestis* auf. Daraus

strickten sie 2018 eine These, der zufolge die Jamnaja-Hirten das Ende der vorherigen Bauernkulturen heraufbeschworen, indem sie die Seuche einschleppten. Aber laut Gronenborn zeigen die archäologischen Funde, dass die Bauerngemeinschaften in Mitteleuropa schon über ein Jahrtausend lang geschrumpft waren, als die Jamnaja zum Kapellenberg gelangten. Wenn die Zahl der Bauern also tatsächlich im Lauf der Zeit zurückging, dann muss das andere Gründe gehabt haben. Detlef Gronenborn ist davon überzeugt, einer davon seien gewaltsame innere Machtkämpfe gewesen.

Und was machten die verbliebenen Jäger und Sammler, bevor die Neuankömmlinge auftauchten? Kamen sie aus ihren Verstecken hervor und setzten sich an die Stelle der Bauernkulturen, übernahmen deren Viehzucht und ihren einst blühenden Handel mit Kupfer? Lebten sie demnach als Wildbeuterhirten? Alexey Nikitin hält das jedenfalls für plausibel. Zumindest gab es wohl noch Jäger und Sammler. Im Jahr 2013 berichtete eine Gruppe um die Paläogenetikerin Ruth Bollongino, die damals an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz forschte, dass Wildbeuter und Bauern um 3000 v. Chr. denselben Begräbnisplatz in der Blätterhöhle in Westfalen nutzten. Sie hatten dort ihre jeweiligen tradierten Kulturen beibehalten.

Ob diese Annahme so wie viele andere, mit denen Forscher das Ende der Jungsteinzeit aufzuklären versuchen, weiteren Genanalysen standhält, wird sich zeigen. Doch die meisten Wissenschaftler sind inzwischen sicher, dass die damaligen Entwicklungen nicht einheitlich verliefen. Als die Jamnaja Fuß auf den europäischen Kontinent gesetzt hatten – ihre Ankunft ebnet den Weg zur Bronzezeit –, war damit die letzte jener drei Gruppen angekommen, aus denen sich das Erbgut der heutigen Europäer zusammensetzt. Diese Genome sind eine Mischung aus mittelsteinzeitlichen Jägern und Sammlern, aus jungsteinzeitlichen Bauern und frühbronzezeitlichen Hirtennomaden der Jamnaja – sowie zu einem ganz geringen Anteil von Neandertalern.

Die Ankunft der Bauernkulturen in Europa bestätigt also im Grunde das, was auch aus anderen Epochen der Vorgeschichte überliefert ist: Menschen wanderten stets umher, entlehnten und übernahmen Ideen – und verdrängten andere. Oder wie es Alexey Nikitin formuliert: »Die Menschheit bleibt nicht statisch.« ◀

QUELLEN

Beau, A. et al.: Multi-scale ancient DNA analyses confirm the Western origin of Michelsberg farmers and document probable practices of human sacrifice, *Plos One* 12, 2017

Gronenborn, D.: The persistence of hunting and gathering. In: Cummings, V. et al. (Hg.): *The Oxford handbook of the archaeology and anthropology of hunter-gatherers*. Oxford University Press 2014

Nikitin, A. G. et al.: Interactions between earliest Linearbandkeramik farmers and central European hunter gatherers at the dawn of European Neolithization. *Scientific Reports* 9, 2019

Rivollat, M. et al.: Ancient genome-wide DNA from France highlights the complexity of interactions between Mesolithic hunter-gatherers and Neolithic farmers. *Science Advances* 6, 2020

REZENSIONEN

FORSCHUNGSREISE EINE REISE ANS ENDE DER WELT

Die Fotografin Esther Horvath hat eine Polarexpedition mehrere Monate lang begleitet und dabei spektakuläre Bilder aufgenommen.

► »Die Arktis ist das Epizentrum des Klimawandels«, schreibt Markus Rex, Leiter der MOSAiC-Expedition im Vorwort. MOSAiC steht für Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate. Ein ganzes Jahr lang sollte der deutsche Forschungseisbrecher »Polarstern« an einer Eisscholle festgefroren durch das Nordpolarmeer driften. An Bord je 100 Expeditionsteilnehmerinnen und -teilnehmer aus über 20 Ländern, die insgesamt fünfmal ausgewechselt werden. Ihr Ziel: die kleinen und großen Zusammenhänge zwischen Atmosphäre, Ozean, Meereis und den Lebewesen darin zu verstehen.

»Wir brauchen solide wissenschaftliche Grundlagen, um die anstehenden politischen Entscheidungen zum Klimaschutz treffgenau (...) gestalten zu können«, erklärt Polarforscher Rex. Denn: »Die Arktis ist die Wetterküche Europas.« Wenn sie sich erwärmt, verändern sich die Winde. Das wiederum hat direkte Konsequenzen für unser Wetter und das weltweite Klima. Keine andere Region des Planeten heizt sich schneller auf als jene am Nordpol. Doch leider ist das auch der Bereich, dessen Klimasystem wir bislang am wenigsten verstehen. Um das nachzuholen, bleibt nicht mehr viel Zeit.

»Wir müssen uns von der Arktis, wie wir sie heute kennen, verabschieden«, schreiben Esther Horvath, Sebastian Grote und Katharina Weiss-Tuider. Ihnen ist klar: »Eine zweite

Chance für eine solche Mission gibt es nicht.« Alle drei arbeiten für das Alfred-Wegener-Institut, das die MOSAiC-Expedition leitet. Gemeinsam haben sie diesen Band erstellt, der die Mission von Anfang, bis Mitte Juni 2020 begleitet. Gleich auf der ersten Seite findet man eine Karte, auf der die Route der »Polarstern« eingezeichnet ist. Leider bleibt auch die MOSAiC-Expedition nicht vom Einfluss der Coronavirus-Pandemie verschont. Wegen der Reisebeschränkungen können die Teilnehmer der dritten Etappe nicht per Flugzeug anreisen. Stattdessen muss der Eisbrecher seine Drift unterbrechen, um das Team bei Spitzbergen abzuholen.

