

Spektrum

der Wissenschaft



Das mechanische Gehirn

Kommunizieren Nervenzellen
mittels Druckwellen
statt elektrischer Aktivität?

KOSMOLOGIE Die Geburt der ersten Quasare

EXTREMWETTER Ist der Klimawandel an Hitze und Starkregen schuld?

DIABETES Neue Impfstoffe könnten vor Typ 1 schützen

JETZT
NEU!

03.18
Spektrum
PSYCHOLOGIE

GEHEIMNISSE | Was wir lieber für uns behalten
INTERVIEW MIT STEVEN PINKER | »In der Welt herrscht immer weniger Gewalt«
MULTITASKING | Zwei Aufgaben sind eine zu viel
SPRACHE | Kinder lernen am besten aus Dialogen

Gute Beziehung

Wie andere Menschen
uns stark machen



Jetzt für nur
€ 5,90 bei Ihrem
Zeitschriften-
händler

Spektrum PSYCHOLOGIE –
Das Magazin für
den modernen,
selbstbestimmten Menschen.

Spektrum PSYCHOLOGIE bringt
Ihnen ab sofort alle zwei
Monate tiefere Einsicht in das
menschliche Miteinander,
mehr Orientierung in aktuellen
gesellschaftlichen Fragen
sowie positive Impulse für Ihr
eigenes Leben:
Kompakt und informativ.

Jetzt im Handel oder hier erhältlich:

www.spektrum.de



EDITORIAL DRUCKWELLEN IM GEHIRN

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Als ich in den 1990er Jahren am Basler Friedrich-Miescher-Institut in Neurobiologie promovierte, gab es dort einen »Journal Club«: Einmal pro Woche trafen sich die Mitglieder der neurobiologischen Arbeitsgruppen, und reihum stellte einer von uns eine neue Fachpublikation vor, die man für das eigene Forschungsgebiet als besonders interessant und wichtig empfand.

Meistens ging es bei den präsentierten Aufsätzen um spezielle Detailergebnisse, etwa zu bestimmten neuronalen Wachstumsfaktoren und ihren Rezeptoren. Als ich einmal an der Reihe war, stieß ich jedoch auf einen Artikel aus einem anderen Fachgebiet, der Immunologie. Darin wurde der seit Jahrzehnten etablierten Sichtweise, der zufolge das Immunsystem im Wesentlichen »selbst« und »nicht selbst« unterscheidet und gegen Letzteres vorgeht, eine Alternative gegenübergestellt: die »Danger Theory«. Demnach löse weniger die Fremdheit eines Moleküls eine Immunantwort aus als dessen Gefahr für den Organismus. Ich erinnere mich noch gut, wie sich unsere Diskussion lange im Kreis drehte, weil einige Kollegen sich partout nicht von der alten Sichtweise lösen konnten. Dabei sollte man doch gerade in der Forschung immer offen für gänzlich neue Ideen sein – weshalb ich die Publikation auch vorgestellt hatte.

Ein ähnlicher Perspektivenwechsel könnte nun Neurobiologen blühen: Eine Reihe von Forschern, darunter der Physiker Thomas Heimburg, ist überzeugt davon, dass Informationen nicht über elektrische Impulse zwischen Nervenzellen weitergegeben werden, sondern über Druckwellen, die an der Membran der dünnen neuronalen Fortsätze entlanglaufen. Die Spannungsschwankungen seien demnach lediglich eine Begleiterscheinung der mechanischen Impulsleitung und nicht zentral für die Arbeitsweise unseres Gehirns. Eine kühne These, aber es gibt reichlich Belege, die sie stützen, wie der Artikel ab S. 12 darlegt.

Wie die »Danger Theory« stößt der Ansatz natürlich auf vielfachen Widerstand unter Neurowissenschaftlern. Als ein Redaktionskollege auf der Lindauer Nobelpreisträgertagung den Entwicklern der Patch-Clamp-Technik Erwin Neher und Bert Sakmann von dem Artikel erzählte, winkten diese nur ab – wenig überraschend vielleicht bei Spezialisten für Elektrophysiologie. Womöglich liegt die Wahrheit ja auch in der Mitte: Elektrische und mechanische Aspekte spielen eine Rolle, je nach betrachteter Teilaufgabe mehr oder weniger. In der Immunologie hat das Gefahrenmodell die alte Sichtweise jedenfalls nicht verdrängt, sondern ergänzt, da sie einige Aspekte besser erklären kann, aber längst nicht alle.

Herzlich grüßt Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung 3.18 stellt innovative Strategien gegen den zunehmend bedrohlichen Klimawandel vor.

AUTOREN DIESER AUSGABE



KIRSTEN M. DRESCHER, STEVEN TRACY

Die beiden Mediziner möchten den Diabetes Typ 1 auf einem für solche Autoimmunkrankheiten eher ungewöhnlichen Weg bekämpfen: mit einer Impfung (S. 32).



WILFRIED ROSENDAHL, DORIS DÖPPES

Die Paläontologen der Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim begeistern sich für die ältesten Mumien der Welt: Dinosaurierfossilien mit steinernen Haut- und Magenresten, Tierkadaver der letzten Eiszeit aus dem Permafrost (S. 40).



PRIYAMVADA NATARAJAN

Um die Strukturen des Kosmos zu kartieren, benutzt die Astrophysikerin einige der ersten extrem leuchtkräftigen Objekte des Alls. Ab S. 66 präsentiert sie eine Erklärung für deren rätselhaften Ursprung.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Stürmische Zeiten

Kleinkind mit Kletterfüßen

Aale auf Kokain

Origami-Greifarm
für die Tiefsee

Weltgrößte
Kristalle in Gefahr

Doppelspindeln in
befruchteten Eizellen

Neue Jupitermonde

Ratten bedrohen
Korallenriffe

22 FORSCHUNG AKTUELL

Blazar als Quelle für Superneutrino

Herkunft eines extrem
energiereichen Neutrinos
erstmalig identifiziert.

Hunger kontra Schmerz

Regulation zweier konkurrierender
Empfindungen im
Gehirn.

Quantenzigarren im Gleichtakt

Atomwolken koppeln sich
überraschend aneinander.

Umweltfreundlichere Düngerproduktion

Neuer Katalysator erlaubt
Synthese von Ammoniak
durch Elektrolyse.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Groß- und Kleinforschung im Weltall

Viele Experimente gelingen
schwerelos besser.

48 ZEITREISE

Vom Regenmachen
zum Unterwasserlabor.

72 SCHLICHTING!

Jetzt bin ich gar

Luft einschließen lassen
Spätzle und Co. aufsteigen.

12 NEUROWISSENSCHAFT **DAS MECHANISCHE GEHIRN**

Ein Physiker erschüttert ein neurobiologisches Dogma: Nervenzellen sollen Informationen statt über elektrische Impulse per Druckwellen übertragen. Er beruft sich dabei auf alte, fast vergessene Experimente.

Von Douglas Fox

32 MEDIZIN **IMPFEN GEGEN DIABETES**

Immer mehr Menschen erkranken an Diabetes Typ 1. Jetzt zeichnet sich ein verblüffendes Gegenmittel ab: Impfstoffe gegen spezielle Viren.

Von Kirsten M. Drescher und Steven Tracy

40 TIERMUMIEN **DINO, MAMMUT & CO**

Neue Serie: Mumien (Teil 1) Versteinerte Haut- und Muskelreste, mumifizierte Gedärme – nur selten überdauernden Gewebe und Organe ihre Lebenswelt vor Zehntausenden von Jahren.

Von Wilfried Rosendahl und Doris Döppes

50 INTERVIEW **EXTREMWETTER DURCH ERDERWÄRMUNG?**

Ob der Klimawandel uns häufiger extreme Wetterphänomene wie Hitzewellen, Hochwasser oder Orkane beschert, ist nicht leicht zu beantworten.

Die Meteorologin Daniela Jacob berichtet über den Stand der Forschung.

Von Alexander Mäder

56 GEOLOGIE **ZIRKONE – ZEUGEN DER FRÜHEN ERDGESCHICHTE**

Serie: Die junge Erde (Teil 2) Im Gestein eingeschlossene Zirkonkristalle können Jahrmilliarden überstehen. Sie liefern Hinweise darauf, wann die Erde zum ersten Mal eine feste Kruste bildete und Ozeane ihre Oberfläche bedeckten.

Von Donald R. Prothero

62 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **ELEKTROCHEMISCHER SPEICHER FÜR GRÜNEN STROM**

Der Umstieg auf Wind- und Solarstrom erfordert Speichertechnologien, die wetterbedingte Schwankungen abfedern. Power-to-Gas, die Synthese von Methangas mittels Ökostrom, könnte hierbei helfen.

Von Matthias Ducci, Marco Oetken und Isabel Rubner

66 ASTROPHYSIK **WIE ENTSTANDEN DIE ERSTEN QUASARE?**

Viele Schwarze Löcher waren bereits überraschend früh nach dem Urknall gewaltig groß. Ein neuer Entstehungsmechanismus soll das erklären.

Von Priyamvada Natarajan

74 ALGEBRAISCHE GEOMETRIE **DER MATHEMATISCHE HELLSEHER**

Mit gerade einmal 30 Jahren hat Peter Scholze ein ganzes Fachgebiet umgekrempelt – und einen intensiven Ausflug in das nächste unternommen.

Von Erica Klarreich

80 MATHEMATIKUNTERRICHT **DIE KOMPETENZFALLE**

Was im Gefolge des Pisa-Schocks den Schülern verordnet wird, ist eine Mogelpackung. Durch Fokussierung auf Testresultate geht der Inhalt verloren.

Von Ysette Weiss und Rainer Kaenders

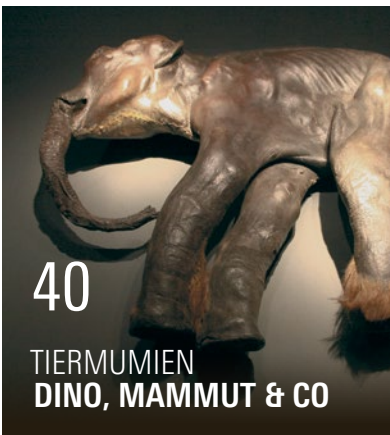
MIT FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG, INSTITUT FÜR NEUROANATOMIE UND ANATOMIE, MARTINUS CENTER FOR BIOMEDICAL IMAGING, CONSORTIUM OF THE HUMAN CONNECTOME PROJECT - WWW.HUMANCONNECTOMEPROJECT.ORG



12

TITELTHEMA
DAS MECHANISCHE GEHIRN

WILFRIED JOSEPHAUH, MANNHEIM



40

TIERMUMIEN
DINO, MAMMUT & CO

F. LAMOT / GJAM 2016, MUSEUM D'HISTOIRE NATURELLE DE LILLE (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:RUSSISCHERAMANTENASKI_REF2010_4.574_MUSCISCHAMANTENHISTORIKREINARELLELLE_GJAM0016_PHOTOFLAMOT_307917_22_BPSA-4.0_GJAM16COMMONS)UND LICENSIS BY SA/4.0 (LEGALCODE)



56

GEOLOGIE
ZIRKONE – ZEUGEN DER
FRÜHEN ERDGESCHICHTE

MARK RUSS



66

ASTROPHYSIK
WIE ENTSTANDEN DIE
ERSTEN QUASARE?

VOLKER LANNERT / UNIVERSITÄT BUNN



74

ALGEBRAISCHE
GEOMETRIE
DER MATHEMATISCHE
HELLSEHER

87 FREISTETTERS FORMELWELT

Segensreicher Betazerfall

Die schwache Kernkraft lässt die Sonne scheinen.

88 REZENSIONEN

Simon Ings: Triumph und Tragödie

Lucy Cooke: Die erstaunliche Wahrheit über Tiere

Lawrence M. Krauss: Das größte Abenteuer der Menschheit

Michael Hütterer u. a.: Die erschöpfte Globalisierung

Klaus Janke, Bruno P. Kremer: Düne, Strand und Watt

Bernhard Kegel: Ausgestorben, um zu bleiben

Ian Stewart: Die Berechnung des Kosmos

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Das Treueversprechen

Kleine Geschenke erhalten die Freundschaft.

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

Titelbild:
jm1366 / Getty Images / iStock



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

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

SPEKTROGRAMM

STÜRMISCHE ZEITEN

▶ Auf dem Mars ist es längst nicht immer sonnig. In der Tiefebene Utopia Planitia nahe dem Nordpol ist im April 2018 ein gewaltiger Sturm aufgezogen, wie diese Aufnahme der ESA-Sonde Mars Express zeigt. Wegen der extrem dünnen Luft sind Stürme auf dem Mars zwar längst nicht so mächtig wie auf der Erde, dennoch erreichen Winde immerhin die Hälfte der Geschwindigkeiten von irdischen Hurrikanen; zudem verdunkelt der aufgewirbelte Staub den Himmel.

Manchmal können die Unwetter sogar über Monate wüten und große Teile der Planetenoberfläche bedecken. Solch ein Sturm ist derzeit in Äquatornähe im Gang, und bedroht dort einen von zwei aktiven Mars-Rovern der NASA: Der 2004 gelandete Opportunity ist auf Strom aus Solarzellen angewiesen, auf denen nun jedoch eine Staubschicht liegt. Die Ingenieure haben den Roboter daher vorsorglich in eine Art Winterschlaf versetzt, aus dem der Rover hoffentlich wieder erwachen wird. Sein Nachfolger von 2012 hat das Problem nicht: Curiosity bezieht seine Energie von einem radioaktiven Klumpen Plutonium, der auch bei schlechtem Wetter Strom und Wärme spendet.

DLR-Pressemitteilung, Juli 2018

PALÄOANTHROPOLOGIE KLEINKIND MIT KLETTERFÜSSEN

► Der aufrechte Gang ist ein Merkmal der Gattung *Homo*. Doch auch Vorfahren des modernen Menschen durchstreiften vor

mehr als drei Millionen Jahren wohl bereits auf zwei Beinen die Landschaften Ostafrikas. Dafür sprechen zumindest die Fuß-

knochen der Art *Australopithecus afarensis*, die im Jahr 1974 durch den Fund des Skeletts von »Lucy« weltberühmt wurde. Wie Menschen hatten auch diese Homininen eine Fußwölbung, die ihr Körpergewicht beim Gehen besser verteilte, und ein großes Fersenbein, das den hohen Belastungen beim Auftreten standhielt.

Doch während Menschen bereits mit für den aufrechten Gang geformten Füßen zur Welt kommen, entwickelten Australopithecinen sie wohl erst im Lauf des Erwachsenwerdens. Zum diesem Schluss kommt jedenfalls ein Team aus Paläoanthropologen um Jeremy DeSilva vom Dartmouth College im US-Bundesstaat New Hampshire. Die Wissenschaftler haben erstmals ein fast vollständiges Fußskelett eines zweieinhalbjährigen Australopi-

thecinen-Mädchens im Detail untersucht und mit den Fußknochen eines erwachsenen Artverwandten verglichen.

Demnach besaß das Mädchen zwar die menschenähnliche Fußwölbung, das Fersenbein war jedoch überraschend klein und ähnelte eher dem von Menschenaffen. Und die Ähnlichkeiten mit Letzteren gingen noch weiter: Offenbar hatten die Kleinkinder der Vormenschen auch sehr bewegliche und lange Zehen, mit denen sie sogar greifen konnten. Dadurch konnten sie wahrscheinlich hervorragend klettern, was überlebenswichtig gewesen sein könnte. Im damaligen Ostafrika boten Bäume vermutlich den besten Schutz vor Raubtieren, argumentieren die Forscher.

Science Advances 10.1126/sciadv.aar7723, 2018



BIOLOGIE AALE AUF KOKAIN

► Vor wenigen Jahrzehnten war der Europäische Aal (*Anguilla anguilla*) ein beliebter Speisefisch, doch seit den 1970er Jahren ist sein Bestand drastisch zurückgegangen: Flussverbauungen, Wasserkraftwerke und Überfischung haben dafür gesorgt, dass die Art mittlerweile als vom Aussterben bedroht gilt. Eine weitere, eher ungewöhnliche Gefahrenquelle haben italienische Biologen um Anna Capaldo von der Università degli Studi di Napoli Federico II aufgespürt: Kokain und seine Abbauprodukte, die mittlerweile viele Flüsse im Umfeld europäischer Metropolen verseuchen. 2009 hatte eine bel-

gische Studie bis zu 753 Nanogramm Kokain pro Liter Wasser in Gewässern und Kläranlagen rund um Brüssel nachgewiesen; die Konzentrationen von daraus hervorgegangenen Metaboliten wie Benzoylcegonin lag sogar bei mehr als 2250 Nanogramm pro Liter. Die Werte für deutsche und andere europäische Großstädte sehen ähnlich aus.

Die Aale nehmen diese Stoffe auf und reichern sie in ihrem Fettgewebe an, wie Capaldo und ihre Kollegen bereits 2012 herausgefunden hatten. Nun haben die Forscher auch handfeste Folgen für die Gesundheit und das Orientierungsvermögen der Fische nachgewiesen: Das Team teilte 150 Aale auf verschiedene Gruppen auf und setzte einige von ihnen 50 Tage

lang Wasser aus, in dem sich 20 Nanogramm Kokain pro Liter befanden. Die Droge ließ die Fische verhaltensauffällig und hyperaktiv werden. Zudem reichert sich das Rauschmittel im Gehirn, in den Muskeln, Kiemen und anderem Gewebe an. Die Muskelzellen schwellen dadurch an oder zerfallen sogar.

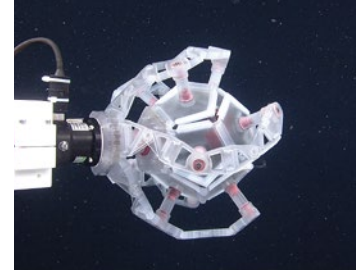
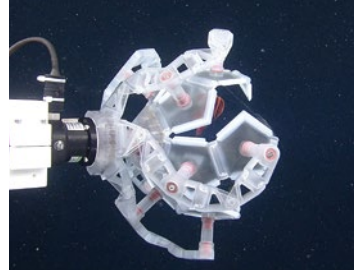
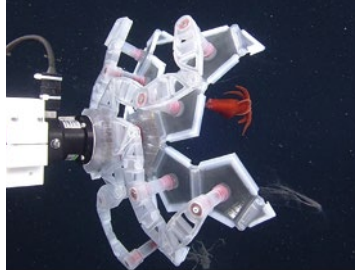
Da die Aale jedoch tausende Kilometer wandern müssen, um von ihrem zeitweiligen Lebensraum in den Flüssen zu ihren Laichplätzen in der Sargassosee des Atlantiks zu gelangen, könnte das Kokain ihre Fortpflanzung beeinträchtigen: Sie überleben dadurch vielleicht die lange Reise nicht oder sind vor Ort zu entkräftet, um sich erfolgreich zu vermehren.

Sci. Total Environ. 640–641, S. 862–873, 2018

TECHNIK ORIGAMI- GREIFARM FÜR DIE TIEFSEE

► Meeresbiologen schätzen, dass es bis zu einer Million unentdeckter Tierarten in der Tiefsee gibt. Mit Fangnetzen lassen sich jedoch nur wenige Fische und Schalentiere lebend an die Oberfläche bringen. Quallen und Tintenfische werden bei dem Versuch, sie zu Forschungszwecken zu fangen, hingegen oft getötet. Zwar gibt es spezielle Vorrichtungen, mit denen Tauchroboter empfindliche Lebewesen einsaugen oder in einen Zylinder sperren können. Das birgt jedoch ebenfalls Gefahren für die Geschöpfe, und es gelingt längst nicht immer, sie zu erwischen.

TEOH, Z. R. ET AL.: ROTARY-ACTUATED FOLDING POLYHEDRONS FOR MIDWATER INVESTIGATION OF DELICATE MARINE ORGANISMS. IN: SCIENCE ROBOTICS 3, EAATS276, 2018



Der Roboterarm umschließt blitzschnell einen Tintenfisch in 560 Meter Meerestiefe.

Ingenieure um Zhi Ern Teoh von der Harvard University haben nun einen besonderen Greifarm entwickelt, der es besser machen soll. Der Rotary Actuated Dodecahedron (RAD) besteht aus geschickt verbundenen Plastikfünfecken, die sich auf Knopfdruck blitzschnell zu einem 20 Zentimeter großen Dodekaeder zusammen-

fügen – einem symmetrischen Körper mit 20 Ecken, der ein Volumen von drei Litern elegant umschließen kann. Der RAD ist dabei so konstruiert, dass ein einziger Drehantrieb den Schließmechanismus in Bewegung setzt.

Die Forscher haben die ausgeklügelte Apparatur im Mystic Aquarium in Connecticut erfolgreich getestet, indem sie dort Ohrenquallen fingen und unbeschadet wieder frei ließen. Nach kleineren Änderungen, die das Gerät seetaug-

lich machten, erprobten sie das elektrische Dodekaeder schließlich in der Bucht von Monterey an der Pazifikküste Kaliforniens. In bis zu 700 Meter Tiefe fing der von den Forschern ferngesteuerte Greifarm verschiedene Quallen und Kalmare ein. Teoh und seine Kollegen glauben, dass das Dodekaeder sogar Drücken widerstehen könnte, wie sie in elf Kilometer Meerestiefe auftreten.

Science Robotics 10.1126/scirobotics.aat5276, 2018

GEOCHEMIE WELTGRÖSSTE KRISTALLE IN GEFahr

► In der mexikanischen Mine von Naica wachsen die größten Kristalle der Welt. Bis zu 14 Meter lang und 50 Tonnen schwer werden die glänzenden Gipsgiganten. Doch nun droht ihnen Gefahr: An der

Luft verlieren sie einen Teil des in ihnen enthaltenen Kristallwassers, berichtet eine Arbeitsgruppe um María Montero-Cabrera vom Centro de Investigación en Materiales Avanzados in Chihuahua. Aus

Sicht des Teams besteht das Risiko, dass die Oberfläche der mehrere hunderttausend Jahre alten Kristalle trüb werden, auch könnten sich tiefe Risse bilden.

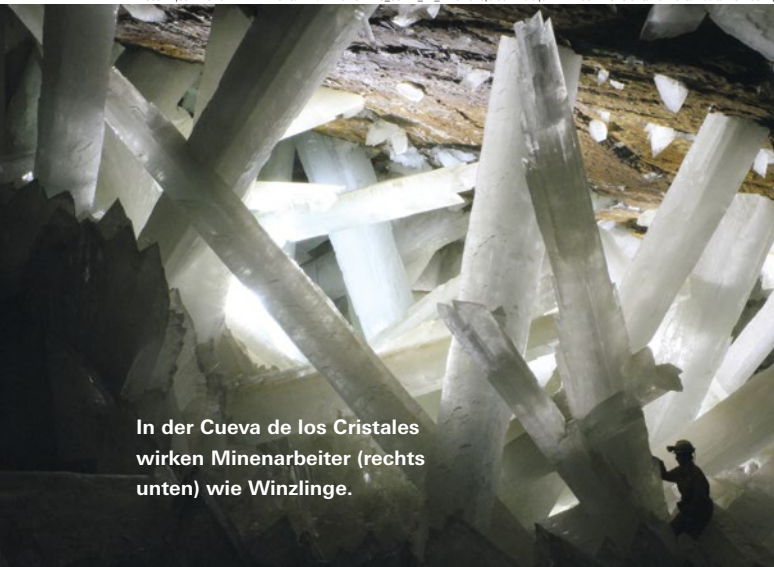
Die weltberühmten Kristallhöhlen kamen durch Bergbauarbeiten ans Licht. Dabei legte das Bergwerk die Höhle trocken und erzeugte ein spezielles Mikroklima mit hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Montero-Cabrera und ihr Team wollten wissen, wie sich die Oberfläche von Kristallproben aus den Höhlen unter verschiedenen Bedingungen verändert – darunter jene, die mutmaßlich derzeit dort herrschen. Frühere Studien hatten bereits Hinweise darauf geliefert, dass sich die Kristalle langsam auflösen. Die Wissenschaftler unter-

suchten nun, wie sich für Bergwerke typische Gase wie Stickoxide, Methan und Kohlendioxid auf die empfindlichen Kristalle im Detail auswirken.

Dabei zeigten sich bereits nach zwölf Monaten teils erschreckende Veränderungen: Die Oberfläche der Proben wurde matt und schlierig. Da die Forscher vergleichsweise hochkonzentrierte Gase einsetzten und bei einer höheren Temperatur arbeiteten, sagen die Experimente nur bedingt etwas über tatsächliche Schäden an den Kristallen aus. Sie verdeutlichen aber die Gefahr, dass die Naturwunder binnen eines geologisch kurzen Zeitraums irreparabel zerstört werden könnten.

Cryst. Growth Des. 10.1021/acs.cgd.8b00583, 2018

ALEXANDER VAN DRIESSCHE (COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:CRISTALES_CUEVA_DE_NAICA.JPG) / CC BY 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/3.0/LEGALCODE)



In der Cueva de los Cristales wirken Minenarbeiter (rechts unten) wie Winzlinge.

ZYTOLOGIE

DOPPELSPINDELN IN BEFRUCHTETEN EIZELLEN

► Wissenschaftler könnten bisher ein falsches Verständnis vom Beginn neuen Lebens bei Säugertieren haben. Darauf deutet eine Studie eines Teams um Jan Ellenberg vom European Molecular Biology Laboratory in Heidelberg hin. Die Biologen konnten erstmals im Detail beobachten, wie in der befruchteten Eizelle von Mäusen, der so genannten Zygote, weibliche und männliche Chro-

mosomen zusammenfinden – und erlebten dabei eine große Überraschung.

Bisher gingen Experten davon aus, dass die Zellkerne von Eizelle und Spermium noch vor der ersten Teilung der Zygote verschmelzen; dies gilt bisher als Startpunkt der Entwicklung eines neuen Individuums. Aber offenbar ist zumindest bei Mäusen das Timing ein anderes. Der Studie zufolge sammeln

sich die Chromosomen erst nach der ersten Zellteilung, ähnlich wie es auch bei Insekten der Fall ist. Zuvor ordnen sich die Erbgutträger von Mutter und Vater in benachbarten Spindeln an, die während der Teilung der Zygote getrennt bleiben und erst anschließend zusammenfinden.

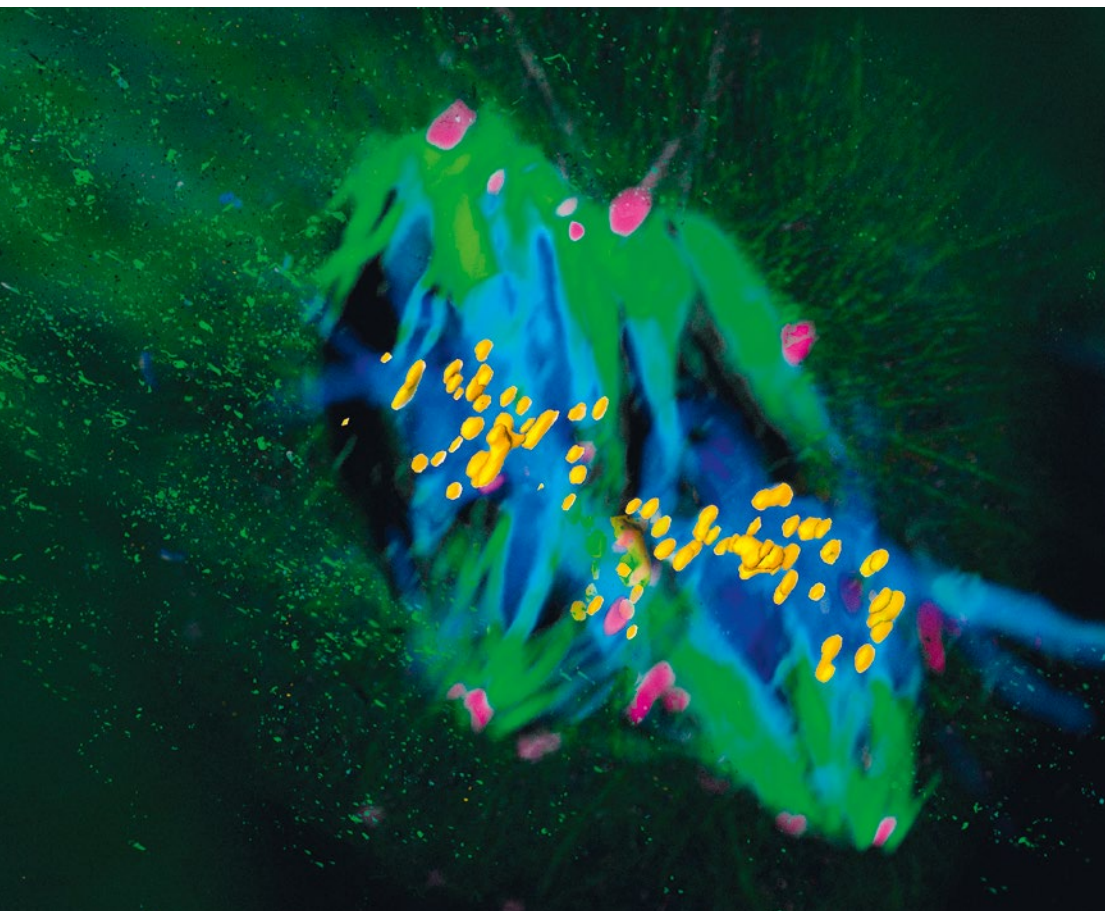
Die Heidelberger Biologen machten die genaue zeitliche Abfolge mit einer besonderen Technik sicht-

bar: Bei der so genannten Lichtblattmikroskopie beleuchtet man nur ausgewählte Teile der an und für sich sehr lichtempfindlichen Zygoten, und diese auch nur sehr kurz. Zuvor hatten die Wissenschaftler mütter- und väterliche Chromosomen mit verschiedenen fluoreszierenden Farbstoffen markiert. Dadurch ließen sich die frühen Entwicklungsstadien besser verfolgen als bisher.

Die anfängliche Trennung des Erbguts in einer Doppelspindel könnte erklären, wieso bei der Entwicklung von Säugetierembryonen relativ häufig Fehler auftreten, argumentiert die Forschergruppe. Ihre Beobachtung könnte sich sogar auf die Gesetzeslage auswirken: Sollte die Befruchtung von menschlichen Eizellen nach einem ähnlichen Schema ablaufen wie bei Mäusen, würde das den genauen Startpunkt des Lebens verschieben, was unter anderem die jetzigen Regeln der Fortpflanzungsmedizin in Frage stellen könnte. Nach dem deutschen Embryonenschutzgesetz gilt bereits »die befruchtete, entwicklungsfähige menschliche Eizelle vom Zeitpunkt der Kernverschmelzung an« als Embryo. Daher müssen bei einer künstlichen Befruchtung zu verpflanzende Embryonen noch vor der ersten Zellteilung ausgewählt werden, was aber die Wahrscheinlichkeit für riskante Mehrlingsschwangerschaften erhöht.

Science 361, S. 189–193, 2018

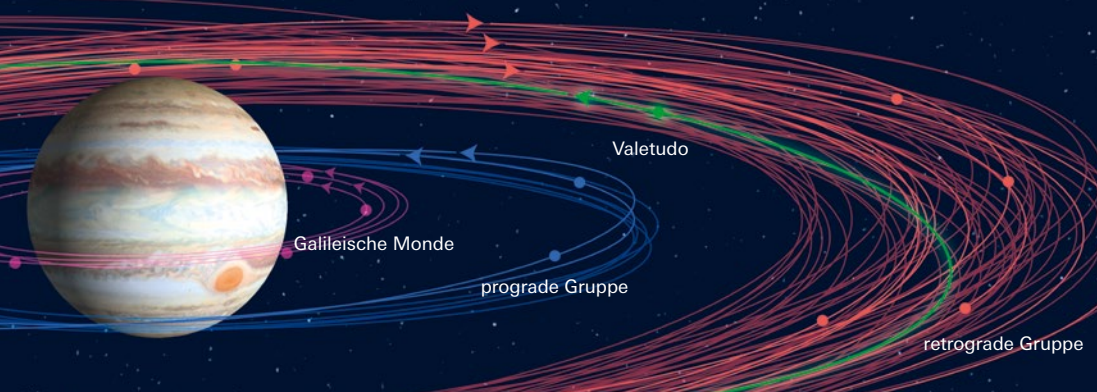
Die erstmals beobachteten Chromosomen-Doppelspindeln in befruchteten Mäuseeizellen bestehen aus feinen Fäden, den Mikrotubuli (grün), die von so genannten Zentrosomen (pink) aus organisiert werden. In der Mitte der Spindeln sammeln sich die DNA (blau) und die Kinetochoren (orange). Letztere sind Proteinstrukturen, an denen die Mikrotubuli die Chromosomen während der Zellteilung auseinanderziehen.



ILIJIA CARASTOVA, M. JULIUS HOSSAIN, JUDITH BECHMANN, JAN ELLENBERG / EMBL

ROBERTO MOLAR CANDANOSA, MIT FROL. GEN. DER CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE; DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Zu den 67 bekannten Jupitermonden kommen zwölf neue hinzu; ihre Bahnen sind in dieser Grafik fett hervorgehoben.



ASTRONOMIE NEUE JUPITERMONDE

Der König der Planeten hat noch mehr Monde als gedacht. Bisher kannten Astronomen 67 Trabanten, die Jupiter umkreisen. Nun hat ein Forscherteam um Scott S. Sheppard von der Carnegie Institution for Science in Washington D. C.

zwölf weitere aufgespürt. Die Neuzugänge sind zwischen einem und drei Kilometer groß und umrunden den Gasplaneten auf weiten elliptischen Bahnen. Damit ist Jupiter nun mit Abstand der Planet mit den meisten bekannten Satelliten, vor Saturn mit 62 Trabanten.

Die Wissenschaftler stießen per Zufall auf die bisher unbekanntesten Himmelskörper: Eigentlich

suchten sie im Frühling 2017 nach dem ominösen Planet X (siehe **Spektrum** Oktober 2016, S. 52), der am äußeren Rand des Sonnensystems seine Bahnen ziehen könnte. Zu dieser Zeit befand sich jedoch auch Jupiter in der Nähe des Sichtfelds eines Teleskops des Cerro Tololo Inter-American Observatory in Chile. Nach der ersten Sichtung der Objekte

berechneten die Forscher deren mutmaßliche Bahnen und konnten diese im Lauf des darauf folgenden Jahrs mit anderen Teleskopen bestätigen. Zwei der Monde umkreisen Jupiter demnach in dessen Rotationsrichtung, also prograd, und benötigen etwas weniger als ein Jahr für eine Umrundung ihres Mutterplaneten.

Neun der Neuzugänge bewegen sich in größerem Abstand, vollenden alle zwei Jahre einen Umlauf und bewegen sich retrograd, entgegen Jupiters Drehsinn. Im Bereich dieser Gruppe treibt auch ein rund ein Kilometer großer Sonderling namens Valetudo durchs All, und zwar in entgegengesetzter Umlaufrichtung zu seinen direkten Nachbarn. Er könnte daher früher oder später mit anderen Trabanten kollidieren, vermuten die Forscher.

Pressemitteilung der Carnegie Institution, Juli 2018

ÖKOLOGIE RATTEN BEDROHEN KORALLENRIFFE

Nicht nur in der Landwirtschaft richten Ratten immer wieder große Schäden an. Offenbar können sie sogar für Korallenriffe gefährlich werden, haben nun Meeresökologen um Nicholas A. J. Graham von der Lancaster University herausgefunden. Das zeigt sich zumindest auf dem Chagos-Archipel, einer Gruppe von Atollen im Indischen Ozean, auf denen seit mehreren Jahrzehnten keine Menschen mehr leben. Auf einigen der Inseln haben Seefahrer in vergangenen Jahrhunderten Hausratten eingeschleppt, auf anderen nicht. Wo sich die Tiere ausbreiten konn-

ten, ist die Zahl der Vögel – unter anderem Tölpel, Fregattvögel, Sturmtaucher und Seeschwalben – massiv zurückgegangen. Das überrascht nicht, schließlich fressen die Ratten Vogeleier und Junge.

Damit entfällt auch der Kot, den die Vögel normalerweise auf den Inseln hinterlassen. Die Ausscheidungen spielen aber eine große Rolle im Ökosystem des Archipels: Sie enthalten wichtige Nährstoffe, welche die Vögel bei ihren Streifzügen übers Meer aufgenommen haben, unter anderem Stickstoff. Mit der Zeit wird das Material zurück ins Meer gespült und trägt dort zur Ernährung von Fischen bei.

Auf Inseln ohne Ratten war die Stickstoffkonzentration im Guano 250-mal so hoch wie auf Atollen

mit Nagern, ermittelten die Ökologen. Sie konnten auch zeigen, dass der Mangel an Nährstoffen Auswirkungen auf die Fischpopulation hat: Rund um Inseln mit Ratten hatten diese deutlich weniger Biomasse.

Um die Atolle tummeln sich unter anderem Papageifische. Gemeinsam mit anderen Pflanzenfressenden Arten sind sie essenziell für die Gesundheit von Korallenriffen: Sie begrenzen das Pflanzenwachstum und schaffen somit Platz, an dem sich Korallen ausbreiten können. Gibt es weniger von ihnen, weil Ratten die Vogelpopulation auf einer Insel dezimiert haben, leiden darunter also auch die Ökosysteme im Wasser.

Nature 559, S. 250–253, 2018

NEUROWISSENSCHAFT

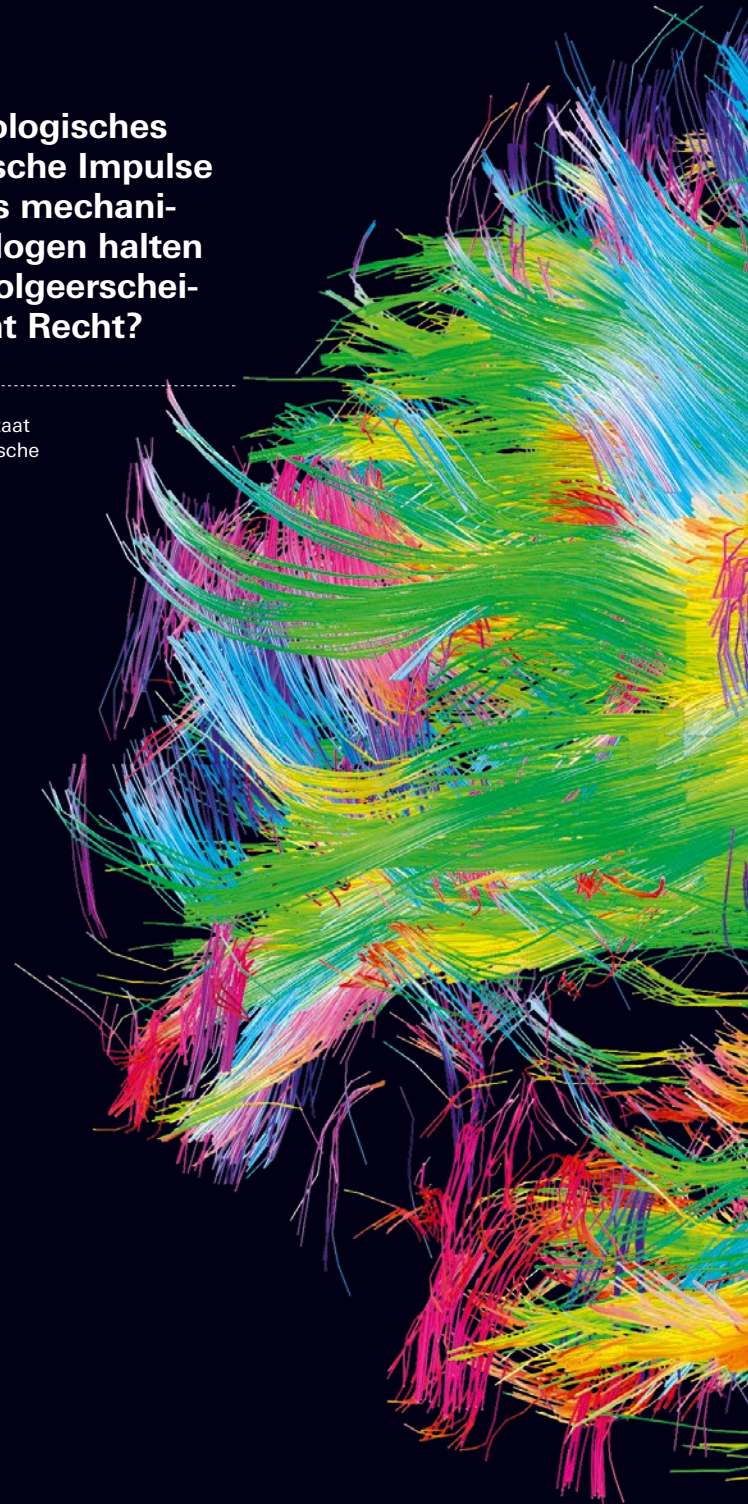
DAS MECHANISCHE GEHIRN

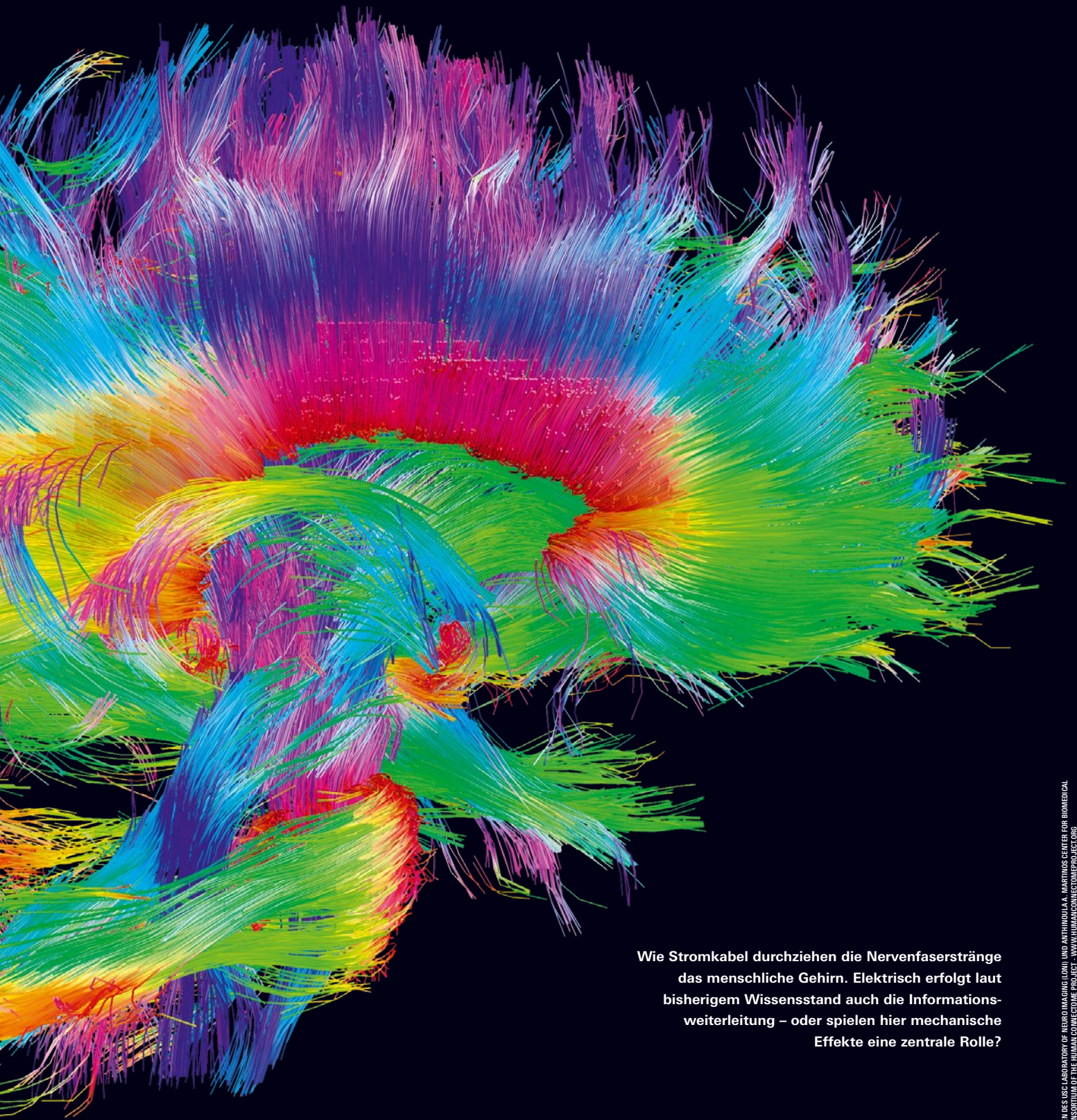
Ein Physiker schickt sich an, ein neurobiologisches Dogma zu erschüttern: Statt über elektrische Impulse sollen Nervenzellen Informationen mittels mechanischer Druckwellen übertragen. Neurobiologen halten seine Beobachtungen hingegen nur für Folgeerscheinungen der elektrischen Impulse. Wer hat Recht?



Douglas Fox ist Wissenschaftsjournalist im US-Bundesstaat Kalifornien und schreibt hauptsächlich über neurobiologische und ökologische Themen.

» spektrum.de/artikel/1580866





Wie Stromkabel durchziehen die Nervenfasernstränge das menschliche Gehirn. Elektrisch erfolgt laut bisherigem Wissensstand auch die Informationsweiterleitung – oder spielen hier mechanische Effekte eine zentrale Rolle?

► Eine junge Frau mit braunen Locken und rot lackierten Fingernägeln liegt in einem Untersuchungszimmer eines Kopenhagener Krankenhauses. Ihr ausgestreckter linker Arm ist mit Elektroden verkabelt. Alle paar Sekunden ertönt ein knackendes Geräusch: ein elektrischer Impuls. Dabei zucken jedes Mal ihre Finger. Hunderte solcher Stromschläge wird die Frau im Lauf des Tages noch erhalten.

Um die Probandin, die für ihre Mitwirkung 1000 dänische Kronen (etwa 135 Euro) bekommt, scharen sich mehrere Ärzte in weißen Kitteln. Thomas Heimburg, Physiker mit dem Schwerpunkt Biophysik, sitzt mit etwas Abstand auf einem Stuhl und hält auf seinem Tablet die Details des harschen Experiments fest, von dem er sich weit reichende Erkenntnisse erhofft.

Zu Beginn haben die Ärzte der Frau das Betäubungsmittel Lidocain in den Arm injiziert – so hoch dosiert, dass es für eine schmerzfreie Operation ausgereicht hätte. Anfangs reagieren die Nerven im Arm der Probandin daher auch nicht auf die elektrischen Reize. Dann jedoch erhöhen die Forscher die Stromstärke stufenweise auf das Zehnfache, bis zu 40 Milliampere; so viel fließt durch eine 5-Watt-Glühbirne.

Knack – ein weiterer Stromschlag. Die Hand der Frau windet sich. Heimburg schenkt ihr keine Beachtung; er blickt auf einen Computermonitor an der Wand. Eine Welle, die das elektrische Signal in Armmuskel und Nerv wiedergibt, zeigt einen großen Ausschlag – die zunehmende Stromstärke hat jetzt den Effekt des Betäubungsmittels überwunden. Der Nerv feuert nun genauso stark wie ohne Betäubung. Heimburg freut sich: »Was in den Lehrbüchern steht, ist hiermit nicht vereinbar.«

Heimburg arbeitet am Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen, das für seine physikalische Forschung berühmt ist. Er will nichts weniger als einige zentrale Lehrbuchinhalte widerlegen. Das Experiment, bei dem ich im Dezember 2011 zuschauen durfte, soll helfen, ein lange ungeklärtes medizinisches Rätsel zu lösen.

Schon seit 170 Jahren verwenden Ärzte Narkosemittel, um Operationen schmerzfrei durchführen zu können. Inzwischen sind Dutzende anästhetisch wirksamer Verbindungen bekannt, die alle bei steigender Dosierung die Funktionen des Nervensystems in gleicher Reihenfolge inaktivieren. Zuerst geht die Gedächtnisbildung verloren, dann die Schmerzempfindung, als Nächstes erlischt das Bewusstsein, und schließlich kann es zum Atemstillstand kommen. Diese Abfolge ist bei allen Tieren – von der Fliege bis zum Menschen – stets identisch.

Trotz millionenfacher Anwendung ist aber immer noch unklar, auf welche Weise Anästhetika eigentlich wirken. Die Substanzen wie Lachgas, Äther, Sevofluran oder Xenon unterscheiden sich molekular so deutlich, dass es unwahrscheinlich klingt, ihr Effekt beruhe nur auf der Bindung an entsprechende Zellproteine, wie das viele andere Medikamente tun.

Sind die elektrischen Impulse nur Nebeneffekte einer mechanischen Druckwelle?

Heimburg glaubt vielmehr an einen ganz anderen Wirkmechanismus: die Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Nervenfasern. Seiner Hypothese zufolge dringen Anästhetika in die fettsäurehaltigen Lipidmembranen ein, welche die Neurone umhüllen. Die Membranen weichen auf und können keine Druckwellen mehr übertragen, ähnlich einer entspannten Gitarrensaite, die nicht schwingen kann.