Die begleitenden Texte, die Hintergründe erklären, Historisches aufgreifen und mit Hilfe von Logbucheinträgen den Alltag der Forscher wiederge-

MARKEUS REX, ALFRED-WEGENER-INSTITUT; ESTHER HORVATH, E. GROTE, S. WEISS-TUIDER, K. EXPEDITION ARKTIS; MIT FROH. GEN. DER VERLAGSGRUPPE RANDOM HOUSE



ben, stammen von den Medienprofis Grote und Weiss-Tuider. Dominiert wird das Werk aber durch die großformatigen Fotos von Horvath, die sich seit einigen Jahren der Fotografie von Polarregionen widmet. Mit einer der Aufnahmen, die bei dieser Expedition entstand, wurde Horvath sogar mit dem »World Press Photo Award« in der Umwelt-Kategorie ausgezeichnet. Leider wird das Bild nicht explizit gezeigt. Doch selbst ohne diese Auszeichnung ist klar: Die Aufnahmen sind ein Meisterwerk. Sie fangen die Stimmung, die Kontraste und das Licht ein, in das die Fotografin sich »sehr verliebt hat«, wie sie in einem Interview im hinteren Teil des Buchs gesteht.

Doch schon bald ist das Licht gänzlich verschwunden, denn ab Mitte November legt sich die Polarnacht über die Arktis. Als wäre es nicht Herausforderung genug, bei minus 40 Grad Celsius draußen zu arbeiten und den Gefahren des Eises zu begegnen, müssen die Expeditionsteilnehmer nun sechs lange Monate in absoluter Dunkelheit zurechtkommen. Darauf haben sie sich akribisch vorbereitet. In den mitunter surreal anmu-

Esther Horvath,
Sebastian Grote,
Katharina
Weiss-Tuider
**EXPEDITION
ARKTIS**
Die größte
Forschungsreise
aller Zeiten
Prestel,
München 2020
288 S., € 50,-



Der deutsche
Forschungseisbre-
cher »Polarstern«
sollte ein Jahr lang
durch das Nord-
polarmeer driften.

REZENSIONEN

tenden Bildern ist förmlich die Hingabe der Forschenden zu spüren.

Schön ist ebenso, dass der Betrachter einen Eindruck vom Alltag auf und um die »Polarstern« bekommt: Ein ganzes Kapitel widmet Horvath und ihre Kollegen dem »Leben am Ende der Welt«. Beim ersten Bild denkt man zunächst an übliche Forschungsaktivitäten – bis man einen Fußball zwischen den Menschen auf dem Eis entdeckt. Für zwei Stunden sei abends eine kleine Eisfläche vor dem Schiff zugänglich, heißt es. Weil hier auch das Ende des World Wide Web erreicht sei, rückten lange vergessene Freizeitaktivitäten in den Fokus. So sind manche Teilnehmer beim Musizieren, Stricken oder auf der Yogamatte abgelichtet.

Immer wieder finden sich Porträtaufnahmen sowie Zitate von Forschenden, die den Band noch persönlicher und authentischer machen. Doch auch der wissenschaftlich interessierte Leser findet in den ein bis zwei Doppelseiten langen Texten zwischen den Kapiteln genug fachliche Informationen und Impulse. Etwas schade ist, dass es zu einigen Bildern keine Erklä-

Schon bald ist das Licht gänzlich verschwunden, die lange Polarnacht beginnt

rung gibt, so dass man nicht genau weiß, was abgebildet ist. Manches erinnert fast an eine Weltraummission, Horvath selbst sagt, die ersten Schritte auf dem Meereis hätten sich wie eine Mondlandung angefühlt. Trotzdem ist fraglich, ob der Titel »Die größte Forschungsreise aller Zeiten« gerechtfertigt ist. In jedem Fall ist die Expedition äußerst wichtig und beeindruckend, was der Band gut vermittelt. Wer noch mehr und bewegte Bilder der »Polarstern« sehen möchte, dem sei die TV-Dokumentation »Expedition Arktis« des ARD ans Herz gelegt.

Annika Röcker ist promovierte Biochemikerin und Autorin. Bis Ende September 2020 war sie Volontärin bei »Spektrum.de«.

DIGITALISIERUNG SPRECHENDE MASCHINEN

Ein Fluch und ein Segen zugleich: Sprachassistenten erleichtern unser Leben, sammeln dabei aber zahlreiche persönliche Daten.

► Siri rät uns, ob wir einen Regenschirm einpacken sollten; Alexa dreht die Heizung höher und Google Assistant erinnert an den Arzttermin. Digitale Sprachassistenten sind aus dem Alltag vieler Personen kaum noch wegzudenken. »Die menschliche Stimme ist das neue Interface«, schreibt der Wissenschaftsjournalist Christoph Drösser in seinem Buch »Wenn die Dinge mit uns reden«. »Mit ihr kann man viele Kommandos leichter und schneller geben als über eine Tastatur oder einen Bildschirm mit vier Untermenüs.«

Noch sei der Kommandoton (»Mach das Licht im Bad aus«) vergleichbar mit dem auf dem Exerzierplatz, wo die Kommunikation vom Offizier zum Untergebenen in bloß eine Richtung verlaufe. Doch in Zukunft könnten Computer immer öfter antworten, schätzt Drösser: »Wir treten zum ersten Mal in der Menschheitsgeschichte in einen Dialog mit nicht-menschlichen Entitäten.«

Dass wir überhaupt mit Maschinen sprechen, setzt voraus, dass die Geräte uns verstehen – eine Fähigkeit, die man dem Menschen zuschreibt. Der Philosoph René Descartes glaubte, man erkenne das Menschsein unseres Gegenübers an der Sprache. Wenn diese Eigenschaft uns also von Dingen unterscheidet, dann war der Traum der sprechenden Maschine im 18. Jahrhundert ambivalent – oder gar frevlerisch –, weil er fundamentale humanistische Prinzipien in Frage stellte.

Der ungarische Tüftler Wolfgang von Kempelen entwickelte bereits 1780 eine »Sprechmaschine« – eine Apparatur, die mit Hilfe eines Blasebalgs, einer Zungenpfeife und eines Trichters menschliche Laute nachahmte. Zwei Jahre lang tourte der Autodidakt mit seinem Automaten im

Christoph Drösser
**WENN DIE DINGE
MIT UNS REDEN**

Von Sprachassistenten,
dichtenden Computern und
Social Bots

Dudenverlag,
Mannheim 2020
240 S., € 16,-



Gepäck durch Europa. Es sei »eines der ersten Modelle für ein nichtmenschliches Wesen oder Ding, das zu uns in mehr oder weniger gut artikulierter Sprache redet«, erklärt Drösser. Zwar habe das Gerät die Wörter nicht selbst, sondern eine Person mit einer Orgeltastatur gesteuert. Doch der Klang, der einer Stimme ähnelte, habe die Leute in ihren Bann gezogen. Ähnlich sei es, wenn Nutzer das erste Mal mit Siri oder Alexa kommunizieren. Allerdings war der Weg von der Sprechmaschine zu modernen Sprachassistenten sehr lang.

Einen Meilenstein bildet dabei das Programm Eliza, das der Computerpionier Joseph Weizenbaum 1966 am MIT in Cambridge präsentierte. Der Chatbot sollte ein Gespräch zwischen einem Psychotherapeuten und seinem Patienten simulieren. Die Software besaß noch keine Maschinenintelligenz und reagierte auf bestimmte Schlüsselwörter, was im Grunde eine Parodie auf die Psychotherapie darstellte.

Seitdem haben sich Sprachcomputer kontinuierlich weiterentwickelt. Die synthetischen Computerstimmen wurden durch täuschend echt klingende Frauen- oder Männerstimmen abgelöst, die sogar Verlegenheitslaute wie »Äh« und »Hm« in ihren Redefluss einbauen. Dass die Sprachfähigkeit digitaler Assistenten so rasant vorangeschritten ist, hat einen zentralen Grund: Künstliche Intelligenz oder genauer gesagt die Fortschritte auf dem Gebiet der natürlichen Sprachverarbeitung (englisch: Natural Language Processing, kurz NLP).

Statt wie bisher akustische Signale in einzelne Laute, so genannte Phone

zu unterteilen, orientieren sich die neuen Verfahren weniger an abstrakten Grammatikregeln, sondern am Erwerb der Muttersprache. Ähnlich wie ein Kleinkind erkennen neuronale Netze mit statistischen Mechanismen Silben und Wörter, deren Kombination am wahrscheinlichsten ist. Spracherkennung, hebt der Autor hervor, bedeutet auch heute noch jede Menge Handarbeit. So arbeiten bei Amazon etwa 10000 Menschen an der Weiterentwicklung von Alexa, die das System mit immer neuen Fragevarianten trainieren.

In seiner Analyse beschränkt sich Drösser aber nicht nur auf das Potenzial von Sprachprogrammen, sondern geht ebenfalls auf die Risiken ein. So könnte das Sprachmodell GPT-2 (und genauso sein Nachfolger GPT-3) massenhaft Fake News verbreiten. Zudem erforderten Sprachassistenten, die ihre Nutzer rund um die Uhr betreuen, einen tiefen Einblick in das Privatleben: Kalender, Adressbuch, Aufenthaltsort, Kreditkartendaten, Kontostand – das alles muss der digi-

tale Assistent kennen, wenn er das Leben des Nutzers managen soll. Und das berge Risiken für die Privatsphäre.

Der Autor stützt seine Ausführungen unter anderem auf mehrere Interviews, die er für das Buch geführt hat.

Besonders interessant ist das Gespräch mit der Informatikerin Leigh Clark, die über die ideale Computerstimme nachdenkt. Die Frage, wie eine Sprechmaschine klingen soll – menschlich oder roboterhaft, servil oder selbstbewusst, männlich oder weiblich – wird Maschinenethiker und Computerlinguisten noch ein paar Jahre beschäftigen.

Christoph Drösser hat ein kluges und facettenreiches Buch geschrieben, das auf zugängliche Weise technikphilosophische, linguistische und computerwissenschaftliche Fragestellungen miteinander verknüpft. Jedem, der sich für Sprachcomputer interessiert, sei dieses Buch empfohlen.

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

ASTRONOMIE WIE EIN DURCH- LÖCHERTES SENFKORN IN NEW YORK

In seinem Buch »Licht im Dunkeln« beschreibt der Physiker Heino Falcke spannend und mitunter sehr persönlich, wie die erste Abbildung eines Schwarzen Lochs gelang.

► Um Menschen für die Astronomie zu begeistern, geht Heino Falcke manchmal unkonventionelle Wege: Als im Sommer 1999 eine totale Sonnenfinsternis angekündigt ist, steht er bettelnd vor der Leiterin der Grundschule seiner Tochter. Einen Tag will er sie aus dem Unterricht befreien, um ihr das Naturereignis zu zeigen. Dummerweise macht ihm die Schulpflicht einen Strich durch die Rechnung. So löst er kurzerhand seinen Haushalt für diesen einen Tag auf und darf dann seine Tochter mitnehmen. Er fährt mit ihr auf einen

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 Heinzlmann, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer

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 eine Beilage des »Synergie«-Magazins der DZG.