Nach Heimburgs These wären die Nervenzellen im Gehirn und im übrigen Körper mechanische und nicht etwa elektrische Signalüberträger, wovon Wissenschaftler seit Jahrzehnten ausgehen. Heimburg hält die elektrischen Impulse nur für Nebeneffekte einer physikalischen Druckwelle, die den Nerv wie eine Schallwelle durchläuft.

Als ich Heimburgs Experiment beiwohnte, war ich kurz davor, ihn für verrückt zu erklären. Doch in den vergangenen sieben Jahren trugen er und seine Kollegen zahlreiche Belege für ihre Hypothese zusammen. Hochempfindliche Messungen zeigen, wie mechanische Wellen sich entlang einer Nervenzelle ausbreiten und wie sich dabei die Membranen rasch ausdehnen und wieder zusammenziehen. Und sie demonstrieren ebenfalls, wie Anästhetika diese Eigenschaften verändern.

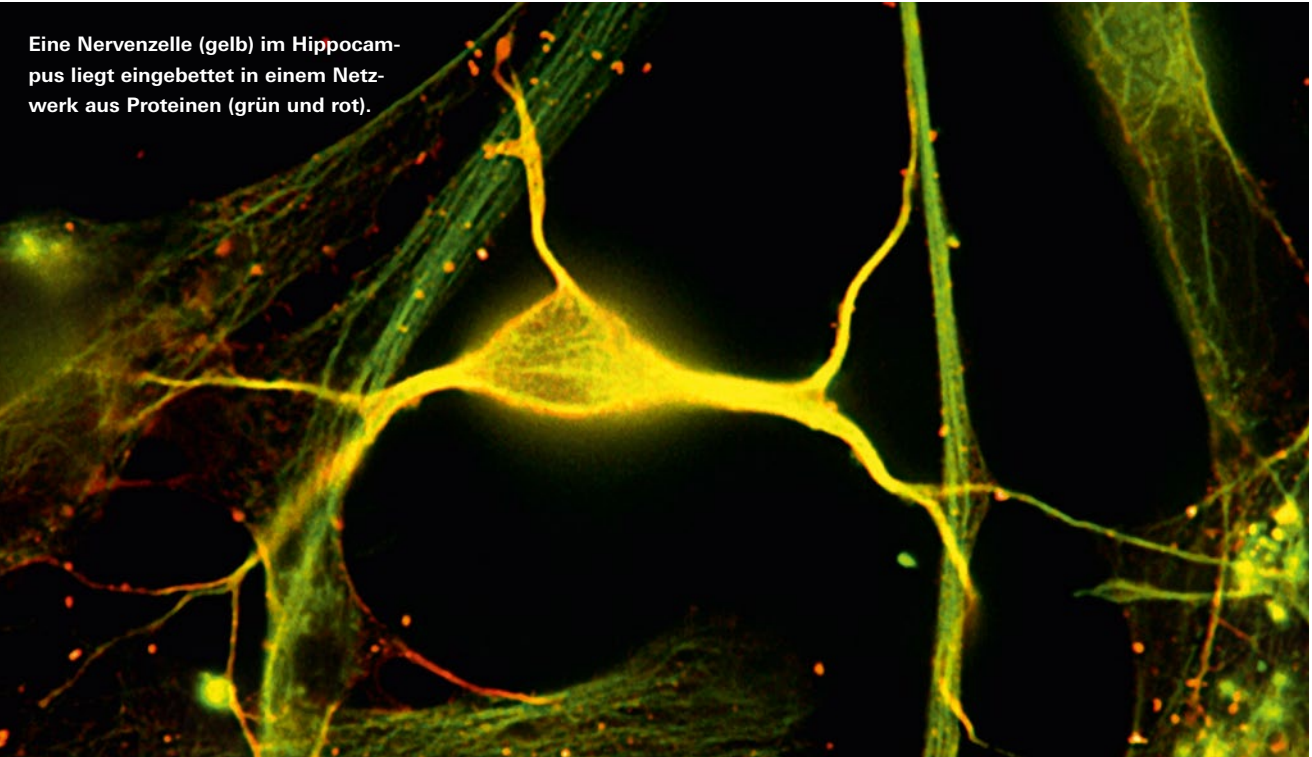
Aus Heimburgs Studien wird deutlich, dass die Signalweiterleitung in den Nervenzellfortsätzen, den Axonen, komplexer abläuft als allgemein angenommen. Sie könnten unser Verständnis von Nerven, Gehirn und Intelligenz grundlegend ändern. Mit seiner Theorie könnte Heimburg die Neurobiologie revolutionieren – oder er ist komplett auf dem Holzweg.

Die Axone der Nervenzellen sind dünner als ein Haar und ähneln feinen Röhren, die von einer lipidhaltigen Zellmembran umhüllt werden. Elektrisch geladene Natrium- und Kaliumionen schwimmen im Zellinneren wie auch außerhalb der Membranhülle umher. Mitte des 20. Jahrhunderts hatten Forscher gelernt, mit feinen Elektroden das Membranpotenzial, also die Spannungsdifferenz zwischen dem Inneren eines Neurons und seiner Umgebung zu messen. Sobald ein elektrischer Impuls die Ner-

AUF EINEN BLICK DRUCK STATT STROM

- 1** Der Physiker Thomas Heimburg postuliert, Nervenzellen feuern nicht elektrisch, sondern mechanisch. Die Signalübertragung erfolge durch Druckwellen, die entlang der Nervenzellmembran laufen.
- 2** Heimburg beruft sich auf vergessene, jahrzehntealte Experimente, die eine kurzfristige Dehnung der Nervenzellen während eines durchlaufenden Aktionspotenzials nachwiesen.
- 3** Viele Neurobiologen gestehen zwar zu, dass mechanische Wellen während der Nervenzellreizung auftreten könnten. Welche Rolle dies für die Signalübertragung spielt, ist aber noch offen.

Eine Nervenzelle (gelb) im Hippocampus liegt eingebettet in einem Netzwerk aus Proteinen (grün und rot).



ROBERT MICHELL BAYLOR COLLEGE OF MEDICINE / SCIENCE PHOTO LIBRARY

venzellmembran entlangläuft und die Elektrode passiert, schnell die Spannung für einige Tausendstelsekunden in die Höhe. 1952 beobachteten die britischen Wissenschaftler Alan Hodgkin (1914–1998) und Andrew Huxley (1917–2012), dass solche Spannungsspitzen, Aktionspotenziale genannt, dann auftreten, wenn Natriumionen von außen durch die Membran ins Zellinnere strömen. Daraufhin fließen im Gegenzug Kaliumionen heraus, und das Membranpotenzial kehrt zum Ruhezustand zurück. Dieses Hodgkin-Huxley-Modell begründete die moderne Neurophysiologie (siehe »Wie übertragen Nervenzellen Signale?«, S. 17).

Zusammen mit John Eccles erhielten die beiden Forscher hierfür 1963 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Doch immer wieder stießen Wissenschaftler auf Befunde, die das Modell in Frage stellten. Den Beobachtungen dieser Forscher geht Heimburg nach, obwohl einige von ihnen lange als irregeleitet missachtet wurden.

Einer von ihnen war der japanisch-amerikanische Biophysiker Ichiji Tasaki (1910–2009), der etliche Jahre in den USA an den National Institutes of Health (NIH) in Bethesda forschte. 1979 führte er ein ungewöhnliches Experiment durch. Unter dem Mikroskop setzte er vorsichtig ein kleines Platinpättchen auf ein freigelegtes Nervenfaserbündel einer Krabbe und bestrahlte es mit einem Laser. Über das reflektierte Laserlicht konnte er messen, ob sich das Nervenbündel weitete oder verengte, wenn ein elektrischer Impuls hindurchlief. Zusammen mit seinem Postdoc Kunihiko Iwasa führte er hunderte solcher Messungen durch. Nach einer Woche war klar: Jedes Mal, wenn ein Impuls die Nervenfasern passierte, erweiterten sie sich kurz, um sich dann binnen weniger Tausendstelsekunden wieder zusammenzuziehen.

Die mechanische Welle war winzig. Die Membranoberfläche hob sich nur um etwa sieben Milliardstel Meter (sieben Nanometer). Doch der Effekt stimmte zeitlich exakt mit dem durchlaufenden elektrischen Impuls überein. Für Tasaki bestätigte dies seinen lang gehegten Verdacht: Hodgkin und Huxley lagen falsch.

Bereits in den 1940er Jahren war es Forschern aufgefallen, dass sich eine zuvor durchsichtige Nervenfasern kurzzeitig milchig eintrübt, sobald ein elektrischer Impuls sie durchläuft. 1968 hatten Tasaki und ein anderes Forscherteam Hinweise gefunden, wonach sich Moleküle in der Zellmembran neu ausrichten, wenn das Aktionspotenzial eintrifft, um nach dessen Passage in die ursprüngliche Anordnung zurückzukehren.

Hinzu kam die Wärmeentwicklung. Ein elektrischer Membranimpuls müsste auch Wärme freisetzen, was gemeinhin passiert, wenn Strom fließt. Gleich mehrere Arbeitsgruppen bemerkten etwas Auffälliges: Die Temperatur der untersuchten Nervenfasern stieg zwar kurzzeitig um einige Millionstel Grad an, wenn der Stromimpuls eintraf. Sie fiel allerdings ebenso rasch wieder ab, nachdem die Spannungsspitze durchgelaufen war. Die Wärme war dabei nicht etwa in die Umgebung abgeflossen, sondern die Nervenfasern hatten sie binnen weniger Tausendstelsekunden zum größten Teil wieder aufgenommen.

Tasaki zog aus der vorübergehenden Aufweitung der Nervenfasern, der Umlagerung der Moleküle in der Membran sowie der Temperaturschwankung einen verblüffenden Schluss: Das Nervensignal war nicht allein ein elektrischer Impuls, sondern mindestens genauso sehr ein mechanischer. Wissenschaftlern, die Nervenzellen nur mittels Elektroden beobachteten, entginge demnach ein wesentlicher Teil der tatsächlichen Vorgänge.

Den Rest seines Lebens verbrachte Tasaki damit, diese Effekte näher zu untersuchen. Er folgerte, dass sie nicht von der Zellmembran selbst ausgehen, sondern von den Proteinschichten und Kohlenhydratfasern direkt darunter. Seine These: Sobald der Impuls eintrifft, absorbieren die Fasern Kaliumionen und Wasser, wodurch sie anschwellen und sich erwärmen. Wenn der Impuls weitergelaufen ist, kehrt sich der Vorgang rasch um.

Indem Tasaki diese Ideen weiterverfolgte, entfernte er sich immer mehr von den Vorstellungen seiner Kollegen. Hinzu kamen andere Faktoren, die ihm die Anerkennung erschwerten. Aufgewachsen in Japan sprach er ein recht ungelinktes Englisch. »Man brauchte schon ein gewisses Vorwissen, um ein wirklich gehaltvolles Gespräch mit ihm zu führen«, erzählt der Neurowissenschaftler Peter Basser von den NIH, der Tasaki mehr als 20 Jahre kannte. »Ich glaube, viele Leute hielten ihn nicht für so tiefgründig und scharfsinnig, wie er es tatsächlich war.« Und obwohl Tasaki Gastwissenschaftler betreute, gelang es ihm nicht, Studenten zu gewinnen, die seine Forschungsansätze weiter vorantrieben.

Sinnbildlich für die Spaltung des Forschungsgebiets stand die zunehmende ideologische Rivalität zwischen Tasaki und Kenneth Cole (1900–1984), einem prominenten Neurowissenschaftler der NIH, der die gemeinhin akzeptierten Lehrmeinung zur Neuronenfunktion verteidigte. Obwohl beide Männer von den 1950er bis in die 1970er Jahre im selben Laborgebäude arbeiteten, redeten sie 15 Jahre lang kaum miteinander – außer bei öffentlichen

»Viele Leute hielten Ichiji Tasaki nicht für so tiefgründig und scharfsinnig, wie er es tatsächlich war«

Peter Basser, National Institutes of Health, Bethesda

Vorträgen, wenn einer den anderen mit kritischen Fragen provozierte.

1997 gab Tasaki sein altes Labor auf und zog in kleinere Räume. Dort forschte er noch bis über sein 90. Lebensjahr hinaus weiter sieben Tage in der Woche. Ende Dezember 2008 stürzte er bei einem Spaziergang in der Nähe seines Hauses und verletzte sich am Kopf. Eine Woche später starb er im Alter von 98 Jahren.

Inzwischen waren Tasakis Forschungsarbeiten aus dem Fokus des Interesses verschwunden. »Ich glaube nicht, dass irgendjemand die Existenz dieser Phänomene anzweifelte, schließlich war er im Labor durchaus angesehen«, erzählt der Biophysiker Adrian Parsegian von der University of Massachusetts in Amherst, der von 1967 bis 2009 an den NIH arbeitete. Eher galten Tasakis Beobachtungen als nebensächliche Randeffekte des elektrischen Impulses während der neuronalen Signalübertragung. Die zu Grunde liegenden wissenschaftlichen Fragen blieben unbeantwortet, sagt Parsegian. »Die eine Auffassung kam in die Lehrbücher, die andere nicht.«

Thomas Heimburg stolperte Mitte der 1980er Jahre über Tasakis Veröffentlichungen, als er am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen promovierte. Stundenlang verschwand er in der Bibliothek, wo er über den alten Arbeiten brütete. Schließlich interpretierte er die Gesamtheit der verfügbaren Beobachtungen anders als Tasaki. Er vermutete, dass die an den Nervenfasern beobachteten nichtelektrischen Phänomene wie mechanische Druckwelle, optische Veränderungen und Wärmeentwicklung in den lipidhaltigen Zellmembranen selbst ablaufen statt in den darunterliegenden Proteinmolekülen und Kohlenhydratfasern.

In den späten 1990er Jahren experimentierte Heimburg mit künstlichen Zellmembranen, um herauszufinden, wie diese auf mechanische Druckwellen reagieren. Aus dieser Arbeit entsprang eine wesentliche Erkenntnis: Die Lipidmoleküle der Membranen befinden sich normalerweise in flüssigem Zustand, sind also zufällig angeordnet. Dabei stehen sie jedoch physikochemisch stets kurz vor einem so genannten Phasenübergang. Wird die Membran nur leicht komprimiert, verdichten sich die Lipide zu einem hochgradig gerichteten Flüssigkristall.

Wie gefrierendes Wasser setzt der Phasenübergang der Lipidmoleküle Wärmeenergie frei

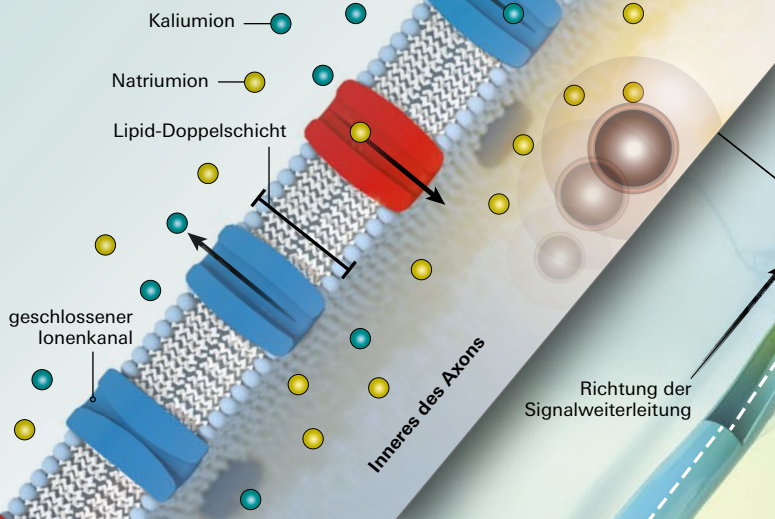
Heimburg schloss daraus: Die neuronale Signalweiterleitung müsse auf einer mechanischen Druckwelle entlang der Nervenzellmembran beruhen. Während ihrer Ausbreitung komprimiere sie die Lipidmoleküle und überführe sie in die Flüssigkristallphase. Dieser Phasenübergang setze eine geringe Menge Wärmeenergie frei, genau wie gefrierendes Wasser. Einige Tausendstelsekunden später – wenn die Druckwelle vorüber ist – kehre die Membran in ihren fluiden Zustand zurück und absorbiere dabei die zuvor freigesetzte Wärmeenergie. Dieser rasche Übergang in den Flüssigkristallzustand dehne die Membran kurzfristig aus – genau wie Tasaki und Iwasa es beobachtet hatten, als sie mit ihrem Laser auf das Platinplättchen zielten.

Heimburgs Experimente gingen noch einen Schritt weiter. Sie zeigten, wie die Druckwelle und der Phasenübergang mit der Spannungsspitze zusammenhängen könnten, die bei der Signalübertragung auftritt. Wie er beobachtete, geht die Membran bereits durch das Anlegen einer elektrischen Spannung in den Flüssigkristallzustand über. »Seit über 70 Jahren messen Elektrophysiologen in Membranen elektrische Spannung, ohne auf die Flüssigkristallstruktur zu achten«, meint er.

Lehrbuchabbildungen zeigen Zellmembranen als dünne, passive Isolierschicht, die eine röhrenartige Nervenzelle umgibt. Doch wie Physiker jetzt aufdecken, verfügen Biomembranen über bisher kaum beachtete Eigenschaften. Sie gehören zu den so genannten piezoelektrischen Materialien, die mechanische Energie in elektrische umwandeln können und umgekehrt. Auf diesem Prinzip beruhen beispielsweise Quarzuhren. Wenn also ein elektrischer Impuls eine Membran entlangwandert, bewegt sich eine mechanische Welle mit. Umgekehrt wiederum verursacht die Druckwelle während ihrer Ausbreitung ein elektrisches Signal.

Das klassische Modell: Elektrischer Impuls

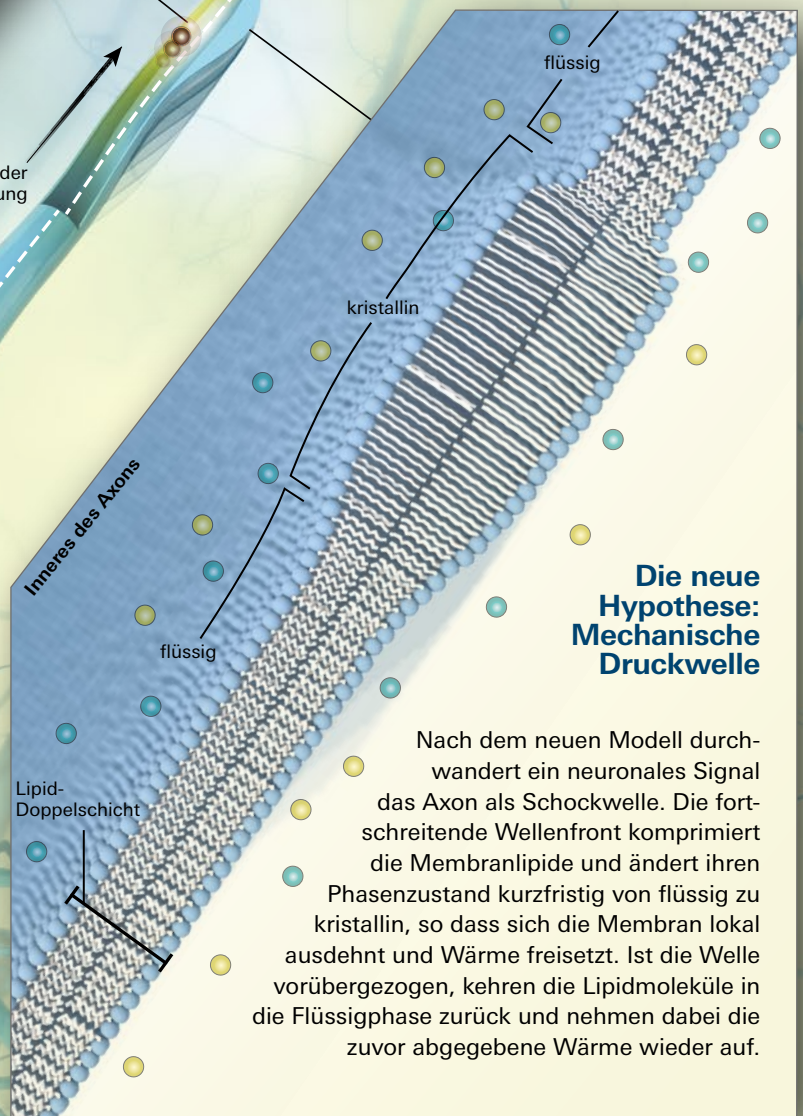
Der konventionellen Vorstellung zufolge pflanzt sich ein Nervensignal als bewegliche Spannungsspitze entlang der Axonmembran fort. In der aus einer doppelten Lipidschicht bestehenden Membran liegen Ionenkanäle, die sich bei einer Spannungsänderung kurzzeitig öffnen und lokal elektrisch geladene Teilchen durchlassen: Natriumionen fließen in die Zelle hinein, kurz darauf strömen Kaliumionen heraus. Diese Ionenströme schieben sich als Front entlang des Axons voran, und es entsteht ein rasch wandernder elektrischer Impuls.



Wie übertragen Nervenzellen Signale?

Jahrzehntelang hatten die Wissenschaftler eine klare Vorstellung davon, wie Nervenzellen (Neurone) im Gehirn und im übrigen Körper Informationen übertragen: Demnach läuft jedes Signal als elektrischer Impuls entlang der lang gestreckten Nervenfasern, des Axons, um an dessen Ende auf die nächste Nervenzelle übermitteln zu werden.

Nun postuliert eine Gruppe von Physikern, dass es sich dabei in Wirklichkeit um einen mechanischen Impuls handelt. Dieser durchläuft das Axon, ähnlich einer akustischen oder seismischen Welle. Andere Forscher vertreten jedoch die Auffassung, die mechanische Druckwelle sei lediglich eine Folge des elektrischen Impulses.



Die neue Hypothese: Mechanische Druckwelle

Nach dem neuen Modell durchwandert ein neuronales Signal das Axon als Schockwelle. Die fortschreitende Wellenfront komprimiert die Membranlipide und ändert ihren Phasenstatus kurzfristig von flüssig zu kristallin, so dass sich die Membran lokal ausdehnt und Wärme freisetzt. Ist die Welle vorbeigezogen, kehren die Lipidmoleküle in die Flüssigphase zurück und nehmen dabei die zuvor abgegebene Wärme wieder auf.

Bis zu dem Zeitpunkt, als Heimburg und sein Kollege Andrew Jackson 2005 erstmalig ihre Hypothese veröffentlichten, hatten sie noch keine solche elektromechanische Signalwelle in Aktion beobachten können. Ein ehemaliger Student Heimburgs füllte diese Lücke: Der Biophysiker Matthias Schneider, der inzwischen an der Technischen Universität Dortmund forscht, und seine Kollegen berichteten 2009, sie hätten mit einer elektrischen Spannungsspitze eine mechanische Druckwelle an einer künstlichen Membran auslösen können. Die Stärke der Druckwelle ähnelte der in einer Nervenzelle und breitete sich mit ungefähr 50 Meter pro Sekunde aus, was in etwa der Geschwindigkeit entspricht, mit der ein Schmerzreiz vom Fuß zum Rückenmark jagt. 2012 bestätigte Schneiders Arbeitsgruppe, dass Druck- und Spannungswelle simultan über die Membran wandern.

2014 machte Schneider seine wichtigste Entdeckung. Ein Hauptmerkmal der neuronalen Signalübertragung stellt das »Alles-oder-nichts-Prinzip« dar. Ist die Intensität eines am Neuron ankommenden Signals zu schwach, reagiert es nicht. Erst wenn der Impuls stark genug ist, feuert die Zelle. »Es gibt eine Schwelle«, erläutert Schneider. Wie er herausfand, folgten die elektromechanischen Wellen an seinen künstlichen Membranen ebenfalls dieser Gesetzmäßigkeit. Entscheidend war offenbar, ob die Druckschwankung hoch genug war, um den Übergang in die Flüssigkristallphase auszulösen. »Nur dann kommt es zum Nervenimpuls«, erklärt er.

Aber wie war Heimburg überhaupt auf seine Vorstellung zur Funktion von Nerven gekommen? Um das herauszufinden, besuchte ich ihn 2011 in seinem Büro im Niels-Bohr-Institut, wo ich sein Neurostimulationsexperiment beobachten konnte.

Heimburgs Bücherregale sind die eines Physikers, nicht eines Biologen – vollgestopft mit Werken bereits ver-

gängen. Diese Erkenntnisse bilden die Basis von Heimburgs Theorie zur Funktionsweise der Nerven – der Idee eines Physikers, der sich in ein anderes Fachgebiet vorwagt. »Die Thermodynamik ist die tiefendendste Wissenschaft«, sagt er. »Wer sie beherrscht, ist weise.«

Beruhet die betäubende Wirkung von Anästhetika allein auf der Bindung an Ionenkanäle?

Schnell stieß er auf Schwachstellen der allgemein akzeptierten Erklärungsmodelle zur Wirkweise von Betäubungsmitteln. Biologen vermuten, Anästhetika schalteten Neurone aus, indem sie sich an Ionenkanäle binden und diese blockieren. Solche Kanäle fungieren als kleine Ventile in der Nervenzellmembran, die sich öffnen können, um Natrium- oder Kaliumionen hindurchströmen zu lassen. Der biologischen Erklärung zufolge treiben Ionenströme die elektrischen Signale entlang der Nervenfaser voran. Da die verschiedenen Anästhetika jedoch sehr unterschiedliche Molekülstrukturen aufweisen, kann Heimburg nicht glauben, dass sie alle an Ionenkanäle binden. Die Erklärung sei »komplett lächerlich«, empört er sich, als müsse er auf etwas so Offensichtliches eigentlich nicht extra hinweisen. Etwas »Grundlegenderes« müsse hier am Werk sein.

Heimburgs Ideen wurden unter anderem durch die Lektüre eines alten Buchs mit dem Titel »Studien über die Narkose« geprägt, das 1901 der englische Biologe Ernest Overton (1865–1933) auf Deutsch veröffentlicht hatte. Ein darin geschildertes Experiment weckte Heimburgs Interesse: Overton hatte Dutzende verschiedene Anästhetika in Fläschchen mit Wasser und einer darauf schwimmenden Olivenölschicht gegeben, jedes geschüttelt und dann gewartet, bis sich Wasser und Öl wieder trennten. Danach bestimmte er, welcher Anteil des jeweiligen Anästhetikums sich in der Ölphase sowie im Wasser gelöst hatte. Je stärker ein Betäubungsmittel im Tierexperiment wirkte, desto mehr der Substanz fand sich in der Ölphase wieder – ein eindrucksvolles Ergebnis, das sich später auch bei heutigen Anästhetika bestätigte. Olivenöl und Zellmembranen bestehen aus ähnlichen Lipidmolekülen. Heimburg vermutet daher, die Medikamentenwirkung beruhe darauf, dass sich die Wirkstoffe in die Zellmembran einlagern und deren physikalische Eigenschaften verändern.

Experimente mit künstlichen Membranen stützten diese These: Behandelte Heimburg eine Membran mit einem Anästhetikum, konnte sie nicht mehr in die Flüssigkristallphase übergehen, denn die Mittel senken die Temperatur und erhöhen den Druck, bei der Lipide vom flüssigen in den kristallinen Zustand übergehen – ähnlich wie Salz oder Zucker den Gefrierpunkt von Wasser erniedrigen.

Heimburg stellte die Hypothese auf, der mechanische Impuls könne ohne den Phasenübergang der Membran nicht entlang der Nervenfaser wandern, was die Blockade Wirkung von Betäubungsmitteln erkläre. Und diese Hemmung müsse auch wieder überwindbar sein. Um den für den Phasenübergang der Membran unter Anästhetika benötigten höheren Druck zu erzeugen, sollte es genügen, die Stromstärke des auslösenden elektrischen Reizes zu erhöhen. Genau dies taten die Ärzte im Kopenhagener Krankenhaus, als sie die Armnerven der Versuchsperson



FOTOLIA / GIORDANO AITA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

storbener deutscher Physiker. Darunter befindet sich eine Reihe gebundener Ausgaben von Hermann von Helmholtz (1821–1894), der Mitte des 19. Jahrhunderts den Energieerhaltungssatz formulierte. Nach diesem zentralen Gesetz der Thermodynamik kann Energie ihre Form verändern, jedoch weder aus dem Nichts entstehen noch vernichtet werden. Interessanterweise hatte Helmholtz auch die Nervenleitgeschwindigkeit gemessen. »Ich halte es für unumgänglich, diese historischen Werke zu lesen«, betont Heimburg. Sie dokumentieren die schrittweise Entdeckung grundlegender Zusammenhänge zwischen Energie, Temperatur, Druck, elektrischer Spannung und Phasenüber-

elektrisch stimulierten. Tatsächlich überwandern stärkere Stromstöße die Hemmwirkung des Anästhetikums, was unwahrscheinlich wäre, wenn die Substanz ausschließlich an Ionenkanälen ansetzt. Und wenn sich die Effekte von Betäubungsmitteln mit höherer elektrischer Signalintensität kompensieren lassen, dann sollte dies ebenfalls mit höherem mechanischem Druck gelingen.

Genau das hatten Biologen bereits 1942 gezeigt. Sie narkotisierten Kaulquappen mit Ethanol und Urethan, bis diese aufhörten zu schwimmen. Dann setzten sie die Tiere in einer Überdruckkammer dem 136-Fachen des normalen Luftdrucks aus. Die Wirkung der Betäubungsmittel schwand; die Kaulquappen bewegten sich wieder. Bei Druckminderung setzte die Wirkung der Narkotika erneut ein. »Das ist doch wirklich erstaunlich«, schmunzelt Heimburg. »Wie kamen sie nur auf die Idee, betrunken Kaulquappen in eine Druckkammer zu setzen?«

»Wie kam man nur auf die Idee, betrunken Kaulquappen in eine Druckkammer zu setzen?«

Thomas Heimburg, Niels-Bohr-Institut, Kopenhagen

Nach wie vor ist Heimburg jedoch frustriert von der ablehnenden Reaktion der Biologen auf seine »Soliton-Theorie« (ein Soliton ist ein Wellenpaket, das sich ohne Veränderung der Form fortpflanzt). So trage laut der emeritierten Neurobiologin Catherine Morris vom Ottawa Hospital Research Institute Heimburgs gesamte Arbeit den Beigeschmack der Anmaßung eines Physikers, der glaube, er könne einfach in ein fremdes Fachgebiet eindringen und den Forschern dort die Köpfe zurechtrücken. Spöttisch bemerkt sie: »Der Ansatz ist typisch für Physiker, die ihre Arbeit ja in der Regel etwa so angehen: »Betrachten wir diese Kuh hier näherungsweise als Massenpunkt.«

Morris' Reaktion ist in gewissem Maß verständlich. Es ginge noch an zu postulieren, dass Neurone ihre Signale sowohl mittels mechanischer als auch elektrischer Mechanismen weiterleiten. Doch etwas ganz Anderes ist es, zu behaupten, Ionenkanäle spielten bei diesem Prozess gar keine Rolle, was Heimburg und Schneider tun und sich damit von dem gängigen neurobiologischen Konzept verabschieden. Sie lassen dabei völlig außer Acht, dass Wissenschaftler Hunderte von Ionenkanalproteinen entdeckt haben, dass sich Ionenströme gezielt mit Medikamenten modulieren lassen und dass mutierte Kanalproteine die Reizweiterleitung beeinflussen. »Sie ignorieren schlicht und einfach große Bereiche der neurobiologischen Forschung«, betont Morris, die 30 Jahre lang Ionenkanäle untersuchte.

Heimburg und Schneider gestehen zu, dass diese Proteine Funktionen haben müssen. Sie verweisen jedoch auf Experimente, nach denen Ionen künstliche Membranen auch ohne Kanalproteine durchströmen können. Sie schreiben diesen Ionenfluss transienten Öffnungen der

Membran zu, die bei Phasenübergängen auftreten. Nach ihrer Überzeugung geschehe das ebenfalls in den Nervenzellen von Gehirn und Rückenmark.

Hier spiegelt sich eine generelle Tendenz in der Physik wieder, wonach alle Prozesse thermodynamisch erklärbar sein sollten. Biologen hätten diesen Aspekt vernachlässigt und sich einseitig auf Proteine als Funktionsträger festgelegt. Eine solche Sichtweise könnte zur Ablehnung von Tasakis Theorie mit beigetragen haben. »Er mochte den Begriff »Ionenkanal« nicht«, erzählt sein ehemaliger Postdoc Iwasa. Als Querdenker habe Tasaki möglicherweise Dinge gesehen, die anderen verborgen blieben, vermutet Iwasa, »aber später dürfte ihm diese Haltung eher geschadet haben«.

Brian Salzberg stimmt dem zu. Der Neurophysiker von der University of Pennsylvania begann 1971 seine Karriere, wobei sich seine Wege gelegentlich mit denen von Tasaki kreuzten. »Er war ein sehr versierter Experimentator, und ich zweifle nicht daran, dass er tatsächliche Veränderungen der Nervenfaserdicke gemessen hat«, betont Salzberg. »Er interpretierte sie jedoch falsch.« Laut Salzberg schwellen Nervenfasern bei einem Spannungspuls kurzzeitig an, weil Wassermoleküle durch die Membran hinein- und dann wieder herausfließen. Dabei benutzen sie dieselben Ionenkanäle, die auch Natriumionen ein- und Kaliumionen ausströmen lassen. Hätte Tasaki das Konzept der Ionenkanäle akzeptiert, dann hätte er das Phänomen der Druckwelle möglicherweise anders gedeutet.

Die verfügbare Messtechnik bestimmt, was Forscher entdecken können

Vielleicht sorgte aber auch ein anderer Aspekt dafür, dass Tasakis Arbeit unbeachtet blieb. Dass die nichtelektrischen Phänomene ausgeblendet wurden, könnte zum Teil auf historischen Gründen beruhen.

Tasaki war ein talentierter Instrumentenbauer, der seine ersten wissenschaftlichen Sporen während des Zweiten Weltkriegs in Tokio verdiente. Angesichts eines eklatanten Mangels an technischer Ausrüstung suchte er sich die Komponenten für seine Messgeräte aus herumliegenden elektrischen Bauteilen zusammen. Jahre später nutzte er in den USA seine Fertigkeiten, um hochempfindliche Instrumente zu konstruieren, mit denen er die Wärmeentwicklung von Nervenzellen messen konnte.

Weder seine Gerätschaften noch seine speziellen Kenntnisse wurden von anderen Wissenschaftlern beachtet. Stattdessen konzentrierten sie sich auf die einfachere Messung von elektrischen Signalen: Die Forscher bauten feine Elektroden, die sich durch die Membran ins Zellinnere schieben lassen, um Spannungsänderungen zu erfassen. Mit der Verbreitung dieser Techniken von Labor zu Labor gewann die elektrophysiologische Theorie der Signalübertragung an Popularität. Die verfügbare Messtechnik bestimmte also, was die Forscher entdecken konnten – und damit auch, welche Ideen sich in der Wissenschaft durchsetzten. »Es handelt sich da um eine Art Wahrnehmungsverzerrung«, räumt Adrian Parsegian ein. »Der Blick auf die Realität hängt davon ab, welches Werkzeug die Forscher zu verstehen glauben und daher ver-

wenden. Instrumente, die sie nicht verstehen, benutzen sie erst gar nicht. Dies könnte so manche Schiefelage des wissenschaftlichen Denkens erklären.«

Heute spielen Unterschiede in der technischen Ausrüstung kaum noch eine Rolle. Heimbürg wiederholte ein altes Experiment nach dem anderen mit modernen Methoden, um all die überraschenden Phänomene näher zu untersuchen, die Tasaki und andere Jahrzehnte zuvor beobachtet hatten. 2014 ahmte seine Arbeitsgruppe das Experiment mit den betäubten Kaulquappen nach – allerdings mit synthetischen Membranen. Als der Druck auf 160 Bar anstieg, verschwand auch hier die Wirkung der Anästhetika, nur ließ sich jetzt der Effekt direkt auf den Phasenwechsel in der Membran zurückführen. Und 2016 gelang es mit einem modernen Mikroskop, die von Tasaki und Iwasa 1979 erstmals beobachtete mechanische Welle in einer einzelnen Nervenzelle hochpräzise zu vermessen.

Unbeeinflusst von festgefahrenen Diskussionen interessieren sich Außenseiter für Heimbürgs Idee

Der 58-jährige Heimbürg beantragte nun Forschungsmittel für sein vielleicht wichtigstes Experiment: die Messung der Wärmeabgabe während der Signalweiterleitung. Tasaki hatte die Wärmeabgabe ganzer Nervenfaserbündel gemessen, Heimbürg aber will den Wärmeimpuls an einer einzigen Nervenzelle mit einem Mikrochip erfassen. Dieses Experiment könnte eine zentrale Kritik an seiner Theorie ausräumen: Während des kurzen Phasenwechsels von flüssig zu kristallin sollte die Zellmembran mehr Wärme abstrahlen und wieder absorbieren, als Tasaki je beobachtet hatte. Wie Heimbürg vermutet, hätten die alten Experimente die Wärmemenge wegen der gleichzeitigen Vermessung zahlreicher Neurone systematisch unterschätzt, da sich die Wiederaufnahme der Wärmeenergie früherer Impulse mit der Wärmeabgabe späterer überlagert hätten. »Die wahre Signalstärke ist wahrscheinlich viel höher«, sagte er mir Ende 2017. Wenn seine Messergebnisse diese Vermutung bestätigen, würde das seine Hypothese stützen, dass die Neuronenmembran eine mechanische Welle fortleitet.

Inzwischen wenden sich auch andere Wissenschaftler diesen Fragen zu – meist Außenseiter, die von den alten, festgefahrenen Diskussionen noch unbeeinflusst sind. Nongjian Tao, Ingenieur für Biosensoren an der Arizona State University, nutzt wie Tasaki und Iwasa Laserstrahlen, um mechanische Impulse in einzelnen Neuronen zu verfolgen. Allerdings richtet Tao den Laser ohne Platinspiegel direkt auf die Zelle, was genauere Messungen ermöglicht. Mit dieser Technik möchte er die Aktivität mehrerer hundert einzelner Nervenzellen in neuronalen Netzwerken gleichzeitig erfassen. »Dass diese mechanischen Effekte existieren, steht ja außer Zweifel«, betont der britische Neurowissenschaftler Simon Laughlin von der University of Cambridge. »Der entscheidende Punkt ist vielmehr: Benutzt sie die Nervenzelle zur Signalgebung?«

Laughlin, der zwar selbst nicht an mechanischen Druckwellen in Neuronen forscht, sich aber 45 Jahre lang mit Ionenkanälen beschäftigt hat, kann sich durchaus vorstellen, dass sich die Druckwellen auf die Kanalproteine aus-

wirken. Neueren Experimenten zufolge reagieren Ionenkanäle außerordentlich empfindlich auf mechanische Kräfte in der Membran. Wenn die Druckwellen tatsächlich dazu beitragen, Kanäle zu öffnen und zu schließen, dürfte das unsere Vorstellung von der Funktionsweise des Gehirns grundlegend verändern, vermitteln doch feuernde Neurone sämtliche Denkprozesse.

Die Aktivität von Ionenkanälen ist notorisch rauschbehaftet und unvorhersehbar. Selbst kleinste thermische Fluktuationen können einen Kanal zufällig öffnen oder schließen. Seit Jahrzehnten versuchen Informationstheoretiker zu erklären, wie das Gehirn verlässlich denken kann, wenn Ionenkanäle so unzuverlässig funktionieren. Mechanische Wellen könnten dagegen ein gezielteres Öffnen und Schließen der Kanäle gewährleisten. »Möglich wäre das durchaus«, glaubt Laughlin.

Und es gibt tatsächlich Hinweise darauf, scheinen doch einige Neurone im Säugerhirn sich nicht an das Hodgkin-Huxley-Modell zu halten. Sobald sie hochfrequent feuern, öffnen sich ihre Ionenkanäle gruppenweise viel schneller als erwartet. Möglicherweise reagieren die Kanäle zu mehreren auf plötzliche Veränderungen in der Membran – etwa die Ankunft einer Druckwelle, die sie mehr oder weniger gleichzeitig öffnet und das Neuron rascher feuern lässt. Damit könnten die Nervenzellen Informationen blitzschnell verarbeiten, was die Voraussetzung für komplexe Denkprozesse liefert. Demnach besäße ein neuronales Aktionspotenzial einen elektrischen sowie einen mechanischen Anteil.

Heimbürg und Schneider befinden sich in ihrem Forschungszweig zurzeit in einer prekären Position. Vielleicht werden sie sich eines Tages den Nobelpreis teilen. Sie könnten aber auch in einer Sackgasse landen, eingesperrt von der gleichen Beharrlichkeit, die Tasaki über so viele Jahrzehnte im Griff hatte. Die Tatsache, dass sich andere Wissenschaftler wie Laughlin und Tao für die Theorie der mechanischen Signalausbreitung interessieren, eröffnet für die Physiker eine Chance, mit ihren Thesen akzeptiert zu werden. Als wir im Februar 2018 miteinander sprachen, beharrte Heimbürg jedoch auf seiner kategorischen Position: »Viele Leute versuchen, das Hodgkin-Huxley-Modell zu retten, indem sie es mit unserer Perspektive kombinieren. Ich persönlich bin aber keinesfalls bereit, Kompromisse zwischen den beiden Modellen zu akzeptieren.« ◀

QUELLEN

Gonzalez-Perez, A. et al.: Solitary Electromechanical Pulses in Lobster Neurons. In: *Biophysical Chemistry* 2016, S. 51–59, 2016

Græsbøll, K. et al.: The Thermodynamics of General and Local Anesthesia. In: *Biophysical Journal* 106, S. 2143–2156, 2014

Heimbürg, T., Jackson, A. D.: On Soliton Propagation in Biomembranes and Nerves. In: *PNAS* 102, S. 9790–9795, 2005

Shrivastava, S., Schneider, M. F.: Evidence for Two-Dimensional Solitary Sound Waves in a Lipid Controlled Interface and its Implications for Biological Signalling. In: *Journal of the Royal Society Interface* 11, 20140098, 2014

Wunderlich, B. et al.: Phase-State Dependent Current Fluctuations in Pure Lipid Membranes. In: *Biophysical Journal* 96, S. 4592–4597, 2009

Wenn ALLES weg ist: Was bleibt dann übrig?



P.M. Neugierig auf morgen.

ASTRONOMIE BLAZAR ALS QUELLE FÜR SUPERNEUTRINO

Erstmals haben Astrophysiker die Herkunft eines extrem energiereichen Neutrinos nachgewiesen. Es stammt von außerhalb der Milchstraße und hat das halbe Universum durchquert.

So könnte es sich zugetragen haben: Vor 3,78 Milliarden Jahren, in einer fernen, noch jungen Galaxie, stellt ein supermassereiches Schwarzes Loch seinen Appetit. Große Mengen von Wasserstoffgas verschwinden auf Nimmerwiedersehen hinter seinem Ereignishorizont. Doch einigen Teilchen gelingt die Flucht. Von starken Magnetfeldern beschleunigt, werden diese Wasserstoffatomkerne in zwei gegenläufig gerichteten Strahlen ins All katapultiert und können so der Anziehungskraft des Gravitationsmonsters entkommen.

Nach kurzer Zeit prallen einige der Teilchen mit anderen Atomkernen zusammen. Unter den Trümmern dieser Kollisionen befinden sich auch so genannte Myon-Neutrinos – ungeladene, extrem leichtgewichtige Teilchen, die sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Ohne von Magnetfeldern oder anderer Materie beeinflusst zu werden, fliegt eines von ihnen geradlinig in eine Richtung, die es in eine Spiralgalaxie namens Milchstraße bringen wird, genauer gesagt auf einen blauen Planeten in einem der Außenbezirke.

Lange deutet nichts darauf hin, dass dem Elementarteilchen dort etwas Aufregendes begegnen könnte. Neutrinos durchdringen dickste Wände, ja ganze Planeten, ohne eine Spur zu hinterlassen. Sie fliegen einfach immer weiter geradeaus. Doch wenige Jahre bevor das 3,78 Milliarden Jahre alte Neutrino auf der Erde ankommt, haben deren Bewohner eine ausgeklügelte Falle errichtet: einen Detektor namens IceCube (siehe **Spektrum** August 2007, S. 38). Er besteht aus mehr als 5000 hochempfindlichen Lichtsensoren, die über einen Kubikkilometer verteilt im ewigen Eis der südlichen Polarkappe versenkt wurden.

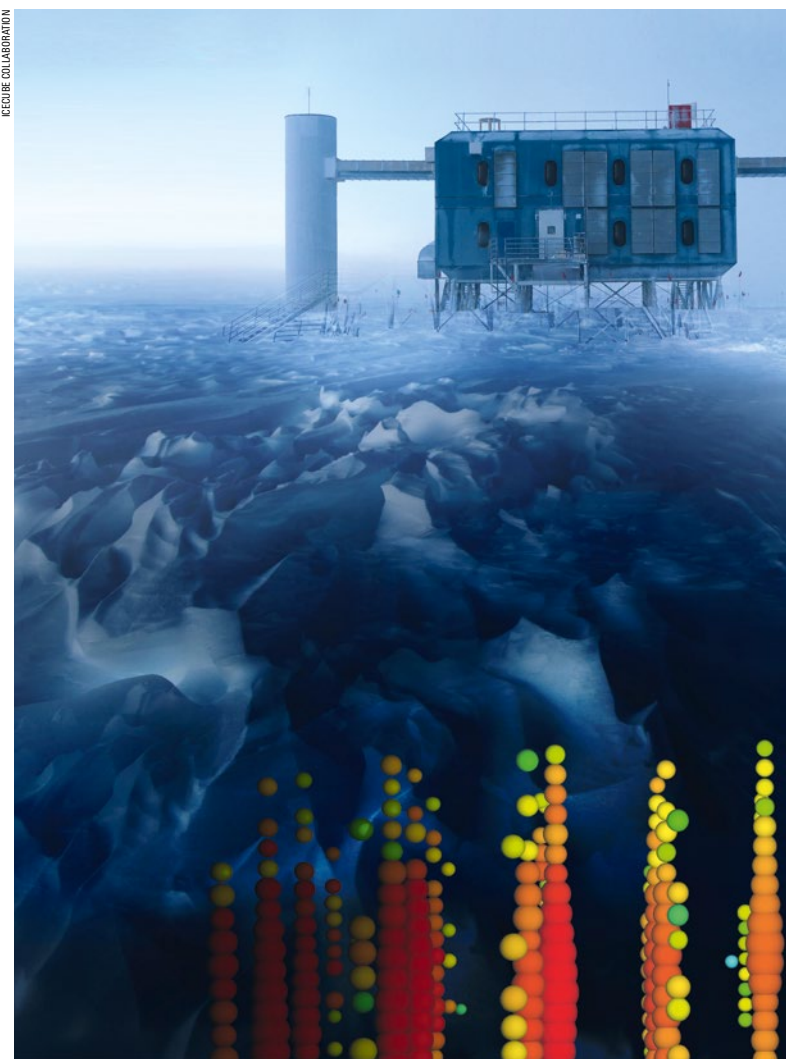
Als das Neutrino am 22. September 2017 um 22:54:30 Uhr mitteleuropäischer Zeit in das Eis über dem Südpol eindringt, geschieht etwas, was ihm seit seiner Abreise nicht passiert ist: Es rast in einen Atomkern und verwandelt sich dabei in ein so genanntes Myon-Elementarteilchen. Und wegen der in IceCube installierten Elektronik werden Menschen über dieses Ereignis sofort informiert. Anders als das Neutrino ist das Myon als schwerer Verwandter des Elektrons elektrisch geladen. Bei seinem Weg durch das Eis der Antarktis hat das Teilchen daher für kurze Zeit bläuliche Lichtpulse freigesetzt, so genannte Tscherenkow-Strahlung, die von den Sensoren im Eis aufgefangen wird.

Damit ist das Neutrino enttarnt. Es erhält den Namen IceCube-170922A – und wird wohl in die Wissenschaftsgeschichte eingehen. Denn bei ihm handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um das erste Neutrino

aus einer weit entfernten Galaxie, bei dem Wissenschaftler den Ursprungsort ausfindig machen konnten. Bisher war – abgesehen von der Sonne, die pro Sekunde unzählige der Teilchen ausspuckt – nur eine Neutrinoquelle im Weltall identifiziert worden: die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke, einer Satellitengalaxie der Milchstraße. Vor 31 Jahren traf ein ganzer Schwall Neutrinos aus der Explosion die irdischen Detektoren. Seither gelten Supernovae als eine wichtige Quelle für Neutrinos, allerdings nur bis zu einer bestimmten Teilchenenergie.

Völlig überraschend ist die nun verkündete Entdeckung des extragalaktischen Neutrinos, die Wissenschaftler rund

Das IceCube-Observatorium am Südpol detektiert Neutrinos aus dem Weltall. Dazu benutzt es Lichtsensoren (farbige Punkte) im Eis unterhalb der Messstation.



um den Globus als Sensation feiern, jedoch nicht: In den vergangenen Jahren haben die Forscher von IceCube immer wieder Hinweise darauf entdeckt, dass irgendwo im All Neutrinos auf gewaltige Energien beschleunigt werden. So registriert der Südpol-Detektor mehrere hundert Teilchen pro Jahr, die offenbar aus den Tiefen des Alls stammen.

Die meisten von ihnen sind wesentlich energiereicher als die Neutrinos aus der Sonne. Da ihre Herkunftsrichtungen über den gesamten Himmel verteilt sind, galt es als sehr wahrscheinlich, dass sie nicht aus der Scheibe der Milchstraße stammen, sondern von fernen Galaxien. Und dort bringen in erster Linie die turbulenten Umgebungen von Schwarzen Löchern im Kern der Galaxien die notwendigen Energien auf, um die Teilchen derart stark anzuschubsen.

Aber bislang war es nicht gelungen, eine neutrinoschleudernde Galaxie auch wirklich zu identifizieren. Mit »170922A« scheint dies nun zum ersten Mal geglückt zu sein. Nur 43 Sekunden nachdem IceCubes Echtzeit-Auswertesystem das Neutrino erkannt hatte, sendete es einen automatisierten Alarm an andere Observatorien auf der ganzen Welt. Vier Stunden später folgte eine detailliertere Information mit genauer Positionsangabe.

Zum Zeitpunkt des Alarms war klar: Sofern das Neutrino tatsächlich aus dem Umfeld eines Schwarzen Lochs stammt, sollte die davongeschleuderte Materie

auch energiereiche elektromagnetische Strahlung praktisch aller Wellenlängen ausgestoßen haben. Und dieses Licht müsste dann zu einer ähnlichen Zeit auf der Erde ankommen und mit geeigneten Teleskopen messbar sein.

Die aus den IceCube-Daten rekonstruierten Himmelskoordinaten deuteten auf einen Punkt im nördlichen Teil des Sternbilds Orion, von dem das Neutrino offenbar stammte. Tatsächlich liegt nur 0,1 Grad neben der Position eine seit Längerem bekannte Gammastrahlenquelle: der Blazar TXS 0506+056. Blazare sind eine Unterart der aktiven Galaxien – Galaxien also, deren zentrales Schwarzes Loch große Materiemengen verschlingt.

Immer wieder feuert das Schwarze Loch auch Gammastrahlung ins All

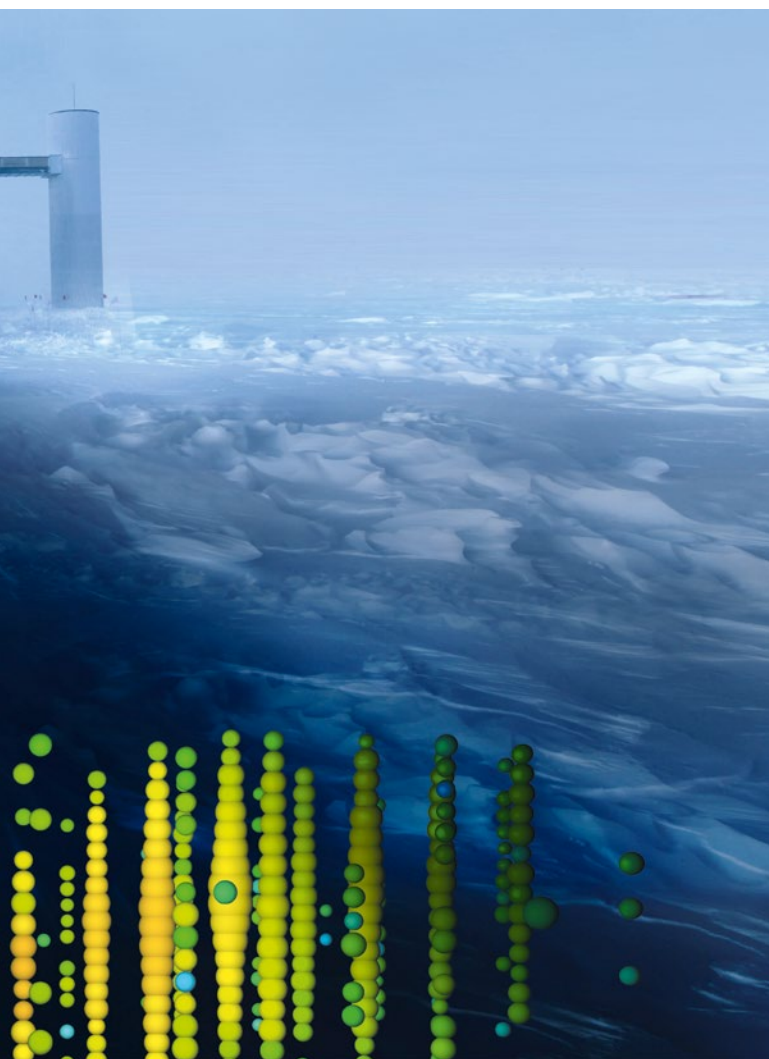
Bei einem Blazar ist zusätzlich einer der beiden Materiestrahlen, entlang denen sich die vom Schwarzen Loch fliehende Materie bewegt, direkt auf die Erde gerichtet. Die Partikelschleudern verraten sich daher oftmals durch minuten- oder auch jahrelange Ausbrüche, während derer sie große Mengen Gammastrahlung aussenden. Damit war ein Verdächtiger ausgemacht. Um ihn zu überführen, mussten die Astrophysiker nun nur noch einen solchen Gammastrahlenausbruch aufspüren, dessen Strahlung aus genau derselben Richtung kommt wie das IceCube-Neutrino.

Am 22. September 2017 reagierte als erstes Teleskop für Gammastrahlung der amerikanische Satellit Fermi auf den Alarm vom Südpol. Fermis Large Area Telescope (LAT) liefert seit 2008 alle drei Stunden ein Bild des gesamten Himmels im Gammalicht. Tatsächlich berichtete die Fermi-Kollaboration am 28. September, dass sich TXS 0506+056 seit April 2017 in einem Zustand erhöhter Aktivität befunden hatte.

Einige Tage später bestätigten auch die MAGIC-Teleskope auf der Kanareninsel La Palma, eines von drei großen, bodengestützten Gammaobservatorien, ein energiereiches Gammasignal von TXS 0506+056 – das erste Mal überhaupt von dieser Quelle. Es folgten weitere Nachbeobachtungen mit Röntgen-, Radio- und optischen Teleskopen. Schließlich gelang es Astronomen mit dem optischen Zehn-Meter-Teleskop GranTeCan, ebenfalls auf La Palma, die Entfernung des Blazars zu bestimmen: Sie entspricht der oben genannten Lichtlaufzeit von 3,78 Milliarden Jahren.

Alle diese Beobachtungen deuteten darauf hin, dass das Neutrino 170922A tatsächlich aus dem Blazar stammt. Nach dem 22. September registrierte IceCube allerdings kein weiteres Neutrino aus TXS 0506+056 mehr. Könnte es sich womöglich nur um einen Zufall gehandelt haben? Gibt es wirklich einen kausalen Zusammenhang zwischen der Gammastrahlung und dem Neutrino?

Zwar geben die Forscher die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Zufall mit weniger als 0,15 Prozent an, völlig auszuschließen ist er mit nur einem einzelnen Neutrino aber nicht. Es mussten also noch andere Indizien her.



ICECUBE KOLLABORATION

Deshalb haben sich die Wissenschaftler durch die im Lauf der vergangenen neuneinhalb Jahre gesammelten Daten ihres Detektors gearbeitet. Schließlich betrachtet IceCube anders als zum Beispiel optische Teleskope keine einzelnen Objekte, sondern registriert Neutrinos, die aus allen möglichen Richtungen auf die Nordhemisphäre der Erde treffen und damit einmal quer durch die Erdkugel geflogen sind. (Die Erde dient dem Detektor gewissermaßen als Filter, da sie Myonen abfängt, die bei Teilchenkollisionen in der Atmosphäre entstanden sind.)

Und siehe da: Bereits Ende 2015 fing das Observatorium aus der Richtung von TXS 0506+056 eine Reihe von Neutrinos auf. Damals registrierte IceCube über einen Zeitraum von mehreren Wochen rund ein Dutzend der Teilchen über dem zu erwartenden Detektorrauschen. Sie hatten zwar weniger Energie als 170922A mit seinen 290 Teraelektronvolt und fielen aus diesem Grund nicht gleich auf (zum Vergleich: Ein Protonenstrahl im »Large Hadron Collider« des CERN kreist mit sieben Teraelektronvolt). Eine solche Häufung an der Position eines bekannten Blazars ist aber ein weiterer, unabhängiger Beleg für die Hypothese, dass TXS 0506+056 tatsächlich eine Neutrinoquelle ist.

TXS 0506+056 gehört zu den 50 hellsten Quellen für Gammastrahlen am Himmel, und es gibt noch weit hellere und nähere Blazare. Warum sollte ausgerechnet dieser Blazar der erste sein, von dem IceCube ein energiereiches Neutrino empfing? Die Forscher erklären das mit der Position der Quelle am Himmel. Von IceCube am Südpol aus gesehen steht TXS 0506+056 flach unter dem Horizont. Das bedeutet, dass Neutrinos aus dieser Richtung eine weniger lange Strecke durch die Erdkugel zurücklegen müssen als die von weiter nördlich stehenden Objekten. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Neutrino

vor Erreichen des Detektors von der Erdmasse absorbiert wird, ist daher kleiner.

Mit 170922A beginnt ein neues Kapitel der Neutrino-forschung. Das Ereignis eignet sich geradezu als Paradebeispiel für die so genannte Multi-Messenger-Astronomie: Mit verschiedenen Instrumenten beobachten Wissenschaftler ein und dasselbe Phänomen am Himmel – und erlangen durch die Kombination der Messdaten tiefere Einblicke in die zu Grunde liegenden Mechanismen. Bestätigt sich der Befund, dass Blazare Neutrinos ins All feuern, dann sind die Astrophysiker außerdem in einem zentralen Rätsel ihrer Disziplin ein Stück weitergekommen: Seit Jahrzehnten gehen sie der Frage nach, welche Prozesse im Weltall Teilchen und Atomkerne auf so hohe Energien beschleunigen können, dass sie nach einer Milliarden Jahre währenden Reise noch gut nachweisbar sind.

Für Neutrinos könnte eine der Hauptquellen dieser kosmischen Strahlung nun identifiziert sein. Allerdings gehen Experten davon aus, dass Blazare nur für 30 bis 80 Prozent des gesamten kosmischen Neutrinoflusses verantwortlich sein können. Es muss also noch weitere Produktionsstätten der flüchtigen Teilchen geben. Für die ziemlich neue Berufssparte der Neutrinoastronomen wird die Arbeit also so schnell nicht ausgehen. ◀

Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

QUELLEN

The IceCube Collaboration et al.: Multimessenger Observations of a Flaring Blazar Coincident with High-Energy Neutrino IceCube-170922A. In: Science 361, eeat1378, 2018

The IceCube Collaboration et al.: Neutrino Emission from the Direction of the Blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A Alert. In: Science 361, S. 147–151, 2018

NEUROWISSENSCHAFT HUNGER KONTRA SCHMERZ

Eine bestimmte Gruppe von Hirnzellen reguliert, welche der beiden konkurrierenden Empfindungen Vorfahrt hat. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Art des Schmerzes.

► Zu den grundlegenden Bedürfnissen des Körpers gehören die regelmäßige Versorgung mit Nährstoffen sowie die Vermeidung von Gewebeschäden. Beide lassen sich aber kaum gleichzeitig befriedigen, da hierfür Verhaltensweisen notwendig sind, die sich in der Regel gegenseitig ausschließen. Wie entscheidet das Gehirn bei Hunger und Schmerz, was in einer bestimmten Situation am dringendsten ist?

Wie die Arbeitsgruppe von Nicholas Betley von der University of Pennsylvania in Philadelphia (USA) herausgefunden hat, hängt diese Priorisierung von der Art des Schmerzes ab: Hirnzellen, die das Hungergefühl vermitteln, unterdrücken chronische Beschwerden, wie sie etwa durch Entzündungen entstehen. Ein akuter Schmerz

dagegen – der eine unmittelbare Bedrohung signalisiert – dämpft die Aktivität dieser Neurone und stuft damit die Nahrungsaufnahme in der Dringlichkeit herab.

Das Team ließ Labormäuse 24 Stunden lang fasten und untersuchte dann ihr Schmerzverhalten. Dabei zeigte sich, dass die hungrigen Mäuse lang anhaltende Schmerzen, wie sie bei chronischen Krankheiten oder Wunden auftreten, offenbar weniger empfanden als eine Kontrollgruppe. Dagegen reagierten sie trotz Hunger gleich stark auf akute Schmerzen, ausgelöst durch Chemikalien, Hitze oder Gewalteinwirkung.

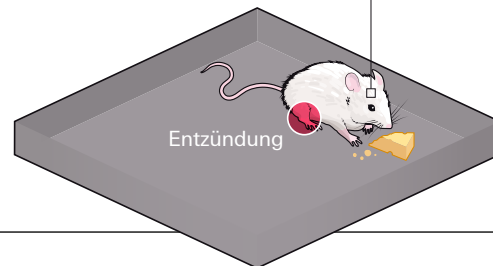
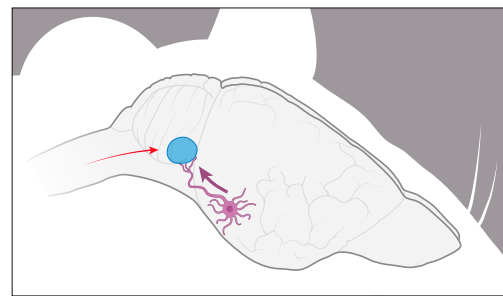
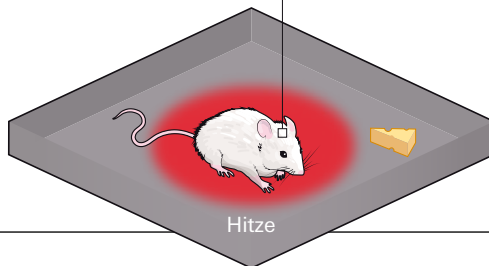
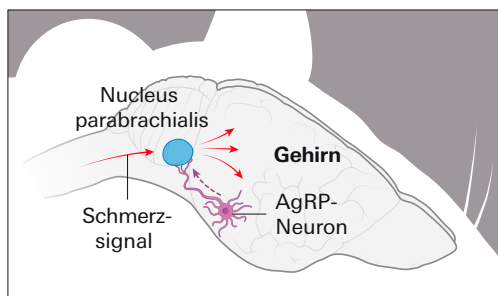
Die Ursache dafür verbirgt sich im Hypothalamus des Gehirns, der verschiedene neuronale Strukturen enthält, welche die Nahrungsaufnahme regulieren. Eine davon, der

Wie das Gehirn Prioritäten setzt

Nervenzellen, die den Neurotransmitter AgRP (Agouti-related protein) produzieren, regulieren die beiden konkurrierenden Empfindungen von Hunger und Schmerz im Mäusegehirn: Spürt das Versuchstier akuten Schmerz, etwa durch Hitze an den Pfoten, gelangen entsprechende Signale an

den Nucleus parabrachialis (links). Gleichzeitig werden die AgRP-Neurone daran gehindert, ihre hemmenden Transmitter auszuscheiden (gestrichelter Pfeil), so dass die Schmerzsignale über den Nucleus parabrachialis ungehindert weitere Hirnareale erreichen können.

Bei lang anhaltender Pein, etwa durch eine Entzündung, bleiben dagegen die appetitfördernden AgRP-Neurone aktiv. Diese Nervenzellen senden dann Signale an den Nucleus parabrachialis und blockieren hier die Weiterleitung der Schmerzinformationen – das Tier kann seinen Hunger stillen.



PONDAREMO, A., KORYKOVA, T., HUNGER IS A GATEKEEPER OF PAIN. IN: NATURE 556, S. 445-448, 2018, FIG. 1

Nucleus arcuatus, beinhaltet eine Gruppe von Nervenzellen, die den Neurotransmitter AgRP (Agouti-related protein) produzieren und damit Nahrungsbedarf signalisieren: Die Aktivierung der AgRP-Neurone löst gieriges Fressen aus, während Tiere, bei denen diese Zellen zerstört worden sind, kaum noch Futter zu sich nehmen. Wie Betley und seine Kollegen jetzt beobachteten, fördert die Stimulation der AgRP-Neurone die schmerzhemmenden Effekte des Hungers. Werden diese Nervenzellen hingegen stillgelegt, bleibt die Schmerzunterdrückung aus.

AgRP-Neurone stehen mit vielen anderen Hirnarealen in Kontakt. Nicht alle Verbindungen regulieren allerdings die Nahrungsaufnahme. Um die schmerzhemmenden Verknüpfungen bei Entzündungen aufzuspüren, aktivierte Betleys Arbeitsgruppe systematisch AgRP-Neurone, die mit sieben verschiedenen Hirnregionen interagieren. Dabei beobachteten die Wissenschaftler eine besonders starke Unterdrückung entzündlicher Schmerzen, wenn sie Verbindungen stimulierten, die zum Nucleus parabrachialis im Hinterhirn ziehen. Diese Struktur gehört zum zentralen schmerzverarbeitenden Netzwerk, das entsprechende Signale aus dem Rückenmark in verschiedene Hirnregionen

verteilt. Dabei steigern Schmerzreize die Aktivität von Neuronen des lateralen Nucleus parabrachialis (LPBN), die Signale von AgRP-Zellen empfangen, wohingegen Nahrungsaufnahme ihre Aktivität hemmt. Andererseits unterdrücken vermutlich LPBN-Neurone den Appetit in kritischen Situationen, wenn die Futtersuche riskant sein könnte, während ihre Hemmung durch AgRP-Neurone diese Blockade bei länger anhaltenden Entzündungen abschaltet.

Welcher Transmitter lindert wirklich?

AgRP-Zellen produzieren drei verschiedene Neurotransmitter, die eine Nahrungsaufnahme ankurbeln: das namensgebende AgRP sowie γ -Aminobuttersäure (GABA) und das Neuropeptid Y (NPY). Eine solche simultane Signalübertragung über mehrere Neurotransmitter ist bei vielen Hirnzellen verbreitet, was es erschwert, die Rolle der einzelnen Substanzen gezielt aufzuklären. Die Forscher um Betley überwand dieses Hindernis, indem sie jeden Neurotransmitter gesondert in den LPBN injizierten. So fanden sie heraus, dass weder AgRP noch GABA eine Schmerzlinderung hervorruft. NPY hingegen unterdrückt

entzündlich bedingte Beschwerden über den Y1-Rezeptor auf der Zelloberfläche von LPBN-Neuronen.

Schließlich zeigten die Wissenschaftler, dass akuter Schmerz die Aktivität von AgRP-Neuronen rasch und ausgeprägt drosselt. Eine ähnliche Aktivitätsreduktion tritt auf, wenn ein Tier Nahrung wittert, was vermutlich dazu dient, die appetitgesteuerte Futtersuche einzustellen und das Gefundene zu fressen. Signale aus weiteren Hypothalamus-Strukturen, die nicht zum Nucleus arcuatus gehören, unterstützen das Verhalten.

Damit ergibt sich folgendes Bild: Akuter Schmerz löst eine Verhaltensänderung aus, indem er die Aktivität der AgRP-Neurone drosselt (siehe linke Grafik auf S. 25). Dadurch können diese Nervenzellen wiederum nachgelagerte, in die Nahrungsaufnahme involvierte Hirnregionen nicht mehr aktivieren. Gleichzeitig alarmieren jetzt akut auftretende Schmerzsignale aus dem Rückenmark über den LPBN weitere Hirnareale und leiten dort die Abwehr schädlicher Reize ein.

Dagegen erfordern entzündlich bedingte Schmerzen keine rasche Verhaltensänderung. Die aktivierten AgRP-Neurone unterdrücken entsprechende Signale und hemmen vermutlich die LPBN-Neurone. Die Schmerzinformationen erreichen daher andere Hirnregionen nicht – die Futtersuche geht also weiter (siehe rechte Grafik auf S. 25). Dieser bislang unbekannt Mechanismus der Priorisierung widerstreitender Bedürfnisse erhellt, wie im Hypothalamus sowohl die neurochemischen Charakteristika von Hirnzellen als auch ihre spezifische Verschaltung genutzt werden, um zur Situation passende Verhaltensentscheidungen zu treffen.

Gezielt wirkende Schmerzmittel

Die Arbeit von Betley und seinen Kollegen erlaubt unterschiedliche Schlussfolgerungen: Erstens erscheint das Schmerzlinderungspotenzial der AgRP-Neurone vergleichbar mit dem von Opiaten – zumindest bei länger anhaltenden Beschwerden. Wie die Autoren betonen, legen die beobachteten Unterschiede in der Verarbeitung akuter und chronischer Pein nahe, dass diese auch unterschiedlich behandelt werden sollten, indem man an verschiedenen Zellpopulationen oder Zielproteinen medikamentös ansetzt. Zudem wäre es sicherlich hilfreich, Schmerzmittel zu entwickeln, denen die Nebenwirkungen der Opiate fehlen. Als möglichen Angriffspunkt solcher Wirkstoffe schlagen die Forscher die NPY-Signalübertragung am Y1-Rezeptor im LPBN vor.

Zweitens zeigt die detaillierte Beschreibung eines Signalwegs, in dem Informationen über zwei negative Zustände (Hunger und Schmerz) verarbeitet werden, wie sich weitere biologische Mechanismen aufklären lassen, die über komplexe und dynamisch regulierte Hierarchien menschlicher und tierischer Verhaltensweisen entscheiden. Prinzipiell ähnliche, aber in anderen Hirnregionen ablaufende Mechanismen könnten die Nahrungsaufnahme hungriger Mäuse bei Entzündungen weiter fördern, etwa über eine schmerzlindernde Wirkung während des Fres-

sens. Dieser Effekt dürfte unabhängig von AgRP-Zellen verlaufen, da ihre Aktivität nach der sensorischen Wahrnehmung von Futter ja abnimmt. Die Hierarchie der Verhaltensweisen während der Nahrungsaufnahme wird daher vermutlich von anderen Nervenzellgruppen kontrolliert – möglicherweise von Neuronen im lateralen Hypothalamus, der mit dem Nucleus parabrachialis verbunden ist und mehrere Nervenzellansammlungen enthält, die bei der Nahrungsaufnahme aktiv sind.

Auch bei Essstörungen wie Magersucht treten negativ empfundene Zustände auf, die miteinander konkurrieren: Hunger und Widerwillen gegen Essen. Mit Speisen assoziierte Reize lösen die Aversion aus und hemmen so die Nahrungsaufnahme. Das Verständnis der Interaktionen zwischen Neuronen, die das Hungergefühl vermitteln, und solchen, die emotionale Reaktionen auf Nahrung kontrollieren, könnte dazu beitragen, die neuronalen Mechanismen von Essstörungen aufzuklären. ◀

Alexey Ponomarenko ist promovierter Biologe am Institut für Klinische Neurowissenschaften und Medizinische Psychologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. **Tatiana Korotkova** ist promovierte Biologin am Max-Planck-Institut für Stoffwechselforschung in Köln.

QUELLE

Alhadeff, A. L. et al.: A Neural Circuit for the Suppression of Pain by a Competing Need State. In: *Cell* 173, S. 140–152, 2018

nature

© Nature Publishing Group

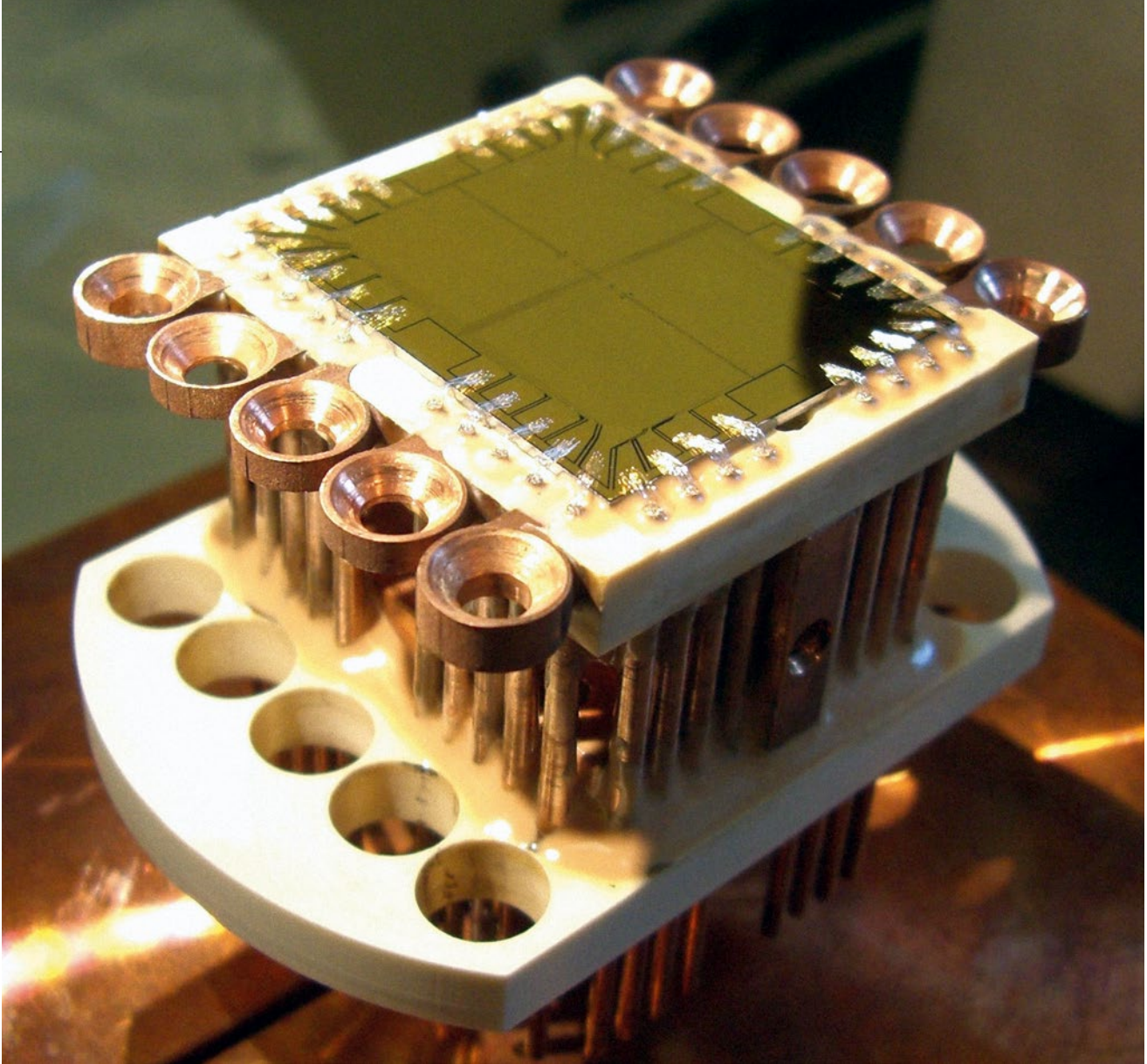
www.nature.com

Nature 556, S. 445–446, 26. April 2018

PHYSIK QUANTENZIGARREN IN RÄTSELHAFTEM GLEICHTAKT

Wissenschaftler haben zwei ungewöhnlich geformte ultrakalte Atomwolken quantenmechanisch gekoppelt. Dabei gleichen sich die Eigenschaften beider Objekte viel stärker aneinander an, als die etablierten Modelle erlauben.

► Nur wenn man es mit wenigen Teilchen zu tun hat, lassen sich die Gleichungen der Quantenmechanik überhaupt exakt lösen – und selbst das ist aufwändig. Quantensysteme aus hunderten oder tausenden Atomen sind auch mit den besten Computern nicht vollständig berechenbar. Physiker müssen die Wissenslücken bei den grundlegenden Gesetzen der Vielteilchen-Quantenphysik deswegen mit Experimenten schließen.



TUWIEN

Werden dünne Wolken aus tausenden Atomen auf extrem niedrige Temperaturen abgekühlt und gleichzeitig in einem engen Bereich festgehalten, findet ein spezieller Phasenübergang statt: Die Atome verlieren ihre Individualität und verhalten sich wie ein einziges Quantenobjekt – ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat entsteht. Die Wolken sind im Labor hervorragend kontrollierbar, etwa mit Hilfe elektromagnetischer Felder. Außerdem lassen sich so kalte Atome gut von ihrer Umgebung trennen, eine unverzichtbare Voraussetzung dafür, Quanteneffekte zu beobachten.

Am Atominstitut der Technischen Universität Wien haben wir an einem solchen System einen überraschenden Effekt entdeckt, der sich mit den bisher bekannten Regeln der Quantenmechanik nicht ausreichend erklären lässt. Dazu haben wir Rubidiumatome in einer Ultrahochvakuum-Kammer auf eine Temperatur von wenigen Nanokelvin gebracht und in einem Magnetfeld gefangen gehalten. Normalerweise versucht man bei einem Bose-Einstein-Kondensat die Atome auf einen winzigen Punkt zu konzentrieren. Ein Atomchip genanntes Gerät in den Wiener Labors (siehe Bild oben) ermöglicht durch hochpräzise elektromagnetische Felder allerdings auch geo-

Mit den Schaltkreisen auf einem etwa drei Zentimeter großen »Atomchip« erzeugen die Forscher elektromagnetische Felder, mit denen sie Teilchen einfangen. Diese schweben dann dicht über der Oberfläche und lassen sich für Experimente weiter manipulieren.

metrisch kompliziertere Konfigurationen. In Kombination mit externen Magnetspulen zwingen wir die ultrakalten Atomwolken in eine besondere dreidimensionale Form. Wir begrenzten den Raum, in dem sich die Atome aufhalten konnten, eng in einer Richtung, ließen ihn in einer anderen jedoch viel weiter ausgedehnt. So entstand eine Art Zigarre, die etwa 1000-mal länger als breit war.

Die Atome können in so einem Zustand nur bestimmte diskrete Energien annehmen. Welche das sind, hängt nach den Gesetzen der Quantenphysik vom verfügbaren Platz ab: Je schmaler der Aufenthaltsbereich, umso größer wird der Abstand zwischen den quantenphysikalisch erlaubten Werten. Bei sehr niedrigen Temperaturen der Atomwolke verfügt jedes Teilchen nur über wenig Energie. Wenn man dann die Atome einsperrt, nehmen sie den geringstmöglichen Wert an – bereits der nächsthöhere Energiezustand

ist unerreichbar. In diesem Fall haben alle Atome denselben Quantenzustand, und ein Bose-Einstein-Kondensat entsteht.

Was aber passiert mit der zigarrenförmigen Atomwolke? Ihre Bewegungsenergie setzt sich aus zwei mathematisch separierbaren Komponenten zusammen: In Längsrichtung der Zigarre haben die Atome relativ viel Platz. Dort kann die Bewegungsenergie viele nah beieinanderliegende Werte annehmen. Senkrecht dazu sind die Atome stark beschränkt. Bei der richtigen Temperatur entsteht ein »Quasi-Kondensat«, bei dem sich die Atome in der engen Richtung wie ein Bose-Einstein-Kondensat verhalten, während sie in der anderen unterschiedliche Quantenzustände annehmen können.

Hin- und herspringende Atome sorgen für eine quantenmechanische Verbindung

Die passenden elektromagnetischen Felder ermöglichen sogar zwei zigarrenförmige Atomwolken nebeneinander. Wenn der Abstand zwischen beiden sehr klein ist, dann wechseln einzelne Atome von einer Wolke zur anderen. Zwar erlauben es die Gesetze der klassischen Physik nicht, die Barriere des elektromagnetischen Felds zu überwinden. Doch weil die Energie eines Quantenteilchens eine gewisse Unschärfe haben darf, bewegt es sich mit Hilfe des so genannten Tunneleffekts gelegentlich durch herkömmlich verbotene Bereiche hindurch.

Solche Atome koppeln beide Wolken quantenphysikalisch miteinander. Das hat Auswirkungen auf die »Phase« der Atomwolken, eine entscheidende Eigenschaft eines Bose-Einstein-Kondensats. Die Phase kommt einzig durch die Welleneigenschaften der Materie zu Stande; in der klassischen Physik gibt es dafür keine Entsprechung. So wie eine akustische Welle eine Abfolge von Wellenbergen und -tälern ist, hat auch ein Bose-Einstein-Kondensat (oder das zigarrenförmige Quasi-Kondensat) Welleneigenschaften und zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Wert zwischen Berg und Tal.

Die Phasen der Atomwolken selbst sind prinzipiell nicht messbar. Allerdings lässt sich die Phasendifferenz zwischen beiden untersuchen: Schwingen die Quasi-Kondensate im gleichen Takt oder leicht versetzt zueinander? Das kann man herausfinden, indem man die elektromagnetische Barriere entfernt. Dann vereinen sich die Atomwolken und interagieren. Es kommt zu einer beobachtbaren Interferenz, ähnlich wie bei dem bekannten Doppelspalt-Experiment.

Man kann gezielt eine bestimmte Phasendifferenz zwischen den beiden Atomwolken erzeugen und dann beobachten, wie sie sich im Lauf der Zeit verändert. Ein Vergleich aus der klassischen Welt ist die Vorstellung zweier Pendeluhren, die gleich schnell, aber zueinander leicht versetzt ticken. Die Kopplung der beiden Atomwolken durch das Hin- und Herwechseln von Atomen entspricht dann einem Gummiband zwischen den Pendeln. Durch dieses sollten die Uhren sich synchronisieren – ihre Phasen angleichen – und nach einiger Zeit wieder desyn-

chronisieren. Wenn die Energie im System perfekt erhalten bleibt, sollten sich Synchronisierung und Desynchronisierung theoretisch endlos abwechseln.

Bei den Atomwolken haben wir erstaunlicherweise etwas ganz anderes beobachtet: Die Phasen der beiden Atomwolken glichen sich extrem rasch aneinander an und blieben synchronisiert. Das ist genau das, was man in einem »dissipativen« System erwarten würde, also einem, aus dem Energie verloren geht. Bei den Pendeluhren kann das etwa durch ein nicht perfekt elastisches Gummiband geschehen, das bei jedem Dehnen ein bisschen Energie in Wärme umwandelt. Im Fall der Atomwolken hingegen ist aus theoretischer Sicht völlig unklar, welcher Mechanismus dahintersteckt.

Das Experiment ist von der Umwelt sehr gut isoliert, und trotzdem deuten die Messergebnisse auf einen Verlust von Energie hin. Da diese nicht einfach verschwinden kann, muss sie auf irgendwelche anderen Parameter des Systems übertragen werden. Denkbar wäre etwa, dass sich die Bewegungsenergie in Zigarren-Längsrichtung ändert, weil die verschiedenen Ebenen miteinander gekoppelt sind. Doch nach allen derzeit bestehenden Theorien dürfte kein Kopplungsmechanismus stark genug sein, um diesen extrem starken und schnellen Dämpfungseffekt zu erklären. Sind also die entsprechenden Theorien unvollständig?

Bisher gab es wenig Grund, an den grundlegenden Formalismen der quantenmechanischen Wechselwirkungen zu zweifeln. Dazu gehört etwa das so genannte Sine-Gordon-Modell, mit dem man eindimensionale Bose-Einstein-Kondensate berechnen kann. Es wurde in Experimenten bisher mit großem Erfolg bestätigt. Niemand hatte erwartet, dass die Atomwolken mit ihrer Desynchronisierung die Vorhersagen so eklatant verletzen würden.

Eine überraschende Erkenntnis mit vielleicht weit reichenden Folgen

Mit der Erkenntnis, dass die Kopplung durch den Tunneleffekt überraschend starke Auswirkungen hat, hofft unser Team weitere Forschungen anzustoßen, um das mathematische Verständnis solcher interatomaren Wechselwirkungen zu verbessern. Schließlich gehört das genaue Verhalten von Vielteilchen-Quantensystemen zu den großen ungelösten Problemen der modernen Physik. Es ist eng mit vielen grundlegenden Rätseln verwoben – vom Zustand des frühen Universums kurz nach dem Urknall bis hin zur Frage, warum die merkwürdigen Effekte der Quantenphysik nur auf winzigen Längenskalen beobachtet werden können, während größere Objekte den Gesetzen der klassischen Physik gehorchen. ◀

Marine Pigneur promoviert in Quantenoptik am Atominstitut der TU Wien.

QUELLE

Pigneur, M. et al.: Relaxation to a Phase-Locked Equilibrium State in a One-Dimensional Bosonic Josephson Junction. In: Physical Review Letters 120, 173601, 2018

ELEKTROCHEMIE

UMWELTFREUNDLICHERE DÜNGERPRODUKTION

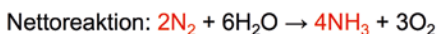
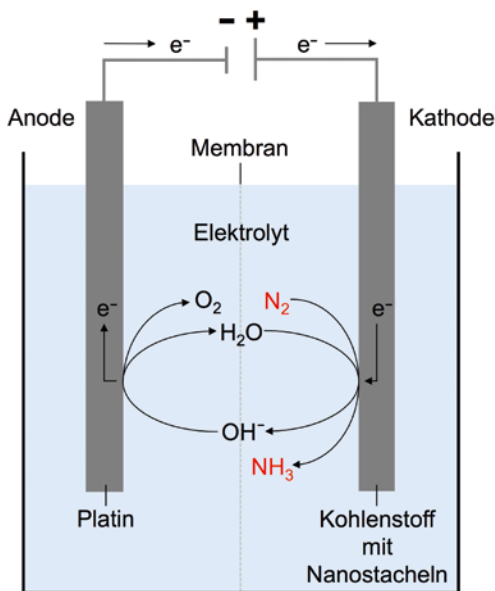
Vor gut 100 Jahren revolutionierte der Haber-Bosch-Prozess die Landwirtschaft. Doch das Verfahren zur Herstellung von Ammoniak belastet die Umwelt stark. Forschern ist es nun gelungen, diesen wichtigen Rohstoff für Kunstdünger mittels Elektrolyse zu synthetisieren.

Am 13. Oktober 1908 meldete der spätere Nobelpreisträger Fritz Haber ein Patent an. Es beschreibt, wie sich Ammoniak (NH_3) aus Wasserstoff (H_2) und Stickstoffgas (N_2) herstellen lässt. Zusammen mit Carl Bosch entwickelte er dafür eine Produktionsanlage. Fünf Jahre später synthetisierten sie Ammoniak im Industriemaßstab. Das Haber-Bosch-Verfahren war geboren.

Die Chemiker lösten damit ein schon zu ihrer Zeit drängendes Problem: Die Weltbevölkerung wuchs rasch und wollte ernährt werden. Um die landwirtschaftlichen Erträge zu steigern, brauchte man stickstoffhaltigen Dünger – und der lässt sich aus Ammoniak herstellen. Rasch etablierte sich daher das Haber-Bosch-Verfahren als unentbehrliche Grundlage moderner Nahrungsmittelproduktion. 2017 erzeugten Anlagen rund um den Globus ungefähr 144 Millionen Tonnen Ammoniak, Tendenz stetig steigend. Damit gehört es zu den zehn weltweit meistproduzierten Chemikalien.

In den über 100 Jahren seit dem Bau der ersten Anlage hat sich der Prozess kaum verändert. Dabei ist der Optimierungsbedarf groß. Denn das Haber-Bosch-Verfahren

Ammoniak (NH_3) lässt sich elektrolytisch aus Stickstoffgas (N_2) und Wasser (H_2O) herstellen. Nanospikes aus Kohlenstoff beschleunigen die sonst sehr träge Reaktion.



schluckt nicht nur beachtliche Mengen an Energie. Es beruht auch auf fossilen Rohstoffen (der dafür benötigte Wasserstoff entsteht oft durch Kohlevergasung) und ist eine erhebliche CO_2 -Quelle – etwa ein Prozent der globalen Treibhausgasemissionen gehen zu Lasten der Ammoniak-synthese.

Chemiker suchen daher inzwischen nach einer umweltfreundlicheren Alternative. Eine Möglichkeit dazu ist die Herstellung von Ammoniak durch Elektrolyse. In einer elektrochemischen Zelle können Stickstoffgas und Wasser (H_2O) zu Ammoniak reagieren, während man Strom zuführt. Dieser lässt sich aus erneuerbaren Quellen gewinnen. Außerdem verbraucht der Prozess selbst weder Erdöl noch Erdgas, setzt damit auch kein CO_2 frei.

Das klingt zwar viel versprechend, ist allerdings ineffizient: In Laborexperimenten konnte man bisher nur verschwindend geringe Mengen an Ammoniak mittels Elektrolyse herstellen. Forschern um Adam J. Rondinone vom Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, USA, gelang nun ein kleiner Durchbruch. Die Chemiker entdeckten einen Katalysator, der die Reaktion etwa zehnmal so effizient ablaufen lässt.

Die Elektrolyse entspricht dem umgekehrten Prozess in einer Batterie. Man benutzt zwei Elektroden, eine Kathode und eine Anode, an deren einem Ende man jeweils eine elektrische Spannung anlegt, während das andere in einen wässrigen Elektrolyten eintaucht. Stickstoffgas und Wasser reagieren an der Kathode zu Ammoniak. Die Reaktion ist eine Reduktion, benötigt also Elektronen. Neben Ammoniak entstehen Hydroxylionen (OH^-), die durch den Elektrolyten zur Anode gelangen und dort wieder zu Wasser oxidieren. Dabei werden Elektronen freigesetzt, die über den äußeren Stromkreis zur Kathode wandern, wo sie wiederum für die Reduktion von Stickstoff zur Verfügung stehen.

So weit die Theorie. In der Praxis gibt es jedoch einen Haken: Stickstoffgas ist extrem reaktionsträge, weshalb die Reduktion unendlich langsam abläuft. Um Ammoniak in größeren Mengen zu gewinnen, braucht man daher einen Reaktionsbeschleuniger, auch Katalysator genannt. Allerdings sind gängige Katalysatoren aus Eisen, Platin oder Gold nicht selektiv genug. Sie begünstigen vor allem eine andere Reaktion an der Kathode: die Umsetzung von Wasser zu Wasserstoff. Deshalb entsteht selbst mit Katalysator kaum Ammoniak.

Das Team um Rondinone fand nun eine Lösung für das Ausbeuteproblem. Es kehrte den herkömmlichen Katalysatoren aus (Edel-)Metallen den Rücken zu und verwen-

dete stattdessen nanometergroße Stacheln aus Kohlenstoff, die an der Spitze nur rund ein Dutzend Atome dick sind. Mit dem neuen Nanomaterial konnten die Forscher in einer Stunde pro Quadratzentimeter Katalysatoroberfläche ungefähr 100 Milligramm Ammoniak herstellen. Damit ist die Elektrolyse zwar noch immer nicht konkurrenzfähig zum Haber-Bosch-Verfahren, doch der Ansatz ist viel versprechend. Das zeigt der so genannte faradaysche Wirkungsgrad des neuen Kohlenstoffkatalysators. Würden keine unerwünschten Nebenreaktionen – wie die Bildung von Wasserstoff – stattfinden und die Ausgangsstoffe vollständig zu Ammoniak reagieren, läge der faradaysche Wirkungsgrad bei 100 Prozent. Mit den Nanostacheln erreichten die Wissenschaftler etwa zehn Prozent. Das ist zwar immer noch relativ gering, verglichen mit früheren Studien allerdings eine mehr als zehnfache Ausbeute.

Nanospikes helfen die Stickstoffmoleküle zu knacken, Lithiumionen nehmen das Gas huckepack

Was macht den neuen Katalysator so viel besser als andere? Eine Besonderheit ist, dass er aus der Kohlenstoffvariante Graphit besteht. Erst seit ungefähr einem Jahrzehnt verwenden Wissenschaftler verschiedene Kohlenstoffmodifikationen als Katalysatoren in elektrochemischen Reaktionen. Bisher haben sie beispielsweise Kohlenstoffnanoröhren, Kohlenstofffasern, Graphit und Graphen eingesetzt. Die Forscher vom Oak Ridge National Laboratory sind allerdings die Ersten, die einen solchen Katalysator für die Ammoniakproduktion nutzen. Dabei hat das Element viele Vorteile: Es ist günstiger und weitaus umweltfreundlicher als die Metalle, auf die man üblicherweise zurückgreift. Und es katalysiert die Entstehung von unerwünschtem Wasserstoff weniger effizient.

Für die guten Ergebnisse ist jedoch nicht das verwendete Material allein verantwortlich. Das stellten die Forscher in einem Kontrollexperiment fest. Sie bombardierten die Kohlenstoffstacheln mit hochenergetischen Sauerstoffionen in einem Plasma, so dass die Spitzen stumpf wurden. Anschließend testeten sie diese in der elektrochemischen Zelle. Das Resultat: Es entstand wenig bis gar kein Ammoniak. Es scheint, als beschleunigten lediglich spitze Stacheln die Ammoniakproduktion. Die Autoren der Studie erklären ihre Beobachtung damit, dass die Spitzen das sie umgebende elektrische Feld verstärken und die Elektronen im Stickstoffmolekül aus dem Gleichgewicht bringen. Das hilft möglicherweise, die extrem starke Dreifachbindung zwischen den beiden Stickstoffatomen zu brechen.

Die Chemiker beobachteten zudem eine effektivere Ammoniaksynthese, wenn sie ein in Wasser gelöstes Lithiumsalz als Elektrolyten nutzten. Natrium- und Kaliumsalze funktionierten hingegen weniger gut. Sie vermuten, dass die Lithiumionen (Li^+) Stickstoffmoleküle zur Kathode transportieren. Stickstoffgas ist in Wasser schlecht löslich, bindet jedoch sehr gut an Lithiumionen. Letztere lagern sich außerdem an den Spitzen an und verhindern

so, dass Wassermoleküle Zugang zur Kathode haben und zu Wasserstoff reagieren.

Während das Team um Rondinone die Ammoniaksynthese mit Hilfe von Kohlenstoffnanostacheln weiterentwickeln will, erzielte eine weitere Gruppe von Wissenschaftlern kürzlich ähnlich gute Resultate mit einem ganz anderen Katalysator. Forscher um Xiaofeng Feng von der University of Central Florida im US-amerikanischen Orlando stellten aus dem Edelmetall Palladium Nanopartikel her, die sie auf einer Oberfläche aus kolloidalem Kohlenstoff (so genanntem Industrieruß) aufbrachten.

Genau wie die Kohlenstoffstacheln helfen die Palladiumpartikel, die Dreifachbindung zwischen den Stickstoffatomen im N_2 -Molekül zu brechen, aber auf eine andere Weise: Das Palladium erleichtert es Wasserstoffionen (H^+), sich an der Kathode anzulagern – als Palladiumhydrid. Die aus dem Wasser stammenden Wasserstoffionen reagieren schließlich mit dem Stickstoffgas zu Ammoniak. Durch die Zwischenlagerung am Palladium wird dieser Prozess beschleunigt.

Die beiden Nanokatalysatoren erzielten eine vergleichbare Ammoniakausbeute: Auch Feng und seine Kollegen erreichten einen faradayschen Wirkungsgrad von etwa zehn Prozent. Allerdings benötigten sie dafür eine geringere Spannung, 0,1 Volt, gegenüber den 1,2 Volt, die das Team um Rondinone anlegen musste. Andererseits ist Kohlenstoff deutlich billiger als Palladium. Wollte man die genauen Kosten der Katalysatoren vergleichen, müsste man ihren Herstellungsaufwand ebenfalls mit einbeziehen. Doch darüber geben die Autoren in ihren Studien keine Auskunft.

Eine Ablösung des Haber-Bosch-Verfahrens durch Elektrolyse würde nicht nur Energie, CO_2 und fossile Brennstoffe einsparen. Daneben ist das elektrochemische Verfahren auch wesentlich flexibler. Man wäre nicht mehr auf riesige Produktionsanlagen angewiesen, sondern könnte Ammoniak in kleinem Maßstab dezentral herstellen: etwa in landwirtschaftlichen Regionen, wo ein entsprechender Bedarf an Düngemitteln herrscht. Damit ließen sich zusätzlich die Transportkosten reduzieren.

Bis dahin ist es allerdings noch ein weiter Weg. Die Entwicklung einer konkurrenzfähigen Ammoniaksynthese mittels Elektrolyse befindet sich erst im Anfangsstadium. Die Wissenschaftler sind aber optimistisch, die Ausbeute ihrer Verfahren weiter steigern zu können. Rondinone schätzt, dass man Ammoniak frühestens in ungefähr zehn Jahren in marktrelevanten Mengen elektrolytisch herstellen können wird. ◀

Anna Clemens ist promovierte Chemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Prag.

QUELLEN

Song, Y. et al.: A Physical Catalyst for the Electrolysis of Nitrogen to Ammonia. In: Science Advances 4, e1700336, 2018

Wang, J. et al.: Ambient Ammonia Synthesis via Palladium-Catalyzed Electrohydrogenation of Dinitrogen at Low Overpotential. In: Nature Communications 9, 1795, 2018



SPRINGERS EINWÜRFE GROSS- UND KLEINFORSCHUNG IM WELTALL

Der Weltraum gestattet Versuche, die auf der Erde nur schwer gelingen. Ist er der natürliche Standort für Zukunftstechnologien?