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 42 vom 1.1.2021.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2021 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562

Editor in Chief: Laura Helmut

Executive Vice President: Michael Florek

Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



Acker nahe der französischen Stadt Metz. Dort sieht die Kleine die totale Sonnenfinsternis, ein Ereignis, das sich erst im Jahr 2081 in unseren Breiten wiederholen wird.

Dass Falcke seine Faszination für alles, was im Universum geschieht, gerne vermittelt, erfährt nicht nur seine Tochter. Die Leser seines Buchs »Licht um Dunkeln« kommen ebenso in den Genuss seiner Erzählungen. »Forscher sind mitunter getrieben auf der Suche nach Geheimnissen«, schreibt Falcke darin. Auch er, Professor an der Radboud-Universität in Nimwegen ist, ist ihr verfallen.

Zusammen mit hunderten Kollegen jagte der Astronom jahrelang einer Aufnahme eines Schwarzen Lochs nach. Sie hatten Erfolg.

Als Leiter des Event-Horizon-Telescope-Projekts gelang es Falcke am 10. April 2019, das erste Bild eines Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie Messier 87 der Weltöffentlichkeit zu präsentieren. Das Magazin

Heino Falcke
mit Jörg Römer
**LICHT IM
DUNKELN**

Schwarze Löcher,
das Universum
und wir

Klett-Cotta,
Stuttgart 2020
224 S., € 24.–



»Science« erklärte das Ergebnis zum Wissenschaftsdurchbruch des Jahres.

Falcke nutzt die ersten Kapitel des Buchs, um dem Leser einen Überblick zum Universum zu geben. Insbesondere konzentriert er sich dabei auf Phänomene, die mit Schwarzen Löchern zusammenhängen, etwa wie die galaktischen Monster entstehen oder wie man sie entdeckte. Er thematisiert auch, wie sich die Radioastronomie entwickelt hat, bis hin zu den heutigen weltweiten Netzwerken zusammengesetzter Teleskope für extrem komplexe Beobachtungen. Diese Erläuterungen, sympathisch aufgelockert mit einigen Anekdoten aus Falckes For-

sch erleben, dienen der Grundlagenvermittlung für jenen Abschnitt im Buch, der es von anderen Sachbüchern über das Universum signifikant abhebt. Der Autor plaudert quasi aus dem Nähkästchen, wie es dem Event-Horizon-Projektteam gelang, das Unmögliche möglich zu machen und ein Foto eines Schwarzen Lochs zu generieren.

Die weltberühmte Aufnahme kommt etwas unscheinbar daher. Man kann es in einem kleinen Bilder-Farbtteil in der Mitte des Buchs bewundern. Eine gelb-rote Scheibe mit Loch vor schwarzem Hintergrund. Und doch ist das Foto eine Riesensensation. Der Lichtring hat einen Durchmesser von 100 Milliarden Kilometern und ist 55 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Normalerweise verschlucken Schwarze Löcher alles, was in ihre Nähe kommt, sogar Licht. Das macht das Unterfangen kompliziert, denn die Regeln der Fotografie erfordern nun einmal, dass ein Objekt Licht reflektieren muss, um es abzubilden. Warum man das galaktische Phänomen dennoch sehen könnte, hatte sich Falcke mit seinen Kollegen schon im Jahr 2000 überlegt und seine Gedanken im »Astrophysical Journal« im Artikel »Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center« veröffentlicht. Damals glaubte er noch, man werde bald ein reales Bild haben. Doch es dauerte 20 weitere Jahre und kostete etwa 14 Millionen Euro.

Spannend berichtet Falcke aus erster Hand von den entscheidenden Tagen und Stunden, in denen Radioteleskope rund um den Globus simultan ihr Visier in Richtung Messier 87 richteten. Als Leser kann man sich hervorragend in das Geschehen hineinversetzen. Doch die Beobachtung war nur der erste Teil der Arbeit. Jedes der acht eingesetzten Teleskope sammelte rund 450 Terabyte Daten, erläutert der Autor. Die Auswertung war fehleranfällig und nahm viel Zeit in Anspruch. Doch schließlich war alles berechnet, das Bild generiert und koloriert. Die Veröffentlichung stand kurz bevor.

Hier zeigt das Buch noch einmal seine Stärken. Der Physiker beschreibt spannend, wie man versuchte, alles geheim zu halten, und dabei zeitgleich

Pressekonferenzen rund um die Erde organisierte; wie Journalisten schon vorab Lunte rochen und wie aufgeregt er war, als er vor der Weltöffentlichkeit stand und das bahnbrechende Ergebnis als leuchtender Ring hinter ihm auf der Leinwand erschien. Der Ring entspricht dem Licht, das von allen Seiten um das Schwarze Loch herum gebogen wird. Im unteren Bereich ist er heller,

Der Wissenschaftsdurchbruch des Jahres: Die erste Aufnahme eines Schwarzen Lochs fasziniert die ganze Welt

genau wie es die Astronomen erwartet hatten, beschreibt Falcke. Das Schwarze Loch erscheint von der Erde aus so klein wie ein durchlöcherntes Senfkorn in New York, das man von Nimwegen aus betrachtet, vergleicht der Forscher die schwer vorstellbaren Dimensionen.