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine Sammlung seiner Einwüfe ist als Buch unter dem Titel »Unendliche Neugier. Was die Wissenschaft treibt« erschienen.

» spektrum.de/artikel/1580872

Seit dem 21. Mai 2018 beherbergt die Internationale Raumstation ISS eine besondere Schatztruhe. Das Cold Atom Laboratory der US-Weltraumbehörde NASA ist nicht viel größer als eine Kühlbox, denn bei Transportflügen zur ISS ist jedes Gramm Nutzlast teuer. Dennoch ermöglicht die kompakte Kiste Quantenexperimente unter Bedingungen, die sich auf der Erde selbst mit größtem Aufwand kaum herstellen lassen (*Nature* 557, S. 151–152, 2018).

Als Forschungsobjekt dienen winzige Wölkchen von einigen hunderttausend Rubidium- oder Kaliumatomen. Sie werden von Magnetfeldern fixiert und mit Laserstrahlen so manipuliert, dass sie zu makroskopischen – immerhin einige zehntel Millimeter großen – Quantenobjekten verschmelzen. Von der atomaren Identität bleibt in einem solchen Bose-Einstein-Kondensat (BEC) nichts mehr übrig. Die einzelnen Partikel werden ununterscheidbar, sie bilden einen kollektiven Quantenzustand.

BECs ermöglichen nicht nur Grundlagenforschung im Grenzbereich von Mikro- und Makrophysik, etwa zu der noch immer umstrittenen Frage, wo und wie die Quantenwelt in die uns vertraute klassische Physik übergeht. Die exotischen Atomklümpchen versprechen auch sensationelle Anwendungen: Gerade versuchen mehrere Labors – mit reger Beteiligung von Großfirmen wie IBM, Microsoft und Google – daraus Prototypen für Quantencomputer zusammenzusetzen (siehe meinen Einwurf vom Januar).

Doch die bisherige Forschung krankt daran, dass sie auf der Erde stattfindet. Hier herrschen für ein BEC und für künftige Quantencomputer extrem feindliche Bedingungen, die aufwändig – und dennoch unzureichend – korrigiert werden müssen. Erstens soll in der Magnetfalle ein möglichst perfektes Vakuum herrschen, damit kein Luftmolekül dem Kondensat ins Gehege kommt. Zweitens droht die Schwerkraft das Klümpchen nach unten aus der

Falle zu ziehen. Um wenigstens sekundenlang Schwerelosigkeit zu erzielen, half man sich bisher damit, die evakuierte Falle samt Kondensat in einem Fallturm loszulassen oder sie mit einer Rakete in eine parabolische Bahn zu schießen. Drittens ist es auf der Erde viel zu warm; ein Bose-Einstein-Kondensat gedeiht nur knapp am absoluten Nullpunkt. Und viertens bedroht das Leben am Boden den empfindlichen Quantenzustand – mit allgegenwärtigen Vibrationen, Strahlungsquellen und weiteren Störungen.

Die natürliche Umgebung eines Quantenkondensats ist der Weltraum. Das All ist von vornherein kalt und leer, und in der Umlaufbahn muss man kein Klümpchen mit Gewalt zum Schweben bringen.

Die Kühlbox an Bord der ISS ist erst der Anfang. Zusammen mit der NASA entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) eine größere und vielseitigere Version namens BECCAL (Bose-Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory). Die Parameter dieses Weltraumlabs werden alles irdisch Erreichbare weit in den Schatten stellen. Als Störfaktor bleibt nur noch die menschliche Besatzung; die Experimente laufen deshalb in den Schlafphasen.

Aber nicht nur für Quantenobjekte ist der Weltraum ideal. Die meisten physikalischen Versuchsanlagen müssen mühsam gegen die irdische Umwelt abgeschirmt werden. Man denke etwa an den Aufwand, der getrieben wird, um riesigen Interferometern die Entdeckung von kosmischen Gravitationswellen zu ermöglichen.

Gewiss, es ist nicht billig, dergleichen ins All zu schaffen. Doch nachdem im Kalten Krieg das Militär der Supermächte die Entwicklungskosten der Raumfahrt stemmte, können heute kommerzielle Unternehmen Transportflüge anbieten. Eines nicht allzu fernen Tages wird vielleicht auf der Rückseite des Mondes ein Gravitationswellendetektor den Betrieb aufnehmen.

MEDIZIN

IMPFFEN GEGEN DIABETES

Immer mehr Menschen erkranken an Diabetes Typ 1. Jetzt zeichnet sich ein ebenso viel versprechendes wie verblüffendes Gegenmittel ab: Impfstoffe gegen spezielle Viren.



Kirsten M. Drescher ist Professorin für Medizinische Mikrobiologie und Immunologie an der Creighton University. Sie erforscht die Rolle von Viren bei Autoimmunerkrankungen und beschäftigt sich mit neuen anti-entzündlichen Arzneistoffen. **Steven Tracy** ist emeritierter Professor für Pathologie und Mikrobiologie am University of Nebraska Medical Center. Seine Forschungsschwerpunkte waren die Molekularbiologie von Enteroviren sowie der Einfluss dieser Krankheitserreger auf Herzmuskelentzündungen und Diabetes Typ 1.

► spektrum.de/artikel/1580868

Warum sind allergischer Schnupfen, Hautausschläge und Asthma im zurückliegenden Jahrhundert häufiger geworden? Ende der 1980er Jahre stellte der britische Epidemiologe David P. Strachan eine einfache und überraschende These dazu auf. Es liege daran, so Strachan, dass die Lebensbedingungen seit der industriellen Revolution immer besser geworden seien; insbesondere habe es einen drastischen Rückgang der Infektionen im frühen Kindesalter gegeben. Der Epidemiologe vermutete, der Kontakt mit Bakterien und Viren in den ersten Lebensjahren schütze vor späteren allergischen Erkrankungen – vorausgesetzt natürlich, die Kinder überlebten diese Infektionen.

Strachans Idee ist heute unter den Namen Hygiene-Hypothese bekannt. Obwohl sie sich ursprünglich nur auf allergische Reaktionen bezog, haben Forscher die Grundannahme, wonach das Fehlen bestimmter Umwelteinflüsse zu Gesundheitsproblemen führt, mittlerweile auch auf andere Erkrankungen übertragen. Dazu zählen Poliomyelitis (Kinderlähmung), multiple Sklerose und Diabetes Typ 1. Zahlreiche epidemiologische Studien belegen, dass solche Komplikationen umso häufiger wurden, je weiter die Industrialisierung fortschritt. Wo immer die Infektionsrate im Kindesalter (und damit die Kindersterblichkeit) sank, tauchten bestimmte Erkrankungen, die zuvor selten gewesen waren, zunehmend öfter auf – wenn auch nicht überall in gleichem Maß.

Im Fall der Kinderlähmung gab es die ersten größeren Ausbrüche im späten 19. Jahrhundert. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts verdoppelte sich mancherorts die Neuerkrankungsrate der multiplen Sklerose. Bei dieser immunologisch bedingten Reaktion greift das Immunsystem die Markscheiden von Nervenzellen an, was zu schweren Behinderungen führen kann. Diabetes Typ 1 ist (zumindest in der immunologischen Form) ebenfalls eine

Beim Diabetes mellitus Typ 1 gehen Zellen der Langerhans-Inseln in der Bauchspeicheldrüse zu Grunde. Diese Zellen produzieren normalerweise Insulin und schütten es aus; ihr Verlust führt daher zu Insulinmangel. Die Patienten müssen sich das Hormon deshalb künstlich zuführen – häufig über Injektionswerkzeuge.



Autoimmunerkrankung, bei der der Körper die Insulin produzierenden Beta-Zellen der Langerhans-Inseln in der Bauchspeicheldrüse zerstört. Die Krankheit verbreitete sich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zunächst langsam, ab den 1950er Jahren dann dramatisch.

Auf welche Weise der Kontakt mit Viren oder Bakterien vor derart unterschiedlichen Krankheiten schützt, ist bis heute ungeklärt. Anscheinend lernt der sich entwickelnde Organismus im Zuge solcher Infektionen, wie er mit Erregern umzugehen hat. Möglicherweise verleitet ihn das Fehlen körperfremder Eindringlinge sogar dazu, sich selbst zu attackieren. Inzwischen hat die Forschung zahlreiche Hinweise darauf geliefert, dass Enteroviren – eine wichtige Gruppe von Krankheitserregern – an der Zunahme von Poliomyelitis- und Diabetes-Typ-1-Fällen beteiligt sind.

Im Gegensatz zum viel weiter verbreiteten Diabetes Typ 2, der häufig mit Ernährung und Übergewicht assoziiert ist und oft erst im Erwachsenenalter auftritt, prägt sich Typ-1-Diabetes vielfach schon bei unter 20-Jährigen aus. Wir experimentierten mit Mäusen, die dazu neigen, spontan diesen Diabetestyp zu entwickeln, und förderten dabei

AUF EINEN BLICK INSULINMANGEL NACH VIRENINFEKTION

- 1** Diabetes Typ 1 ist genetisch und durch Umweltfaktoren bedingt. Anders als Typ 2 tritt er oft schon bei Kindern und Jugendlichen auf.
- 2** In den zurückliegenden zwei Jahrhunderten nahm die Häufigkeit mancher Krankheiten in der entwickelten Welt stark zu, darunter Kinderlähmung und Diabetes Typ 1.
- 3** Enteroviren, die unter anderem in ungeklärtem Abwasser auftreten, können vor Diabetes Typ 1 schützen, ihn aber auch auslösen. Impfstoffe gegen sie könnten viele Menschen davor bewahren zu erkranken.



einen komplexen Mechanismus zu Tage. Unseren Daten zufolge können dieselben Enteroviren-Stämme die Krankheit sowohl verhindern als auch fördern – je nachdem, in welchem Alter das Tier damit infiziert wird. Sollte das bei Menschen ebenfalls zutreffen, könnte ein Impfstoff, der auf solchen Viren basiert, möglicherweise zahlreiche Personen vor Diabetes Typ 1 schützen.

Wir begannen unsere Untersuchungen mit einer Grundsatfrage ähnlich der, die Strachan einst aufwarf: Warum war diese Variante der Zuckerkrankheit früher so selten, und wieso stieg ihre Häufigkeit in den 1950er Jahren drastisch an? Schon in der Antike haben griechische, arabische, indische und chinesische Ärzte eine seltene Kombination von Symptomen beschrieben, bei der es sich nahezu sicher um Diabetes Typ 1 handelte: rascher Gewichtsverlust, abnorm starkes Durstgefühl und süß schmeckender Urin. Gestützt auf Angaben aus Heilanstalten und Krankenhäusern haben Forscher abgeschätzt, dass im frühen 20. Jahrhundert etwa 1 bis 2 von 100 000 unter 15-Jährigen daran litten. Heute liegt dieses Verhältnis in einigen Gegenden der USA bei 20 zu 100 000 und in Finnland bei mehr als 60 zu 100 000. Besonders erschreckend: Die Zahlen steigen weiter.

Schnelle Zunahme der Krankheitshäufigkeit ist wohl nicht genetisch bedingt

Diese Entwicklung verlief jedoch keineswegs geradlinig. Nach Jahren der langsamen Zunahme in einigen Ländern sprang die Neuerkrankungsrate für Typ-1-Diabetes in der Mitte des 20. Jahrhunderts plötzlich steil nach oben. Seither beobachten Epidemiologen weltweit ein durchschnittliches jährliches Wachstum zwischen 3 und 5 Prozent. Zwischen 1998 und 2010 nahm die Zahl neu auftretender Fälle pro Zeitraum (Inzidenz) um schockierende 40 Prozent zu!

Einem derart steilen Anstieg liegt höchstwahrscheinlich keine Veränderung im menschlichen Genpool zu Grunde, denn DNA mutiert nicht so rasch. Das individuelle Diabetes-Typ-1-Risiko hängt von zahlreichen Erbanlagen ab, die auf komplizierte Weise zusammenwirken. Soweit wir aus Untersuchungen wissen, hat sich die Häufigkeit genetischer Profile, die ein hohes Erkrankungsrisiko bergen, nicht verändert. Vielmehr leiden mehr und mehr Menschen an der Zuckerkrankheit, die auf Grund ihrer Erbanlagen eigentlich gar nicht dafür prädestiniert sind. Nur wenige Fälle lassen sich als rein genetisch bedingt klassifizieren. Diese und andere weltweit erhobene Befunde lassen stark vermuten, dass hier relativ neue Umwelteinflüsse am Werk sind.

Welche Einflüsse das sein könnten, dazu sind über die Jahre viele Möglichkeiten in Betracht gezogen und wieder verworfen worden. Während Diabetes Typ 2 klar mit Ernährung und Übergewicht zusammenhängt, trifft das auf Typ-1-Diabetes nicht zu. Verblüffenderweise haben mehrere Studien ergeben, dass er mit zunehmendem Abstand zum Äquator immer häufiger auftritt. Könnte es vielleicht sein, dass ein Mangel an Vitamin D, das der Körper unter Einstrahlung von Sonnenlicht produziert, hier eine Rolle spielt? Diese Idee erwies sich rasch als unzutreffend – unter anderem deshalb, weil Diabetes Typ 1 in

manchen Regionen Finnlands mit höherer Sonneneinstrahlung häufiger auftritt als in sonnenärmeren Gebieten.

Vieles deutet stattdessen auf einen viralen Auslöser hin, und zwar vermutlich auf ein oder zwei Virenspezies, die in Abwasser oder in verunreinigtem Trinkwasser auftreten. Zahlreiche Studien legen nahe, dass es sich hierbei um Enteroviren handelt – so bezeichnet, weil sie normalerweise im Darm (altgriechisch »énteron«) vorkommen. Einige Enteroviren können sich in der Bauchspeicheldrüse vermehren und dabei in Geweberegionen nahe den Insulin produzierenden Inselzellen Entzündungen auslösen. Das lockt autoreaktive T-Lymphozyten an, welche die Inselzellen angreifen und deren Fähigkeit zerstören, Insulin zu bilden. Die Folge: Diabetes.

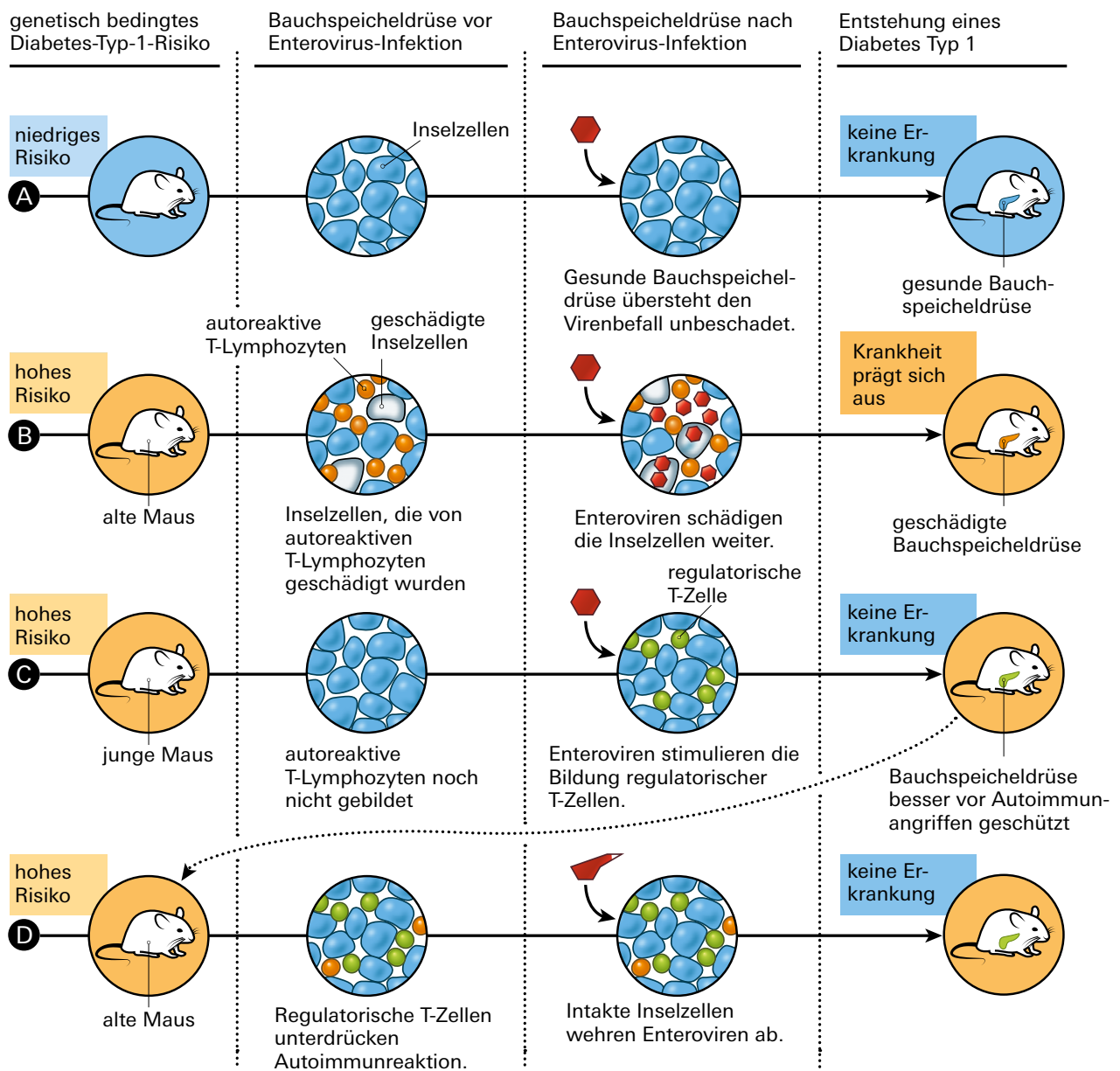
Heute sind mehr als 100 Subtypen von Enteroviren bekannt. Keiner davon scheint allein für die weltweite Zunahme der Diabetes-Häufigkeit verantwortlich zu sein. Vielmehr haben Wissenschaftler mehrere Kandidaten hierfür identifiziert, allen voran sechs Subtypen, die als Coxsackie-B-Viren bezeichnet werden. Allerdings ist nicht genau verstanden, wie Infektionen mit diesen Erregern den Körper dazu veranlassen, sich selbst zu attackieren. Der Prozess muss kompliziert sein, denn epidemiologischen Studien zufolge treiben bestimmte Enterovirus-Subtypen die Erkrankung nicht nur voran, sondern können auch vor ihr schützen.

Als wir darüber nachdachten, mit welchen Experimenten wir Diabetes Typ 1 verursachenden Enteroviren auf die Spur kommen könnten, nahmen wir zunächst eine andere Krankheit ins Visier, nämlich die Kinderlähmung. Sie wird von Polioviren ausgelöst, die ebenfalls zu den Enteroviren zählen. Polioviren scheinen schon seit Jahrtausenden zu existieren, denn eine antike ägyptische Stele, die heute in einem Kopenhagener Museum ausgestellt ist, zeigt ganz offensichtlich einen Poliomyelitis-Patienten (siehe Bild S. 37 links). Die schrecklichen Symptome, etwa schwere Lähmungen und deformierte Gliedmaßen, wurden lange Zeit recht selten beschrieben. Im späten 19. Jahrhundert jedoch änderte sich das: Zunächst kam es zu sporadischen, später zu jährlich ausbrechenden Epidemien. Im 20. Jahrhundert tötete die Kinderlähmung zehntausende Kinder und machte Millionen zu Krüppeln. Noch im Jahr 1988 trugen täglich rund 1000 Kinder schwere Schäden infolge einer Polio-Infektion davon. Dank einer massiven Impfkampagne kursiert die Krankheit heute nur noch in drei Ländern.

Die Hygiene-Hypothese hilft, den plötzlichen Anstieg der Poliomyelitis-Fälle zu erklären. Wir vergessen oft, dass viele Annehmlichkeiten des heutigen Alltags in den entwickelten Ländern erst seit etwa 100 Jahren existieren. Bevor es in Europa und Nordamerika eine flächendeckende kommunale Wasserversorgung gab, entnahmen die Menschen das Wasser aus Quellen, Teichen sowie öffentlichen Brunnen und benutzten es oft direkt vor Ort – nicht bloß zum Trinken, sondern auch zur Körperpflege und zum Waschen von Kleidung. Trinkwasser war daher oft mit menschlichem oder tierischem Unrat verschmutzt. Der Mangel an fließendem Wasser und Seife brachte es zudem mit sich, dass sich die Menschen nach dem Toilettengang wesentlich seltener die Hände wuschen als heute. Beim Zuberei-

Diabetes Typ 1 und Enterovirus-Infektionen

Mäuse ohne genetisch bedingte Neigung zu Diabetes Typ 1 können Infektionen mit Enteroviren in der Regel ohne Folgeschäden überstehen (A); die Zellen der Langerhans-Inseln in ihrer Bauchspeicheldrüse produzieren auch nach dem Virenbefall weiter Insulin. Bei Mäusen mit einer genetischen Veranlagung für diese Krankheit (B, C, D) sieht das anders aus. Wie sie auf eine Enterovirus-Infektion reagieren, hängt von ihrem Alter ab. Bei älteren Tieren (B) sind die Inselzellen oft schon infolge von Autoimmunreaktionen geschädigt. Die Viren haben es in diesem Fall leichter, sich in den Zellen zu vermehren, sie weiter zu schädigen und die Insulinproduktion zu beeinträchtigen, was einen Diabetes Typ 1 auslösen kann. Ist das Tier jedoch noch jung und deshalb immunologisch nur wenig geschädigt (C), regt die Infektion den Organismus zur Bildung regulatorischer T-Zellen an. Diese dämpfen die Aktivität Autoimmunreaktionen vermittelnder autoreaktiver T-Lymphozyten und wirken so der Entstehung eines Diabetes Typ 1 entgegen (D).



ten von Mahlzeiten oder beim Händeschütteln wurden Krankheitskeime daher zahlreich und weitläufig verbreitet.

Fast jeder war deshalb von Beginn seines Lebens an Polioviren ausgesetzt, die über menschliche Fäkalien in die Umwelt gelangt waren. Neugeborene erkrankten dennoch meist nicht, denn ihre Mütter waren immunisiert und gaben ihren Schutz über Antikörper an den Nachwuchs weiter – sowohl während der Schwangerschaft an den Fötus als auch beim Stillen an das Baby. Als die Kinder abgestillt waren, ging der Schutz durch die mütterlichen Antikörper allmählich verloren. Die Kinder bildeten nun eigene Antikörper gegen das Poliovirus aus, da sie immer wieder mit ihm in Kontakt kamen. Obwohl die Erreger also praktisch allgegenwärtig waren, erkrankten nur wenige Menschen an Kinderlähmung, weil sie erst von den mütterlichen und dann von ihren eigenen Antikörpern geschützt wurden.

Dieser Mechanismus, der wohl schon seit Jahrtausenden am Werk gewesen war, begann zu versagen, als die Hygiene Einzug hielt. In einer weitgehend sauberen Umgebung aufwachsend, kamen viele Kinder zunächst nicht mit Polioviren in Berührung. Wenn sie später im Leben doch einmal damit infiziert wurden, hatten sie deshalb keinen Immunschutz und liefen Gefahr, schwer zu erkranken. Etwa eine von 100 bis 200 Infektionen nimmt einen so genannten paralytischen Verlauf mit Lähmungserscheinungen. Ein berühmtes Beispiel hierfür ist der amerikanische Präsident Franklin D. Roosevelt, der im Alter von 39 Jahren an paralytischer Poliomyelitis erkrankte, als er Ferien auf einer Insel in New Brunswick machte.

Zum Glück gibt es heute einen Impfstoff gegen die Kinderlähmung, der sich als sicher und ungemein wirkungsvoll erwiesen hat. Er bewahrte zahllose Kinder vor gravierenden Gesundheitsschäden. Wenn es aber möglich ist, eine Vakzine gegen das Poliovirus zu entwickeln, warum sollte das nicht auch bei anderen Enteroviren gelingen? Falls sich der Verdacht erhärtet, dass Diabetes Typ 1 von solchen Erregern verursacht wird, würde sich damit eine neue Behandlungsoption eröffnen: ein Impfstoff gegen die Zuckerkrankheit nämlich, der Menschen mit besonders hohem Infektionsrisiko schützt.

Das Poliovirus können wir übrigens als Ursache von Typ-1-Diabetes ausschließen. Obwohl Poliomyelitis-Epidemien im 20. Jahrhundert oft auftraten, gab es keine zeitlich dazu passende Zunahme von Diabetes Typ 1. Zudem ist die Zuckerkrankheit in diversen Ländern weiter auf dem Vormarsch, obwohl dort die Kinderlähmung mittlerweile ausgerottet ist.

Wenn man nachweisen will, dass ein Virus eine bestimmte Krankheit verursacht, ist es das Beste, den Erreger zunächst aus erkranktem Gewebe zu isolieren – im Fall des Typ-1-Diabetes also aus der Bauchspeicheldrüse. Allerdings stellt es eine große chirurgische Herausforderung dar, Gewebeprobe aus dem Drüsenorgan zu gewinnen, weshalb Mediziner solche Eingriffe bei gesunden Menschen nur selten durchführen. Ferner ist es sehr schwierig, den richtigen Zeitpunkt für eine solche Probenentnahme abzuspannen: Sie muss genau dann erfolgen, wenn das Immunsystem beginnt, die Bauchspeicheldrüse zu attackieren und die Inselzellen zu zerstören. Wenn der Diabetes sich bereits ausgeprägt hat und ärztlich diagnostiziert wird, sind für gewöhnlich alle Anzeichen einer aktiven Infektion verschwunden.

Trotz dieser Schwierigkeiten sind schon mehr als 40 Studien veröffentlicht worden, die überzeugend belegen, dass es einen Zusammenhang gibt zwischen der Anwesenheit verschiedener Enteroviren-Typen und dem Aufkommen eines Diabetes Typ 1. Dabei gelang es, entweder das Virus oder sein Erbgut aus der Bauchspeicheldrüse von Verstorbenen zu isolieren. Anderen Studien zufolge beeinflussen manche Enterovirus-Infektionen auch den langfristigen Verlauf der Erkrankung.

Die frühe Infektion mit Coxsackie-B-Viren scheint vor Diabetes Typ 1 zu schützen

Mäuse eines bestimmten Stamms mit der Bezeichnung »NOD« (für »non-obese diabetic«, zu Deutsch: nicht fettliebend und zuckerkrank) erkranken ohne jedes äußere Zutun an Diabetes Typ 1. Merkwürdigerweise geschieht das bei Tieren, die unter hygienischen Bedingungen gehalten werden, viel schneller als bei solchen, die in schmutzigen Käfigen leben. Wir vermuten, dass NOD-Mäuse bis zu einem gewissen Grad mit Menschen vergleichbar sind, die genetisch bedingt ein höheres Diabetesrisiko tragen. Dies macht die Mäuse zu geeigneten Modellorganismen, um den Zusammenhang zwischen Enteroviren und der Zuckerkrankheit zu erforschen. Begünstigend kommt hinzu, dass Coxsackie-B-Viren, die erwiesenermaßen am Entstehen von Diabetes Typ 1 mitwirken, sich gut in lebenden Mäusen vermehren.

Im Jahr 2002 infizierten wir sehr junge NOD-Mäuse mit Coxsackie-B-Viren, hielten sie sonst aber in steriler Umgebung. Es zeigte sich, dass die Tiere mit zunehmendem Alter deutlich seltener einen Typ-1-Diabetes ausprägten als nicht infizierte Kontrolltiere. Das stützte die These, wonach ein früher Kontakt mit den Erregern vor der Erkrankung schützen kann. Interessanterweise war dieser Effekt nicht auf bestimmte Typen der Coxsackie-B-Viren beschränkt, wenn auch manche eine stärkere Schutzwirkung zu vermitteln schienen als andere. Experimente eines Teams um den Virologen Heikki Hyöty von der Universität Tampere (Finnland) haben ähnliche Ergebnisse geliefert.

Drei Erklärungen kommen für diesen Effekt in Betracht. Erstens könnte die frühe Virusinfektion den Organismus dazu veranlassen, schützende Antikörper herzustellen, so dass ein späterer Kontakt mit denselben Enteroviren-Typen nicht zum Krankheitsausbruch führt. Auf diesem Mecha-



SHERRY YOUNG / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



Eine ägyptische Stele, die etwa 3400 Jahre alt ist, zeigt offenbar einen an Poliomyelitis Erkrankten (links). Deutlich sichtbar ist die verkümmerte Muskulatur eines seiner Beine – eine Komplikation, die bei schwerem Verlauf der Krankheit zurückbleiben kann (rechts).

nismus beruhen die Polio- und etliche weitere Impfungen, die Mediziner heute einsetzen. Zweitens: Weil Coxsackie-B-Viren vielen anderen Enteroviren molekular stark ähneln, könnte die Infektion mit ihnen dazu führen, dass die Immunreaktion gegen Enteroviren künftig schneller einsetzt – auch gegenüber solchen, mit denen der Körper noch nie in Berührung gekommen ist. Drittens könnte eine enterovirale Infektion die Bildung regulatorischer Immunzellen stimulieren, so genannter T-Regs. Diese Zellen arbeiten wie eine Körperpolizei, indem sie schädliche Autoimmunreaktionen dämpfen.

Um herauszufinden, was davon zutrifft, infizierten wir Mäuse zu unterschiedlichen Zeitpunkten in ihrem Leben und beobachteten sie anschließend mindestens 30 Wochen lang. Dabei kam heraus: Eine Coxsackie-B-Infektion von älteren NOD-Mäusen führt dazu, dass die Tiere häufiger an Diabetes Typ 1 erkranken – genau andersherum als bei jungen Mäusen.

Wir vermuten, dass bei den älteren Nagern die Bauchspeicheldrüse bereits entzündet gewesen war, die Inselzellen also schon unter Beschuss seitens körpereigener T-Lymphozyten standen. Die Enteroviren konnten die



Inselzellen daher leichter infizieren und somit die Ausprägung des Diabetes beschleunigen. Anders ausgedrückt: Möglicherweise muss erst ein genetisch bedingter körpereigener Angriff auf die Bauchspeicheldrüse begonnen haben, bevor die Coxsackie-B-Viren den Diabetes wirkungsvoll triggern können. Je älter die Maus und je schwerer die Entzündung, umso schneller ginge das vorstatten. Tatsächlich hatten sich bei Versuchen mit besonders alten Mäusen oft schon ein bis zwei Tage nach der viralen Infektion die Diabetessymptome ausgebildet, während Kontrolltiere, die unter sterilen Bedingungen lebten, erst viel später erkrankten.

Ein Forscherteam um den Immunologen Matthias von Herrath am La Jolla Institute for Allergy and Immunology (Kalifornien) hat Belege dafür gefunden, dass Enterovirus-Infektionen in einem frühen Lebensalter – bevor Autoimmunreaktionen eingesetzt haben – den Organismus zur Produktion von T-Regs anregen. Diese Zellen zirkulieren bis ins Erwachsenenalter im Körper, unterdrücken die Bildung Autoimmunreaktionen vermittelnder T-Lymphozyten und schützen so vor Typ-1-Diabetes. Ist die Bauchspeicheldrüse aber infolge von Autoimmunprozessen bereits

entzündet, wie es bei den älteren NOD-Mäusen in unseren Experimenten wohl der Fall war, dann können die Viren offenbar leichter in die Inselzellen eintreten, sie zerstören und Diabetes auslösen. Es hängt mithin vom Alter der Nager ab, ob die Infektion mit den Erregern vor Diabetes schützt oder ihn begünstigt.

Vorausgesetzt, ähnliche Prozesse spielen sich bei Menschen ab, die genetisch bedingt zu Diabetes Typ 1 neigen – wie können wir diese Überlegungen dann nutzen, um ihnen zu helfen? Niemand wünscht sich die alten Zeiten mangelnder Hygiene zurück. Aber das ist auch gar nicht nötig. Die Erfahrungen mit dem Polio-Impfstoff zeigen, dass die Entwicklung sicherer und wirksamer Enterovirus-Vakzinen möglich ist.

Das Immunsystem vorbeugend gegen den Virenangriff wappnen

Antivirale Impfstoffe gibt es grundsätzlich in drei Varianten: als abgeschwächten Lebendimpfstoff, als Totimpfstoff und als Toxoidimpfstoff. Lebendimpfstoffe wurden ursprünglich hergestellt, indem man das betreffende Virus zunächst bestimmte Zellen oder ein Wirtstier passieren ließ, wobei sich seine krank machende Wirkung abschwächte. Solche Vakzinen erzeugen den stärksten Immunschutz, weil sich die aktiven Viren im Körper vermehren und eine normale Immunreaktion hervorrufen. Der Nachteil: Die Erreger können rasch mutieren und dabei wieder gefährlicher werden. Mit Hilfe der Gentechnik lassen sich heute bestimmte Bereiche im Virusgenom verändern oder herauschneiden, um die Wahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis zu minimieren, doch ein Restrisiko bleibt. Bei den Totimpfstoffen werden die Viren inaktiviert, so dass sie sich nicht mehr vermehren können, aber immer noch eine gewisse Immunität vermitteln. Allerdings ist der Immunschutz schwächer, und die Impfung muss regelmäßig aufgefrischt werden, weil die inaktivierten Erreger im Körper nicht überdauern. Die Toxoidimpfstoffe schließlich sind eine Untergruppe der Totimpfstoffe; sie enthalten nur jene Teile eines Virus, von denen bekannt ist, dass sie das Immunsystem zur Produktion von Antikörpern anregen.

Wie aus den Studiendaten hervorgeht, wird Typ-1-Diabetes offensichtlich nicht nur von einem einzigen oder einigen wenigen Enterovirus-Typen getriggert. Ebenso wissen wir, dass die Krankheit historisch immer dann selten auftrat, wenn Enterovirus-Typen nahezu überall vorkamen. Deshalb sollte ein Mehrfachimpfstoff mit multiplen Enteroviren den besten Immunschutz vermitteln. Anfangs könnte man aus Sicherheitsgründen einen Totimpfstoff verwenden. Später ließe sich zwecks stärkerer Immunisierung ein stark abgeschwächter Lebendimpfstoff einsetzen.

Eine solche Vakzine gegen Diabetes Typ 1 ist sogar schon in Entwicklung. Hyötys Team arbeitet zusammen mit dem finnischen Pharmaunternehmen Vactec Oy an einem Impfstoff gegen einen einzelnen Coxsackie-B-Virus-Typ. Nachdem die Forscher untersucht haben, inwieweit sich damit Typ-1-Diabetes bei Mäusen verhindern lässt, soll der Totimpfstoff voraussichtlich noch in diesem Jahr

auf sichere Anwendbarkeit bei Erwachsenen geprüft werden. Bis man ihn bei Kindern daraufhin testen kann, ob er vor Diabetes schützt, dürften noch mindestens zehn Jahre ins Land gehen. Angesichts dessen, dass wahrscheinlich etliche Enteroviren-Stämme daran mitwirken, die Krankheit auszulösen, bleibt nur zu hoffen, dass das Ziel richtig gewählt wurde, damit der Impfstoff die Häufigkeit von Diabetes Typ 1 tatsächlich deutlich senkt.

Darüber hinaus gibt es viele Bemühungen, die Symptome der Zuckerkrankheit einzudämmen, sobald sie ausgebrochen ist. Paolo Fiorina vom Boston Children's Hospital und seine Kollegen haben bei Mäusen gezeigt: Die Krankheit lässt sich zurückdrängen, indem man den Tieren Stamm- und Vorläuferzellen verabreicht, die mit Prostaglandinen behandelt wurden. Denn die Prostaglandin-Behandlung führt dazu, dass die Zellen vermehrt das Molekül PD-L1 herstellen, das an der Hemmung der Immunantwort mitwirkt und somit Autoimmunreaktionen dämpfen kann. Eine andere Gruppe um Denise Faustman vom Massachusetts General Hospital untersucht, inwieweit ein Lebendimpfstoff gegen Tuberkulose namens Bacille Calmette-Guérin (BCG) auch gegen Diabetes wirkt. Mehrere Forschergruppen in den USA und in Großbritannien konzentrieren sich wiederum auf eine Immunisierung mit Hilfe von Proinsulin, einer Vorstufe von Insulin. Laut Arbeiten einer Gruppe um Mark Peakman vom King's College London, die 2017 veröffentlicht wurden, hilft ein Proteinfragment des Proinsulins bei einem neu diagnostizierten Typ-1-Diabetes. Alle zwei bis vier Wochen in die Haut der Patienten injiziert, verhindert das Proteinfragment, dass die Zerstörung der Inselzellen fortschreitet – offenbar, indem es die Immuntoleranz des Organismus verbessert und somit Autoimmunreaktionen entgegenwirkt.

In den USA diagnostizieren Ärzte jedes Jahr 40 000 neue Diabetes-Typ-1-Erkrankungen; in Deutschland sind es allein bei den unter 20-Jährigen jährlich bis zu 3700. Impfstoffe werden die Krankheit zwar niemals völlig ausrotten, denn einige Menschen bekommen sie offenbar allein auf Grund ihrer genetischen Veranlagung. Es bleibt daher wichtig, die Behandlungsmethoden weiterzuentwickeln und so die Lebensqualität von Patienten zu verbessern, die nicht mehr selbst Insulin herzustellen vermögen. Doch auch wenn nicht alle Betroffenen mit Impfstoffen geschützt werden können, wird eine effektive Vakzine dennoch sehr vielen Menschen ein besseres Leben ermöglichen. Millionen könnten profitieren, wenn es uns gelänge, die Krankheit wieder so selten zu machen, wie sie es einst war. ◀

QUELLEN

Alhadj Ali, M. A. et al.: Metabolic and Immune Effects of Immunotherapy with Proinsulin Peptide in Human New-Onset Type 1 Diabetes. In: *Science Translational Medicine* 9, eaaf7779, 2017

Ben Nasr, M. et al.: Prostaglandin E2 Stimulates the Expansion of Regulatory Hematopoietic Stem and Progenitor Cells in Type 1 Diabetes. In: *Frontiers in Immunology* 9, 1387, 2018

Drescher, K. M. et al.: Enteroviruses, Hygiene and Type 1 Diabetes: Toward a Preventive Vaccine. In: *Reviews in Medical Virology* 25, S. 19–32, 2015

Spektrum PLUS⁺

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

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

- Download des Monats im September: **Spektrum** KOMPAKT »Elektromobilität«
- Leserexkursion zum Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen am 24. August 2018
- Leserexkursion zu EUMETSAT am 14. September 2018 in Darmstadt
- Ermäßigter Preis für die Hürtiggruten-Reise »Zauber des Nordlichts« im März 2019
- Reduzierter Teilnehmerpreis auf ausgewählte Reisen aus dem Programm von birdingtours
- Redaktionsbesuch bei **Gehirn&Geist** am 12. November 2018 in Heidelberg
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung:

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

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM 40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Tiefenschwindel oder Lebenshilfe – was bringt Psychologie?

Wann? 27. September 2018, 19.30 Uhr | **Wo?** Urania Berlin

In diesem ebenso fundierten wie amüsanten Vortrag erklärt **Gehirn&Geist**-Redakteur Steve Ayan, was Psychologie ist, wo ihre Stärken und Schwächen liegen sowie was ihre Ergebnisse uns nützen.

Der Ursprung des Lebens auf der Erde

Wann? 26. Oktober 2018, 19.30 Uhr | **Wo?** Urania Berlin

In seinem Vortrag beleuchtet Online-Redakteur Lars Fischer, was wir heute über die chemische Evolution wissen – und was nicht.

Tickets und Anmeldungen:

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

TIERMUMIEN DINO, MAMMUT & CO

Versteinerte Haut- und Muskelreste, mumifizierte Gedärme – nur selten überdauerten Gewebe und Organe urgeschichtlicher Tiere. Doch jeder neue Fund bereichert unser Wissen um ihre Lebenswelt vor Zehntausenden von Jahren.



SERIE Mumien

Teil 1: **September 2018**
Dino, Mammut & Co.
Wilfried Rosendahl und Doris Döppes

Teil 2: **Oktober 2018**
Fürsorge bis ins Jenseits
Stephanie Zesch

Opfer für die Andengötter
Stephanie Zesch

Teil 3: **November 2018**
Unversehrt bis zum Jüngsten Gericht
Amelie Alterauge



Der promovierte Paläontologe **Wilfried Rosendahl** ist Direktor an den Reiss-Engelhorn-Museen und des Curt-Engelhorn-Zentrums für Kunst- und Kulturgeschichte. Dort leitet er zudem das German-Mummy-Project. Die promovierte Paläontologin **Doris Döppes** ist wissenschaftliche Sammlungsleiterin in der Abteilung Weltkulturen und Umwelt an den Reiss-Engelhorn-Museen.

» spektrum.de/artikel/1580876



Als »Leonardo« erlangte dieses im US-Bundesstaat Montana entdeckte Fossil eines jungen Hadrosauriers (*Brachylophosaurus canadiensis*) Berühmtheit. Nach seinem Tod mumifizierten Teile des Kadavers, bevor sie von Sediment bedeckt wurden und allmählich versteinerten.

»Die angenehme Vorstellung, in 20 000 Jahren könnte Sibirien statt vom Eis von Orangen- und Zitronenbäumen bedeckt sein, macht mir schon jetzt Vergnügen«, schrieb die Zarin Katharina die Große dem französischen Philosophen und Schriftsteller Voltaire, nachdem 1771 Teile eines Nashorns im Norden Russlands zu Tage kamen. Schon seit Ende des 17. Jahrhunderts waren immer wieder Überreste von Elefanten entdeckt worden. Die Herrscherin sah darin ein Zeichen, dass es in Sibirien einst warm gewesen sein musste, und das könnte eines Tages wieder so sein. Der Brieffreund hingegen vermutete, ein Inder habe irgendwann ein Rhinoceros ins kalte Land gebracht. Wie wir heute wissen, irrten beide: Wollhaarnashorn und Mammut lebten in eiszeitlichen Landschaften. Ihre Kadaver waren durch das schnelle

AUF EINEN BLICK DIE ÄLTESTEN MUMIEN DER WELT

- 1 Weltweit sind Forschern bislang nur fünf versteinerte Dinosauriermumien bekannt, zudem gut 60 Mumien eiszeitlicher Säugetiere in Permafrostböden oder Erdwachslagerstätten.
- 2 Damit ein solcher Glücksfall eintritt, musste der Tierkadaver zunächst rasch mumifizieren und dann vollständig in Sediment eingebettet werden.
- 3 Bei Dinosauriermumien erfolgte im Lauf von Jahrmillionen ein Austausch organischer Substanz durch Mineralien; die Mumien etwa von Mammuts oder Wollhaarnashörnern wurden meist durch Permafrost vor Zersetzung bewahrt.

Einfrieren im Permafrost auf natürliche Weise mumifiziert worden.

Bis heute kamen nur wenige vollständige Zeugen der Urzeit ans Licht, denn auch Mumien zerfallen, wenn sich die Erhaltungsbedingungen ändern. Bleibt organische Substanz über Zehntausende von Jahren erhalten, ist das stets eine Sensation. Fasst man den Begriff Mumie weiter, stammen die ältesten Exemplare sogar aus der Kreidezeit – der Zeit der Dinosaurier.

Im August 1908 suchten die Fossilienjäger Charles H. Sternberg und seine Söhne in den Badlands Wyomings nach lukrativen Versteinerungen. Wenige Jahrzehnte zuvor waren dort in der so genannten Lance-Formation Dinosaurierfossilien entdeckt worden. Heute wissen Paläontologen: Die weitläufige, bis zu 750 Meter dicke Felsstruktur aus Sandstein, Tonsteinen und Mergel entstand während der Oberkreide am Rand eines Flachmeers, etwa wenn Zuflüsse bei Hochwasser Sedimente ablagerten.

Mumie oder nicht?

In rund 70 Millionen Jahre alten Sandsteinschichten stießen die Sternbergs auf einen Entenschnabeldinosaurier (fachlich: Hadrosaurier), dessen Skelett bis auf die Hinterfüße, Teile des Beckens sowie des Schwanzes vollständig war. Zudem lagen die fossilen Knochen im anatomischen Verband, was nicht nur den Wert des Objekts steigerte – es verriet auch, dass sich kein Raubtier am Kadaver gütlich getan haben konnte. Die größte Überraschung aber waren fossile Hautpartien – oft mit ein bis fünf Millimeter großen Hornschuppen besetzt – im Halsbereich, an der Kehle, an den Vorderbeinen bis zu den Fingern, in der Brustregion sowie am Rumpf. Viele dieser Abdrücke lagen den Knochen eng auf, manche befanden sich aber auch in den Körperbereichen dazwischen.

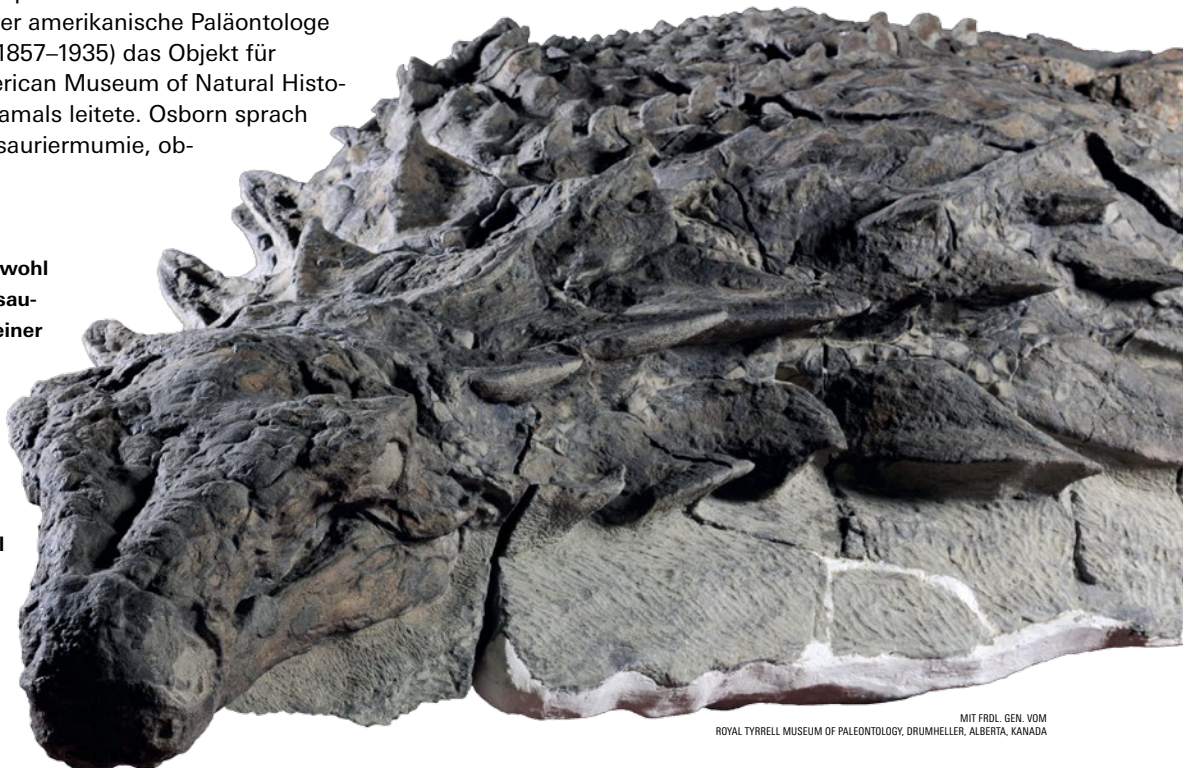
Beeindruckt erwarb der amerikanische Paläontologe Henry Fairfield Osborn (1857–1935) das Objekt für 2000 Dollar für das American Museum of Natural History in New York, das er damals leitete. Osborn sprach erstmals von einer Dinosauriermumie, ob-

wohl in diesen Fossilien keine organischen Substanzen mehr vorhanden sind, wie man es von »echten« Mumien her kennt. Im Lauf von Jahrmillionen wurde sie, wie bei allen Versteinerungen, mineralisiert. Gegen die Bezeichnung ließe sich nach heutiger Kenntnis einwenden, dass es sich bei den erhaltenen Hautstrukturen auch um fossile Bakterienbeläge handeln könnte, welche den Kadaver in einem ersten Stadium der Verwesung bedeckten und Oberflächenformen nachzeichneten. Gleichwohl trifft der Begriff Mumie den Charakter dieser Fossilien am besten, die noch nach geologischen Zeiträumen Strukturen von Weichteilgeweben zeigen.

Schon 1910 entdeckten die Sternbergs in der Lance-Formation eine weitere Hadrosauriermumie; beide Exemplare werden inzwischen der Art *Edmontosaurus annectens* zugeschrieben. Weil der Schwanz diesmal erhalten war, ließ sich die Länge des Tiers zu seinen Lebzeiten auf etwa fünf Meter schätzen. Auch dieses Exemplar besaß noch Hautabdrücke mit teilweise deutlich erkennbaren Schuppenstrukturen, zudem waren versteinerte Nadeln, Zweige und Nadelbaumzapfen im Bauchbereich, wohl Reste des Mageninhalts, zu sehen. Sie passen zu dem, was Forscher über die Lebensweise der Edmontosaurier herausfanden. Die Tiere bewohnten bewaldete Gebiete an Küsten und Flussdeltas. Wie alle Hadrosaurier waren ihre Hinterläufe sehr viel größer und kräftiger als die Vorderbeine. Diesmal erhielt das Senckenberg Naturmuseum in Frankfurt am Main den Zuschlag.

Aus der Körperhaltung der versteinerten Tiere schließen Forscher auf die Umgebung, in der sie zu Tode kamen: Die Schädel sind nach hinten gezogen, wie man es bei mumifizierten Kadavern in Wüstenregionen beobachtet. Denn bei sehr trockener Luft und starker Sonneneinstrahlung trocknet der Körper schnell aus, so dass Muskeln und Seh-

Die ungewöhnlichste und wohl am besten erhaltene Dinosauriermumie wurde 2011 in einer Ölsandmine in Kanada entdeckt: der mit Panzerplatten erhaltene vordere Körperteil eines Ankylosauriers. Mehr als 7000 Stunden benötigte seine Präparation im Royal Tyrrell Museum in Alberta (Kanada). Am Ende ließ sich sogar eine rot-bräunliche Färbung der hautüberzogenen Platten erkennen.



MIT FRDL. GEN. VDM
ROYAL TYRRELL MUSEUM OF PALEONTOLOGY, DRUMHELLER, ALBERTA, KANADA

nen schrumpfen – und im Nackenbereich den Kopf nach hinten ziehen. Gleichzeitig hemmen diese klimatischen Bedingungen die Verwesung, denn Mikroben benötigen Feuchtigkeit.

Experten gehen davon aus, dass die Kadaver der beiden Entenschnabeldinosaurier wie beschrieben mumifizierten, bald darauf von Hochwasser erfasst und am Rand eines Flachmeers abgelagert wurden. Dann bedeckte sie feinkörniges Sediment, und der Versteinerungsprozess beziehungsweise die Mineralisierung von Knochen und Gewebe begann. Im Lauf von Jahrmillionen geriet die Bodenschicht in die Tiefe und wurde allmählich mitsamt der mineralisierten Mumie durch Druck zu Gestein verfestigt.

Wie selten diese besonderen Umstände waren, macht eine Zahl deutlich: Bis heute kamen lediglich drei weitere in Erhaltung und Vollständigkeit vergleichbare Dinosauriermumien zu Tage. 2002 zog erneut ein Fossiliensammler das große Los, als er in einem schmalen Canyon im US-Bundesstaat Montana auf »Leonardo« stieß, das 77 Millionen Jahre alte Mumiefossil eines *Brachylophosaurus canadiensis* (siehe Bild S. 41). Auch dieser Hadrosaurier lebte in Uferzonen und weidete tief hängende Zweige ab. Das bestätigten fossile Reste von mehr als 30 verschiedenen Pflanzen wie Koniferen und Magnolienbäumen in Magen und Verdauungstrakt.

Daspletosaurus gegen »Leonardo«

Sechs Jahre lang untersuchten gut 100 Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen den einzigartigen Fund, darunter der amerikanische Pionier der modernen Mumienforschung Arthur Aufderheide (1922–2013). Ihren Erkenntnissen nach starb der sieben Meter lange Saurier mit etwa sechs Jahren. Röntgenbilder offenbarten unter anderem eine zum Todeszeitpunkt noch nicht verheilte Bisswunde auf Leonardos rechter Seite, direkt hinter dem Vorderbein. Die Forscher vermuteten, dass ihn ein *Daspletosaurus* angegriffen hat, ein Raubsaurier aus der Familie der Tyrannosaurier. »Leonardo« konnte wohl entkommen, starb aber bald darauf aus heute nicht mehr zu klärendem Grund. Danach wiederholte sich der schon geschilderte Prozess von Mumifizieren, Einbetten und Versteinern.

»Dakota«, ein 67 Millionen Jahre alter Hadrosaurier, legte die Latte 2006 noch höher. Ein Student hatte einige Jahre zuvor in den Schichten der Hell Creek Formation in North Dakota Knochen entdeckt, doch was das Team des britischen Paläontologen Phillip Manning von der University of Manchester frei legte, übertraf alle Erwartungen. Nicht allein Hautabdrücke begeisterten die Experten, sondern vereinzelt auch versteinerte Muskeln. Ein übergroßer Computertomograf der NASA offenbarte unter anderem, dass der Schwanz noch nicht mit dem letzten Wirbel endete, sondern darüber hinaus weiches Gewebe aufwies. Dakota zeigte, dass *Edmontosaurus annectens* bis zu zwei Meter größer war als bis dahin angenommen.

Bei der jüngsten, 2011 in einer kanadischen Ölsandmine entdeckten fossilen Mumie handelt sich erstmals um einen Ankylosaurier (siehe Bild links). Auf vier vergleichs-



AUS PFENNIGER, E. W. MAMMUTLEICHEN UND URINAL DREIHEISEN IN NORDOST-SIBIRIEN, F. A. BRUCHIUS, LEPTZIG 1926

1901 entdeckten sibirische Jäger am Fluss Beresowka die Mumie eines 35 bis 40 Jahre alten Mammutbullen, die schmelzendes Inlandeis frei gegeben hatte.

weise kurzen Beinen durchstreifte dieser massige Pflanzenfresser fruchtbare Flussauen; knöcherne, von Haut überzogene Panzerplatten schützten ihn gegen Räuber. Als er vor etwa 112 Millionen Jahren aus unbekanntem Grund starb, trocknete sein Kadaver ganz oder teilweise aus. Sicherlich schon bald darauf riss Hochwasser die Mumie in den Fluss, der sie ins Meer trug, wo Sediment sie begrub. Erhalten blieb der versteinerte, vordere Körperteil des zu Lebzeiten über fünf Meter langen Tiers. Ein Fossil, das immerhin 1,1 Tonnen auf die Waage brachte. Seine Präparation kostete Mark Mitchell vom Royal Tyrrell Museum in Alberta mehr als 7000 Stunden. Das Ergebnis ist ein eindrucksvolles Fossil, dessen Hautstrukturen sogar Hinweise auf eine rot-bräunliche Pigmentierung der Panzerplatten gaben.

Die ältesten »echten« Mumien der Erdgeschichte sind im Vergleich zu diesen Fossilien sehr jung: Mammuts, Wollhaarnashörner und Höhlenlöwen lebten in der Steppe der letzten Eiszeit. Nicht Hitze, sondern Temperaturen unter dem Gefrierpunkt hatten alle bei der Verwesung aktiven Mikroorganismen gestoppt; bis heute ganzjährig gefrorene Böden erhielten diesen Zustand aufrecht. Dazu müssen Arktis oder Antarktis nahe sein, doch nicht überall sind die Bedingungen ideal. So reicht der Permafrost in Nordrussland bis in eine Tiefe von mehr als 1000 Metern, in Skandinavien sind es maximal 20 Meter. In den Sommermonaten tauen die Flächen nur wenige Meter auf.

1692 erwähnte der Diplomat und spätere Amsterdamer Regent Nicolaas Witsen in seinem Reisebericht »Noord en

Oost Tartarije«, zu Deutsch Nord- und Osttatri, erstmals über mit Haut und Haar erhaltene Tierfunde, vier Jahre später beschrieb ein Russe namens Ludloff die Knochen eines von sibirischen Jägern »mamantu«, das heißt »Erdbewohner« genannten Tiers. Der Göttinger Anatom Johann Friedrich Blumenbach (1752–1840), ein Mitbegründer der Zoologie, machte daraus 1799 bei der Beschreibung einer ausgestorbenen Elefantenart die Bezeichnung Mammut.

Im selben Jahr entdeckte der Elfenbeinsammler Ossip Schumakow einen Mammutkadaver, den ein Erdbeben im Delta des sibirischen Flusses Lena teilweise frei gelegt hatte. Als Michael Adams, Botaniker an der Kaiserlich-Russischen Akademie der Wissenschaft, ihn 1806 bergen wollte, hatten Aasfresser nur wenig außer den Knochen

Vor etwa 41000 Jahren ertrank dieses Mammutbaby in einer Schlammulde, 1977 kam seine Kältemumie zu Tage. »Dima« starb im Alter von acht Monaten. Sein Herz (rechts) war größer, leistungsfähiger und besser durchblutet als das heutiger Elefantenbabys – eine Anpassung an die Klimaverhältnisse der letzten Eiszeit.



WILFRIED ROSENDAHL, MANNHEIM



WILFRIED ROSENDAHL, MANNHEIM

übrig gelassen. Es gelang ihm aber, daraus das Skelett zu rekonstruieren – eine Pionierleistung.

Bis heute kamen seitdem nicht nur Mammutknochen zu Tage – 1970 ein ganzer Friedhof von etwa 156 Tieren, die vermutlich als Herde beim Überqueren des Flusses ertrunken waren –, sondern auch mumifizierte Kadaver. Die Weichteilerhaltung ist einer Gefrierdrying-Technologie zu verdanken. Auf Grund schwankender Temperaturen kommt es aber mitunter nicht zur vollständigen Entwässerung bis in die letzte Körperzelle. Dann findet man selbst nach 40 000 Jahren gelegentlich sogar noch Blutreste.

Besonders spektakuläre Mumien sind die in den letzten Jahrzehnten entdeckten Jungtiere. Die erste wurde 1948 in einer Goldmine in Fairbanks (Alaska) gefunden: der Kopf mit Rüssel, das Schulterblatt und ein Vorderbein. »Effie« war etwa neun Monate alt gewesen, als sie vor rund 21 000 Jahren starb. Auch diese Mumie ist im American Museum of Natural History in New York zu bestaunen.

Im Sommer 1977 entdeckte ein Planiererraupenfahrer während der Goldsuche in Ufernähe des Kirgijach (Sibirien) ein weiteres Mammutbaby. »Dima« lag auf seiner linken Seite, unter zwei Meter gefrorenem Schlamm begraben. Der kleine Bulle war nur acht Monate alt geworden. Die Umstände seines Todes lassen sich recht gut rekonstruieren. Vermutlich rutschte er vor etwa 41 000 Jahren in ein Schlammloch. Pollen verraten, dass dies wohl im Herbst geschah. Eine Verletzung am rechten Vorderfuß verhinderte, dass sich der Jungbulle aus eigener Kraft befreite. In seiner Panik schluckte Dima Matsch und Haare. Völlig erschöpft ließ er schließlich den Rüssel sinken – und erstickte. Der Kadaver weist keine Bissspuren auf, vermutlich hat das Muttertier also noch eine Zeit lang Raubtiere und Aasfresser verschreckt.

Das kranke Mammut »Dima«

Für Paläontologen war diese Tragödie ein Glücksfall: Als Kältemumie im Permafrostboden überstand die Leiche die Jahrtausende fast vollständig. Das Schild der Planiererraupe hatte allerdings Teile der rechten Körperseite zerstört. Mit zirka 104 Zentimeter Höhe brachte der Jungbulle zu Lebzeiten wohl etwa 100 Kilogramm auf die Waage, die Mumie wog noch 68. Der Rüssel maß 76 Zentimeter, bei ausgewachsenen Tieren hätte er gut zwei Meter lang werden können, wie man aus anderen Mumien schließen kann. Die Stoßzähne waren schon entwickelt, hatten die Haut aber noch nicht durchstoßen. Einige Wollhaare waren erhalten, zudem ein kurzer Schwanz, wie er von altsteinzeitlichen Höhlenmalereien aus Frankreich überliefert ist.

Überdies konservierte das Eis Muskeln, innere Organe und sogar Überreste von Parasiten: Unter dem Mikroskop zeigten sich Fliegen und Einzeller im Darm sowie Eier von Schmarotzern im Fleisch. Dima hatte also nicht nur an einer Verletzung gelitten, sondern war auch in einem schlechten Allgemeinzustand gewesen. Noch intakte rote und weiße Blutkörperchen gewannen Forscher aus seinem

Die Rüsselspitze eines in Sibirien gefundenen Mammut wurde vom Rest des Kadavers abgetrennt, so dass man beim Blick von unten auf die Nasenlöcher blickt. Deutlich sind die beiden Fortsätze zu erkennen, wie sie auch heutige Elefanten bei der Nahrungsaufnahme zum Greifen benutzen.



Unterleib, sie glichen denen heutiger Elefanten. Sein Herz, anhand computertomografischer Aufnahmen rekonstruiert, bestätigte sogar die Lehrmeinung: Mammutts waren enger mit Asiatischen Elefanten verwandt als mit Afrikanischen. Insgesamt war dieses Organ in der Eiszeit aber größer, leistungsfähiger und besser durchblutet als heutzutage – eine Anpassung an die Bedingungen der letzten Eiszeit.

Bildgebende Verfahren aus der diagnostischen Medizin erweisen sich in den letzten Jahren immer wieder als sehr hilfreich. Sie ermöglichen einen ersten Blick ins Körperinnere, ohne das Skalpellen anzusetzen und ohne die Mumie zu beschädigen. Die Bilddaten helfen dann auch bei der Planung einer Autopsie, um die unwiederbringliche Zerstörung der Mumie zu begrenzen. Zum Beispiel ließ sich mittels Computertomografie im Darm des 2008 geborgenen, vier bis fünf Monate alten Bullen »Khroma« Muttermilch nachweisen. Das liefert einen ersten Anhaltspunkt, wie lange Mammutbabys gesäugt wurden (bei heutigen Elefanten sind es bis zu zwei Jahre).

Zuvor kamen weitere naturwissenschaftliche Verfahren zum Einsatz. Um den Fund in einem französischen Museum auszustellen, galt es die mit 45 000 bis 50 000 Jahre bislang älteste Mumie eines Mammutbabys gegen drohenden Zerfall zu schützen. Sie wurde noch gefroren nach Grenoble gebracht. Wissenschaftler der auf Konservierung und Restaurierung spezialisierten Einrichtung ARC-Nucléart in Grenoble setzten sie Gammastrahlen aus, die Mikroben verlässlich abtöten. Zuvor entnahmen sie verschiedenen Körperteilen Gewebeproben, denn die Strahlen schädigen jedwede DNA. Für die »Durchleuchtung« im Computertomografen hat man den Leichnam sodann langsam aufgetaut.

Inzwischen ist die Suche nach Mammutüberresten in Sibirien zu einem lukrativen Geschäft geworden – die urzeitlichen Stoßzähne fallen nicht unter das internationale

Verbot des Elfenbeinhandels. Dabei kommen auch andere Vertreter der eiszeitlichen Fauna ans Licht, beispielsweise 2015 Eismumien zweier Raubkatzenbabys.

Anhand der Position der Milchzähne und des Umstands, dass die Augen noch verschlossen waren, schätzten Zoologen ihr Lebensalter auf ein bis zwei Tage. An »Uyan« und »Dina«, benannt nach dem Fundort, waren Schnurrhaare und einziehbare Krallen noch gut zu sehen, im Computertomogramm dann auch Organe und Gehirn. Eingedrückte Schädel, jedoch keine Bissspuren, dazu leere Mägen und der erstaunlich gute Zustand der Mumien – vermutlich starben die Tiere, weil das Versteck, in dem ihre Mutter sie deponierte, um auf die Jagd zu gehen, in sich zusammenbrach. Vergleiche mit der Anatomie und der DNA heutiger afrikanischer Löwen bestätigen die Vermutung: »Uyan« und »Dina« waren Höhlenlöwen (*Panthera spelaea*). Bei einem 2017 in derselben Region entdeckten, eineinhalb bis zwei Monate alten Jungtier steht diese anfängliche Zuordnung hingegen zur Diskussion: Das vor etwa 50 000 Jahren ebenfalls in seinem Versteck umgekommene Baby könnte auch ein Luchs gewesen sein; die Untersuchungen laufen noch.

Was Katharina die Große so begeistert und zu falschen Schlüssen veranlasst hatte, war ein weiterer markanter Großsäuger der eiszeitlichen Steppenlandschaft gewesen: ein Wollhaarnashorn (*Coelodonta antiquitatis*). Einst zogen

Dieses mumifizierte Höhlenlöwenbaby wurde 2015 zufällig bei der Suche nach Mammutstoßzähnen entdeckt. Bei dem Tier, das nur wenige Tage alt wurde, sind noch alle inneren Organe und sogar das Gehirn erhalten.

sie als Einzelgänger oder in kleinen Gruppen durch die Tundren; Höhlenmalereien und Knochenfossilien legen davon seit längerem Zeugnis ab. Nashornmumien aber sind äußerst selten, und das Exemplar, dessen Überreste 1771 in die Kunstkammer der Zarin in St. Petersburg gelangte, war der erste Fund seiner Art. Auch bei einer 1877 entdeckten zweiten Nashornmumie waren nur der Kopf und ein Bein erhalten. 1972 wurden Reste einer Nashornkuh gefunden: das fast vollständige Skelett sowie das rechte Hinterbein teilweise mit Haut und Haaren.

Ein letztes Mahl aus Gras und Löwenzahn

Außerdem waren diesmal auch die beiden aus Haarsubstanz bestehenden Hörner sowie als Mageninhalt gedeutete Substanzen konserviert worden. Demnach hatte das Tier vor seinem Tod 89 Prozent Gräser, 4,5 Prozent Korbblütler wie Löwenzahn, 2,5 Prozent Salbei oder Wermut und 4 Prozent sonstige Pflanzenarten gefressen. Eine weitgehend intakte Nashornmumie ergänzte dieses Nahrungsspektrum 2007 um beispielsweise Fichte, Kiefer, Weide, Blutwurz, Wegwarte, Spitzwegerich oder Baldrian – und vervollständigte so auch das Wissen um die eiszeitliche Flora. In diesem Fall gibt es zudem eine plausible Annahme über die Todesursache vor 41 000 Jahren: Der Boden war aufgetaut, und eine mit Schlamm gefüllte Spalte wurde dem Tier zum Verhängnis.

2015 kam schließlich »Sascha« hinzu, ein etwa zur Hälfte erhaltenes Jungtier, das vor rund 45 000 Jahren starb (siehe Rekonstruktion rechts außen). Seine Mumie trug teilweise noch hellbraunes Fell und zeigte die Ansätze der beiden Hörner. Über den Zahnstatus konnte ein internationales Forscherteam unter der Leitung der Yakutischen Akademie der Wissenschaften »Saschas«

Lebensalter auf 12 bis 14 Monate bestimmen. Ein Computertomogramm des Kopfes zeigte, dass einige Weichteilstrukturen im Innern erhalten sind, darunter die Zunge, das rechte Auge sowie Teile des Gehirns. Bislang gab der Permafrostboden nur wenige vollständige Mumien von Mammuts und Wollhaarnashörnern frei. Dass sich ihre Zahl in den letzten Jahren deutlich erhöhte, mag unter anderem Folge systematischer Suchen aus kommerziel-



Spielarten der natürlichen Konservierung

Mumien des Wollhaarnashorns findet man nicht nur im Permafrost, sondern auch in Lagerstätten von Ozokerit, auch Erdwachs, Bergwachs und Bergtalg genannt. Das braungelbe bis grünschwarze wachsartige Gemisch aus festen Kohlenwasserstoffen der Paraffine entsteht zum Beispiel bei der Oxidation von Erdöl, wenn leichtflüchtige Bestandteile verdunsten.



MIT FRIDL. GEN. DER FINDINGS OF THE NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON, 2010

Zersetzung, und der Körper mumifizierte. Das Ozokerit-Vorkommen in Starunia war so ergiebig, dass Erdwachs unterirdisch abgebaut wurde, um daraus nach weiterer Aufbereitung beispielsweise Möbelpolitur zu machen oder es bei der Herstellung von Vaseline zu verwenden. 1907 stießen Arbeiter erstmals auf natürlich mumifizierte Mammut- und Wollhaarnashornreste, 1929 erbrachte eine gezielte Grabung in fast 13 Meter Tiefe die nahezu vollständige und sehr gut erhaltene Mumie einer jungen Wollhaarnashornkuh. Narben in der lederartig gegerbten Haut stammen wahrscheinlich von Kämpfen mit Artgenossen.

Nach der Bergung wurden Abgüsse des Kadavers von Starunia genommen, um auf der damit hergestellten »Dermoplastik« die konservierte Haut des Nashorns aufzubringen. Von dem kompletten Kadaver gibt es heute nur noch wenige Abgüsse, unter anderem im Naturhistorischen Museum in London.

REKONSTRUKTION: REMIE BAKKER; FOTO: MARC STEINMETZ FÜR NATIONAL GEOGRAPHIC DE; MIT FRIDL. GEN. VON WILFRIED ROSENDAHL



Mumien wie jene aus der Ukraine inspirierten diese Rekonstruktion einer Wollhaarnashornkuh; »Sascha« bot die Vorlage für das Jungtier. Vor mehr als 40 000 Jahren lebten diese Giganten in der eiszeitlichen Steppe.

THE JESSE EARL HYDE COLLECTION, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY (OVRUL DEPARTMENT OF GEOLOGICAL SCIENCES (HTTP://CASU.ABS.CASE.EDU/HYDE_COLLECTION/))



Mumie einer Wollhaarnashornkuh kurz nach ihrer Entdeckung 1929 in der Erdwachsagerstätte von Starunia (Ukraine).

Die bekannteste Fundstelle für Ozokerit-Mumien liegt in den östlichen Karpaten nahe dem heute ukrainischen Ort Starunia. Das Erdwachs entstand im Miozän, also vor etwa 20 Millionen Jahren, und stieg in Ablagerungen der letzten Eiszeit auf. Umschloss es einen Kadaver, verhinderten der Luftabschluss und ein geringer Salzgehalt im Ozokerit dessen

Theoretisch könnte auch Naturasphalt, gleichfalls ein aus dem Erdöl entstandenes festes Gemisch von Kohlenwasserstoffen, Körper konservieren, doch sein Salzgehalt ist selten hoch genug. Deshalb kamen in den berühmten Asphalt-sümpfen von Rancho La Brea in Los Angeles bislang zwar 1,5 Millionen Knochen aus der Zeit von 40 000 bis 10 000 Jahren vor heute zu Tage, nur selten aber Haare, Krallen und Hautreste.

lem oder wissenschaftlichem Interesse sein. Zudem macht sich aber der Klimawandel unserer Zeit bemerkbar: Der eisige Boden taut alljährlich über einen immer längeren Zeitraum auf; daher geraten auch tiefere Schichten unter diesen Einfluss. Darin liegt zwar eine Chance auf neue Funde, doch an der Luft drohen die jahrtausendlang konservierten Mumien schnell zu zerfallen. Wie viele mögen schon in den Weiten Sibiriens oder Kanadas aufgetaut sein, um endgültig zu verwesen? ◀

QUELLEN

- Guthrie, R. D.:** Frozen Fauna of the Mammoth Steppe: The Story of Blue Babe. The University of Chicago Press, Chicago 1990
- Lister, A., Bahn, P.:** Mammut: Riesen der Eiszeit. Thorbecke, Ostfildern 2009
- Manning, P.:** Grave Secrets of Dinosaurs. Soft Tissues and Hard Science. National Geography, Washington D. C. 2008
- Wieczorek, A., Rosendahl, W.:** Mumien – der Traum vom ewigen Leben. Philipp von Zabern, Darmstadt 2014

1918

NEUES AUS DER REGENMACHERFORSCHUNG

»Die schon vor Jahrzehnten unternommenen Versuche, Nebel durch elektrische Entladungen niederzuschlagen, haben zu keinen Ergebnissen gefunden. Nun berichtet aber *L'industrie Electrique*, daß [Versuche] in Australien zu befriedigenden Ergebnissen geführt haben. Die in der Atmosphäre in Form von Wolken schwebenden Wasserpartikeln erhalten elektrische Ladung, und es erscheint technisch durchaus möglich, diese auf die Erde herabzu ziehen, [indem] man eine leitende Verbindung nach den Wolken herstellt. Bei den Versuchen hat man durch an Ballons angebrachte, mit 300 000 Volt gespeiste Röntgenröhren Wasserteilchen ionisiert. Solch Regen [dürfte] nicht billig werden. Die neuerdings mit allen Mitteln erstrebte Höchstausnutzung des Ackerbodens [ermöglicht aber] die Aufwendung höherer Kosten.« *Prometheus 1507, S. 443–444*

KÖNIG DUNGI UND DIE OUT-OF-BAYBLON-THESE

»Im südwestlichen Teil von Babylonien fand man vor einigen Jahrzehnten zwei Statuen [von] König Dungi I. Auf dem Schoß trägt jede eine Platte. Eine zeigt den Grundriß eines Gebäudes. Daneben ein Maßstab, [jedoch] stark beschädigt. Um so besser erhalten ist der, den die zweite Figur hält. Der Maßstab ist in 16 Teile geteilt, deren Länge zwischen 16 und 17 mm schwankt.



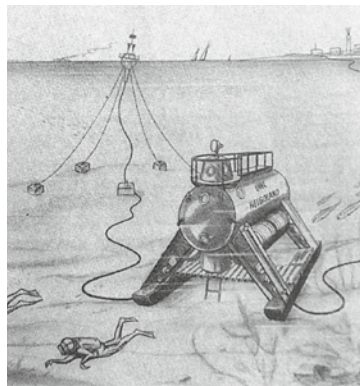
Statue des Königs Dungi I.

Es geht ein Streit, ob die Völkerheimat im Orient oder im hohen Norden zu suchen sei. Um [Ersteres] zu beweisen, [hat man] geschlossen, daß die babylonische Doppelelle aus der Länge eines Sekundenpendels für den 30. Breitengrad abgeleitet worden sei. Wenn die Babylonier fähig gewesen wären, ein so subtiles Instrument herzustellen, dann wären sie sicher gezwungen gewesen, ihre Unterteilungen der Elle sorgsamer auszuführen.« *Prometheus 1508, S. 447–448*

1968

MOBILES UNTERWASSERLABOR

»Die Biologische Anstalt Helgoland und das Institut für Flugmedizin der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt



Modellzeichnung der Unterwasserstation.

e. V. beabsichtigen, ein Unterwasserlaboratorium in der Nordsee einzusetzen. Der Ersteintritt ist für den Frühsommer 1969 vorgesehen. Das Laboratorium selbst ist als druckfester Zylinder bis zum Differenzdruck von 10 atm ausgelegt. Dies entspricht einer Wassertiefe von 100 m. Es ist aus Sicherheitsgründen in zwei Räume aufgeteilt, den Naß- und den Arbeits- bzw. Schlafräum. Mehrere Beobachtungsfenster im Naßteil ermöglichen es, das Geschehen im Meer zu beobachten. Das wird aber wegen der schlechten Sichtverhältnisse in der Nordsee nur von begrenztem Wert sein. Flut- und lenkbare Lufttanks gestatten den schwimmenden Transport des Laboratoriums und ermöglichen einen relativ leichten Standortwechsel. Das Laboratorium soll vier Wissenschaftlern

Unterkunft gewähren. Da die Atmosphäre in einem geschlossenen Kreislauf ständig regeneriert und verbrauchter Sauerstoff ergänzt wird, ist die Aufenthaltsdauer praktisch unbeschränkt. Aus Sicherheitsgründen sollen aber Sprechleitungen und Stromkabel sowohl nach dem Lande als auch zu einer oberhalb schwimmenden Tonne geführt werden. Sollten alle Verbindungen ausfallen, so läßt sich ein eingeschränkter Betrieb noch acht Tage aus der Notstrombatterie aufrechterhalten.« *Die Umschau 19, S. 593*

(Beim Ersteintritt vor Helgoland kamen zwei Taucher bei Außenarbeiten ums Leben. Zwischen 1972 und 1981 setzte das Helmholtz-Zentrum Geesthacht für Material- und Küstenforschung die Unterwasserstation in Nord- und Ostsee sowie im Nordatlantik ein. Es ist im Nautineum Stralsund zu besichtigen. D. Red.)

ANOMALE LEBENSFORMEN IM ATOLL

»Sehr aufschlußreiche Untersuchungen sind im Gebiet der französischen Atomversuche [im Mururoa-Atoll] angestellt worden. Das Gebiet erwies sich als außerordentlich arm an organischem Leben und erhöht radioaktiv, obwohl die Arbeiten erst drei Monate nach den [Tests] angestellt wurden. Außerdem fand man in großer Zahl anomale Individuen des Planktonkrebses *Pleuromamma piseki* F.; ihnen fehlten die Leuchtorgane. Anomale Individuen treten nur in dieser Ozeanregion auf, wobei sich deren Anteil mit wachsender Entfernung zum Versuchsort vermindert. Als Ursache [kommt] nur die mutagene Wirkung ionisierender Strahlung in Frage.« *Die Umschau 20, S. 637*



Gehen Sie mit **Spektrum** auf eine unvergessliche Leserreise

ERLEBEN SIE DIE FASZINIERENDE WELT DER VÖGEL

Sie wollten schon immer einmal den majestätischen Kaiseradler in Spanien oder den Eisvogel am Niederrhein sehen? Oder die vielfältige Landschaft und die verschiedenen Lebensräume des Mittleren Isartals kennen lernen und mit Glück und Geduld den seltenen Nachtreier beim Brüten entdecken?

Dann gehen Sie mit unserem Kooperationspartner birdingtours auf Reisen und freuen Sie sich auf unvergessliche Beobachtungen und beeindruckende Naturerlebnisse. Mit den ornithologischen Exkursionen von birdingtours in Deutschland und Europa bieten wir interessierten **Spektrum**-Lesern und Vogelguckern die Möglichkeit, sich für die Welt der Gefiederten zu begeistern, ihr Wissen mit einer kleineren Reisegruppe zu teilen und mit Hilfe der erfahrenen und fachkundigen Reiseleiter noch zu erweitern. Mit ihnen kommen Sie zu den schönsten Beobachtungsplätzen.



SÜDDEUTSCHLAND

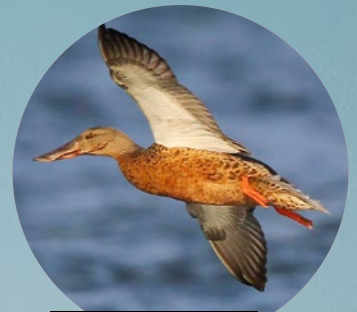
Das Mittlere Isartal bei Freising 3 Tage / 2 Nächte

Das Mittlere Isartal ist ein Vogelrastgebiet von großer Bedeutung. Unterschiedliche Lebensräume vom Niedermoor über Auwälder bis hin zu Baggerseen locken eine Vielzahl von Arten an, die hier rasten und überwintern. Wir besuchen das Gebiet an drei spannenden Tagen.

SPANIEN

Extremadura und Coto Doñana 9 Tage / 8 Nächte

Doñana und Extremadura – zwei Vogelparadiese im Südwesten Spaniens, die das Herz jedes Naturliebhabers höher schlagen lassen. Beobachten Sie in Europa selten gewordene Großtrappen oder den majestätischen Kaiseradler.



NORDDEUTSCHLAND

Niederrhein: Entenpracht und mehr! 3 Tage / 2 Nächte

Der Niederrhein ist bedeutender Rastplatz und wichtiges Überwinterungsgebiet für ziehende Vögel. Verfolgen Sie das Spektakel zehntausender Gänse und den Durchzug zahlreicher Watvögel.



INTERVIEW

EXTREMWETTER DURCH ERDERWÄRMUNG?

Ob der Klimawandel extreme und daher seltene Wetterphänomene verstärkt, lässt sich nur schwer belegen. Doch Wissenschaftler haben auf diesem Gebiet in den letzten Jahren Fortschritte gemacht. Die Meteorologin Daniela Jacob gibt einen Überblick über den Stand der Forschung.

» spektrum.de/artikel/1580880

Spektrum der Wissenschaft: Frau Professor Jacob, wie beraten Sie Bürgermeister und Firmenchefs, die sich vor extremen Wetterereignissen schützen möchten?

Prof. Dr. Daniela Jacob: Zunächst klären wir, ob sich aus den meteorologischen Messdaten schon eine Zunahme von Extremwerten herauslesen lässt. Da hat sich in den vergangenen Jahren viel verändert. Zum Beispiel hat die Zahl der Starkniederschlagstage pro Jahr in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in weiten Teilen Deutschlands deutlich zugenommen – im Mittel um mehr als 20 Prozent. Im zweiten Schritt prüfen wir mit Klimamodellen, ob eine Zunahme für die nächsten Jahrzehnte zu erwarten ist. Interessanterweise kommt es den meisten Partnern gar nicht darauf an, ob sich die Veränderungen auf den Klimawandel zurückführen lassen. Sie interessiert in erster Linie, worauf sie sich einstellen müssen.

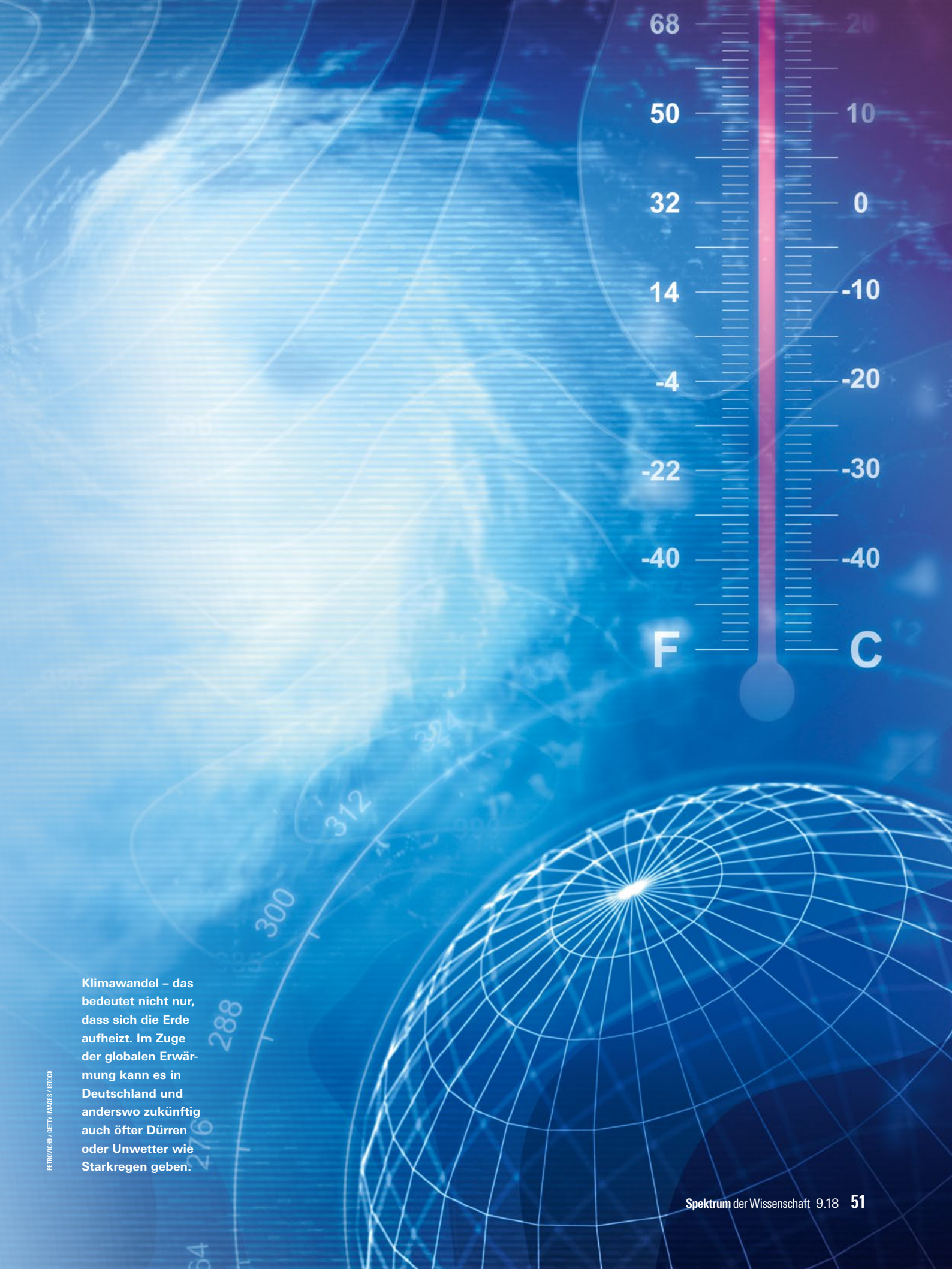
Woran soll es denn sonst liegen, wenn nicht am Temperaturanstieg?

Wenn wir eine Zunahme von Extremereignissen feststellen, finden wir erfahrungsgemäß auch eine Verbindung zum Temperaturanstieg. Und unsere Partner wollen wissen, welchen Unterschied es für sie macht, ob wir den Temperaturanstieg – global gesehen – auf zwei Grad begrenzen oder nicht. Die Skepsis dem Klimawandel gegenüber und die Annahme, dass sich gar nichts ändert, sind verschwunden. Aber ob man jeden Parameter und jedes Wetterereignis direkt auf den Klimawandel zurückführen kann, steht bei unseren Beratungen nicht im Vordergrund. Ich finde es wichtig, dass wir uns nicht erst



Daniela Jacob

ist promovierte Meteorologin und seit 2015 Direktorin des Climate Service Center Germany (GERICS). Die Einrichtung mit Sitz in Hamburg gehört zum Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Sie berät Politik, Verwaltungen und Unternehmen in Fragen der Anpassung an den Klimawandel und entwickelt Ideen für Dienstleistungen in diesem Bereich. Zuvor war Jacob viele Jahre als Wissenschaftlerin am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg tätig. Seit 2016 lehrt sie außerdem als Gastprofessorin an der Leuphana Universität Lüneburg. Sie ist Koautorin des fünften Sachstandsberichts des Weltklimarats (IPCC) sowie des IPCC-Sonderberichts über die Auswirkungen einer globalen Erwärmung von 1,5 Grad Celsius.



Klimawandel – das bedeutet nicht nur, dass sich die Erde aufheizt. Im Zuge der globalen Erwärmung kann es in Deutschland und anderswo zukünftig auch öfter Dürren oder Unwetter wie Starkregen geben.

PETROVICHS / GETTY IMAGES / ISTOCK

dann wappnen, wenn in jedem Einzelfall klar bewiesen ist, dass ein Risiko durch den Klimawandel verschärft wird.

Die Wissenschaftshistorikerin Naomi Oreskes hat die Arbeit der »merchants of doubt« bekannt gemacht: Sie säen Zweifel an der Klimaforschung, um politische Maßnahmen hinauszuzögern. Ist das ein Problem?

Ich kenne die Zweifler durchaus. Aber ich habe den Eindruck, dass die Debatte um Anpassungsmaßnahmen

anders läuft. Viele Unternehmen und Kommunen wollen den Klimawandel in ihren Strategien berücksichtigen – sei es als Risiko oder als Chance. Städte erleben zum Beispiel, dass ihre Parkhäuser und Fußgängerzonen häufig überschwemmt werden, und fragen sich, ob das noch schlimmer wird und welche Stadtteile dann betroffen sein könnten. Und an der Nordsee interessiert es die Tourismusbranche, ob die Sommer künftig häufiger trocken und sonnig sein werden.

Unklare Beweislage

Seit 2011 versucht die American Meteorological Society jedes Jahr die extremen Wetterereignisse der vergangenen zwölf Monate zu erklären. Für 2016 kommt sie in ihrem »Bulletin« nun erstmals zum Schluss, dass die beobachteten Hitzewellen ohne den Klimawandel kaum denkbar gewesen wären. In dem Jahr brachte das Hochdruckgebiet »Luzifer« Südeuropa Temperaturen von mehr als 40 Grad. In den USA wurden vielerorts Rekordtemperaturen gemessen, ebenso in Kuwait, wo das Thermometer auf 54 Grad kletterte. In Indien starben hunderte Menschen während einer mehrwöchigen Hitzeperiode, und die Thailänder verbrauchten mehr Strom denn je, weil ihre Klimaanlage auf Hochtouren liefen. Im Jahr 2016 wurde die höchste weltweite Durchschnittstemperatur seit Beginn der Aufzeichnungen gemessen.

Wenn solche Ereignisse zunehmen, spielen Wissenschaftler in Computersimulationen verschiedene Klimaszenarien durch, erläutert Robert Vautard, ein Experte für Hitzewellen am Institut Pierre Simon Laplace in Paris. Er bestätigt, dass es in den vergangenen Jahren viele Beispiele für extreme Temperaturen gab. Und wenn man die Klimamodelle mit einer niedrigen Konzentration an Treibhausgasen laufen lasse, kämen diese Extreme kaum vor. »Es ist fast ausgeschlossen, dass die Hitzewellen, die wir vermehrt beobachten,

auch ohne den Klimawandel zu Stande kämen«, sagt Vautard. Dieser Trend werde weiter anhalten. Später Frost wie jener, der im April 2017 den europäischen Landwirten Verluste von mehr als drei Milliarden Euro bescherte, dürfte hingegen seltener auftreten.

Hitzewellen nehmen eindeutig zu

Die britische Organisation Energy & Climate Intelligence Unit (ECIU) hat beim Durchsehen der Fachliteratur, die seit der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris erschienen ist, 15 Studien gefunden, die Hitzewellen untersuchten: In allen stellten die Forscher fest, dass anhaltende Extremtemperaturen und Klimawandel zusammenhängen. Doch Vautard schränkt ein: »Die Zunahme an Hitzewellen ist der einzige klare Befund, den wir bisher haben.« Es gebe zwar erste Hinweise darauf, dass es häufiger sintflutartig regnet, und Vautard rechnet damit, dass man auch die Zunahme von Starkregen in zehn Jahren eindeutig auf den Klimawandel zurückführen wird. Für andere Wetterphänomene hingegen lassen sich nur schwer Aussagen treffen, etwa bei Stürmen, obwohl diese nach Schätzung des Versicherungskonzerns Munich Re im Jahr 2017 außergewöhnlich große Verwüstungen angerichtet haben: Allein die Hurrikane im Nordatlantik haben Schäden in Höhe von 215 Milliarden US-Dollar verursacht.

Bei Stürmen handle es sich um komplexe Phänomene, erklärt

Vautard, die nicht nur von einem einzelnen Parameter wie Temperatur oder Niederschlagsmenge abhängig sind. Sie seien daher schwerer zu modellieren. Die Literaturrecherche der ECIU kam zu einem ähnlichen Ergebnis: Drei Studien zeigten eine positive Korrelation zwischen der Zunahme von Stürmen und der atmosphärischen Erwärmung auf – vier konnten einen solchen Zusammenhang nicht bestätigen.

Überschwemmungen und Waldbrände sind ebenfalls eine große Herausforderung für die Klimamodelle, weil sie auch davon abhängen, wie der Mensch Flüsse und Wälder managt. Als Beispiel nennt Vautard ein Gewitter über einer ausgetrockneten Gegend mit hartem Boden, in dem Regenwasser schlecht versickern kann: Obwohl beide Faktoren für sich betrachtet nicht extrem sind, können sie in Kombination eine heftige Überschwemmung auslösen. Doch er ist zuversichtlich: »In den nächsten Jahren werden wir die Faktoren immer besser auseinanderhalten können.«

Quellen

Energy and Climate Intelligence Unit: Heavy Weather: Tracking the Fingerprints of Climate Change, Two Years after the Paris Summit. 2017. https://eciu.net/assets/Reports/ECIU_Climate_Attribution-report-Dec-2017.pdf

Herring, S.C. et al. (Hg.): Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective. Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society 99, 2018

Im Jahr 2017 gab es auffällig viele schwere Hurrikane, die einige Karibikinseln vollständig verwüstet haben. Nach Ansicht vieler Wissenschaftler gibt es noch nicht genügend Daten, um zu sagen, ob das Risiko von Wirbelstürmen im Zuge des Klimawandels steigt. Naomi Oreskes hält die Anforderungen an die Statistik für falsch gewählt, weil es hier um existenzielle Bedrohungen geht. Getreu dem Motto: lieber einmal zu viel warnen als einmal zu wenig.

Ich halte es für falsch, die wissenschaftlichen Standards zu ändern. Es geht vielmehr darum, welche Schlussfolgerungen wir ziehen. Wenn ein Hurrikan die Infrastruktur einer Insel zwei- oder dreimal hintereinander zerstört, sollte man sie so wiederaufbauen, dass sie künftigen Wirbelstürmen nach Möglichkeit standhalten wird – plus einem Sicherheitsaufschlag. Alles andere wäre fahrlässig.

Welche Wetterveränderungen kann man mit dem Klimawandel in Verbindung bringen?

Am deutlichsten sieht man den Effekt bei Temperatur-extremen. Hitzeperioden werden länger und heftiger. Die Temperatur ist eine Größe, die sich in Messungen und Computermodellen gut und relativ genau handhaben lässt. Hier kennen wir die natürlichen Schwankungen und können sagen, dass die Temperaturen immer häufiger über den Höchstwerten liegen, die man früher beobachtete. Bei Niederschlägen ist das viel schwieriger zu beurteilen, denn das sind kleinräumige Ereignisse. Es kann auf der einen Straßenseite regnen und auf der anderen nicht. Computermodelle müssen daher mit einer sehr hohen räumlichen wie zeitlichen Auflösung rechnen, um Regengebiete gut abzubilden. Außerdem sind nicht flächendeckend Messgeräte aufgestellt. Daher müssen wir davon ausgehen, dass wir die natürliche Variabilität aktuell nicht vollständig erfassen.

Wenn also in Frankfurt das größte Gewitter seit Beginn der Aufzeichnungen niedergeht ...

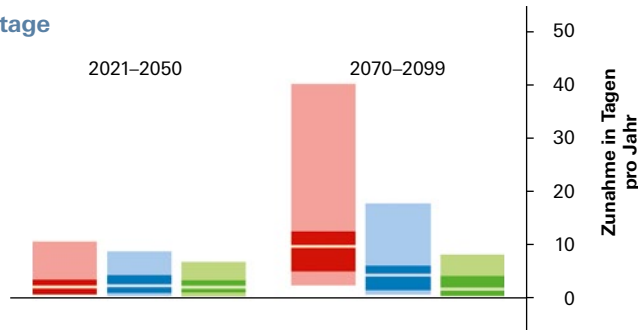
... könnte es sein, dass es vor einigen Jahren ein noch heftigeres Gewitter gab, das aber 50 Kilometer entfernt niederging und nicht oder nur unvollständig erfasst wurde. Man versucht, die fehlenden Messungen am Boden durch Satellitendaten auszugleichen. Doch Satelliten messen den Niederschlag nicht direkt, sondern nur den Wassergehalt der Atmosphäre. Die eigentliche Regenmenge müssen Meteorologen daraus ableiten. Aber wir wissen, dass die Atmosphäre mit jedem zusätzlichen Grad Celsius sechs bis acht Prozent mehr Wasserdampf speichern kann. Der wird irgendwo als Regen herunterkommen, und wenn es in den Sommermonaten wärmer wird, steigt das Risiko für die Bildung von Gewitterwolken. Wissenschaftler gehen deshalb davon aus, dass das Potenzial für Starkregen mit der Erderwärmung steigt.

Hat die Forschung zu extremen Wetterereignissen Fortschritte gemacht?

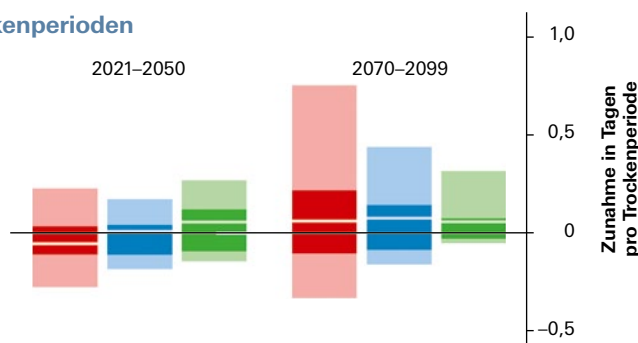
Ja, in den vergangenen fünf Jahren hat sich sehr viel getan. Die physikalischen Grundlagen werden in den Klimamodellen heute besser berücksichtigt, und die

Szenarien für Deutschland

Hitzetage

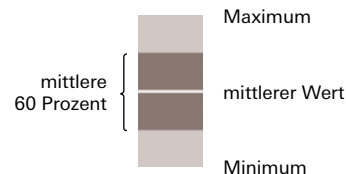


Trockenperioden



Erwärmung bis 2100

- über 4 Grad
- über 2 Grad
- unter 2 Grad



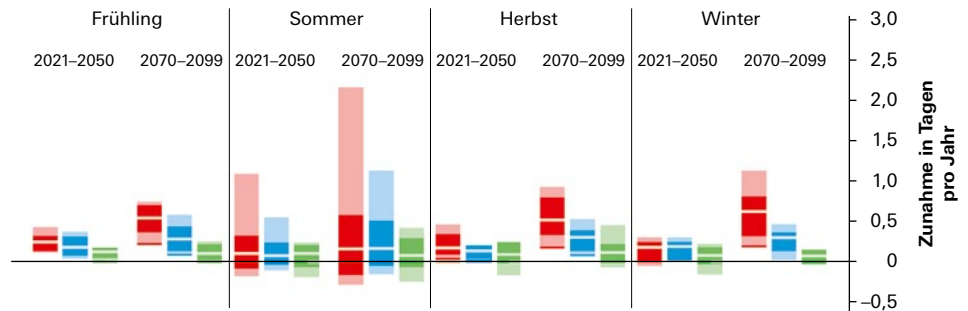
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, INCH: CLIMATE SERVICE CENTER GERMANY (GERIST)

Klimaszenarien für Deutschland im Rahmen von EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain) zeigen: Je nachdem, wie sich die globalen CO₂-Emissionen entwickeln, drohen uns langfristig mehr Hitzetage mit über 30 Grad Celsius (oben) und längere Dürren (unten).