Das Buch lebt von der lockeren und persönlichen Erzählweise. Als Koautor hatte der Astronom den »Spiegel«-Redakteur Jörg Römer zur Seite. Die Zusammenarbeit mit einem Journalisten merkt man den Texten an. Sie sind für ein Sachbuch außergewöhnlich kurzweilig zu lesen. Der Autorenmix tut den meisten fachlichen Büchern in der Regel gut, so auch hier.

Eine ungewöhnliche Abrundung erfährt das Werk mit den teilweise philosophisch-religiösen Gedankengängen. Klar wird: Für Falcke widersprechen sich Naturwissenschaft und der Glaube an Gott nicht. Eine Tatsache, die erst einmal überrascht und zum Nachdenken anregt.

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

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

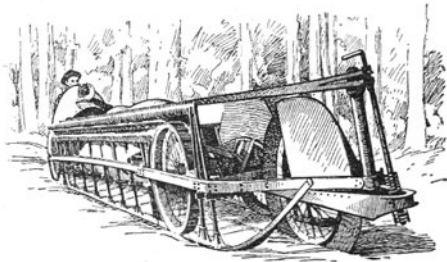
DER SCHNELLSTE ERREGER DER WELT

1921

»Die Geschwindigkeit der Bakterienbewegung wurde schon früher untersucht. Jetzt liegen neue Bestimmungen von G. Sanarelli vor. Danach ist das schnellste untersuchte Bakterium der Cholera-Vibrio, obwohl er nur eine Geißel trägt. Er legt in der Sekunde $125 \mu = 0,125 \text{ mm}$ zurück. Damit bewegt er sich dreimal so rasch wie *Bacillus prodigiosus* und *B. pyocyaneus* (Bazillus des grünen Eiters), fünfmal so rasch wie der Typhusbazillus, zehnmal so schnell wie *Bacterium coli* (der wichtigste Darmbazillus) und *Proteus vulgaris* und zwölftmal so schnell wie *Bacillus megatherium*.« *Die Umschau* 9, S. 110

EIN AUTO FÜR EIS UND SCHNEE

»Seit der Einführung des Automobils haben die Erfinder sich bemüht, den Motor auch für die Beförderung auf Schnee und Eis zu verwenden,



Der Motorschlitten aus Alaska.

aber bisher hat man wenig Erfolg gehabt. Nun hat ein Einwohner von Alaska einen Automobilschlitten erfunden, der ähnlich wie die Tanks auf Raupenrädern mit endlosen Ketten aus Stahldraht fährt. Der Schlitten ist 7,60 m lang. Er wird getrieben von einem 22-PS-Motor von 4 Zylindern mit Luftkühlung. Bewegt wird der Schlitten durch die Hinterräder. Die Richtung wird durch eine Stahlplatte am Vorderteile erzielt. [Er] legt vollbeladen in der Stunde 50 km auf flachem Gelände zurück. Dank seiner Raupenräder ist er auch für unebenes Gelände geeignet, da er über Baumstämme glatt hinübersetzt.« *Technische Monatshefte* 2, S. 47–48

VÖGEL IM STIMMBRUCH

»Der Unterschied der Stimmen junger Vögel von denen der erwachsenen ist in der Regel so auffallend, daß man sie bei gewissen Vogelarten mit voller Berechtigung als Kinderstimmen bezeichnen kann. Stimmwechsel, dem menschlichen Mutieren vergleichlich, ist zunächst bei den Vögeln nur sehr selten anzutreffen. Sehr charakteristisch äußerst sich der Übergang von der Kinder- zu Altenstimme beim jungen Haushahn, dessen scharfes hohes Kikeriki ganz allmählich in das tiefe, mehr dunklere Kükerükü des erwachsenen Hahnes übergeht.« *Kosmos* 2, S. 54

KÄFER TROTZ KÄLTE MIT GEFRIERSCHUTZMITTEL

1971

»An der University of Alaska untersucht L. Keith Miller die merkwürdige Fähigkeit des Laufkäfers *Pterostichus brevicornis* (Familie Carabidae), tiefe Temperaturen unversehrt zu überdauern. Man fand die Käfer in Totholz bei Temperaturen von -50 bis -60 °C ; sie waren steif gefroren. Bei Zimmertemperatur erwachten sie zu neuem Leben. Im Laboratorium wurden die Käfer -85 °C ausgesetzt; sie überlebten. Es stellte sich heraus, daß das Blut der Käfer einen hohen Gehalt an Glycerin aufweist, das sie bei kalter Witterung erzeugen (ein ähnlicher Stoff ist in Kühlerschutzmitteln für Autos enthalten).« *Die Umschau* 3, S. 100

SEE-ELEFANTEN BRÜLLEN IM DIALEKT

»Nicht nur Bayern und Schwaben, sondern auch See-Elefanten unterscheiden sich voneinander durch ›Dialekte‹. Das stellten Wissenschaftler fest, die das Warngebrüll von See-Elefanten auf den Inseln Ano Nuevo, San Miguel, San Nicolas und Isla de Guadalupe untersuchten. Dieses Warngebrüll dient dazu, fremde See-Elefanten von den eigenen Weibchen fernzuhalten. Es besteht jeweils aus einem ›Satz‹ und mehreren ›Wörtern‹. Der Satz ist überall gleich lang: sechs Sekunden. In dieser Zeit aber brüllen die Bullen von Ano Nuevo nur 6,1 Wörter, die von San Nicolas, 528 Kilometer südlicher, dagegen mehr als das Doppelte. Die ›Brüllgeschwindigkeit‹ auf den beiden anderen Inseln liegt dazwischen.« *Kosmos* 2, S. *32

FINNLAND SPRENGT FÜR ÖLRESERVEN

»Ende 1970 konnte Shell die Felskavernen von Kotka/ Südfinnland in Betrieb nehmen. Sie liegen 27 m tief unter dem Meeresspiegel, besitzen ein Fassungsvermögen von $150\,000 \text{ m}^3$ und werden aus dem Fels herausgesprengt (Bild). Die Kavernen unterscheiden sich wesentlich von den unterirdischen Lagern in der Bundesrepublik Deutschland, die, wie etwa die Kavernen bei Sottorf nahe Ham-

burg, durch Ausspülung von Salzstöcken entstanden sind. Damit das Öl nicht in den Untergrund versickern kann, ist der Kavernenboden mit einer Wasserschicht bedeckt, auf der das Öl auf Grund seines geringeren spezifischen Gewichts aufliegt.«

Die Umschau 4, S. 138

Sprengung in einer finnischen Ölkaverne.