Rechenkapazitäten sind ebenfalls gestiegen. Inzwischen können wir in den Modellen Flächen von wenigen Quadratkilometern auflösen und damit auch die Entwicklung kleinräumiger Niederschläge wie Gewitter auf großen Zeitskalen untersuchen, auf denen der Klimawandel stattfindet. Für die Zukunft erwarten wir weitere Fortschritte: Wir haben zum Beispiel 2017 ein europäisches Projekt gestartet, in dem meine Forscherkollegen und ich mit mehreren Klimamodellen extreme Niederschläge für die Alpenregionen untersuchen. Zuerst wollen wir prüfen, ob wir Sturzbäche und andere Beobachtungen aus der Vergangenheit am Computer nachbilden können. Dann rechnen wir damit in die Zukunft. Im Moment deutet alles darauf hin, dass extreme Niederschläge künftig noch heftiger werden und auch Regionen treffen werden, die bisher verschont blieben. Ihre Häufigkeit scheint jedoch nicht zuzunehmen. Aber in drei bis vier Jahren wissen wir mehr.

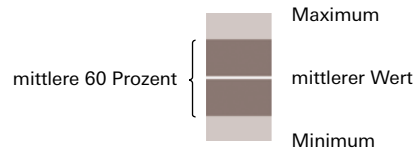
Computermodelle lassen für Deutschland im Zuge des Klimawandels nicht nur auf mehr extrem heiße und trockene Tage schließen – auch intensive Regenfälle mit mehr als 20 Millimeter Niederschlag am Tag könnten auf lange Sicht zunehmen. Vor allem im Sommer dürfte es zukünftig öfter zu lokalen sintflutartigen Güssen kommen.

extrem regenreiche Tage



Erwärmung bis 2100

- über 4 Grad
- über 2 Grad
- unter 2 Grad



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH:
CLIMATE SERVICE CENTER GERMANY (GERICS)

Kürzlich endete das Projekt »Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland«, an dem Sie beteiligt waren. Wenn die CO₂-Emissionen weiter steigen wie bisher, wird sich die Zahl der Tage, an denen die Temperatur hier zu Lande auf über 30 Grad klettert, in diesem Jahrhundert mindestens verdoppeln, im Oberrheingraben sogar vervierfachen.

Ja, aber ist diese Zunahme an heißen Tagen schon extrem? Wir werden die regionalen Klimamodelle noch weiter auswerten müssen, um die Folgen besser zu verstehen. Dabei geht es auch um »compound effects«, die wir so nennen, weil mehrere Faktoren zusammenspielen. So hatte etwa der Orkan »Kyrill«, der im Januar 2007 über Europa fegte, so verheerende Folgen, weil der Boden nicht gefroren, sondern durch Regen aufgeweicht war. Damit brauchte es gar nicht die höchsten Windgeschwindigkeiten, um Bäume zu entwurzeln. Ein anderes Beispiel ist das, was die Bauern in Schleswig-Holstein und Niedersachsen 2017 erlebten: Ab September waren die Äcker so feucht, dass man sie nicht befahren konnte. Vielerorts blieb im Herbst die Ernte stehen, und Anfang des Jahres 2018 konnten die Bauern nicht düngen, weil die Gülle nicht versickert wäre.

Wenn man sich auf die Temperatur konzentriert, dann könnte Berlin am Ende des Jahrhunderts so warm sein wie heute die Städte an der Adria oder in der Provence. Das klingt eher verlockend. Liegt es daran, dass wir hier Mittelwerte betrachten und keine Extreme?

Ja, aber das ist nicht der entscheidende Punkt. Wir müssen auch berücksichtigen, dass sich nicht nur die Temperatur ändert. Womöglich wird es gleichzeitig so schwül, dass die Hitze hier schwerer zu ertragen ist als in Südeuropa. Außerdem sind wir es nicht gewöhnt, bei 30 Grad im Schatten volle Leistung zu bringen, und viele Häuser würden wenig Abkühlung bieten. Im Gegenteil: Wir bauen derzeit Häuser mit großen Glasflächen, hinter denen es in Zukunft sehr heiß werden dürfte. London stellt hingegen jetzt schon seine Bauweise um, weil der so genannte Wärmeineffekt, den man in vielen Großstädten beob-

achtet, bis 2050 so stark werden könnte, dass die Temperatur in Büros und Wohnungen selbst mit Klimaanlage nicht mehr unter 28 Grad fällt. Wenn ich Menschen das mögliche Klima der Zukunft verdeutlichen will, arbeite ich oft mit Analogien.

Welchen?

Ich sage ihnen zum Beispiel, dass ein Ausnahmesommer wie der, den wir 2003 erlebten, am Ende des 21. Jahrhunderts alle fünf Jahre vorkommen könnte, wenn wir unsere Emissionen nicht drastisch reduzieren. Orkantiefs wie »Friederike«, das im Januar 2018 über Europa zog und unser Bahnsystem für einen halben Tag lahmlegte, könnten ebenfalls häufiger auftreten; Gleiches gilt für Überschwemmungen wie jene nach den sintflutartigen Regenfällen in Berlin Ende Juni 2017. Insgesamt müssen wir in Deutschland mit mehr Extremereignissen rechnen, mit mehr Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen und Stürmen. Im Winter wird die Temperatur häufiger um die null Grad liegen. Dann taut es tagsüber und friert nachts – eine große Belastung für die Autofahrer und den Asphalt.

Werden wir mit dem Klimawandel zurechtkommen?

In Deutschland haben wir die Möglichkeiten, uns daran anzupassen. Wissenschaftler werden zwar nicht jede Überschwemmung vorhersagen können, das wird vielleicht nie möglich sein. Aber wir werden abschätzen können, wohin das Wasser im Extremfall fließen wird und welche Regionen künftig betroffen sein werden. Wir können uns darauf entsprechend einstellen – andere Länder nicht unbedingt. Und wenn wir den Klimaschutz vernachlässigen und sich die Erde global um drei, vier oder fünf Grad erwärmt, dann steigt das Risiko für noch extremere Wetterkapriolen in vielen Regionen deutlich an. Jedes Grad Erwärmung, das wir vermeiden, macht sich mehr als bezahlt. ◀

Die Fragen stellte **Alexander Mäder**, Philosoph und Wissenschaftsjournalist in Stuttgart.

Alles auf ARTE · TV komplett · Mediathek · Hintergrund

Testen Sie das ARTE Magazin!



2 Ausgaben
gratis

Jeden Monat aktuell –
die Vielfalt von ARTE
in einem Magazin

- Renommierete Autoren empfehlen die Highlights von ARTE
- Optimaler Überblick über das ARTE-Programm
- Exklusive Einladungen zu ARTE-Events

**Kompetent.
Übersichtlich.
Komplett.**

Wunschprämie auswählen und Gratishefte bestellen:

 www.arte-magazin.de/spektrum

 040 – 3007 4000



GEOLOGIE

ZIRKONE – ZEUGEN DER FRÜHEN ERDGESCHICHTE

Zirkone sind winzige Kristalle, die praktisch nicht verwittern und Jahrmilliarden überdauern können. Einschlüsse in ihnen liefern Hinweise darauf, wann die Erde eine feste Kruste bildete und die ersten Ozeane ihre Oberfläche bedeckten.



Donald R. Prothero ist außerordentlicher Professor für Geologie an der California State Polytechnic University in Pomona, außerordentlicher Professor für Astronomie und Geowissenschaften am Mt. San Antonio College in Los Angeles sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Wirbeltierpaläontologie am Natural History Museum im Los Angeles County. Der vorliegende Artikel ist ein redigierter Auszug aus dem 2018 bei Columbia University Press erschienenen Buch »The Story of the Earth in 25 Rocks«.

► spektrum.de/artikel/1580884

SERIE

Die junge Erde

Teil 1: August 2018

Asteroidenhagel: Streit um die frühe Erde
Adam Mann

Teil 2: September 2018

Zirkone – Zeugen der frühen Erdgeschichte
Donald R. Prothero

Teil 3: Oktober 2018

Die Jagd nach den ältesten Fossilien
Rebecca Boyle




F. LANDY / GLOW 2016. MUSEUM D'HISTOIRE NATURELLE DE LILLE (COMMUNSWIKIMEDIA.ORG/WIKIFILE:BUSSTREPROVENANCE/ASC_REF2016.34.574_MUS_CCS>49
UMHISTORIANATURELLELILLE.COM/MUSEUM-PROTHERO/3.370/CC-BY-SA.4.0/ICR/WECCOMMUNSWIKIMEDIA/COMMUNSWIKIMEDIA.ORG/WIKIFILE:LEGALCODE)

► Zirkonia ist ein beliebter Schmuckstein, der Diamanten ähnelt, jedoch deutlich erschwinglicher ist. Der synthetische Kristall wird aus Zirkoniumdioxid (ZrO_2) hergestellt. Ebenfalls als Diamantersatz taugen natürlich vorkommende Zirkoniumsilikate ($ZrSiO_4$), besser bekannt als Zirkone. Große Kristalle dieses Minerals bilden Oktaeder, die zwei an der Basis zusammengeklebten Pyramiden gleichen. Man findet sie – je nach Kristallstruktur und Verunreinigung – in vielen verschiedenen Farben, von Violett über Rot bis Gelb. Manche sind auch durchsichtig.

Zwar haben Zirkone einen geringeren kommerziellen Wert als Diamanten, dafür ist ihr wissenschaftlicher Informationsgehalt umso größer, was sie für Geologen besonders kostbar macht. Zirkone bilden sehr harte Kristalle, die praktisch nicht verwittern, und zwar vor allem in graniti-

schem Magma, wenn dieses abkühlt. Zirkoniumatome sind recht groß, so dass sich bei der Kristallbildung leicht Elemente wie Uran und Thorium einlagern, die in anderen Mineralen keinen Platz finden. Geowissenschaftler nutzen deshalb Zirkone, um anhand des Zerfalls des radioaktiven Urans in stabile Bleiatome das Alter von Gesteinsproben zu bestimmen.

Es gibt nur wenige natürlich vorkommende radioaktive Elemente, die so langsam zerfallen, dass sie sich für die Datierung sehr alter Gesteine eignen. Dazu gehören die Uranisotope 238 und 235, die mit einer Halbwertszeit von 4,468 beziehungsweise 0,704 Milliarden Jahren die Bleiisotope 207 und 206 bilden. Kennt man sowohl die Menge der Mutteratome (Uran) und Tochteratome (Blei) als auch die des ursprünglich in einer Probe vorhandenen Bleis,



Zirkonkristalle treten in den verschiedensten Farben, Formen und Größen auf. Allen gemein ist, dass sie hart und resistent sind gegenüber Verwitterung. Bei ihrer Entstehung werden andere große Atome wie Uran in ihrem Kristallgitter eingeschlossen. Das macht sie so wertvoll für die Altersbestimmung früher Gesteine.

kann man aus dem Verhältnis der radioaktiven zu den stabilen Isotopen berechnen, wie lange der Zerfall bereits andauert, sprich, wann das Uran im Kristall eingeschlossen wurde. Die konventionelle Uran-Blei-Datierung ist jedoch schwierig bei Gesteinen, die mehr als vier Milliarden Jahre alt sind, da diese kaum noch messbare Mengen Uran enthalten. Oft erfassen Forscher daher lediglich die Zerfallsprodukte und nutzen die unterschiedlichen Zerfallsgeschwindigkeiten der verschiedenen Uranisotope, um das Alter einer Probe zu bestimmen.

Zirkone sind derart widerstandsfähig, dass man sie nur mit roher Gewalt aus Granitgestein extrahieren kann. In der Regel dient dafür ein so genannter Brecher, eine Zerkleinerungsmaschine, die große Brocken zu einem feinen Pulver zermahlt. Dieses versetzt man anschließend mit Flusssäure, einer der ätzendsten Säuren überhaupt. Sie löst nahezu jedes Mineral auf – abgesehen von Zirkon. Nach dem Säurebad der pulverisierten Gesteinsprobe bleiben nur die konzentrierten Zirkonkristalle übrig, bereit zur Analyse.

Zirkone erweisen sich nicht nur im Labor als äußerst resistent, sondern auch in der Natur, etwa wenn aus Gestein durch Regen, Frost, Hitze oder chemische Prozesse Sandkörner werden, die Flüsse mit sich führen. Selbst in extrem verwittertem Sand, der zu etwa 99 Prozent aus Quarz besteht, findet man eine gewisse Menge an Zirkon. Tatsächlich nutzen Geologen den Anteil an Zirkon sowie an den ebenfalls harten Mineralen Turmalin und Rutil – den so genannten ZTR-Index –, um den Grad der Verwitterung von Sand oder Sandstein zu bestimmen.

Zirkone können ungemein hilfreich sein, ganz unterschiedliche geowissenschaftliche Fragen zu beantworten. Besonders wertvoll sind sie für Geochronologen, weil sie die Datierung sehr alter Gesteine ermöglichen. So konnten Forscher mit Hilfe dieses Minerals etwa das Alter einiger

Meteoriten und Mondgesteine ermitteln. Und es erlaubt Geologen, Gesteine aus der Frühzeit der Erde einzuordnen. Hierfür analysieren sie nicht nur Uran- und Bleisotope, sondern messen etwa auch den radioaktiven Zerfall von in Zirkonen eingeschlossenem Rubidium zu Strontium.

Mit rund 3,8 Milliarden Jahren hielten die so genannten Amitsoq-Gneise des Grünsteingürtels an der Südwestküste Grönlands lange Zeit den Altersrekord. Sie gehören zu den ersten Krustengesteinen der Erde und enthalten Teile der kontinentalen Urkruste, aus der der gebänderte Gneis hervorging; zudem uralte ozeanische Kruste (Grünstein) und Reste des frühen Erdmantels. Da die Gesteine jedoch durch wechselnde Temperatur- und Druckbedingungen stark verändert (metamorphosiert) sind, könnte ihr wahres Alter sogar noch höher liegen.

Auf der Suche nach der Urkruste des Planeten werden Forscher in Kanada gleich zweimal fündig

Die Amitsoq-Gneise haben Wissenschaftlern einiges über die junge Erdkruste verraten: Demnach trieben zu jener Zeit kleine Blöcke kontinentalen Materials in einer dünnen, heißen ozeanischen Kruste. Diese bildete sich aus so genannter komatiitischer Lava, die aus dem Mantel an die Oberfläche drang und dort zu Komatiit erstarrte – einem Gestein, das Mantelminerale wie Olivin, ein grünliches Silikat, enthält. Komatiitische Laven sind deutlich reicher an Magnesium und Eisen als basaltische und traten lediglich in der Frühzeit der Erde auf. Inzwischen haben sich Temperatur sowie chemische Zusammensetzung des oberen Mantels verändert, so dass der Ozeanboden heute aus Basalt besteht. Da Komatiit einen hohen Schmelzpunkt hat, muss die Erde damals noch sehr heiß gewesen sein und wies vermutlich eine mobile Kruste auf, die leicht wieder schmolz. Auch gab es wohl keine Plattentektonik, da die Protokontinente vergleichsweise klein und dünn waren.

Im Jahr 1999 stellte der Acasta-Gneis einen neuen Altersrekord auf: 4,031 Milliarden Jahre. Dieser Gesteinskomplex im Nordwesten Kanadas ist ebenfalls ein Überbleibsel der kontinentalen Urkruste. Doch kaum zehn Jahre später präsentierten Wissenschaftler einen Gesteins-Methusalem mit noch früherem Geburtsjahr: Auf 4,28 und 4,321 Milliarden Jahre vor heute datierten sie Proben aus dem Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel am Ostufer der kanadischen Hudson Bay, indem sie den Zerfall des radioaktiven Elements Samarium zu Neodym untersuchten. Die Altersbestimmungen sind jedoch umstritten. Viele Forscher glauben, dass es sich dabei nicht um das Alter der Lavagesteine selbst handelt, sondern um das des Ausgangsmaterials, das aufgeschmolzen wurde und sich wieder verfestigte. Uran-Blei-Datierungen von Zirkonen legen nahe, dass die Gesteine »nur« rund 3,78 Milliarden Jahre alt sind. Dennoch deuten sie auf die womöglich allererste Bildung kontinentaler Kruste vor mehr als vier Milliarden Jahren hin.

Die ältesten bekannten Gesteine in unserem Sonnensystem – Mondgestein und Meteoriten – existieren bereits seit mehr als 4,5 Milliarden Jahren. Warum sind die der Erde über 200 Millionen Jahre jünger? Die Antwort auf diese Frage lautet zum einen Verwitterung und zum ande-

AUF EINEN BLICK DAS ÄLTESTE MINERAL DER ERDE

- 1** Zirkone, winzige, nahezu unverwüstliche Kristalle aus Zirkoniumsilikat, können Jahrmilliarden überdauern. Sie enthalten oft Einschlüsse von Fremdstoffen, etwa Uran. Diese erlauben es Wissenschaftlern zum Beispiel, das Alter von Gesteinen abzulesen.
- 2** Gesteinsdatierungen anhand von Zirkonen sowie die Analyse darin eingeschlossener Gase zeigen, dass die junge Erde rasch abkühlte. Offenbar hatte sie bereits vor mehr als vier Milliarden Jahren eine dünne Kruste, und Ozeane bedeckten ihre Oberfläche.
- 3** In 4,1 Milliarden Jahre alten Zirkonen haben Geologen zudem Spuren von Graphit gefunden, der biologischen Ursprungs sein könnte. Womöglich ist also das Leben auf der Erde deutlich früher entstanden, als Forscher bislang vermutet haben.



Dieses Gestein aus dem Nordwesten Kanadas hat bereits einige Jahre auf dem Buckel. Der Acasta-Gneis – benannt nach dem Fluss Acasta – gehört zu den ältesten Gesteinsformationen der Erde und ist ein Überbleibsel der frühen kontinentalen Kruste, die sich vor mehr als vier Milliarden Jahren bildete.

ren: Plattentektonik. Die Erdoberfläche wird ständig recycelt, indem die tektonischen Platten in den Subduktionszonen in den Erdmantel abtauchen und aufschmelzen und sich entlang der Mittelozeanischen Rücken durch emporsteigende basaltische Lava neue Kruste bildet. Die Oberfläche des Mondes ist hingegen starr, ohne driftende Platten. Daher findet man dort noch heute Gesteine aus der Zeit kurz nach seiner Geburt vor gut 4,5 Milliarden Jahren. Meteoriten aus dem frühen Sonnensystem sind seit ihrer Abkühlung ebenfalls unverändert und nochmals um einige hundert Millionen Jahre älter.

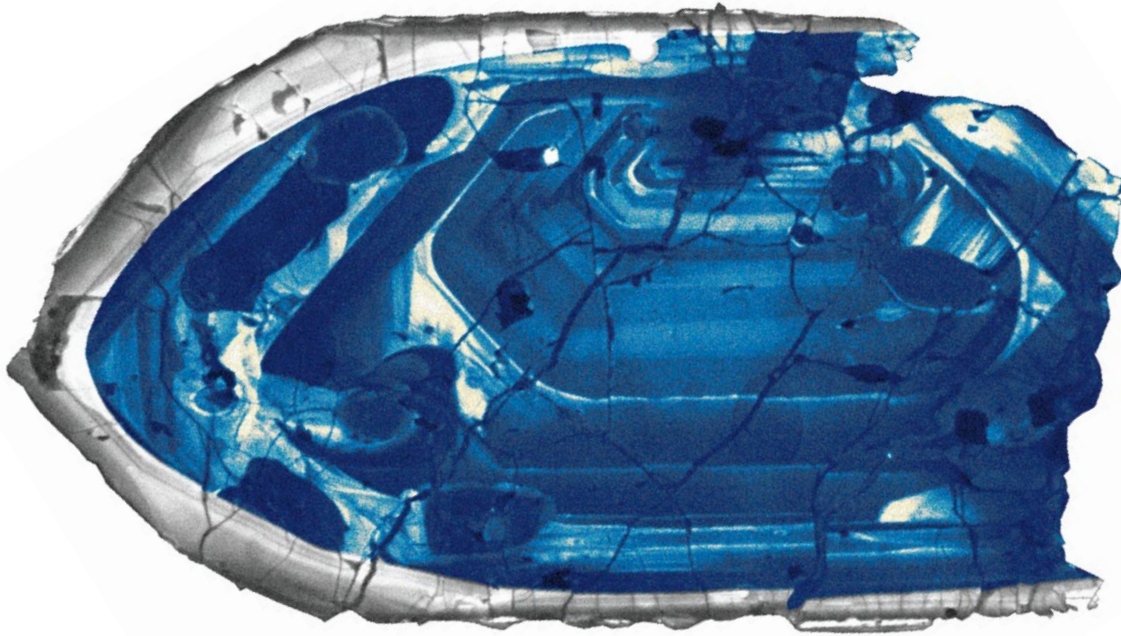
Doch auch auf der Erde gibt es Material, das älter ist als die kanadischen Gesteine. 2014 fanden Geologen in den Jack Hills in Westaustralien eingeschlossen in relativ jungem Sandstein eine Hand voll Zirkone. Anschließend Datierungen der winzigen Kristalle mittels der Uran-Blei-Methode ergaben Alter von bis zu 4,404 Milliarden Jahren, also fast 100 Millionen Jahre mehr als die Proben von der Hudson Bay. Damit ist man, geologisch betrachtet, inzwischen recht nah dran am Alter von Mondgestein und Meteoriten.

Neben den bislang ältesten Datierungen lieferten die Sandkörner der Jack Hills weitere Überraschungen. Bei der Analyse von Gasblasen, die in den Zirkonen eingeschlossen waren, fanden Wissenschaftler Hinweise auf die Zusammensetzung der Erdatmosphäre vor mehr als vier Milliarden Jahren. Das Verhältnis von schweren (^{18}O)

zu leichten (^{16}O) Sauerstoffisotopen in den Gasblasen deutet darauf hin, dass es auf der Erdoberfläche zu jener Zeit bereits flüssiges Wasser gab.

Bis dahin hatten Forscher angenommen, dass es deutlich länger dauerte, bis die glutflüssige Erde nach ihrer Entstehung vor knapp 4,5 Milliarden ausreichend abgekühlt war. Erst nach etwa 700 Millionen Jahren, so glaubte man, hätten an der Erdoberfläche Temperaturen unterhalb des Siedepunkts von Wasser geherrscht. Darauf deuteten auch die ältesten Sedimentgesteine aus Grönland hin, die vor 3,8 Milliarden Jahren mit Hilfe von fließendem Wasser entstanden. Die Zirkone aus den Jack Hills stellen diese Vorstellung völlig auf den Kopf. Sollte es tatsächlich schon vor 4,4 Milliarden Jahren flüssiges Wasser auf der Erde gegeben haben, wäre die dafür notwendige Abkühlung des Planeten in weniger als 200 Millionen Jahren erfolgt. Demnach dürften in diesem Zeitraum auch nur wenige Meteoriten die Erde getroffen haben, andernfalls wären die Ozeane wieder verdampft. Wissenschaftler sprechen hierbei von der Hypothese der frühen kühlen Erde.

Woher kam das erste Wasser? Bisher nahmen Geologen an, dass es im Mantel eingeschlossen war, als die Erde abkühlte, und durch Vulkane allmählich entwich. Jüngste Analysen zeigen jedoch, dass die chemische Zusammensetzung extraterrestrischer Objekte – vor allem die bestimmter Steinmeteoriten, so genannter kohligter Chondrite – der Chemie der Ozeane auf der Erde ähnelt. Das lässt



Dieser Zirkonkristall stammt aus den Jack Hills in Australien. Geschätztes Alter: rund 4,4 Milliarden Jahre. Es ist das älteste bekannte Material der Erde und deutet auf eine rasche Abkühlung des Planeten hin, nachdem dieser vor 4,55 Milliarden Jahren aus kosmischem Staub geboren worden war.

vermuten, dass die Trümmer des frühen Sonnensystems, zu denen die Chondrite gehören, reichlich Wasser enthielten. Gleiches gilt für Mondgesteine, die heute nur noch wenig Wasser enthalten. Sollte dies zutreffen, dann war bereits bei der Erdentstehung Wasser vorhanden, das schließlich kondensierte und die ersten Ozeane bildete, nachdem die Erdoberfläche auf unter 100 Grad Celsius abkühlt war.

Kometen kommen hingegen nicht als Wasserquelle in Frage. Zwar bezeichnet man diese oft als »schmutzige Schneebälle«, weil sie überwiegend aus Staub und Eis bestehen. 2014 allerdings ergab eine Analyse von vier Kometen, dass sie sich chemisch stark vom Wasser auf der Erde unterscheiden. Die populäre Annahme, Kometen seien auf die frühe Erde gestürzt und hätten so die ersten Ozeane gebildet, muss also verworfen werden.

Nachdem die westaustralischen Zirkone schon dazu beitrugen, dass Forscher die Frühzeit der Erde neu bewerten, sorgten sie 2015 für zusätzliche Aufregung, als eine wissenschaftliche Studie über winzige, ebenfalls darin eingeschlossene Graphitkristalle erschien. Graphit ist neben Diamant eine weitere Modifikation des Kohlenstoffs, die unter anderem in Bleistiften verwendet wird. Erstaunlicherweise stimmte das Verhältnis der stabilen Kohlenstoffisotope ^{12}C und ^{13}C in jenem Graphit mit der Isotopensignatur von Lebewesen überein. Die dazugehörigen Zirkone waren 4,1 Milliarden Jahre alt, also jünger als jene, die flüssiges Wasser auf der frühen Erde nahelegten. Aber

sie übertrafen den bisherigen Rekordhalter aus dem grönländischen Grünsteingürtel um ganze 300 Millionen Jahre. Dort hatte man ebenfalls Kohlenstoff gefunden, der möglicherweise biologischen Ursprungs ist. Die ältesten Spuren, die viele Forscher als fossile Mikroorganismen ansehen, stammen aus 3,5 Milliarden Jahre alten Sedimentgesteinen in der westaustralischen Region Pilbara sowie aus 3,4 Milliarden Jahre alten versteinerten Stromatolithen in Südafrika. Den neuesten Daten zufolge entwickelte sich das Leben lange davor und ist womöglich ähnlich alt wie die ersten Ozeane auf der kühlen frühen Erde.

Diese Erkenntnisse aus ein und denselben Zirkonen zwingen Wissenschaftler, ein neues Bild von der Frühzeit der Erde zu zeichnen. So dachte man lange – basierend auf der Datierung von Gesteinsproben aus Mondkratern –, dass Erde wie Mond vor knapp vier Milliarden von einem apokalyptischen Asteroidensturm heimgesucht wurden, der unseren Planeten in einen lebensfeindlichen Ort verwandelte (**Spektrum** August 2018, S. 58). Dass es lange vor diesem so genannten Großen Bombardement bereits flüssiges Wasser auf der Erde gab und möglicherweise erste Einzeller, aus denen alle heutigen Organismen hervorgingen, lässt allerdings einen weniger heftigen kosmischen Bombenhagel vermuten. ◀

QUELLEN

Bell, E. A. et al.: Potentially Biogenic Carbon Preserved in a 4.1 Billion-Year-Old Zircon. In: PNAS 112, S. 14518–14521, 2015

O'Neil, J. et al.: Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust. In: Science 321, S. 1828–1831, 2008

Valley, J. W. et al.: A Cool Early Earth. In: Geology 30, S. 351–354, 2002

Valley, J. W. et al.: Hadean Age for a Post-Magma-Ocean Zircon Confirmed by Atom-Probe Tomography. In: Nature Geoscience 7, S. 219–223, 2014

Wilde, S. A. et al.: Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. In: Nature 409, S. 175–178, 2001

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/t/kristalle-minerale-und-gesteine



S. E. / STOCK.ADOBE.COM

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern 2019 wieder drei besondere Reisen

Leserreisen

FRÜHJAHR 2019

Chile



DAS LAND DER TELESKOPGIGANTEN

Chile, das faszinierende Land der weltbekannten Großobservatorien, lockt uns im Januar 2019. Die astronomischen Highlights sind der Besuch des La-Silla- sowie des Paranal-Observatoriums mit seinen berühmten 8,2-Meter-VLT-Teleskopen und der Interferometrianlage. Natürlich werden Sie dabei fachkundig betreut.

Auch eine Sonderführung zur Montagestation des ALMA-Projekts ist geplant.

Landschaftlich stehen vor allem die Atacamawüste und die fantastische Welt der hohen Anden auf dem Programm:

San Pedro de Atacama, die große Salzkordillere, der viertgrößte Salzsee der Welt, die Hochlandlagunen des Altiplano und die Geysire des Vulkan El Tatio.

Hauptreise: 21. 1.–4. 2. 2019, 15-tägig

Preis im DZ/F: € 5 730,-

Astron. Betreuung: Dr. Klaus-Peter Schröder

Verlängerung: 3. 2.–10. 2. 2019, 8-tägig

Preis im DZ/F: € 2 720,-

Skandinavien



IM GEHEIMNISSVOLLEN LICHT DES HOHEN NORDENS

Seit Jahrhunderten faszinieren die Polarlichterscheinungen den Menschen. Insbesondere erhellt ihr magisches Erscheinungsbild die lange, dunkle Jahreszeit der hohen Breitengrade. Nordskandinavien liegt glücklicherweise in dieser Polarlichtzone.

Das Reiseprogramm am Inarisee in Finnland und im Pasviktal in Norwegen an der russischen Grenze bietet neben geführten Polarlichtbeobachtungen bei stabilem Festlandklima und interessanten Vorträgen viele Winteraktivitäten zur Auswahl: Husky-, Rentier- oder Schneescooter-Safaris sowie eine Königskrabben-Safari. Auch die lappländische Samen-Kultur wird bei dieser Reise nicht zu kurz kommen.

Hauptreise: 24. 3.–2. 4. 2019, 10-tägig

Preis im DZ/HP: € 2 690,-

Astron. Betreuung: Joachim Biefang

Verlängerung: 25. 3.–31. 03. 2019, 7-tägig

Preis im DZ/VP: € 2 385,-

Mexiko



DIE ARCHEO-ASTRONOMISCHE REISE ZU DEN MAYAS

Diese Zeitreise durch die Astronomie führt uns von der heutigen Mischkultur Mexikos über die Kolonialzeit der Spanier, die vor 500 Jahren begann, bis hin zu den mittelamerikanischen Hochkulturen der Azteken und Mayas.

Wir besuchen bedeutende archäologische Stätten der präkolumbischen Zeit sowie beeindruckende Prachtbauten der spanischen Kolonialherren. An vielen Orten sehen wir den wichtigen Einfluss der Astronomie und bekommen diesen eindrucksvoll erklärt. An einem Abend in Mexiko-Stadt planen wir hierzu einen interessanten Vortrag mit dem Astro-Archäologen J. Galindo, der unter anderem neun Jahre an der Ruhr-Universität Bonn tätig war. Der Astronomie des 21. Jahrhunderts wenden wir uns ebenfalls zu.

Hauptreise: 6. 3.–26. 3. 2019, 21-tägig

Preis im DZ/HP: € 4 960,-

Verlängerung: 25. 3.–1. 4. 2019

Preis im DZ/VP: € 1 680,-

Infopakete bei unserem Reiseveranstalter:

WITTMANN TRAVEL, 21129 Hamburg, Urenfleet 6e, Tel.: 040 85105-376, Fax: 040 85105-377, E-Mail: info@wittmann-travel.de

www.wittmann-travel.de

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN ELEKTROCHEMISCHER SPEICHER FÜR GRÜNEN STROM

Der großflächige Umstieg auf Wind- und Solarstrom erfordert Speichertechnologien, die wetterbedingte Schwankungen abfedern. Power-to-Gas, die Umwandlung von Ökostrom in Methan, könnte hierbei helfen, da es verschiedene Energiesysteme intelligent miteinander verknüpft.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg. **Isabel Rubner** ist dort als akademische Oberrätin tätig.

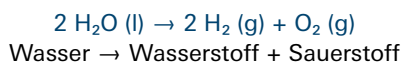
► [spektrum.de/artikel/1580886](https://www.spektrum.de/artikel/1580886)

ZSW (WWW.ZSW.BW.DE)



► Grüner Strom durch Windräder und Fotovoltaikanlagen? Wunderbar! Doch an Tagen mit viel Wind oder Sonnenschein wird überschüssiger Strom produziert. Der muss gespeichert werden, um ihn anschließend zeit- und ortsunabhängig nutzen zu können. Vor allem elektrochemische Speichertechnologien mit einem hohen Wirkungsgrad bieten sich dafür an.

Dazu zählt auch die so genannte Power-to-Gas-Technologie, die Ökostrom zur Synthese von Brenngasen nutzt. Im ersten Schritt dieses Prozesses wird regenerative Energie bei der Elektrolyse von Wasser in energiereiches Wasserstoffgas (H_2) umgewandelt (»l« steht für »flüssig«, »g« für »gasförmig«):

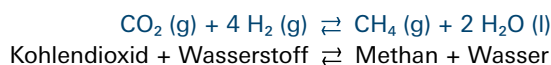


Diese Power-to-Gas-Pilotanlage am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg in Stuttgart erzeugt aus Wasserstoff und Kohlendioxid bis zu 300 Kubikmeter Methan am Tag.

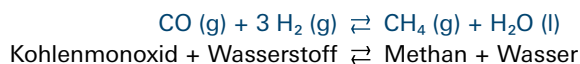
Der Wasserstoff kann anschließend zum Beispiel ins Erdgasnetz eingespeist werden oder Autos mit Brennstoffzellen antreiben (in denen die Rückreaktion der Elektrolyse abläuft). Allerdings ist Wasserstoff äußerst flüchtig. Das macht den Transport und die sichere Lagerung entsprechend aufwändig und erfordert spezielle Druckbehälter. Diese Probleme lassen sich umgehen, indem man den elektrolytisch erzeugten Wasserstoff in ein anderes Gas umwandelt, das besser handhabbar ist.

Ein solches Gas ist Methan (CH_4), der Hauptbestandteil von Erdgas. Bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck sowie unter Verwendung eines Katalysators reagiert Wasserstoff mit Kohlendioxid (CO_2) oder Kohlenmonoxid (CO) zu Methan. Der französische Chemiker Paul Sabatier entdeckte diesen Prozess bereits Anfang des 20. Jahrhunderts, die Energiewende verleiht ihm nun jedoch eine ganz neue Relevanz. Je nach Kohlenstoffquelle verläuft die Sabatier-Reaktion nach folgenden Gleichungen:

Methanisierung von CO_2 :



Methanisierung von CO :



Durch die Umwandlung von Wind- und Solarstrom in Wasserstoff und schließlich in Methan erhält man einen nachhaltigen Energieträger. Dieser lässt sich direkt ins Erdgasnetz einspeisen (siehe »Konzept ›Power-to-Gas‹«, S. 64) und kann Leistungsschwankungen ausgleichen oder als saubere Reserveenergie dienen. In Deutschland existiert bereits ein leistungsfähiges Erdgasnetz mit Über- und Untertagespeichern, die sich zur langfristigen Lagerung von synthetischem Erdgas eignen.

Power-to-Gas ist aber nicht nur eine Option, um die Versorgung mit regenerativer Energie zu stabilisieren. Die Technologie bietet Staaten, die Erdgas überwiegend aus dem Ausland importieren, auch die Chance, sich energiepolitisch unabhängiger zu machen. Und das mit einem grundsätzlich klimaneutralen Brennstoff, denn das für die Methansynthese benötigte CO_2 kann aus der Luft gewonnen werden.

Im energetischen Vergleich der beiden Reaktionsprodukte des Power-to-Gas-Prozesses hat Methan gegenüber Wasserstoff die Nase vorn. Verbrennt man Methan mit Sauerstoff zu CO_2 , wird etwa dreimal so viel Energie frei wie bei der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser (der so genannten Knallgasreaktion). Allerdings belastet derzeit noch die energieintensive CO_2 -Gewinnung aus der Umgebungsluft die Gesamtbilanz der Methanisierung. Forscher testen daher verschiedene CO_2 -Quellen. Alternativ können Power-to-Gas-Anlagen zum Beispiel an Biogasanlagen gekoppelt werden, in denen durch mikrobiellen Abbau von organischem Material neben Methan viel CO_2 anfällt. Üblicherweise entfernt man das CO_2



aus dem Gasgemisch, um den Methangehalt zu erhöhen. Mit Power-to-Gas lässt sich Biogas auch ohne vorherige CO₂-Abscheidung in hoch konzentriertes »grünes Erdgas« verwandeln. Diese so genannte Direktmethanisierung erreicht einen deutlich höheren Wirkungsgrad als eine Methanisierung von atmosphärischem CO₂. Als weiteren Rohstoff für die Sabatier-Reaktion bietet sich CO₂ an, das aus in Kraftwerken produziertem Rauchgas ausgewaschen wird.

Man nimmt an, dass die CO₂-Methanisierung auf einem zweistufigen Reaktionsmechanismus basiert. Demnach erfolgt zunächst die Reduktion von CO₂ zu Kohlenmonoxid, mit Wasserstoff als Reduktionsmittel:



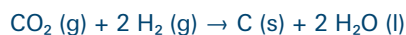
Kohlendioxid + Wasserstoff \rightleftharpoons Kohlenmonoxid + Wasser

Dieser erste Syntheseschritt entspricht der Rückreaktion der so genannten Wassergas-Shift-Reaktion, die bei der Aufbereitung von Gasgemischen und der Produktion von Wasserstoff Anwendung findet. Das so entstandene Kohlenmonoxid wird mit Wasserstoff schließlich weiter zu Methan reduziert.

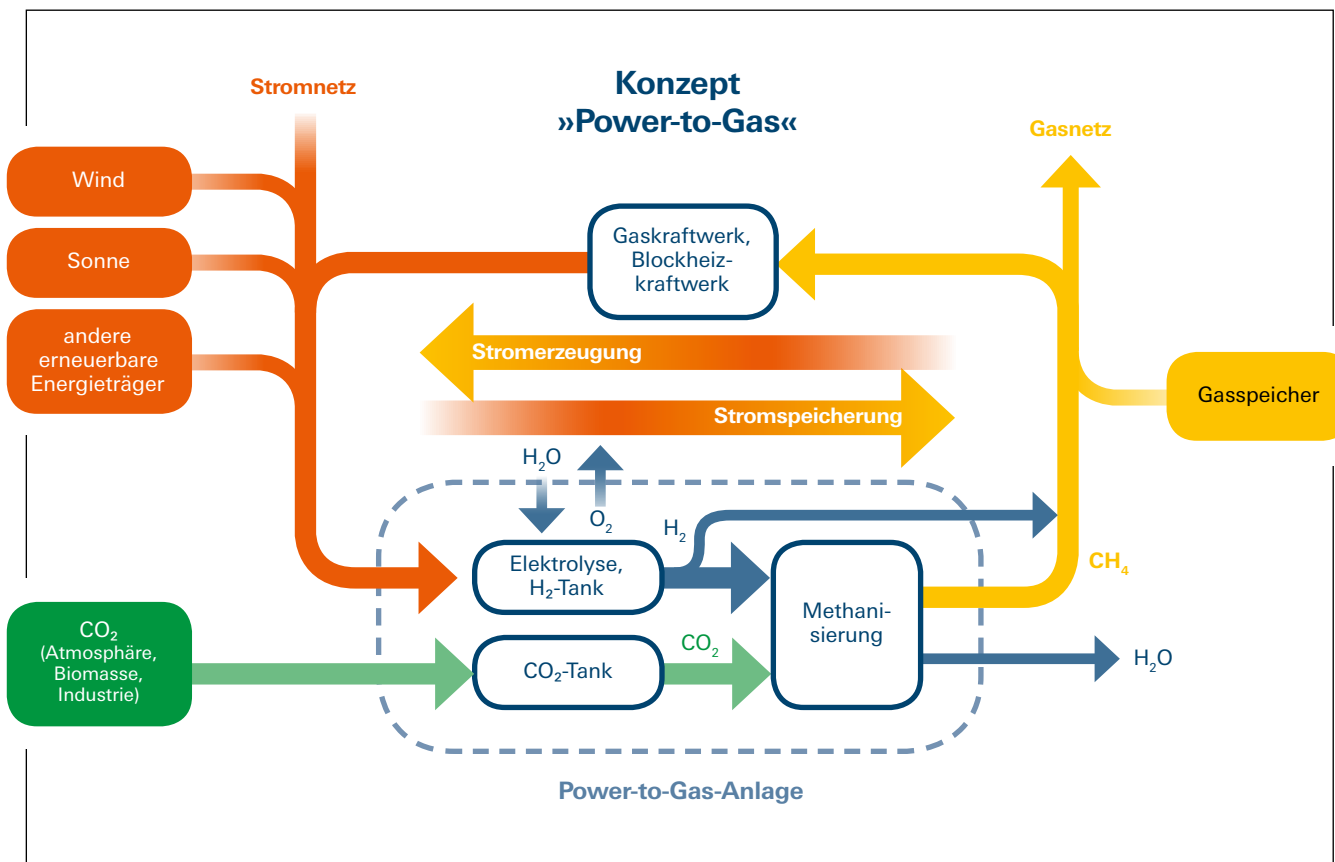
Das Verhältnis der gasförmigen Ausgangsstoffe zum gasförmigen Produkt Methan beträgt 5 : 1 (CO₂) beziehungsweise 4 : 1 (CO). Damit die Gleichgewichtsreaktionen in der gewünschten Richtung ablaufen, ist daher hoher Druck nötig. Darüber hinaus verläuft die Methanisierung exotherm, sprich, sie erzeugt Wärme. Folglich

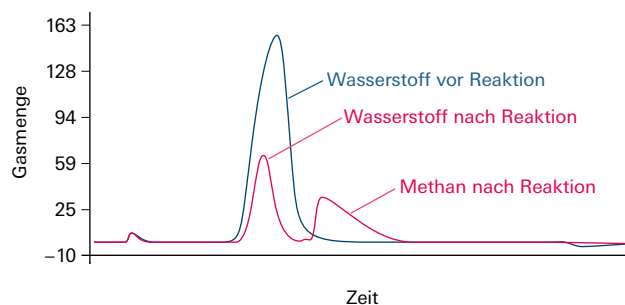
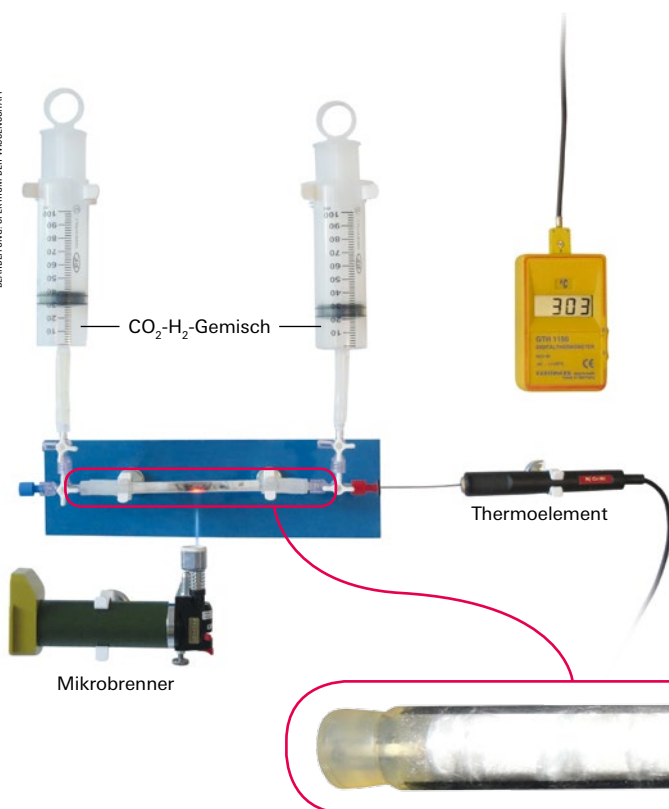
muss bei der technischen Reaktionsführung Wärmeenergie abgeführt werden, um das chemische Gleichgewicht in Richtung Methan zu verschieben. Die optimale Reaktionstemperatur beträgt zirka 300 Grad Celsius. Höhere Temperaturen begünstigen die Wassergas-Shift-Reaktion, und bei mehr als 450 Grad entsteht vermehrt Kohlenmonoxid als Endprodukt.

Des Weiteren erfordern die bei der Methanisierung ablaufenden Reaktionen hohe Aktivierungsenergien. Ein Katalysator, mit dem die Ausgangsstoffe eine Zwischenstufe bilden, der aber während der Reaktion selbst nicht verbraucht wird, hilft diese herabzusetzen. Bei der Auswahl gilt es zu beachten, dass Kohlenmonoxid viele effiziente Katalysatoren – Platin etwa – vergiftet und damit unbrauchbar macht. Gleichzeitig kann der richtige Katalysator die Bildung unerwünschter Nebenprodukte wie Kohlenmonoxid deutlich reduzieren. Für die Methanisierung von CO₂ eignen sich Nickel- und Rutheniumkatalysatoren, die in der Regel gegenüber kleineren Mengen Kohlenmonoxid unempfindlich sind. Auch direkt an der Oberfläche des Katalysators darf die Temperatur nicht zu hoch steigen. Ab zirka 600 Grad läuft sonst die so genannte Bosch-Reaktion ab, die elementaren Kohlenstoff abscheidet und damit die Effizienz des Katalysators herabsetzt (»s« steht für »fest«):



Kohlendioxid + Wasserstoff \rightarrow Kohlenstoff + Wasser





Methanisierung: Bei rund 300 Grad Celsius reagieren Wasserstoff (H₂) und Kohlendioxid (CO₂) zu Methan (links). Ein Nickelkatalysator (unten) beschleunigt die Reaktion. Das Gaschromatogramm (oben) bestätigt die Bildung von Methan unter Verbrauch von Wasserstoff.

Das hier vorgestellte Power-to-Gas-Verfahren lässt sich mit Hilfe eines recht einfachen experimentellen Aufbaus gut nachvollziehen und bietet die Gelegenheit, das Thema nachhaltige Energieversorgung zum Beispiel im Chemieunterricht anschaulich zu vermitteln. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung mit weiterführenden Experimenten sowie Videos finden Sie in der Online-Ergänzung zu diesem Artikel und unter <https://www.ph-freiburg.de/chemie/linksmaterial.html>.

Da Kohlenmonoxid hochgiftig ist – das geruchlose Gas hemmt die Sauerstoffaufnahme durch das Blut und kann zum Erstickungstod führen –, verwenden wir hier Wasserstoff und CO₂ zur Methansynthese. Für den Versuchsaufbau benötigen wir diverses Stativmaterial (Muffen, Klemmen, Stangen und Stativplatten) oder eine Weißwandtafel.

Zuerst befüllen wir ein Quarzrohr von zehn Zentimeter Länge und neun Millimeter Durchmesser mit dem Katalysator. Dafür eignet sich reines Nickelpulver oder besser noch nanoskaliges Nickel-Zeolith. Letzteres hat den Vorteil, dass Zeolith hygroskopisch (Wasser bindend) ist und das im Zuge der Methanisierung entstehende Wasser aufnimmt. Dadurch verschiebt sich das Gleichgewicht der Reaktion in Richtung des gewünschten Produkts Methan. (Wassergesättigtes Zeolith lässt sich durch Erhitzen regenerieren.) Die Katalysatoreinheit verbinden wir über Dreiwegehähne mit zwei 100-Milliliter-Plastikspritzen und installieren zudem an einem Ende des Quarzrohrs ein Thermometer mit einem Nickel-Chrom-Nickel-Thermoelement, das mehrere hundert Grad problemlos misst (siehe Bild oben). Für die notwendige Reaktionstemperatur sorgt ein handelsüblicher Mikrobrenner.

Nun spülen wir den gasdichten Versuchsaufbau mit Wasserstoff und füllen anschließend in die eine Spritze

80 Milliliter Wasserstoff und in die andere 20 Milliliter CO₂. Das Volumenverhältnis der beiden Gase entspricht damit dem bei der Methanisierung von CO₂ (4 : 1). Danach erhitzen wir den Katalysator auf 300 Grad und lassen das Gasgemisch langsam und gleichmäßig rund zehnmal über den Katalysator strömen, indem wir abwechselnd an den Spritzen ziehen beziehungsweise diese entleeren. Dabei nimmt das Gasvolumen kontinuierlich ab. Im Idealfall schrumpft es bis auf exakt ein Fünftel des ursprünglichen Volumens – das nämlich würde eine vollständige Umsetzung von Wasserstoff und CO₂ zu Methan bedeuten (unter der Annahme, dass der zugleich gebildete Wasserdampf absorbiert wurde oder kondensiert ist).

Zur Analyse der Reaktionsprodukte bietet sich die Gaschromatografie an, ein Verfahren zur Trennung von Gasgemischen. Die obige Grafik zeigt ein exemplarisches Chromatogramm. Die Methanausbeute liegt in der Regel bei rund 80 Prozent.

Der Versuch demonstriert, wie man aus CO₂ und elektrolytisch gewonnenem Wasserstoff »grünes Erdgas« synthetisieren kann. Als Stromspeicher und -erzeuger, der sich flexibel an den Bedarf anpassen lässt, könnte Power-to-Gas eine wichtige Rolle spielen bei einer nachhaltigen Energieversorgung der Zukunft. ◀

QUELLEN

Delmelle, R. et al.: Development of Improved Nickel Catalysts for Sorption Enhanced CO₂ Methanation. In: International Journal of Hydrogen Energy 41, S. 20185–20191, 2016

Rubner, I. et al.: »Power to Gas« – Ein Baustein zur schulpraktischen Umsetzung der Energiewende. In: Chemkon 24, S. 7–12, 2017

ASTROPHYSIK WIE ENTSTANDEN DIE ERSTEN QUASARE?

Viele Schwarze Löcher waren bereits überraschend früh nach dem Urknall gewaltig groß. Ein neuer Entstehungsmechanismus soll das Rätsel lösen, wie es dazu kommen konnte.

G. A. M. MILLER



Priyamvada Natarajan ist theoretische Astrophysikerin an der Yale University. Sie erforscht Schwarze Löcher und deren Einfluss auf die Strukturen und die Entwicklung von Galaxien.

» spektrum.de/artikel/1580888

Quasare gehören zu den leuchtkräftigsten Erscheinungen im Kosmos, wie diese grafische Darstellung illustriert. Sie werden von massereichen Schwarzen Löchern angetrieben, die hineinstürzende Materie aufheizen.

► In seinen ersten Augenblicken war der Kosmos unvorstellbar heiß und kompakt. Es dauerte eine ganze Weile, bis er sich genug ausgedehnt und abgekühlt hatte, damit sich Atome bilden und das Universum mit Gas füllen konnten. Dieses verdichtete sich im Lauf von einigen hundert Millionen Jahren zu den ersten Sternen, die sich 400 Millionen Jahre nach dem Urknall allmählich zu Galaxien zusammenfanden. Astronomen haben festgestellt, dass damals bereits eine weitere Klasse astronomischer Objekte aufleuchtete: die Quasare.

Quasare sind extrem hell. Sie werden befeuert von Gas, das in »supermassereiche« Schwarze Löcher mit der milliardenfachen Masse der Sonne fällt und sich dabei aufheizt. Sie zählen zu den leuchtkräftigsten Gebilden im Universum und sind deswegen noch über gewaltige Strecken hinweg sichtbar. Die am weitesten entfernten und damit jüngsten Quasare stellen die Astronomen allerdings vor ein großes Rätsel, denn es hätte sie zu dem Zeitpunkt eigentlich noch gar nicht geben dürfen.

Konventionelle Theorien zur Entstehung supermassereicher Schwarzer Löcher veranschlagen dafür eine Milliarde Jahre und mehr. Im Rahmen der Himmelsdurchmusterung Sloan Digital Sky Survey stießen Astronomen jedoch bereits 2001 auf einen Quasar zu einer Zeit, als der Kosmos noch jünger war. Über einen weiteren Rekordanwärter berichteten Forscher dann 2017: Er leuchtete bereits 690 Millionen Jahre nach dem Urknall. Wie konnten sich die kosmischen Leuchttürme in so kurzer Zeit bilden?

Viele Astronomen meinen, die ersten Schwarzen Löcher – die Saatkörner für die späteren supermassereichen Exemplare – wären zurückgeblieben, nachdem die frühesten Sterne als Supernovae explodiert sind. Doch solche Überreste hätten höchstens ein paar hundert Sonnenmassen enthalten. Es ist schwierig, sich Szenarien auszudenken, in denen derartige Objekte in genügend kurzer Zeit Unmengen von Material aus ihrer Umgebung einsammeln.

Als möglichen Ausweg aus dem Dilemma haben einige Kollegen und ich erstmals vor rund zehn Jahren ein Modell vorgeschlagen, das ohne die Geburt und den Tod von Sternen auskommt. Demnach entstehen die Saatkörner der Schwarzen Löcher stattdessen bei einem direkten Kollaps von Gas innerhalb von einigen wenigen hundert Millionen Jahren nach dem Urknall. Nach dem Schnellstart könnten diese Schwarzen Löcher von anfänglich 10000 bis 100000 Sonnenmassen leicht auf bis zu zehn Milliarden Sonnenmassen anwachsen. Aber ist es tatsächlich so gewesen? Vermutlich wird sich die Frage mit dem James Webb Space Telescope (JWST) beantworten lassen, das nach einigen Verzögerungen 2021 starten soll.

Schwarze Löcher sind rätselhafte astronomische Objekte, deren gewaltiger Schwerkraft selbst Licht nicht entkommen kann. Bis zur Entdeckung der Quasare war nicht einmal klar, ob es sich vielleicht nur um mathematische Kuriositäten aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie ohne reale Bedeutung handelt. Doch bei Quasaren können Astronomen die Strahlung von Materie beobachten, die tatsächlich in entsprechende Gebilde hineinfällt.

Außerordentlich schnelles Wachstum erfordert außergewöhnliche Erklärungen

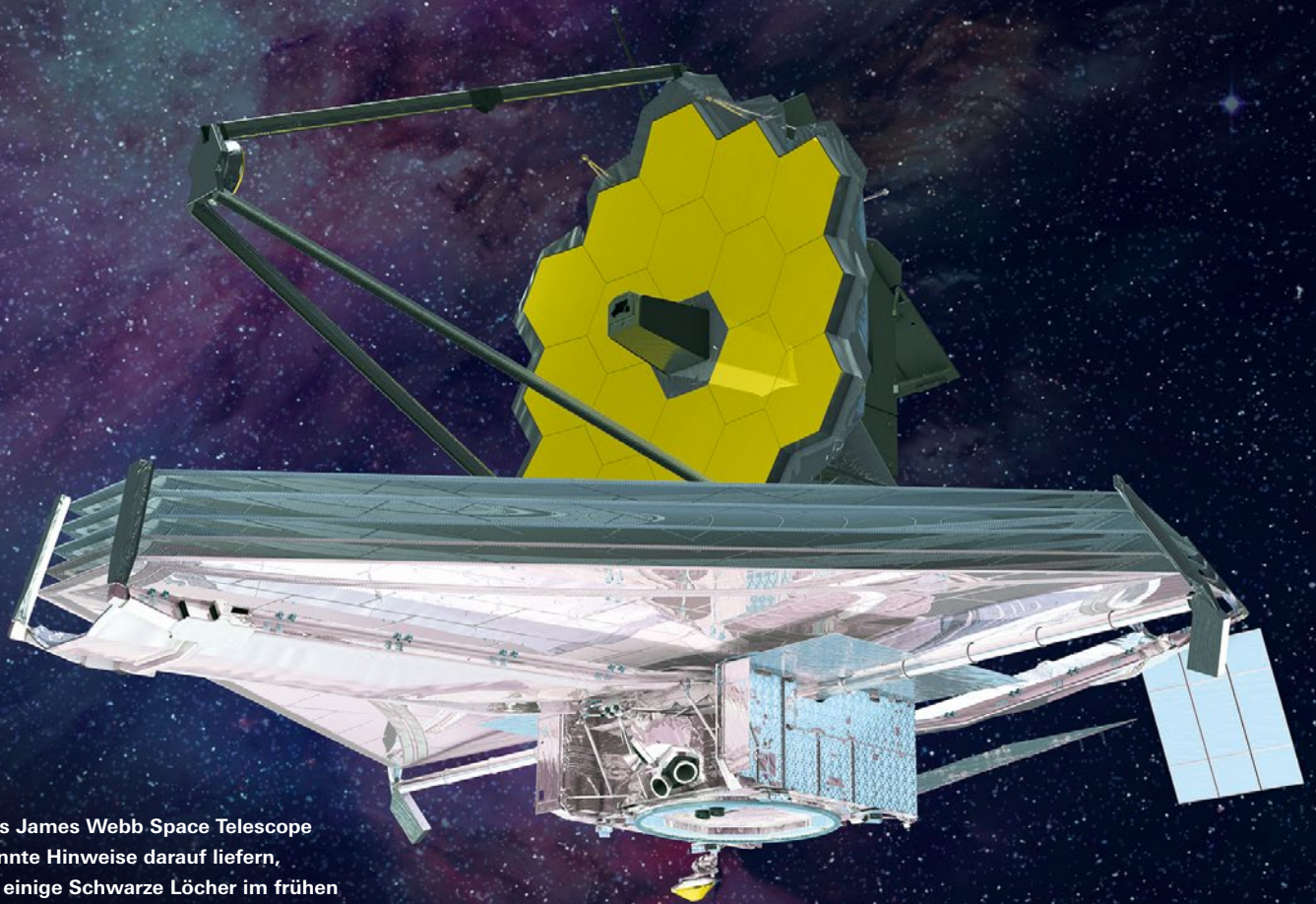
Die meisten Schwarzen Löcher entstehen nach heutigen Vorstellungen, wenn Sterne mit mehr als etwa zehn Sonnenmassen ihren nuklearen Brennstoff verbraucht haben und deshalb abkühlen. Die Schwerkraft gewinnt dann die Oberhand, und der Stern kollabiert. Das führt zu einer katastrophalen Supernova-Explosion und lässt ein Schwarzes Loch zurück. Lange vermuteten Astronomen, auch die Exemplare in Quasaren müssten über jenen Weg entstanden sein. Es könnte sich, so die Überlegung, um die Überreste der als Population III bezeichneten ersten Sterne im Kosmos handeln. Diese sind etwa 200 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden, als das ursprüngliche Gas im Kosmos abkühlte und fragmentierte, das heißt in einzelne Wolken zerfiel. Die Sterne der Population III waren vermutlich massereicher als die Sterne späterer Generationen und haben vielleicht Schwarze Löcher mit bis zu mehreren hundert Sonnenmassen hinterlassen. Wenn sie außerdem in dichten Haufen entstanden sind, verschmolzen die aus ihnen hervorgegangenen Schwarzen Löcher rasch miteinander zu Exemplaren mit tausenden Sonnenmassen. Doch selbst diese wären viel zu klein, um die ersten Quasare im jungen Kosmos anzutreiben.

Es gibt außerdem Vermutungen, dass bereits infolge der exponentiellen Expansion des Weltraums in dessen ersten Sekundenbruchteilen »primordiale« Schwarze Löcher entstanden sein könnten. Dabei wären winzige Fluktuationen der Materiedichte im Verlauf der Inflation genannten Frühphase rapide angewachsen (siehe dazu »Die Schwarzen Löcher des Urknalls«, **Spektrum** Oktober 2017, S. 12). Doch auch die Produkte dieses Vorgangs hätten wohl lediglich etwa 10 bis 100 Sonnenmassen enthalten.

Beide Ansätze stehen also vor demselben Problem, wie die ersten Quasare zu erklären sind: Deren Saatkörner müssten innerhalb der ersten Milliarde Jahre der kosmi-

AUF EINEN BLICK DIE SAAT DER SCHWARZEN MONSTER

- 1** In weit entfernten, sehr jungen Teilen des Alls sehen Astronomen extrem leuchtkräftige Objekte, so genannte Quasare. Diese werden von riesigen Schwarzen Löchern angetrieben.
- 2** Es ist unklar, wie solche Gebilde so bald nach dem Urknall entstehen konnten. Über den bisher angenommenen Weg – die Explosion massereicher Sterne – wären sie nicht schnell genug auf Quasargröße angewachsen.
- 3** Physiker bringen eine Alternative ins Spiel: Schwarze Löcher könnten direkt aus kollabierenden Gaswolken hervorgegangen sein. Mit neuen Teleskopen wird sich das bald überprüfen lassen.



Das James Webb Space Telescope könnte Hinweise darauf liefern, ob einige Schwarze Löcher im frühen All tatsächlich durch den direkten Kollaps von Gaswolken entstanden sind. Es soll 2021 starten.

NASA

schen Geschichte außerordentlich schnell größer geworden sein. Nach aktuellem Wissen sind entsprechende Szenarien höchst unwahrscheinlich. Es gibt nämlich eine Rate, bei der ein Schwarzes Loch optimal wächst, das »Eddington-Limit«. Ein solches Schwarzes Loch verdoppelt seine Masse etwa in der Größenordnung einiger zehn Millionen Jahre. Um derart exponentiell auf eine Milliarde Sonnenmassen anzuwachsen, müsste ein Saatkorn mit der zehnfachen Sonnenmasse eine Milliarde Jahre lang Gas und Sterne am Eddington-Limit aufnehmen. Es ist schwer vorstellbar, wie sich eine ganze Population Schwarzer Löcher kontinuierlich so effektiv Materialnachschub aus der Umgebung holen kann.

Wenn die ersten Quasare tatsächlich aus den Schwarzen Löchern der Population III entstanden sein sollten, müssten sie mehr Materie aufgenommen haben, als das Eddington-Limit erlaubt. Das ist unter speziellen Umständen in einer dichten, gasreichen Umgebung durchaus möglich. Derartige Bedingungen könnte es im frühen Universum gegeben haben, aber sie wären selbst damals nicht die Norm gewesen. Außerdem kann ein außergewöhnlich schnelles Wachstum dazu führen, dass ein Schwarzes Loch sich gewissermaßen verschluckt – die dabei erzeugte Strahlung stoppt dann den Zustrom von Materie. Sofern unsere Vorstellungen vom Fütterungsprozess Schwarzer Löcher

und dem Eddington-Limit stimmen, mag es angesichts dieser Einschränkungen zwar den einen oder anderen Ausnahmequasar gegeben haben. Aber so lässt sich nicht die Existenz einer gesamten Population erklären.

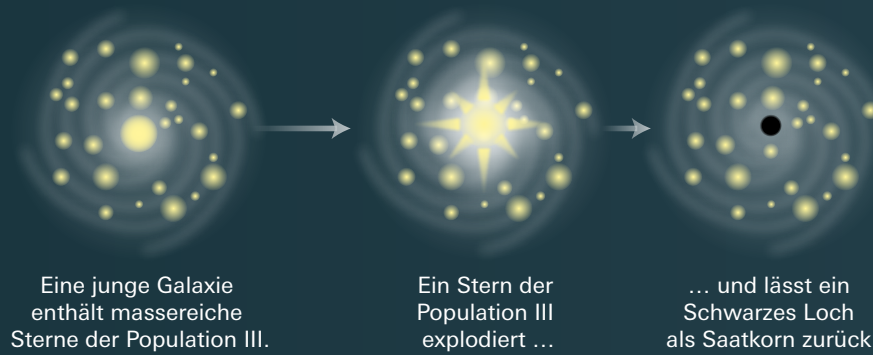
Rettender Kollaps gescheiterter Galaxien

Wir müssen uns deshalb fragen, ob nicht weitere Prozesse die Saatkörner für supermassereiche Schwarze Löcher hervorgebracht haben. Aufbauend auf den Untersuchungen anderer Forschungsgruppen veröffentlichten mein Mitarbeiter Guiseppe Lodato und ich 2006 und 2007 mehrere Arbeiten über einen neuen Mechanismus. Der Prozess beginnt mit großen Scheiben aus ursprünglichem Gas. Normalerweise würden sie abkühlen, fragmentieren und Sterne und Galaxien bilden. Wie wir jedoch mit Computersimulationen zeigten, können sie stattdessen zu dichten Klumpen kollabieren, aus denen Schwarze Löcher mit der zehntausend- bis millionenfachen Sonnenmasse hervorgehen. Dazu muss der normale Abkühlungsprozess allerdings gestört werden.

Scheiben kühlen sich effektiver ab, wenn sie molekularen Wasserstoff enthalten, bei dem jeweils zwei Atome aneinander gebunden sind. Wenn eine Galaxie in der Nachbarschaft intensiv genug leuchtet, bricht die Strahlung diese Bindungen wieder auf. Dann ist der resultie-

Konventionelles Szenario

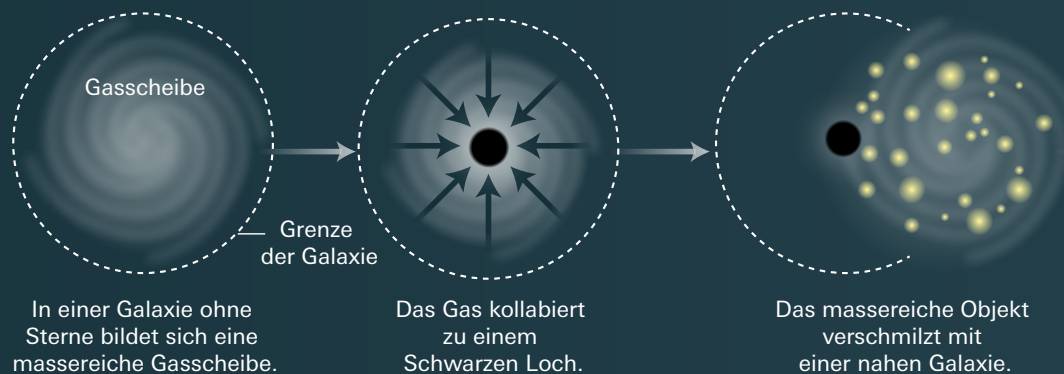
Als die ersten Sterne (»Population III«) ihren nuklearen Brennstoff aufgebraucht hatten, vergingen sie in Supernova-Explosionen. Zurück blieben Schwarze Löcher. Diese schluckten Gas und Sterne aus der Umgebung und wuchsen.



Urknall etwa 180 Millionen Jahre etwa 270 Millionen Jahre etwa 370 Millionen Jahre

Direkter Kollaps

Unterbleibt in einer angehenden Galaxie die Sternentstehung, kann die gesamte Gasscheibe zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Stößt dieses mit einer Nachbargalaxie zusammen, verschlingt es dort Gas und Sterne und wächst rasant.



rende atomare Wasserstoff zu warm, um daraus Sterne zu bilden. Ohne diese wiederum kann eine solche massereiche, bestrahlte Scheibe dynamisch instabil werden. Daraufhin strömt ihre Materie schnell in das Scheibenzentrum, und durch den direkten Kollaps entsteht ein massereiches Schwarzes Loch. Dieses Szenario beruht auf dem Vorhandensein von Sternen in der Umgebung. Darum spielte es sich wohl vor allem in Materiescheiben ab, die um größere Galaxien mit Sternen der Population III kreisten.

Simulationen von Gasströmungen auf großen Skalen sowie die von kleinräumigeren Prozessen bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten lassen so entstehende Schwarze Löcher plausibel erscheinen. Aber das heißt noch nicht, dass sie auch tatsächlich existieren – wir benötigen beobachtbare Beweise. Vermutlich kommt häufig ein Vorgang vor, bei dem das Saatkorn mit der benachbarten Galaxie verschmilzt. Diese würde dem Schwarzen Loch eine neue Quelle an Gas zugänglich machen, das es verschlingen kann. In der speziellen Phase sollte die Struktur im frühen Universum als heller Miniquasar aufleuchten und nachweisbar sein.

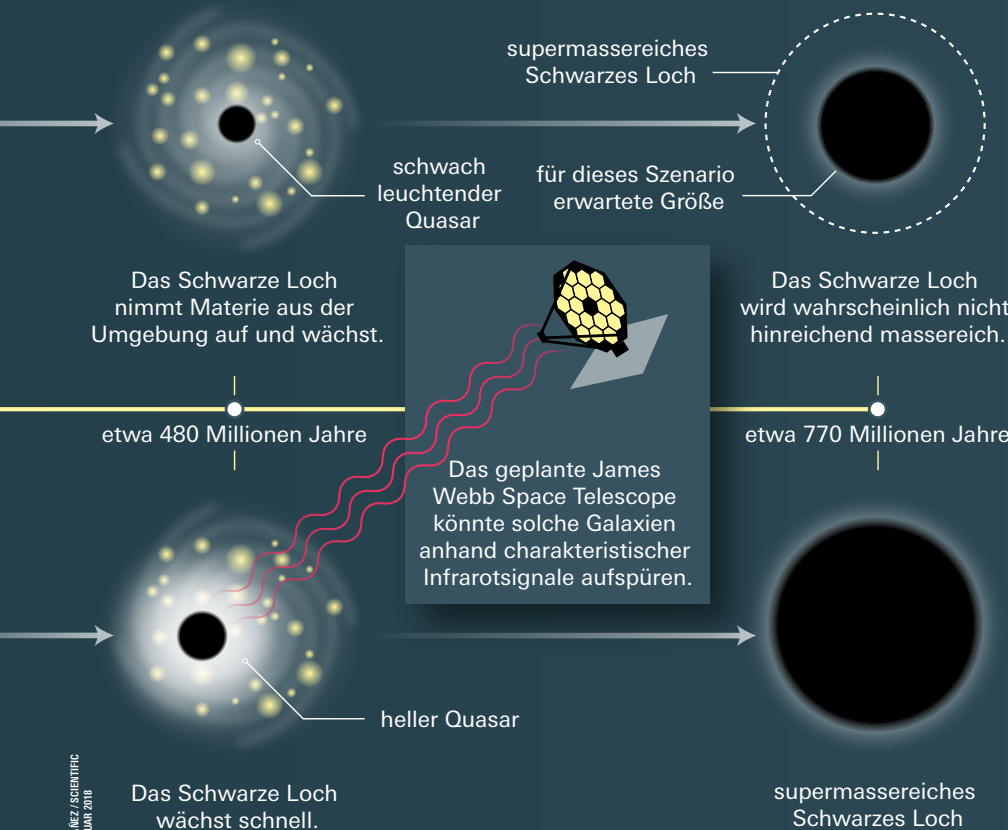
Das Schwarze Loch würde nicht nur heller strahlen als die sie umgebenden Sterne, sondern wäre auch massereicher. Das kehrt die normale Ordnung um – üblicherweise sind die Sterne einer Galaxie zusammen etwa 1000-mal schwerer als das zentrale Schwarze Loch. So eine Galaxie mit übergewichtigem Schwarzen Loch (englisch: obese

black hole galaxy, OBG) sollte eine sehr spezielle spektroskopische Signatur aufweisen, insbesondere im infraroten Strahlungsbereich bei Wellenlängen von 1 bis 30 Mikrometern. Darauf werden das Mittelinfrarotinstrument und die Nahinfrarotkamera des JWST eingestellt sein. Als leistungsstärkstes Weltraumteleskop der Astronomiegeschichte wird es in die frühesten kosmischen Epochen blicken. Falls sich dort tatsächlich Galaxien mit übergewichtigen Schwarzen Löchern verbergen, wäre das ein starkes Indiz für das Szenario des direkten Kollapses. Traditionelle Saatkörner für supermassereiche Schwarze Löcher, die aus Sternen der Population III entstehen, wären dagegen wahrscheinlich zu leuchtschwach für einen Nachweis.

Neue Instrumente versprechen Antworten

Möglicherweise lässt sich unser Modell noch auf andere Weise überprüfen. In seltenen Fällen könnte die Muttergalaxie bereits ein zentrales Schwarzes Loch besitzen. Verschmilzt es mit dem durch direkten Kollaps entstandenen Schwarzen Loch, werden energiereiche Gravitationswellen frei. Diese sollten mit der Laser Interferometer Space Antenna (LISA) nachweisbar sein, einer geplanten Satellitenmission der europäischen Raumfahrtorganisation ESA. LISA soll in den 2030er Jahren starten.

Im frühen Universum könnten Schwarze Löcher sowohl durch direkten Kollaps als auch durch Akkretion aus den



Zwei Wege zum Schwarzen Loch

Um Quasare hell aufleuchten zu lassen, benötigen Schwarze Löcher eine enorme Masse. Es ist rätselhaft, wie sie diese schnell genug erhalten haben. Das konventionelle Bild der Entstehung der frühesten supermassereichen Schwarzen Löcher beginnt mit dem Tod der ersten Sterne (oben). Eine neuere Idee (unten) geht davon aus, dass große Gasscheiben direkt zu Schwarzen Löchern kollabiert sind.

AMANDA MONTANEZ / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2018

Überresten von Sternen der Population III hervorgegangen sein. Die Frage ist: Welcher Mechanismus produzierte damals die meisten Quasare? Die Antwort darauf würde Ordnung in die zeitliche Entwicklung der Objekte im jungen Kosmos bringen und Informationen darüber liefern, wie supermassereiche Schwarze Löcher die großen Galaxien in ihrer Umgebung beeinflussen.

Beobachtungsdaten deuten darauf hin, dass zentrale Schwarze Löcher darüber entscheiden, wie viele Sterne in ihren Galaxien entstehen. Indem die beim Einfall von Materie freigesetzte Energie das umgebende Gas aufheizt, verhindert sie dessen Abkühlung, und die Sternbildung kommt nicht in Gang. Die Folgen können sogar weit über das galaktische Zentrum hinausreichen. Wenn eng gebündelte Strahlung nach außen schießt, wirken sich diese energiereichen so genannten Jets bis in die äußeren Regionen der Galaxie aus. Die Mechanismen und Auswirkungen sind höchst komplex, und Astronomen kennen durch die bisherigen Messungen mit Radioteleskopen längst nicht alle Details.

Revolutionäre Technik erweitert gerade unsere Möglichkeiten, Schwarze Löcher aller Massen zu untersuchen und zu verstehen. Als sich 2015 erstmals Gravitationswellen im Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) bemerkbar machten, konnten die Wissenschaftler diese beispielsweise auf zwei zusammenstoßende Schwarze Löcher mit etwa 36 und 29 Sonnenmassen

zurückführen. Inzwischen haben viele weitere Gravitationswellen von ähnlichen Ereignissen Einzelheiten darüber geliefert, wie Schwarze Löcher verschmelzen. Auch als Pulsar Timing Arrays bezeichnete Untersuchungen könnten zukünftig Schwingungen der Raumzeit nachweisen, hier dann durch die genaue Vermessung kosmischer Strahlungsquellen.

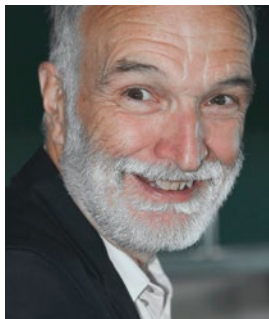
Obendrein bilden Astronomen mit Hilfe von Radioteleskopen auf der ganzen Welt das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße ab. Die Wissenschaftler hoffen, mit dem Event Horizon Telescope einen ringförmigen Schatten um das Schwarze Loch zu sehen, der von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt wird (siehe »Schattenwurf des Schwarzen Lochs«, *Spektrum* Juli 2017, S. 20). Und bald wird das JWST Blicke auf die frühesten Schwarzen Löcher gestatten. Viele Entdeckungen sind also schon in naher Zukunft möglich – und könnten unsere Vorstellungen über Schwarze Löcher radikal verändern. ◀

QUELLEN

Latif, M. A. et al.: Black Hole Formation in the Early Universe. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 433, S. 1607–1618, 2013

Natarajan, P. et al.: Unveiling the First Black Holes with JWST: Multi-wavelength Spectral Predictions. In: *The Astrophysical Journal* 838, 117, 2017

SCHLICHTING! JETZT BIN ICH GAR



Spätzle, Gnocchi und Co sind fertig, sobald sie im siedenden Wasser an die Oberfläche kommen. Dann haben sich die in ihnen enthaltenen Luftbläschen so stark erwärmt und ausgedehnt, dass ihre Dichte hinreichend klein geworden ist.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

» spektrum.de/artikel/1580890

► Spätzle kochen ist einfach, heißt es. Denn sie wüssten, wann sie gar sind. In der Tat dürfte jeder, der es einmal versucht hat, erlebt haben, wie die Teigstückchen nach einer gewissen Kochzeit massenhaft zur Oberfläche steigen. Auch weitere Beilagen zeigen an, wenn sie vollständig durcherhitzt sind, darunter Gnocchi und Knödel – obwohl diese gar nicht aus Nudelteig, sondern aus Kartoffelmasse bestehen. Andere Arten von Pasta zeigen das Verhalten hingegen nicht.

Wenn man die kalten Spätzle in den Topf gibt, tauchen sie zunächst auf den Boden. Doch nach kurzer Zeit arbeiten sich vereinzelte Exemplare im siedenden Wasser empor, und bald schwimmen alle an die Oberfläche. Dieser Vorgang ist interessanterweise reversibel: Wartet man, bis sich das Wasser samt Teigwaren genügend stark abkühlt, sinken diese wieder ab. Erneutes Erwärmen treibt sie dann wieder in die Höhe.

Das liefert bereits einige Hinweise auf die physikalischen Hintergründe. Jeder Körper verdrängt beim Eintauchen so viel Flüssigkeit, wie seinem eigenen Volumen entspricht, und erfährt infolgedessen eine nach oben gerichtete Auftriebskraft. Ist seine abwärts wirkende Gewichtskraft betragsmäßig größer, sinkt er auf den Boden; ist sie kleiner, schwimmt er an der Oberfläche. Dem so genannten archimedischen Prinzip zufolge ist die statische Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit. Ein Objekt schwebt in dieser, wenn seine Dichte (also der Quotient aus Masse und Volumen) derjenigen der Flüssigkeit entspricht. Bei größerer oder kleinerer Dichte sinkt es beziehungsweise steigt auf.

Für die Spätzle bedeutet das: Sie gehen offenbar deswegen zunächst unter, weil ihre Dichte bei Raumtemperatur höher ist als die des Wassers. Im Lauf der

Erwärmung wird sie geringer. Da die Masse des Teigs kaum kleiner werden dürfte, muss sein Volumen gewachsen sein. Das Wasser ändert seine Dichte vergleichsweise wenig, so dass dieser Einfluss vernachlässigt werden kann.

Doch was ist der Grund für die Volumenzunahme? Man könnte leicht an Aufquellen denken. Das aber kann nicht die Ursache für die geringere Dichte sein: Wenn die enthaltene Stärke Wasser aufnimmt, kompensiert der damit einhergehende Gewichtszuwachs ja exakt die vergrößerte Auftriebskraft. Das kennen wir von anderen Nudelprodukten, die beim Kochen nicht aufsteigen. Auch beispielsweise eine Gasentwicklung im Inneren können wir ausschließen. Wie bei einem aufgehenden Kuchen wäre so eine Reaktion unumkehrbar, und die Spätzle würden nach dem Abkühlen nicht wieder zu Boden sinken.

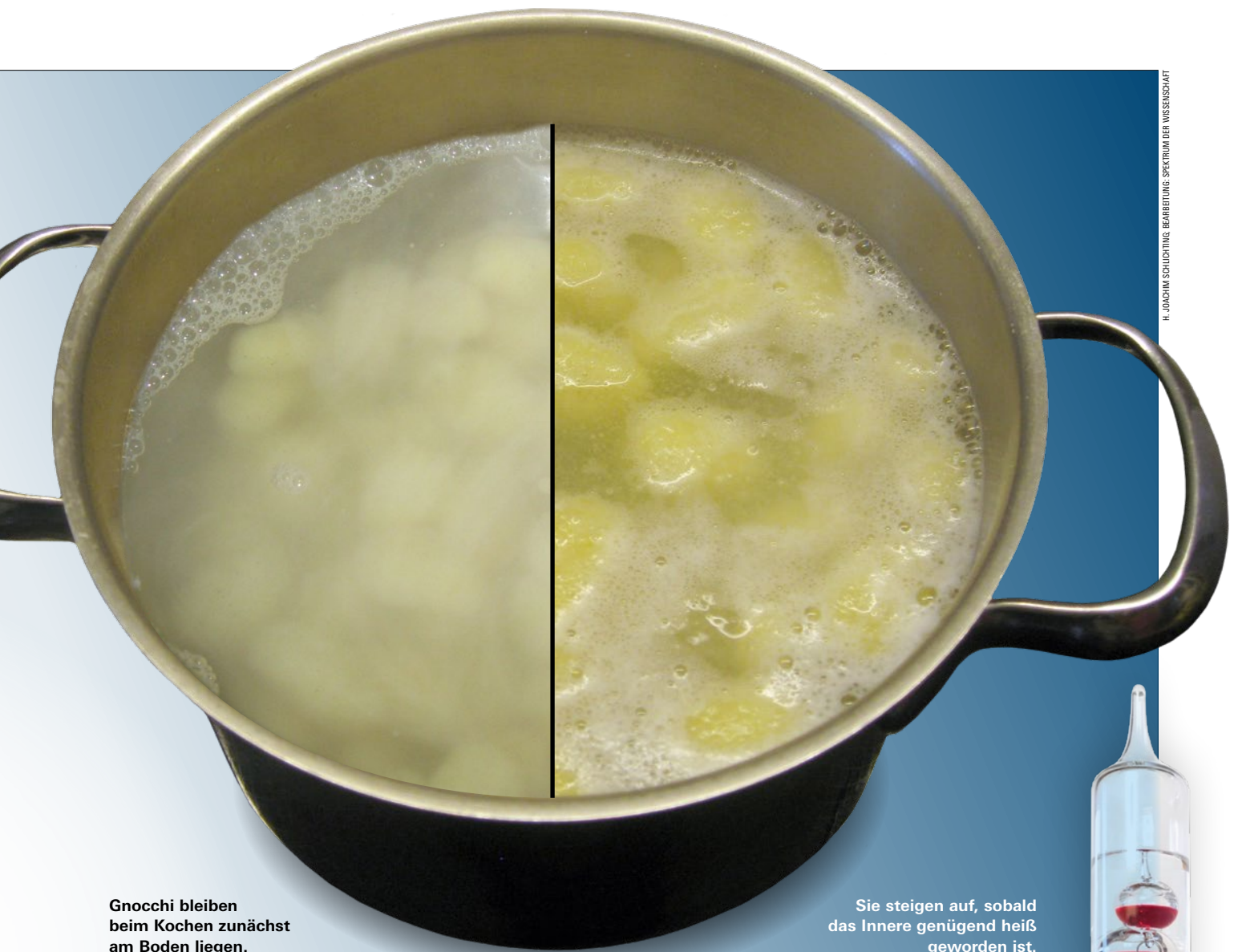
Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten ist vielmehr eine indirekte Folge ihrer abweichenden Herstellungsweise. Während der Spätzleproduktion nimmt der Teig viel Luft auf, die in kleinen, abgeschlossenen Hohlräumen erhalten bleibt. Nicht so beim Walzen und Pressen klassischer Pasta.

Bei der Erwärmung verhält sich die eingeschlossene Luft nahezu wie ein ideales Gas, das sich proportional zur Temperatur ausdehnt. Infolgedessen werden die Spätzle regelrecht aufgepumpt und erhalten so den beobachteten Auftrieb. Sobald die Temperatur abnimmt, schrumpft die Luft wieder und damit das Volumen der Spätzle; sie sinken ab. Wer seine garen Teigwaren im Wasser vergisst, findet sie schließlich am Boden des Topfes vor.

Das Steig- und Sinkverhalten erinnert an das so genannte Galilei-Thermometer. Dabei handelt es sich um

Sie blies sich richtig auf, als würde sie gleich aufsteigen wie eine Montgolfiere, wenn niemand sie festhielt

Sten Nadolny (* 1942)



Gnocchi bleiben beim Kochen zunächst am Boden liegen.

Sie steigen auf, sobald das Innere genügend heiß geworden ist.

einen schmalen, hohen Glaszylinder (siehe kleines Bild rechts) mit einer transparenten Flüssigkeit, in der einige teilweise mit Luft gefüllte Glaskörper unterschiedlicher Dichte driften. An deren Lage lässt sich die ungefähre Temperatur ablesen: Bei Erwärmung sinkt eine nach der anderen Kugel ab, und wenn es kälter wird, steigen sie wieder auf. Die Kugeln sind so beschaffen und angeordnet, dass immer die unterste der aufschwimmenden Kugeln die aktuelle Temperatur anzeigt.

Anders als bei den Spätzle ist jedoch nicht eine Änderung der Dichte der Glaskugeln für den jeweiligen Auf- und Abstieg verantwortlich. Da die Schwimmkörper abgeschlossen sind, ändert sich ihre Masse nicht, und die Volumenausdehnung von Glas ist vernachlässigbar gering – zumal das Gerät ohnehin nur auf ganze Grad genau misst. Vielmehr basiert das Prinzip auf der schwankenden Dichte der Umgebungsflüssigkeit.

Spätzle sind trotz dieser Ähnlichkeit als Thermometer völlig ungeeignet. Sie differenzieren durch ihren einheit-

lichen und ziemlich abrupten Aufstieg lediglich zwischen sehr heiß und siedend heiß, unterscheiden für jemanden, der den Topf anfassen will, also nicht einmal zwischen ungefährlich und gefährlich. Als Maß für die beiden Zustände »gar« und »nicht gar« ist ihr Verhalten jedoch ideal.

QUELLE

Ucke, C., Schlichting, H. J.: Das Galilei-Thermometer – Termometro lento. In: Physik in unserer Zeit 25/1, S. 44–45, 1994

Im »Galilei-Thermometer« sinken Glaskörper unterschiedlicher Dichte bei Erwärmung nacheinander nach unten. Die jeweils unterste der aufschwimmenden Kugeln zeigt die aktuelle Temperatur an.



ALGEBRAISCHE GEOMETRIE DER MATHEMATISCHE HELLSEHER

Mit gerade einmal 30 Jahren hat Peter Scholze ein ganzes Fachgebiet umgekrempelt – und einen intensiven Ausflug in das nächste unternommen.



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

» [spektrum.de/artikel/1580892](https://www.spektrum.de/artikel/1580892)

Im Jahr 2010 ging ein Gerücht um unter den Zahlentheoretikern. Angeblich hatte ein Student aus Bonn eine Arbeit geschrieben, die auf nur 37 Seiten erledigte, wofür die beiden etablierten Wissenschaftler Michael Harris und Richard Taylor ein Buch von immerhin 288 Seiten gebraucht hatten: den bis zur Undurchdringlichkeit verwickelten Beweis eines Satzes aus der Zahlentheorie, der wiederum von einem Spezialfall der berühmten Langlands-Korrespondenz handelt (**Spektrum** Juni 2018, S. 34). Tatsächlich – der 22-jährige Peter Scholze hatte in seiner Masterarbeit einen der kompliziertesten Teile des Beweises durch eine elegante Eigenkonstruktion ersetzt.

Die Fachwelt brach in großes Erstaunen aus. »Es war einfach unglaublich, dass jemand in so jungem Alter etwas so Revolutionäres zu Stande bringt«, sagt Jared Weinstein, Zahlentheoretiker an der Boston University und mit seinen 36 Jahren nicht gerade zum alten Eisen gehörend. »Das lehrt einen Bescheidenheit!«

Den Mathematikern in Bonn war Scholzes Ausnahmemental nicht entgangen. Nur zwei Jahre später ernannten sie ihn zum W3-Professor; damals war er der jüngste Inhaber dieses Titels überhaupt.

Mittlerweile hat Scholze es zu großem Ruhm gebracht. Die Verleiher des »SASTRA Ramanujan Prize« hielten ihn bereits 2013 für »einen der einflussreichsten Mathematiker der Welt«, und die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die ihm 2016 den Leibniz-Preis zuerkannte, würdigte ihn als ein »Ausnahmemental, wie es sie lediglich alle paar Jahrzehnte gibt«. Seit Juli dieses Jahres ist er – neben Koryphäen wie Gerd Faltings und Don Zagier – Direktor des

Max-Planck-Instituts für Mathematik in Bonn. Und auf dem jüngsten Internationalen Mathematikerkongress in Rio de Janeiro wurde seine Leistung mit der Fields-Medaille gewürdigt, einer Auszeichnung, die in ihrem Prestige dem Nobelpreis gleichkommt.

Sein bislang bedeutendstes Konzept ist eine Klasse fraktaler Strukturen, die er »perfektoide Räume« genannt hat. Die Idee ist erst ein paar Jahre alt, hat aber bereits reiche Früchte in der algebraischen Geometrie getragen – jenem von Alexander Grothendieck ins Leben gerufenen Gebiet, in dem sich Zahlentheorie und Geometrie treffen (**Spektrum** Juli 2015, S. 52). Jared Weinstein geht sogar so weit, seinem jungen Fachkollegen Hellseherqualitäten zu bescheinigen: »Er kann die Entwicklungen sehen, bevor sie überhaupt angefangen haben.«

Den Stoff der Anfängervorlesung?

Hat er nie richtig studiert

Viele Mathematiker treten Scholze »mit einer Mischung aus Bewunderung, Ängstlichkeit und Freude« entgegen, sagt Bhargav Bhatt von der University of Michigan, der mehrere Arbeiten gemeinsam mit ihm verfasst hat. Das liegt nicht an seiner Persönlichkeit, die seine Kollegen übereinstimmend als zugleich bodenständig und großzügig beschreiben. »Er lässt dich nie spüren, dass er dir haushoch überlegen ist«, formuliert sein Kollege Eugen Hellmann. Vielmehr liegt es an seiner phänomenalen Fähigkeit, tief in das Wesen eines mathematischen Gegenstands zu blicken. Anders als viele seiner Fachkollegen nimmt er sich nicht die Lösung eines speziellen Problems vor, sondern ein rätselhaftes Konzept, das er um seiner selbst willen verstehen möchte. Aber hinterher »finden die Strukturen, die er sich ausgedacht hat, Millionen von Anwendungen, die vorher niemand erahnen konnte, eben weil es genau die richtigen Konzepte waren«, so Ana Caraiani, Zahlentheoretikerin am Imperial College London, die ebenfalls mit ihm zusammengearbeitet hat.

Mit 14 Jahren begann Peter Scholze, sich die Mathematik auf Universitätsniveau selbst anzueignen. Hilfreich war,



Peter Scholze, geboren 1987 in Dresden, ist Professor am Hausdorff-Zentrum für Mathematik, einem von der Universität Bonn und dem Max-Planck-Institut für Mathematik getragenen Exzellenzcluster. Für seine mathematischen Leistungen wurde ihm bereits eine eindrucksvolle Anzahl von Preisen verliehen.

VOLKER LAMBERT / UNIVERSITÄT BONN

dass er damals auf das Heinrich-Hertz-Gymnasium in Berlin ging, eine Schule mit Schwerpunkt in Mathematik und Naturwissenschaften, die aus einer Spezialschule der DDR hervorgegangen ist. An dieser Schule »war man kein Außenseiter, wenn man sich für Mathematik begeisterte«, erzählt Scholze. Noch als Schüler gewann er einmal eine Silber- und dreimal eine Goldmedaille bei der internationalen Mathematik-Olympiade.

Mit 16 erfuhr er, dass zehn Jahre zuvor Andrew Wiles das berühmte fermatsche Problem aus dem 17. Jahrhundert gelöst hatte: Beweise, dass die Gleichung $x^n + y^n = z^n$ keine Lösung in natürlichen Zahlen hat, wenn der Exponent n größer als 2 ist. Scholze wollte den Beweis verstehen, musste aber bald feststellen, dass zwar die Aufgabe einfach zu formulieren ist, aber die Lösung allerlei von der härtesten aktuellen Mathematik erfordert. »Ich begriff erstmal gar nichts, aber es war faszinierend.«

Daraufhin arbeitete sich der Schüler von hinten nach vorne durch das Material: Jedes Mal, wenn er etwas nicht verstand, eignete er sich den dazu erforderlichen Stoff an, dann das, was man brauchte, um diese Inhalte zu verstehen, und so weiter. »Ungefähr so lerne ich heute noch«, erklärt er im Gespräch. »Was man in der Anfängervorlesung macht, wie lineare Algebra, habe ich nie richtig studiert – das ist bei anderen Gelegenheiten nebenher mitgekommen.«

Mehr als das ursprüngliche Problem reizte ihn das, was ihm auf dem langen, mühsamen Weg durch den Beweis begegnete: Strukturen wie Modulformen und elliptische Kurven, die auf geheimnisvolle Weise weit entfernte Gebiete wie Zahlentheorie, Algebra, Geometrie und Analysis miteinander verbinden. Allmählich kristallisierten sich seine speziellen Vorlieben heraus. Noch heute begeistert

AUF EINEN BLICK EIN AUSNAHMETALENT

- 1** Schon als Schüler eignete sich Peter Scholze die Mathematik auf Universitätsniveau selbst an und errang mehrere Goldmedaillen bei mathematischen Olympiaden.
- 2** Als 22-jähriger Student lieferte er einen radikal vereinfachten Beweis zu einem Satz, der einen Spezialfall der berühmten Langlands-Korrespondenz betrifft.
- 3** Das von ihm eingeführte Konzept der perfektoiden Räume hat sein Fachgebiet, die arithmetische algebraische Geometrie, revolutioniert.

er sich für Probleme, die aus einfachen Gleichungen für ganze Zahlen («diophantischen Gleichungen») erwachsen. Diese vergleichsweise handgreiflichen Ursprünge lassen die esoterischsten mathematischen Strukturen für ihn irgendwie konkret erscheinen. »Am Ende interessiert mich die Arithmetik«, sagt er. Und am schönsten finde er es, wenn er von seinen abstrakten Konstruktionen zu kleinen Entdeckungen über gewöhnliche ganze Zahlen kommt.

Nach der Schule begann er in Bonn zu studieren – und hat nie etwas mitgeschrieben, wie sich sein damaliger Kommilitone Eugen Hellmann erinnert: »Er hat das auf der Stelle verstanden, und nicht bloß irgendwie, sondern so tief durchdrungen, dass er es nie wieder vergaß.«

Schalze begann seine Forschungen in der algebraischen Geometrie, jener Fachrichtung, die mit geometrischen Mitteln Aussagen über ganzzahlige Lösungen von Polynomgleichungen sucht. Das sind Gleichungen wie $xy^2+3y=5$, in denen die Unbekannten wie x und y nur mit sich selbst – auch mehrfach –, miteinander und mit gan-

zen Zahlen multipliziert und diese Produkte addiert werden. Prominentes Beispiel ist Fermats Gleichung $x^n+y^n=z^n$.

Manchmal ist es nützlich, die Beteiligten einer solchen Gleichung nicht als gewöhnliche reelle Zahlen zu interpretieren, sondern als so genannte p -adische Zahlen («Die bizarre Welt der p -adischen Zahlen«, unten). Sie entstehen dadurch, dass man die Lücken zwischen den rationalen Zahlen auf sehr ungewohnte Weise füllt. Die rationalen Zahlen («Brüche»), das heißt Quotienten ganzer Zahlen, liegen zwar »unendlich dicht« beieinander; gleichwohl gibt es zwischen ihnen Lücken, wie man zum Beispiel bei dem Versuch entdeckt, die Wurzel aus 2 zu berechnen. Man findet beliebig gute rationale Näherungen, insbesondere wird der Abstand zwischen verschiedenen Näherungen kleiner als jede positive Zahl, aber die Zahl $\sqrt{2}$ selbst ist nicht rational. Um derartige Lücken zu stopfen, führt man die irrationalen Zahlen ein.

Fasst man dagegen die natürlichen Zahlen als p -adische Zahlen (zu einer festgelegten Basis p , die eine Primzahl

Die bizarre Welt der p -adischen Zahlen

Unsere gewöhnliche (dezimale)

Schreibweise für Zahlen ist eine Darstellung als Summe von Zehnerpotenzen mit Vorfaktoren («Koeffizienten») zwischen 0 und 9. 347 ist eine Kurzform für $3 \cdot 10^2 + 4 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0$. In der Tat kann man jede reelle Zahl mit der Folge ihrer Ziffern identifizieren: $a_n a_{n-1} \dots a_1 a_0, a_{-1} a_{-2} a_{-3} \dots$ ist im Wesentlichen dasselbe wie $a_n \cdot 10^n + a_{n-1} \cdot 10^{n-1} + \dots + a_1 \cdot 10 + a_0 + a_{-1} \cdot 10^{-1} + a_{-2} \cdot 10^{-2} + a_{-3} \cdot 10^{-3} + \dots$. Dabei sind die a_j Ziffern zwischen 0 und 9. Man muss nur dem Umstand Rechnung tragen, dass – zum Beispiel – die Ziffernfolgen 0,999... und 1,000... dieselbe Zahl bezeichnen (Spektrum April 2017, S. 78).

Allgemein ist in der Mathematik eine Folge eine Menge von – zum Beispiel – Zahlen, deren Elemente mit Nummern («Indizes») versehen sind: a_n bezeichnet das n -te Glied einer Folge, im obigen Beispiel den Faktor von 10^n . Üblicherweise laufen die Indizes von 1 bis ins Unendliche: a_1, a_2, a_3, \dots . Das ist bei der Dezimaldarstellung reeller Zahlen anders. Hier darf es unendlich viele Glieder mit negativem Index geben. Zum Beispiel schreibt sich die Kreiszahl π

als $\pi = 3,14159\dots = 3 \cdot 10^0 + 1 \cdot 10^{-1} + 4 \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-5} + \dots$ oder explizit als Folge geschrieben $a_0=3, a_{-1}=1, a_{-2}=4, a_{-3}=1, \dots$

Dass die Basis unseres Zahlensystems die Zehn ist, hat keine mathematische Bedeutung. Für das Folgende muss die Basis p des Zahlensystems sogar eine Primzahl sein.