Die Wettermaschine

Sonnig mit Aussicht auf Tornados.

Eine Kurzgeschichte von Uwe Hermann

Der Schnee auf dem Bürgersteig lag bereits knöchelhoch, und noch immer schneite es. Die Flocken fielen so heftig, dass ich kaum den Weg erkennen konnte. In meinen Halbschuhen und der dünnen Sommerjacke fror ich erbärmlich und war froh, als endlich unser Gartentor vor mir auftauchte. Sofort, als ich hindurchtrat, hörte es auf zu schneien. Die Temperaturen schnellten in die Höhe, und Sommerhitze schlug mir wie eine Faust entgegen. Einen Moment lang rebellierte mein Kreislauf. Dann hatte sich mein Körper an den Temperaturwechsel gewöhnt.

Meine Frau lag im Bikini am Pool und sonnte sich. Als sie meine Schritte hörte, schob sie die Sonnenbrille hoch auf die Stirn und blickte mich erstaunt an.

»Kruses Eingrenzung funktioniert schon wieder nicht«, antwortete ich auf ihre unausgesprochene Frage. Ich klopfte mir die schmelzenden Flocken von der Jacke. »Die feiern eine Schneeparty, und ihr Wetter reicht bis auf die Straße.«

Bärbel setzte sich auf. »So kann das nicht weitergehen«, sagte sie empört. »Ständig ärgern wir uns über die Kruses und deren Wetter.«

Ich zog meine nasse Jacke und die durchgeweichten Schuhe aus. Kurz zuvor hatte ich in ihnen noch gefroren, nun schwitzte ich. »Was soll ich denn machen?«

Ihre Augen funkelten streitlustig. »Du könntest zum Beispiel hinübergehen und dich beschweren.«

Ich folgte Bärbels Blick zum Grundstück der Kruses. Viel erkannte ich dort nicht. Die Grundstücksgrenze glich einer weißen Wand aus Schneegestöber. Aber was ich hörte, ließ auf reichlich Alkohol und eine ausgelassene Stimmung schließen. Dort meinen Ärger beziehungsweise den Ärger meiner Frau loszuwerden, war das Letzte, was ich wollte. Außerdem ahnte ich, dass Bärbel nur eingeschnappt war, weil Kruses uns nicht eingeladen hatten.

»Vielleicht später. Zuerst muss ich mich umziehen«, antwortete ich ausweichend. Inzwischen lief mir der Schweiß in Strömen vom Körper. Bärbels Mine ließ nichts Gutes erahnen. Gleich würde sie mir mit einem Dutzend Gründen kommen, warum ich mich jetzt sofort zu beschweren hatte. Ich wusste: Am Ende würde ich am Gartenzaun stehen und mit den Kruses diskutieren.

Doch dann rettete mich unsere Tochter Corinna, die mit hochrotem Kopf und der Gewalt eines Unwetters in den Garten stürmte. Sie wohnte seit einigen Wochen bei ihrem Freund. Dass sie nun hier unangekündigt auftauchte, war kein gutes Zeichen. »Ich hasse die Männer!«, schluchzte sie, kaum dass sie uns erreichte.

Meine Frau vergaß die Kruses. »Was ist los, Liebling?« Corinna wischte sich die Tränen aus dem Gesicht. »Tim,

dieser Idiot, hat doch tatsächlich eine Wettermaschine gekauft. Dabei weiß er ganz genau, wie schädlich die Dinger für die Umwelt sind.«

»Und deshalb habt ihr euch verkracht?«, rutschte es mir heraus.

»Aber natürlich! Wir alle sollten auf manipuliertes Wetter verzichten. Es ist ein gefährlicher Eingriff in das Klimasystem der Erde und zerstört unsere Zukunft.«

»Ach Quatsch«, erwiderte ich. »Weißt du denn nicht, dass die Wettermaschinen helfen, den Hunger in der Welt zu bekämpfen? Heutzutage können die Landwirte dank ihnen das ganze Jahr hindurch ernten. Oder denk an die unzähligen Veranstaltungen, die früher regelrecht ins Wasser gefallen sind: Open-Air-Festivals, Jahrmärkte, Stadtfeste ... Heute garantieren Wettermaschinen bei jedem Fest strahlenden Sonnenschein.«

»Papa hat Recht«, pflichtete mir Bärbel zu meiner Überraschung bei. »Außerdem gibt es auf den Straßen kein Glatteis, Starkregen oder Nebel mehr. Das Fahren ist seitdem viel sicherer geworden.«

Corinnas Blick verdunkelte sich weiter. »Und was ist mit den negativen Folgen?« Sie war nun offensichtlich im Kampfmodus. »Überall dort, wo keine Wettermaschinen stehen, gibt es Stürme, Gewitter, Starkregen und Überschwemmungen. Deshalb müssen immer mehr von diesen Dingen aufgestellt werden.«

»Schlechtes Wetter hat es früher auch schon gegeben«, widersprach ich.

Corinna warf verzweifelt die Arme in die Luft. »Himmel, das Wetter ist global. Man kann doch nicht punktuell etwas ändern und glauben, dass das keine Auswirkungen auf den Rest der Welt hat.«

»Du übertreibst«, sagte ich und hielt nach der Fernbedienung der Wettermaschine Ausschau. »Ich jedenfalls möchte auf unsere Wettermaschine nicht mehr verzichten.«

In diesem Moment zischte es lautstark, und Funken sprangen den Draht der Eingrenzung unseres Grundstücks entlang. Die Kontrolllichter auf den Begrenzungspfählen erloschen. Sofort drängte eine Wolke aus Schnee und Kälte von den Kruses auf unser Grundstück.

Meine Frau sprang mit einem Schrei von der Liege auf, als die Kaltfront sie erreichte. Über unseren Köpfen zogen sich wie im Zeitraffer dunkle Wolken zusammen. Ein Blitz zerteilte den Himmel; es krachte ohrenbetäubend. Nach einem weiteren Donnerschlag setzte sintflutartiger Regen ein. Die Temperaturen fielen schneller, als wir durch den Garten laufen konnten. Völlig durchnässt betraten wir das Haus.

»Unsere Wettermaschine ist hinüber«, seufzte ich. »Wahrscheinlich ist Feuchtigkeit in die Elektronik gekommen. Kein

Wunder, bei dem Schneegestöber, das die Kruses veranstalten.« Ich blieb am Küchenfenster stehen und schaute hinaus. Es regnete und hagelte abwechselnd, als könnte sich das Wetter nicht entscheiden, auf welche Weise die Welt untergehen sollte.

»Siehst du das? Das ist doch nicht nur schlechtes Wetter! Solche Unwetter hat es früher nicht gegeben«, rief Corinna. Ärgerlich zog ich die Luft ein. Ich mochte es nicht, wenn sie Recht hatte. »Mag sein, dass dieses Gewitter heftiger ist als sonst, aber das hängt nicht mit den Wettermaschinen zusammen.«

Meine Frau hatte sich im Schlafzimmer umgezogen und kam zurück in die Küche. »Mit genug Wettermaschinen würde es gar keine Unwetter mehr geben.«

Es knallte, als irgendwo der Blitz einschlug. Wir zuckten erschrocken zusammen. Erkennen konnten wir kaum noch etwas, dazu war es längst zu dunkel.

Ein erneutes Krachen ließ das Haus erzittern. »Ich rufe den Reparaturdienst an, bevor das Unwetter noch schlimmer wird«, sagte ich und zog mein Smartphone aus der Hosentasche. Doch es meldete sich nur eine Stimme vom Band, die mich um Geduld bat. Leider war Geduld das Letzte, was ich gerade erübrigen konnte.

»Hilft nichts. Ich fahre in die Stadt. Telefonisch erreiche ich dort niemanden.« Ich erinnerte mich wieder an meine nasse Kleidung. »Vorher ziehe ich mich aber noch um.«

»Nimmst du mich mit? Ich bin mit dem Bus hier!«, rief Corinna mir hinterher, als ich den Weg zum Schlafzimmer einschlug.

Am Ende fuhren wir alle drei in die Stadt. Meine Frau weigerte sich, bei dem Gewitter allein zu Hause zu bleiben. Wahrscheinlich hatte sie aber nur Angst, dass ich zu viel Geld für eine neue Wettermaschine ausgeben könnte.

Kaum hatten wir unser Grundstück verlassen, ließ das Gewitter nach. Es klarte auf, und am Himmel stand keine einzige Wolke mehr. Auf den meisten Grundstücken schien die Sonne. Nur dort, wo niemand zu Hause war, regnete es. Einmal sahen wir einen Garten, den seine Besitzer in eine Eislandschaft verwandelt hatten. Das Haus war festlich geschmückt, und eine Gruppe Kinder – von denen offensichtlich eines gerade Geburtstag feierte – lieferte sich eine Schneeballschlacht zwischen prächtigen Eisskulpturen.

In der Stadt trennten sich unsere Wege. Meine Frau verschwand in einer Bäckerei, um ihre Nerven mit Kaffee und Kuchen zu beruhigen. Corinna sprang mit den Worten »Ich habe noch etwas zu erledigen« aus dem Wagen und eilte davon. Auch ich stieg aus und suchte den nächsten Servicehändler für Wettermaschinen auf.

Als ich das Geschäft betrat, sah ich eine lange Warteschlange vor mir. Dutzende Köpfe drehten sich kurz in meine Richtung. Dann wanderten die Blicke wieder nach vorne zum Tresen, wo ein Verkäufer gerade einem Kunden das neuste Spitzenmodell einer Wettermaschine erklärte. Ich entdeckte einen Bekannten, ein paar Meter vor mir. Auch er sah mich und winkte mir zu.

»Auch Probleme mit der Wettermaschine?«, fragte ich.

Er nickte ärgerlich. »Das ist dieses Jahr schon die zweite, die ich mir kaufen muss. Meine alte Kiste hat nicht mehr genug Leistung. Und das, obwohl die Garantie noch nicht einmal abgelaufen ist.«

»Ist bei uns auch so«, sagte ein Jugendlicher und schaute sich zu uns um. »Ja, es scheint, als ob die Geräte immer mehr Leistung bräuchten, je mehr von ihnen aufgestellt werden«, erwiderte mein Bekannter.

Ich dachte an das Schneegestöber der Kruses auf dem Bürgersteig vor meinem Haus. »Meine Tochter meint, dass die Wettermaschinen schädlich für die Umwelt sind«, sagte ich zögernd.

»Also ich habe gehört, dass das an der Sonne liegt. Die wird größer oder kleiner. Genau weiß ich das nicht, aber die Sonne ist daran schuld. Das ist sicher«, mischte sich jemand vor uns in unser Gespräch ein. Auf einer Videowand lief ein Werbefilm: Eine Frauenstimme warb mit dem Slogan »In einem Cabrio von Tesla fahren Sie immer bei Sonnenschein für das neuste Modell mit eingebauter Wettermaschine. »Auch für Fußgänger soll es bald tragbare Wettermaschinen geben«, hörte ich jemanden sagen.

Mein Smartphone klingelte; meine Frau meldete sich. Noch bevor ich sie begrüßen konnte, rief sie: »Corinna demonstriert vor dem Rathaus gegen die Wettermaschinen!«

»Was?«

»Ich habe sie gerade im Livestream gesehen.« In ihrem Tonfall schwang Panik mit. »Du holst sie sofort dort ab!«

Meine Frau und ich trafen gleichzeitig beim Rathaus ein. Die Demonstranten hatten den Eingang blockiert. Corinna hielt ein Protestschild in die Höhe, und alle verlangten lautstark die Abschaltung sämtlicher Wettermaschinen. Eine Gruppe Polizisten war bereits auf dem Weg zu ihr.

»Tu etwas!«, kreischte meine Frau. Ich lief zu Corinna hinüber und zerrte sie von den Demonstranten fort. Gemeinsam verfrachteten wir unsere Tochter ins Auto. Auf dem Heimweg brach sie in Tränen aus, und ich schwieg mit zusammengebissenen Zähnen.

Als wir in unsere Straße einbogen, gab es unser Haus nicht mehr. Das Unwetter hatte es völlig zerstört und nur Trümmer übrig gelassen. Die Kruses erzählten, dass der Tornado nur auf unserem Grundstück gewütet und dabei ein eindrucksvolles Bild abgegeben hätte. Etwas mitleidig boten sie uns an, uns bei ihnen mit einem Glühwein aufzuwärmen.

Hoch über unseren Köpfen, außerhalb der menschlichen Einflussosphäre, tobten derweil weiterhin pausenlos schwere Gewitter – und warteten auf den Moment, in dem irgendwo wieder eine Wettermaschine ausfiel. ◀

DER AUTOR

Uwe Hermann, ausgezeichnet mit dem Kurd-Laßwitz-Preis und dem Deutschen Science-Fiction-Preis, schreibt seit 1990 Kurzgeschichten und Romane. Seine letzten Veröffentlichungen: »Userland – Berlin 2069« und »Der Raum zwischen den Worten: Kurzgeschichten – Band 5«. Im Februar 2021 erscheint sein neuer SF-Thriller »Nanopark«.

www.kurzgeschichten.com

VORSCHAU



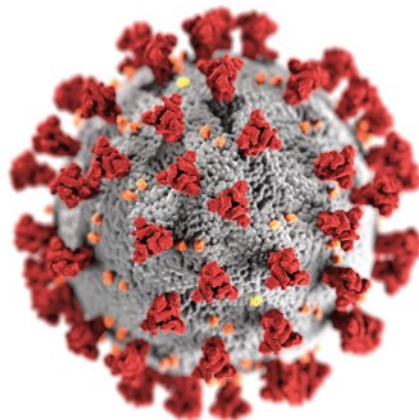
JOHN ANTHONY DI GIOVANNI, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DIE KRIEGE DER ZUKUNFT

Werden Satelliten künftig zur Zielscheibe kriegerischer Auseinandersetzungen? Unsere moderne Gesellschaft hängt davon ab, dass die abertausenden Flugkörper ihre Arbeit störungsfrei verrichten. Experten drängen daher auf ein internationales Abkommen zum Weltraumrecht. Auf dem Erdboden fordern dagegen autonome Waffensysteme Staaten und Ethiker heraus: Womöglich wird irgendwann nicht mehr der Mensch die Entscheidung über Leben und Tod treffen, sondern eine Software.

SARS-COV-2 UND DAS IMMUNSYSTEM

Infektionen mit dem neuen Coronavirus führen mitunter zu schweren Krankheitsverläufen, bei denen massive Lungenprobleme, Herz-Kreislauf- und Nierenschäden auftreten – bis hin zum Organversagen. Der Grund: Es laufen Abwehrreaktionen aus dem Ruder, die sowohl die angeborene als auch die adaptive Immunantwort betreffen.



CDC / ALISSA LECKERT, MSMI, DAN HIGGINS, MANS



4X-IMAGE / GETTY IMAGES / ISTOCK

ÜBERLICHTSCHNELL DURCH DIE WAND

Quantenmechanische Objekte können Hindernisse einfach durchqueren. Laut jüngsten Experimenten bewegen sie sich dabei möglicherweise sogar mit höherer Geschwindigkeit als das Licht.



ORBON ALDAY / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIGITALE MANIPULATION

Tagtäglich beeinflussen uns Algorithmen – sei es, weil man sich Videos auf Youtube ansieht oder Informationen in sozialen Medien austauscht. Wenn man die zugehörigen psychologischen Tricks und ihre Funktionsweise kennt, kann man ihnen entgehen.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserekskursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

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

www.spektrum.de/abo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **50**
13./12.
2020

TRAUER
Gestorben ohne Abschied

THEMENWOCHE **LEBEN MIT DEM TOD**

Wie wollen wir sterben?

Der Tod ist ein Tabuthema. Dabei kennt die moderne Medizin Mittel und Wege, ihn erträglich zu machen. Und die Bedürfnisse des Einzelnen am Lebensende zu erfüllen.

TRAUMA
»Alle schweren Erkrankungen können zu einer PTBS führen«

GEFÜHLTE RISIKEN
Die Angst um die Liebsten

LETZTE HILFE
Wie sorge ich für einen Sterbenden?

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