Eine reelle Zahl, geschrieben in der Basis p , ist also eine Folge von Ziffern zwischen 0 und $p-1$, die unendlich viele Glieder mit negativem, aber nur endlich viele mit positivem Index enthalten darf. Geht das auch andersherum? Was sind das für Zahlen, die unendlich viele Stellen links vom Komma, aber nur endlich viele rechts davon haben dürfen?

Sie heißen p -adische Zahlen, ihr Verhalten ist äußerst gewöhnungsbedürftig, und im Gegensatz zu den reellen Zahlen sind sie zur Beschreibung von Naturvorgängen völlig ungeeignet. Aber man kann mit ihnen fast so rechnen, wie man es aus der Grundschule gewohnt ist (Spektrum Spezial 2/2005 »Unendlich (plus eins)«, S. 24). So ist in den

5-adischen Zahlen, wie in den gewöhnlichen Zahlen in der Darstellung zur Basis 5, $4+1=10$. Allerdings ist $\dots 4444+1=0$, denn es gibt beim Addieren jedesmal einen Übertrag, und die Kette der Überträge reicht bis ins Unendliche. Auch die Division ist in anderer Reihenfolge auszuführen als nach der Schulmethode.

Es stellt sich heraus, dass die p -adischen Zahlen einen Körper bilden, das heißt eine Menge, in der die vier Grundrechenarten uneingeschränkt durchführbar sind – bis auf die Division durch null. Man pflegt ihn mit \mathbb{Q}_p zu bezeichnen.

Wann sind zwei reelle Zahlen nah beieinander? Wenn ihre Differenz eine Null vor dem Komma und viele Nullen dahinter hat. Zwei p -adische Zahlen dagegen sind nah beieinander, wenn ihre Differenz viele Nullen vor dem Komma hat (und nur Nullen dahinter) oder, was dasselbe ist, durch eine hohe Potenz von p teilbar ist. Es schadet nicht, wenn weiter links noch unendlich viele Ziffern folgen. Mit dieser Definition von Nähe gibt es Folgen und Grenzwerte unter den p -adischen Zahlen. Nur

sein muss) auf, so gilt eine andere Definition von Abstand: Als nahe beieinander gelten zwei Zahlen nicht, wenn der Betrag ihrer Differenz klein ist, sondern wenn diese Differenz durch eine große Potenz von p teilbar ist – ein seltsames Kriterium mit noch seltsameren Folgen. So gerät man beim Lückenstopfen an Zahlen, die unendlich viele Stellen vor dem Komma haben. Aber es ist ein nützliches Kriterium. So sind Gleichungen wie $x^2=3y^2$, in denen es entscheidend auf den Faktor 3 ankommt, in den 3-adischen Zahlen (das heißt in den p -adischen Zahlen für $p=3$) viel leichter zu analysieren.

Perfektoide Räume: Unendliche Türme aus immer größeren Zahlensystemen

Die p -adischen Zahlen bilden einen Körper, das heißt, zu jedem Element gibt es ein Negatives und einen Kehrwert; allerdings hat eine Zahl wie -1 unendlich viele Stellen vor dem Komma. » p -adische Zahlen sind weit weg von unserer gewohnten Vorstellungswelt«, sagt Scholze. Aber über

die Jahre ist er sehr vertraut mit ihnen geworden. »Inzwischen bin ich sie so gewohnt, dass mir die reellen Zahlen komisch vorkommen.«

In den 1970er Jahren hatten die Mathematiker bemerkt, dass den p -adischen Zahlen leichter beizukommen ist, wenn man nicht nur sie selbst studiert, sondern auf ihnen einen unendlichen Turm von Zahlensystemen aufbaut: zuunterst die p -adischen Zahlen selbst, darüber ein System aus p im Kreis angeordneten Exemplaren der p -adischen Zahlen, und so weiter: Jedes Stockwerk ist in einem gewissen Sinn eine p -fache Version des unmittelbar unter ihm liegenden.

Der ganze Turm ist das einfachste Exemplar der Klasse, mit deren Einführung Scholze großes Aufsehen erregte: perfektoide Räume. Ein perfektoider Raum ist in seiner Kompliziertheit schwerlich zu überschätzen. Viele mathematische Strukturen lassen sich als differenzierbare Mannigfaltigkeiten auffassen; das heißt, wenn man die Umgebung eines Punktes in immer stärkerer Vergrößerung

kann man sie nicht so übersichtlich auf einer Zahlengeraden anordnen wie die reellen Zahlen.

Potenzieren zählt – als wiederholtes Multiplizieren – zu den Operationen, die in einem Körper stets möglich sind. Nicht aber Wurzelziehen: Unter den reellen Zahlen gibt es kein x mit der Eigenschaft $x^2=-1$. Diesem Mangel helfen die Mathematiker ab, indem sie den reellen Zahlen quasi per Dekret eine weitere Zahl namens i hinzufügen, von der nichts weiter vorausgesetzt wird als die Eigenschaft $i^2=-1$ (sie »adjungieren zum Körper der reellen Zahlen eine Wurzel aus -1 «). Damit machen sie im Endeffekt aus den reellen die komplexen Zahlen (**Spektrum** August 2018, S. 74).

Ähnliches funktioniert mit den p -adischen Zahlen auch. Man adjungiert zum Körper \mathbb{Q}_p vorzugsweise eine p -te Wurzel aus p . Anders als bei den komplexen Zahlen ist damit allerdings das Problem des Wurzelziehens nicht ein für alle Mal erledigt. Es erweist sich vielmehr als sinnvoll, auch noch die p -te Wurzel aus der p -ten Wurzel von p zu adjungieren, dann deren p -te Wurzel und so weiter. Das ergibt den im Haupttext angesprochenen unendlichen Turm der Erweiterungskörper von \mathbb{Q}_p .

Der Körper \mathbb{Q}_p der p -adischen Zahlen hat eine weitere besondere Eigenschaft: Man kann seine Elemente – Folgen von Ziffern zwischen 0 und $p-1$, von denen unendlich viele mit positiven Indizes, aber nur endlich viele mit negativen Indizes ungleich null sein dürfen – mit neuen Rechenvorschriften versehen, und dann ist es ein ganz anderer Körper.

Diese neuen Regeln stammen ursprünglich aus der komplexen Analysis (Funktionentheorie). Dort studiert man bevorzugt Funktionen, die durch Potenzreihen, das heißt durch unendliche Summen der Form $f(z)=a_0+a_1z+a_2z^2+a_3z^3+\dots$ darstellbar sind. Und wenn man Funktionen wie $1/z$ oder $2/z^3+3z^2$ nicht aus der Betrachtung ausschließen will, muss man die Summe zu einer »Laurent-Reihe« erweitern, in der auch Koeffizienten mit negativen Indizes vorkommen dürfen: In $1/z$ ist $a_{-1}=1$, in $2/z^3+3z^2$ sind die einzigen Koeffizienten, die ungleich null sind, $a_{-3}=2$ und $a_2=3$.

Funktionen dieser Klasse (»meromorphe Funktionen mit endlichem Hauptteil«) werden vollständig durch die Folge ihrer Koeffizienten $a_{-n}, a_{-(n-1)}, \dots, a_{-1}, a_0, a_1, a_2, \dots$ beschrieben, und wie man solche

Funktionen miteinander addiert oder multipliziert, lässt sich über diese Koeffizienten ausdrücken. Das sind zwar eigentlich komplexe Zahlen; aber nichts hindert einen daran, an deren Stelle Elemente eines anderen Körpers zu setzen. In diesem Fall heißt der Körper \mathbb{F}_p ; es handelt sich um die Zahlen $0, 1, \dots, p-1$, mit denen »modulo p « gerechnet wird: Man addiert und multipliziert zunächst so wie gewohnt und nimmt vom Ergebnis den Rest nach Division durch p .

Fragen von Konvergenz oder Differenzierbarkeit, die in der komplexen Analysis eine Hauptrolle spielten, sind bei diesem Übergang zum endlichen Körper \mathbb{F}_p belanglos geworden oder gar nicht mehr formulierbar. Aber über die »formalen Laurent-Reihen über \mathbb{F}_p « findet man eine neue Körperstruktur für dieselbe Menge, die schon den Körper \mathbb{Q}_p bildet.

Indem man dasselbe Objekt einerseits als Element des einen, andererseits als Element des anderen Körpers interpretiert, kommt man zu weit reichenden Ergebnissen. Aus diesem Kunstgriff bezieht das Konzept vom perfektoiden Raum seine Mächtigkeit.

Christoph Pöppe

betrachtet, sieht die Struktur immer glatter aus. Ein perfektoider Raum dagegen bleibt unter beliebig starker Vergrößerung verknittert, eine Eigenschaft, die typisch für Fraktale ist.

Es ist nicht unbedingt einleuchtend, dass eine Struktur (in diesem Fall der Körper der p -adischen Zahlen) einfacher zu verstehen ist, indem man etwas äußerst Kompliziertes (einen perfektoiden Raum) daraufsetzt. Aber dort hat die Mathematik Peter Scholze gewissermaßen hingeführt. »Ich wollte den Kern dieses Phänomens verstehen«, sagt er. »Es gab keinen allgemeinen Formalismus, der das hätte erklären können.«

Schließlich gelang es ihm, perfektoiden Räume für eine große Vielfalt mathematischer Strukturen zu konstruieren. Mit ihrer Hilfe kann man Fragen über Polynome aus der Welt der p -adischen Zahlen in ein anderes mathematisches Universum transportieren, in dem die Arithmetik viel einfacher ist, die »formalen Laurent-Reihen über dem endlichen Körper modulo p «. Zum Beispiel funktioniert die Addition ohne den Übertrag auf die nächsthöhere Stelle. »Das Verrückteste an den perfektoiden Räumen ist, dass man mit ihnen auf wundersame Weise von einem Zahlensystem zum anderen wechseln kann«, sagt Weinstein.

Mit Hilfe dieser Einsicht konnte Scholze eine komplizierte Aussage über Lösungen von Polynomgleichungen in den p -adischen Zahlen zum Teil beweisen. Es handelt sich um die 1970 von Pierre Deligne (**Spektrum** Juli 2013, S. 14) formulierte »weight-monodromy conjecture«. Mit diesem Beweis promovierte er 2012 – und seine Dissertation »hatte so weitreichende Folgen, dass Arbeitsgruppen auf der ganzen Welt sich in sie vertieften«, so Weinstein. Hellmann drückt es so aus: »Scholze hat die klarste Form gefunden, in der man alle bisherigen Ergebnisse ausdrücken konnte, und das auf elegante Weise – und weil das genau die richtige Begriffsbildung war, konnte er weit über das bisher Bekannte hinausgehen.«

Flug über den Dschungel

Perfektoiden Räume sind zweifellos etwas vom Schwierigsten überhaupt in der Mathematik; gleichwohl ist Scholze bekannt für die Klarheit seiner Darstellungen, in Artikeln wie in Vorträgen. Weinstein gesteht: »Ich verstehe gar nichts, bis Peter es mir erklärt.« Und Caraiani fügt hinzu, dass Scholze sich nicht zu schade ist, seine Ideen auf Vordiplomsniveau zu erläutern. Dank seiner freundlichen, zugänglichen Art sei er die ideale Führungsfigur auf seinem Gebiet.

Aber selbst mit einer Einführung durch Scholze sind perfektoiden Räume alles andere als einfach zu verstehen. »Wenn du auch nur ein bisschen von dem Weg abweichst, den er vorgibt, landest du im finstersten Dschungel, und dann wird's richtig schwierig«, sagt Hellmann. »Aber Peter steckt niemals im Dschungel fest. Er versucht sich gar nicht erst durchzuschlagen. Er fliegt drüber!«

Scholze arbeitet nämlich, ohne irgendetwas aufzuschreiben – wie im Studium. Also muss er seine Gedanken in klinisch reiner Form ausdrücken, oder in seinen eigenen Worten: »Du hast nur eine begrenzte Kapazität in deinem Kopf; da ist kein Platz für zu komplizierte Dinge.«



RYAN QUARANTINE (WWW.PHOTOGRAPHY.COM) FÜR QUANTA MAGAZINE

Vom äußeren Eindruck ist Peter Scholze kaum von seinen Studenten zu unterscheiden.

Während sich die Fachkollegen auf der ganzen Welt mit den perfektoiden Räumen herumschlagen, stammen die weitreichendsten Entdeckungen auf diesem Gebiet, wenig erstaunlich, von Scholze selbst und seinen Arbeitskollegen. Ein Ergebnis, das er 2013 ins Internet stellte, erregte ungläubiges Erstaunen bei der Fachwelt. »Wir hätten nie gedacht, dass ein derartiger Satz überhaupt in Reichweite war«, sagt Weinstein.

In dieser Arbeit gelang es Scholze, die so genannten Reziprozitätssätze zu verallgemeinern. Dabei geht es um Polynomgleichungen in modularer Arithmetik. Man rechnet »modulo einer Zahl p «, das heißt man betrachtet an Stelle der gewöhnlichen Ergebnisse deren Reste bei der Division durch p ; üblicherweise ist p eine Primzahl. Aus dem Alltag geläufig ist die Arithmetik modulo 12; so pflegt man mit Uhrzeiten zu rechnen. Zum Beispiel ist 1 Uhr die Zeit, die 5 Stunden nach 8 Uhr liegt, denn $8+5=13$ modulo 12. Die Zahlen modulo einer Primzahl p bilden die gebräuchlichsten und bestuntersuchten endlichen Körper.

Der Urahn aller Reziprozitätssätze ist einer von Scholzes Favoriten: das quadratische Reziprozitätsgesetz, das der 24-jährige Carl Friedrich Gauß 1801 bewies. Sind zwei verschiedene ungerade Primzahlen p und q gegeben, die nicht beide bei Division durch 4 den Rest 3 lassen, dann ist p ein Quadrat – das heißt eine Quadratzahl – modulo q genau dann, wenn q ein Quadrat modulo p ist. Beispiel: 5 ist ein Quadrat modulo 11, denn $4^2=16=5$ modulo 11, und 11 ist ein Quadrat modulo 5, denn $1^2=1=11$ modulo 5.

Dieser Satz ist zwar mit elementaren Mitteln beweisbar, aber dennoch irgendwie erstaunlich. »Auf den ersten Blick haben die beiden Aussagen nichts miteinander zu tun«, so Scholze. Und nach Jared Weinstein »kann man größere Teile der modernen algebraischen Zahlentheorie als den Versuch auffassen, dieses Gesetz zu verallgemeinern«.

Mitte des 20. Jahrhunderts entdeckten die Mathematiker eine Beziehung der Reziprozitätssätze zu einem – anscheinend – völlig anderen Thema: der hyperbolischen Geometrie. Das ist die Geometrie, in der es zu einer Geraden durch einen Punkt außerhalb dieser Geraden nicht nur genau eine Parallele gibt, sondern unendlich viele, in der die Winkelsumme im Dreieck stets kleiner ist als 180 Grad und bei der die ganze unendliche hyperbolische Ebene winkeltreu ins Innere einer Kreisscheibe abgebildet werden kann – eine Tatsache, die den berühmten »Kreislimit«-Bildern von Maurits C. Escher zu Grunde liegt.

Ein kleiner Ausflug zur algebraischen Topologie versetzt die Fachwelt in Aufregung

Die Verbindung zwischen den Reziprozitätssätzen und der hyperbolischen Geometrie ist ein Kernstück des oben genannten Langlands-Programms, einer Sammlung von Sätzen und Vermutungen, die Zahlentheorie, Analysis und Geometrie miteinander verbinden. Einmal bewiesen, erlauben die Vermutungen weit reichende Folgerungen. So ist es möglich, den Beweis von Fermats letztem Satz auf einen kleinen, allerdings alles andere als einfachen Teil des Langlands-Programms zurückzuführen.

Allmählich wurde klar, dass das Programm sich nicht auf die zweidimensionale hyperbolische Geometrie beschränkt, sondern auch auf höherdimensionale hyperbolische Räume und etliches mehr anwendbar ist. Scholze hat nun das Langlands-Programm auf eine große Klasse von Strukturen im dreidimensionalen hyperbolischen Raum verallgemeinert – und darüber hinaus. Indem er eine perfektoiden Version dieses Raums konstruierte, fand er eine gänzlich neue Serie von Reziprozitätssätzen.

Damit stellt sich heraus, so Weinstein, »dass das Langlands-Programm tiefer ist, als wir dachten. Es ist systematischer und allgegenwärtig.«

Mit Scholze über Mathematik zu reden sei ungefähr so, wie ein Orakel zu befragen, sagt Weinstein. »Wenn er sagt, »ja, das funktioniert«, dann kannst du darauf vertrauen; wenn er nein sagt, kannst du's gleich aufgeben, und wenn er sagt »weiß nicht« – das kommt vor –, dann herzlichen Glückwunsch. Dann hast du ein richtig interessantes Problem erwischt.«

So anstrengend, wie man befürchten könnte, sei die Zusammenarbeit mit Scholze gar nicht, berichtet Caraiani. Hektik sei eigentlich nie aufgekommen. »Irgendwie hatte man immer das Gefühl, in aller Ruhe das Richtige zu tun: den allgemeinsten Satz zu beweisen, den man bewältigen kann, und das in der schönsten Form, die Konstruktion finden, die alles taghell erleuchtet ...«

Nur einmal wurde Scholze selbst richtig hektisch: als es Ende 2013 darum ging, eine Arbeit fertigzustellen, bevor seine Tochter auf die Welt kam. Es sei eine gute Idee gewesen, das Projekt zu forcieren, sagt er selbst.

»Danach habe ich erstmal nicht viel hingekriegt.« Als Vater müsse er sich seine Zeit disziplinierter einteilen. Das gehe allerdings nicht so weit, dass er sich bestimmte Stunden am Tag zum Arbeiten freihalten müsse. Er macht halt immer dann Mathematik, wenn er sonst nichts zu tun hat. »Es ist einfach meine Leidenschaft«, sagt er. »Ich will zu jeder Zeit darüber nachdenken.«

Aber er hält nichts davon, diese Leidenschaft romantisch zu verklären. Ob ihm die Mathematik als Schicksal in die Wiege gelegt worden sei? Die Frage sei ihm viel zu philosophisch. Und mit seinem wachsenden Ruhm fühlt er sich alles andere als wohl: »Manchmal ist der Rummel etwas zu viel. Ich versuche, mich davon im Alltag nicht nervös machen zu lassen.«

Nach wie vor arbeitet Scholze an den perfektoiden Räumen; aber inzwischen hat er einen Ausflug zur algebraischen Topologie unternommen, das ist die Fachrichtung, die deformierbare Gebilde mit Mitteln der Algebra untersucht. »In nur anderthalb Jahren ist er zum absoluten Experten auf diesem Gebiet geworden«, sagt Bhatt. Die Fachkollegen sehen es mit einer Mischung aus Furcht und Begeisterung, wenn Scholze ihr Reich betritt. »Das heißt, dass in naher Zukunft viel passieren wird. Man wird den Grenzen der Erkenntnis beim Wandern zusehen können.«

Dabei hat Scholze nach seiner eigenen Wahrnehmung noch gar nicht richtig angefangen. »Bis jetzt bin ich noch in der Lernphase, und dieses oder jenes Ergebnis habe ich vielleicht schon in meinen eigenen Worten ausgedrückt. Aber die Forschung kommt erst noch.«

Von diesem Ausflug abgesehen, ist Scholze seinem eigentlichen Fachgebiet treu geblieben. In dem Überblicksartikel » p -adic Geometry«, den er für den diesjährigen Internationalen Mathematikerkongress in Rio de Janeiro geschrieben hat, fasst er nicht nur seine Forschungen über die seltsame und reichhaltige Welt der p -adischen Strukturen zusammen. Er beschreibt auch deren Beziehungen zur berühmten Langlands-Korrespondenz. ◀

QUELLEN

Bhatt, B. et al.: Topological Hochschild Homology and Integral p -adic Hodge Theory, 2018. <https://arxiv.org/abs/1802.03261>

Nikolaus, T., Scholze, P.: On Topological Cyclic Homology, 2017. <https://arxiv.org/abs/1707.01799>

Scholze, P.: The Local Langlands Correspondence for GL_n over p -adic Fields, 2010. <https://arxiv.org/abs/1010.1540>

Scholze, P.: Perfectoid Spaces, 2011. <https://arxiv.org/abs/1111.4914>

Scholze, P.: On Torsion in the Cohomology of Locally Symmetric Varieties, 2013. <https://arxiv.org/abs/1306.2070>

Scholze, P.: p -adic Geometry, 2017. Überblicksartikel für den ICM 2018. <https://arxiv.org/abs/1712.03708>

Übersetzte, redigierte und aktualisierte Fassung des Artikels »The Oracle of Arithmetic« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus der Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

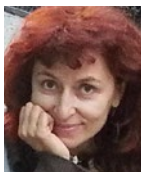


Geradengleichungen sind ein klassisches Thema der analytischen Geometrie, das in der Mittelstufe vorbereitet wird. An dieser Schultafel werden sie geometrisch und algebraisch durchgenommen; dabei ist die Modellierung einer realen Situation kein Thema.

ESSAY

DIE KOMPETENZFALLE

In der Folge des »Pisa-Schocks« wurden die Prüfungsaufgaben in Mathematik an Gymnasien und vergleichbaren Schularten umgekrempelt. Herausgekommen ist jedoch eine Mogelpackung. In Klassenarbeiten zeigen die Schülerinnen und Schüler nur noch, ob sie gelernt haben, eigens für den Test konstruierte Aufgaben zu lösen.



Ysette Weiss und **Rainer Kaenders** haben in Mathematik promoviert, forschen seit vielen Jahren in der Mathematikdidaktik und verfügen über mehrjährige Erfahrungen in verschiedenen Bildungssystemen: Weiss in der DDR, in der Sowjetunion und in England, Kaenders in der BRD und den Niederlanden, beide im vereinigten Deutschland. Weiss ist Professorin für Mathematikdidaktik in Mainz, Kaenders Professor für Mathematik und ihre Didaktik in Bonn.

» [spektrum.de/artikel/1580894](https://www.spektrum.de/artikel/1580894)

Der Schock ereilt den hoffnungsvollen Studienanfänger in den ersten Mathematikvorlesungen. Noch vor wenigen Monaten wurde ihm mit einer gewissen Feierlichkeit die allgemeine Hochschulreife bescheinigt. Nun muss er feststellen, dass die »echte« Mathematik mit dem, was er unter diesem Namen in der Schule gelernt hat, kaum etwas zu tun hat. Dagegen helfen seine 15 Punkte in der Abiturarbeit ebenso wenig wie die Tatsache, dass das Schulsystem insgesamt bei den Pisa-Tests neuerdings bessere Noten bekommt. Auch der Vorkurs, den viele Universitäten inzwischen anbieten, kann den Abgrund nicht überbrücken.

Es geht nicht um die Zumutungen, die den Anfängern dieses Fachs seit jeher zu schaffen machen, etwa dass man sich an der Universität bei der Einführung neuer Konzepte nicht lange mit Beispielen aufhält und echte Beweise fordert. Das Problem ist weitaus tiefgreifender und in dieser Härte erst wenige Jahre alt. Es trifft nicht nur die Studierenden in Mathematik, sondern ebenso in Informatik, Naturwissenschaften und den technischen Fächern.

Der Mathematikunterricht steckt in einer tiefen Krise. Paradoxerweise krankt er an einem Heilmittel, das ihm vor anderthalb Jahrzehnten wegen des schlechten Abschneidens im Pisa-Test verordnet wurde. Nun stellt sich heraus, dass die Therapie schlimmer ist als die Krankheit.

Die Krise hat mittlerweile auch offizielle Gremien erreicht. »An deutschen Hochschulen verzeichnet man seit mehr als einer Dekade den alarmierenden Befund, dass einem Großteil der Studierenden bei Studienbeginn viele mathematische Grundkenntnisse und -fertigkeiten sowie konzeptuelles Verständnis mathematischer Inhalte fehlen.« So formulierte es, mittlerweile weitgehend unwidersprochen, die Kommission zum Übergang Schule-Hochschule, in der sich die drei zuständigen Fachgesellschaften zusammengetan haben: die Deutsche Mathematiker-Vereinigung (DMV), die Gesellschaft für Didaktik der Mathematik (GDM) und der Deutsche Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU).

In ihrer im Frühjahr 2017 veröffentlichten Stellungnahme führt die Kommission zahlreiche Gründe für die Misere an: Viele Bundesländer haben die Stundenzahl für Mathematik reduziert; Leistungskurse gibt es nicht mehr oder nur noch in stark veränderter Form; immer mehr Angehörige eines Jahrgangs wollen – und sollen – Abitur machen; Mathematik steht in Konkurrenz zu anderen Gegenständen der Allgemeinbildung. Daher habe die Kultusbürokratie die Ansprüche deutlich gesenkt; zugleich seien neue Inhalte eingeführt worden.

Das spielt sicherlich alles mehr oder weniger eine Rolle. Wir – und mit uns die 130 Unterzeichner eines »Brandbriefs« vom 17. März 2017, der eine heftige Diskussion anstieß, sowie viele andere Fachleute – sehen jedoch die Hauptursache in einem Prinzip, das die deutsche Bildungspolitik mit der Einführung von Bildungsstandards 2003 im Gefolge des Pisa-Schocks gesetzlich verordnet hat: der Kompetenzorientierung.

Das klingt zunächst seltsam. Wer könnte ernsthaft etwas dagegen haben, wenn Schülerinnen und Schüler Kompetenzen erwerben?

Auch die Mitglieder der genannten Kommission hatten erkennbar die alltagsprachliche Bedeutung von »kompetent« (»zuständig und in der Lage«) im Sinn. Konsequenterweise wollte die Kommission in ihrer Stellungnahme zum »Brandbrief« die Kompetenzorientierung noch verbindlicher und noch konkreter formuliert wissen.

Das ist ein folgenschweres Missverständnis. Das begriffliche System der Kompetenzorientierung stammt aus der angewandten Psychologie. Dort hat es lange, in Form von ausgearbeiteten Eignungstests, vor allem zur Selektion und Anpassung von Arbeitskräften gedient. In Bezug auf Unterricht wurde es auf Betreiben der OECD (das E steht für »economic«, nicht für »education«!) von vor allem quantitativ empirisch arbeitenden pädagogischen Psychologen und Didaktikern vorangetrieben. Inzwischen ist es nachdrücklich und nachhaltig als universelle Sprache für die Beschreibung und Gestaltung von Lernprozessen in Schule und Hochschule etabliert und in Gesetzesform gegossen worden.

Wo ist der Kosinus geblieben?

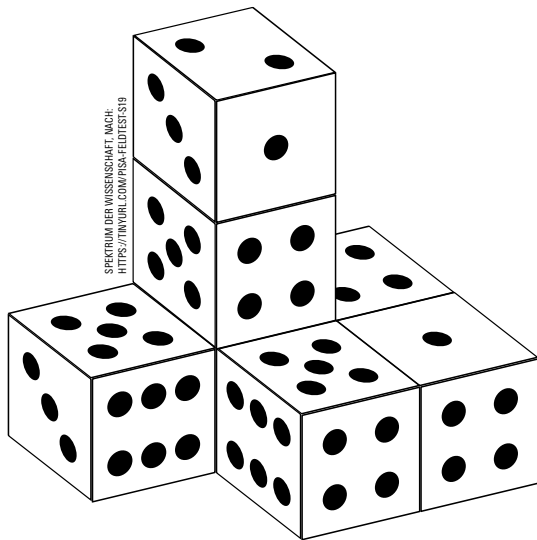
Charakteristisch für die quantitativ arbeitende angewandte Psychologie ist die bedingungslose Fokussierung auf messbaren Output. Ein Schüler gilt als kompetent, wenn und insoweit er die richtigen Lösungen zu den eigens für die Überprüfung konstruierten Aufgaben liefert.

Damit hat Gedankengut, das eigentlich charakteristisch für industrielle Produktionsprozesse ist, Einzug in die Schule gehalten. Das – nur leicht überspitzte – Idealbild dieser Ideologie ist die voll automatisierte und vor allem engmaschig überwachte Lernfabrik. Jede Abweichung vom Sollwert fällt sofort auf und kann durch geeignete Maßnahmen korrigiert werden. Ausgeliefert werden nur Produkte, die sämtliche Qualitätskontrollen bestanden haben.

Inwieweit der so produzierte Schüler das Abgefragte tatsächlich gelernt hat oder gar selbstständig damit umgehen kann, wird ausgeblendet; es ist ja nicht quantitativ messbar. 2006 schrieben führende Vertreter des Programme for International Student Assessment (Pisa) im

AUF EINEN BLICK FLUCH DER OUTPUT-ORIENTIERUNG

- 1 Die als Reaktion auf den Pisa-Schock eingeführten Bildungsstandards erheben die »Kompetenzorientierung« zur obersten Leitlinie für den Schulunterricht.
- 2 Dabei wurde »Kompetenz« umdefiniert: Kompetent ist nicht, wer das Fach beherrscht, sondern wer einen bestimmten Test besteht.
- 3 Die Orientierung an den Testergebnissen führt nach Ansicht der Autoren zur Entfremdung der Lernenden von der Sache sowie zu Inkompetenz – bei guten Noten.



»Dieses Bauwerk besteht aus sieben identischen Würfeln, deren Flächen von 1 bis 6 nummeriert sind. Wenn man es von oben betrachtet, sind nur 5 Würfel zu sehen. Wie viele Punkte sind insgesamt sichtbar, wenn man das Bauwerk von oben betrachtet?« So lautet eine der Aufgaben aus dem Feldtest zur Pisa-Studie 2012. Es ging um den Leistungsstand 15-jähriger Schülerinnen und Schüler in Mathematik – und bei dieser Aufgabe speziell darum, »eine geforderte Perspektive aus einem Foto einer dreidimensionalen Konstruktion zu interpretieren«.

Vorwort zu den »Bildungsstandards Mathematik«: »Bildungsstandards mit ihrem Bezug zu Schülerkompetenzen sind explizit so formuliert, dass sie mit Hilfe entsprechender Aufgaben bzw. Tests überprüft werden können. Diese Messbarkeit zeichnet sie national und international aus, und bei aller Bescheidenheit ist es diese Eigenschaft, die es erlaubt, zu bestimmten Zeitpunkten festzustellen, ob und in welchem Ausmaß Schülerinnen und Schüler für das weitere Leben adäquat gerüstet sind bzw. ob Optimierungsbedarf besteht.«

Hier steigt in neuem Gewand der Behaviorismus aus der wohlverdienten Mottenkiste. In dem Bemühen, den Standards der Physik nachzueifern – man stelle keine Hypothesen auf über Dinge, die nicht messbar sind –, beschränkten sich Forscher wie Burrhus F. Skinner (1904–1990) auf Modelle des menschlichen Verhaltens, die Annahmen über den inneren Zustand ihrer Versuchsobjekte auf ein Minimum reduzierten und damit regelmäßig Wesentliches außer Acht ließen.

Die Kompetenzorientierung macht darüber hinaus den Weg frei für eine Entfremdung vom eigentlichen Inhalt, bis hin zu blankem Unsinn. Unter Fachleuten würde sich jeder unmöglich machen, der die Primzahlen und die Teilbarkeit als Lerninhalte abschafft und die Sinusfunktion einführt, ohne gleichberechtigt von der Kosinusfunktion und dem Einheitskreis zu sprechen. Wo es ums Differenzieren geht, wird, zum Beispiel in Nordrhein-Westfalen, dann der Unfug auf die Spitze getrieben: Die Schüler sollen die

Kosinusfunktion als die Ableitung der Sinusfunktion »benennen« können – ohne zu wissen, was das ist.

Im Namen der Kompetenzorientierung sind nicht nur die Kosinusfunktion, der Einheitskreis und der Kosinussatz (und mit ihm fast alle Inhalte der elementaren Geometrie) sowie zentrale Inhalte der Analysis (wie Monotonie) aus den nordrhein-westfälischen Lehrplänen verschwunden. Andere Begriffe, wie das Skalarprodukt, hängen dadurch zusammenhanglos im luftleeren Raum. Stattdessen gibt es ein neu geschaffenes Surrogat von Mathematik (Grafik links), gehüllt in Pseudoanwendungskontexte, das immerhin seinen erklärten Zweck erfüllt: Es bringt die ersehnten Outputs in internationalen Vergleichstests hervor.

Ähnliches lässt sich in allen Bundesländern beobachten; verschiedene lokale Proteste haben sich schließlich zu dem oben genannten Brandbrief von Mathematiklehrern in Schule und Hochschule aus der ganzen Bundesrepublik zusammengefunden. Fächerübergreifend ist die »Gesellschaft für Bildung und Wissen« zum bundesweit beachteten Forum für die Kritik an der Kompetenzorientierung geworden. Auch Eltern finden sich zu Initiativen (wie etwa in Baden-Württemberg oder in Nordrhein-Westfalen) zusammen, weil sie nicht mehr hinnehmen, dass ihren Kindern elementare Grundfertigkeiten fehlen.

Einige der Initiatoren der Kompetenzorientierung haben in ihr sicherlich nicht sofort den Umschwung zur Output-Orientierung und -Messung gesehen. Man konnte die Rede von der Kompetenz ja ohne Weiteres als komplizierte Formulierung des Ziels »Das Kind soll was lernen« lesen. Vor allem versprach das Prinzip eine Befreiung von den überkommenen Lehrplänen, die sehr kleinteilig den Stoff aufzählten, und eine Hinwendung zu Anforderungen der Praxis. Was sollte dagegen einzuwenden sein?

In einer Replik auf den Brandbrief sehen 50 Mathematikdidaktiker auch heute noch – im Widerspruch zu den drei großen Fachgesellschaften – hier sogar eine viel versprechende Entwicklung: »Bildungsstandards können also weder aufgrund ihrer Zielsetzungen noch angesichts der Kürze der Zeit seit ihrer Einführung für die benannten Defizite verantwortlich gemacht werden. Im Gegenteil zeigt sich in den letzten Jahren eine erfreuliche Verbesserung der Leistung deutscher Schülerinnen und Schüler im internationalen Vergleich, auch wenn dies noch nicht ausreichen kann.«

Es kommt nicht darauf an, ob du der Sache gerecht wirst, sondern ob du den richtigen Output lieferst

Nur haben die Leute, die aus – nachvollziehbarem – Wunschdenken den Kompetenzbegriff ideologisch überhöhten, dadurch der systematischen Umsetzung der Output-Orientierung freie Bahn verschafft. In einer generalstabsmäßig durchgeführten Operation wurden die Bildungsstandards eingeführt und damit die einseitige Orientierung an beobachtbaren, messbaren und in die Kompetenzraster passenden Lernprozessen. Diese Entwicklung hat jetzt, zum Beispiel in Gestalt des Projekts »nexus«, sogar die Hochschulen erreicht.

In der Bildungstradition, die mit Platon ihren Anfang nahm und mit der Aufklärung und dem Neuhumanismus

Distraktorische Kontexte in Abituraufgaben

»Die Bewegungen zweier Forschungs-U-Boote U_1 und U_2 , die von einer Forschungsstation mithilfe eines Sonarsystems geortet werden, sollen modellhaft in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben werden. Im Modell, das den Zeitraum von 12.20 Uhr bis 12.27 Uhr erfasst, bewegen sich beide U-Boote geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit, U_1 entlang der Geraden g_1 , U_2 entlang der Geraden g_2 . Die Positionen von U_1 um 12.20 Uhr und 12.21 Uhr werden durch die Punkte $P_0(4|14|-5)$ bzw. $P_1(6|11|-5)$ dargestellt, die Positionen von U_2 zu denselben Zeitpunkten durch $Q_0(11|9|-15)$ bzw. $Q_1(9|6|-13)$. Die Wasseroberfläche wird durch die x_1x_2 -Ebene, die Lage der Forschungsstation durch den Punkt $F(12|11,5|0)$ beschrieben. Eine Längeneinheit im Koordinatensystem entspricht 100 m in der Realität.«

So beginnt eine der Aufgaben zum erhöhten Anforderungsniveau (https://www.iqb.hu-berlin.de/abitur/sammlung/mathematik/erhoeht/Aufgabensammlung_16.pdf) aus der »Aufgabensammlung zur Orientierung« des Berliner Instituts zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (IQB). Diese Aufgaben sollen vorbildhaft illustrieren, wie die in den Bildungsstandards beschriebenen Kompetenzen und Vorgaben für die Abiturprüfung in Aufgaben und Erwartungshorizonte übersetzt werden können.

Im Anschluss sollen die Schüler Geradengleichungen für die beiden U-Boote aufstellen und für diverse Fragestellungen auswerten. Das klingt anspruchsvoll. Allerdings ist das mathematische Modellieren bereits im Aufgabentext erledigt,

und zwar nicht so, wie es der Sache gerecht würde, sondern so, dass ein Problem der analytischen Geometrie herauskommt, das im (engen) Rahmen des Gelernten liegt und nicht zu einfach ist.

Von U-Booten ist die Rede, weil hier eine gleichförmige Bewegung für Laien plausibel scheint. Üblicherweise wird dieselbe Aufgabe mit Flugzeugen gestellt. Wehe, wenn der Schüler sich echte U-Boote vorstellt und über Auftrieb, Druckunterschiede, Wasserwiderstand, Riffe im Wasser, durch Funkpeilungen bestimmbare Polarkoordinaten oder gar das Notausblasen der Tauchzellen nachdenkt! Dann wäre er auf den Kontext als Distraktor hereingefallen.

Der entsprechend trainierte Schüler geht hier aber vor, wie er

es schon bei der entsprechenden Aufgabe über Flugzeuge oder Hubschrauber gelernt hat. Er bestimmt parametrisierte Gleichungen für die Geraden und wertet diese auf verschiedene Weise aus. Er rechnet die Geschwindigkeit mit dem angegebenen Faktor von Kilometer pro Stunde in Knoten um, begründet, dass die U-Boote nicht kollidieren und sich nicht zu nahe kommen, ermittelt rechnerisch, wie lange der Abstand zur Forschungsstation F weniger als 850 Meter beträgt, und untersucht, ob sich U_1 , U_2 und F auf einer Geraden befinden können. Teile der Umformungen und Berechnungen kann er mit einem Computeralgebrasytem oder einem wissenschaftlichen Taschenrechner durchführen.

zur Grundlage des europäischen Bildungsverständnisses wurde, sind es die Gegenstände, Phänomene und geistigen Schöpfungen dieser Welt selbst, die uns in ihren Bann ziehen und nicht auswechselbar sind. Immanuel Kants viel zitiertes Ausruf »Sapere aude!« ruft dazu auf, aus eigener Motivation zu denken. Modernere mathematikdidaktische Theorien, wie etwa die von Heinrich Winter (1928–2017), haben gezeigt, was dieses Bildungsideal für die Mathematik bedeuten kann. Unter der Kompetenzorientierung dagegen kommt es nicht darauf an, ob der Lernende einem Gegenstand, einem Phänomen oder einer geistigen Schöpfung gerecht wird. Es genügt, wenn er den Erwartungen der bewertenden Beobachter entspricht.

In Deutschland gibt es großartige Mathematiklehrerinnen und -lehrer. Sie können Begeisterung für ein Fach wecken, das für das Leben der Schülerinnen und Schüler Bedeutung bekommt und wirklich etwas mit der Kultur der Mathematik zu tun hat. Doch für diese Lehrer wird es immer schwerer, das in der Unterrichtspraxis umzusetzen.

Mathematische Kommunikation ist vielfältig. Häufig fragen sich Lehrer und Schüler, ob eine Argumentation als Beweis gelten kann, ob eine Berechnung zu einer logisch belastbaren Aussage führt, ob eine Zeichnung einen mathematischen Sachverhalt wiedergibt, ob und inwieweit eine Herleitung als gelungen betrachtet werden kann oder welche Eigenschaft eines Objekts zur Definition erhoben werden sollte. An solchen und anderen derartigen Fragen vollzieht sich mathematische Entwicklung über den Diskurs. Auch mathematische Aufgaben haben traditionell eine gewisse Offenheit: Zunächst muss die Bedeutung der Frage ergründet werden, was sich nicht immer direkt und messbar in der Antwort widerspiegelt.

Kompetenzen hingegen sind so angelegt, dass sie über den Output der Schülerinnen und Schüler definiert und gemessen werden. Die Aufforderung, diesen Output zu liefern, geschieht über so genannte Operatoren. Das muss man wissen, wenn man die oft anspruchsvoll klingenden Wortlaute von Abituraufgaben richtig einordnen will. Die Bedeutung von Verben wie »angeben«, »nennen«, »skizzie-



Lineare Algebra, hier in einer Anfängervorlesung an der Universität, ist die Fortsetzung der schulischen linearen Algebra und analytischen Geometrie mit anderen – abstrakteren – Mitteln. Es fällt Studienanfängern von Jahr zu Jahr schwerer, den Anschluss von der einen zur anderen Darreichungsform zu finden.

ren«, »bestimmen«, »ermitteln«, »erklären« und »beweisen« ist nicht universell, sondern wird in der Schule wie in der Universität durch den Gebrauch in der Interaktion zwischen Lehrenden und Lernenden bestimmt. In solchem Verständnis zeigt sich gerade mathematische Fähigkeit, wobei eben auch das Ringen um eine Deutung (»Haben wir das jetzt bewiesen?«) zu Entwicklung und interessanten Einsichten führt.

Nun sind unter der Kompetenzorientierung insgesamt 23 Verben, darunter die oben angeführten, als »Operatoren« juristisch hieb- und stichfest in drei Anforderungsniveaus ausformuliert. Es handelt sich um unmissverständliche Befehle im Rahmen der so genannten Standardsicherung. (Was muss hier eigentlich gegen wen gesichert werden?) Nicht selten führt diese mathematische Jurisprudenz zu Absurditäten oder Banalitäten. So bedeutet der Operator »vergleichen«: »Gemeinsamkeiten, Ähnlichkeiten und Unterschiede darstellen«. Ja – was sonst?

Gleichwohl sind die Operatoren nicht nur wunderliche Formulierungen von Offensichtlichem; sie sind gefährlich, da sie die Lernenden davon entbinden, über die Sinnhaftigkeit ihrer Antworten nachzudenken. Der Operator »bestimmen, ermitteln« mit der Beschreibung »Zusammenhänge bzw. Lösungswege aufzeigen, das Vorgehen dar-

stellen und die Ergebnisse formulieren« klingt unschuldig und sinnvoll. In der Praxis läuft dieses Bestimmen und Ermitteln häufig auf nichts anderes hinaus als das mechanisierte Übersetzen von so genannten Modellierungsaufgaben in Taschenrechnerbefehle.

Durch ihre anwendungsbezogene Formulierung sehen die Kompetenzaufgaben anspruchsvoll aus und können damit dem ersten Blick von Bildungsökonomern, besorgten Eltern, Politikern und manchem fachkundigen Hochschulangehörigen standhalten. Es handelt sich jedoch um standardisierte Aufgabentypen, die nach immer denselben zigfach eintrainierten Schemata abzuarbeiten sind. Die eigentliche Schwierigkeit der Aufgaben besteht nicht so sehr in der Mathematik. Dennoch empfinden die Schüler sie als schwer, weil es nicht einfach ist, sie von ihren textlichen Distraktoren zu befreien und herauszufinden, welches der Schemata im Einzelfall aktiviert und nachgeahmt werden soll (»Distraktorisches Kontexte in Abituraufgaben«, S. 83).

In der Realität sind die zentralen Prüfungen – und nicht die Kernlehrpläne – zum geheimen Lehrplan geworden, der damit im Übrigen auch nicht mehr demokratischer Kontrolle unterliegt, nicht einmal indirekt. Einst mit dem erklärten Ziel eingeführt, die Kultur fester Lösungsschemata abzulösen, wurden genau diese Lösungsschemata jetzt zum zentralen Unterrichtsgegenstand.

Aus der Kompetenzperspektive wird Problemlösefähigkeit häufig mit der Anwendung von Mathematik und dem Modellieren mit Mathematik in Verbindung gebracht. Das geht maßgeblich auf den Psychologen Franz Weinert (1930–2001) zurück. Er hat den mehrfach von der OECD geäußerten Vorschlag, den »vieldeutigen Leistungsbegriff«

durch das »Konzept der Kompetenz zu ersetzen«, umgesetzt, dabei einen angewandten Problemlösebegriff ins Zentrum seiner Kompetenzdefinition gestellt und diese für alle deutschen Kompetenzforscher in Stein gemeißelt.

Vor dem Pisa-Schock hatten Anwendung von und Modellierung mit Mathematik ihren zentralen Platz nicht im Mathematikunterricht selbst, sondern vorrangig in der Physik und vielen anderen, mittlerweile demathematisierten Fächern wie Chemie, Biologie, Erdkunde, Ökonomie und Sachkunde. Doch wirkliches Anwenden und erst recht Modellieren sind schwer. Beides hat zwar im deutschen Mathematikunterricht selbst eine lange Tradition; allerdings gelingen Anwenden und Modellieren nur dann, wenn der Lehrer besonders engagiert und mit dem jeweiligen außermathematischen Gegenstand vertraut ist.

Da nun aber mathematisches Modellieren unstreitig zu den anspruchsvollsten und wirtschaftlich bedeutendsten Aktivitäten der Berufspraxis gehört, versuchen einige Mathematikdidaktiker in Großprojekten, die von wirtschaftsnahen Stiftungen (zum Beispiel der Telekom-Stiftung mit ihrem Deutschen Zentrum für Lehrerbildung Mathematik, DZLM) unterstützt werden, das kompetenzorientierte mathematische Modellieren in zentralen Tests und damit auch im Schulalltag zu implementieren.

»Es ist ein fundamentales Missverständnis, dass die Schule die Schüler studierfertig abzuliefern hat«

Für Abituraufgaben und andere zentrale Tests eignen sich Modellierungsaufgaben überhaupt nicht. Die beim Pisa-Unternehmen als Modellierungsaufgaben deklarierten Problemstellungen entpuppen sich bei näherem Hinsehen als standardisierte Anwendungen und Einkleidungen. Durch das verwendete Vokabular der oft mathematisch banalen Kontexte lässt sich teilweise selbst das Fachpublikum beeindrucken. Psychometrische Institute wie das Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (IQB) in Berlin sehen in diesen Scheinmodellierungen fachlich abgeseignete Vorbilder, die sie dann in Abituraufgaben für das ganze Land verwandeln, ausdrücklich beauftragt von der Kultusministerkonferenz.

Es gelingt in diesen Abituraufgaben, ein hohes Niveau vorzutäuschen und komplexe mathematische Aktivitäten zu imitieren, weil die Output-Orientierung eben eine Trennung von sachlichem Gehalt und vorgezeigter Leistung erlaubt. In dieser Logik verfügt ein Schüler über Modellierungskompetenz, wenn er – beobachtbar und messbar für andere – das zugehörige Vokabular verwendet. Echte Erfahrungen mit Modellierungen wären dagegen exemplarisch mit ungleich höherer Anstrengung und längerem Zeitaufwand zu entwickeln und würden detaillierte Einblicke in einen Kontext erfordern. So viel Freiheit für fachübergreifende Ansätze und entsprechend qualifiziertes Lehrpersonal stehen im gegenwärtigen outputorientierten Schulbetrieb nicht entfernt zur Verfügung.

Die mathematischen Defizite der Studierenden an den Universitäten sind schon lange nicht mehr durch Brücken- und Vorkurse zu kompensieren. Kristina Reiss, Professorin für Mathematikdidaktik an der TU München und Projektleiterin der Pisa-Studie 2018, zeigt sich allerdings von der

Misere wenig beeindruckt: »Es ist ein fundamentales Missverständnis, dass die Schule die Schüler studierfertig abzuliefern hat.« So zitiert sie der »Tagesspiegel« vom 22. März 2017.

Wenn der schulische Mathematikunterricht weiterhin eine Parallelkultur bleibt, die von der Kultur der (Elementar-)Mathematik losgelöst ist, werden die Studierenden der Mathematik oder verwandter Studiengänge nur noch schwächer; da die Studierenden ein falsches Bild ihrer Studienfächer haben, ist ihr Studienerfolg fraglich – selbst wenn die Landesregierungen (wie in Nordrhein-Westfalen) den Universitäten Prämien für Absolventen zahlen. Die Empfehlung der mathematischen Fachgesellschaften, noch mehr auf kompetenzorientierte Bildungsstandards zu setzen, und die allenthalben kritiklos durchgeführte Digitalisierung werden den Schaden verstärken.

Nach getaner Arbeit in der Schule verlegen sich nun die Akteure der Kompetenzorientierung auf die Hochschule. Die Universitäten senken ihre Anforderungen rasant und setzen nun in einer zweiten Kompetenzifizierungswelle (nach der ersten in der Bologna-Reform 1999) auch im eigenen Haus die Kompetenzorientierung durch. Fachinhalte werden damit zusehends austauschbar.

So antwortete Mechtild Dreyer, Vorsitzende des Runden Tisches »Anerkennung« im Projekt »nexus« – einer der treibenden Kräfte der zweiten Kompetenzifizierung – auf die Interviewfrage »Wie kann diese Kompetenzorientierung konkret aussehen?«: »Nehmen wir als Beispiel mein eigenes Fach, die Philosophie des Mittelalters. Normalerweise beschäftigen sich die Studierenden am Anfang unter anderem mit Texten von Aristoteles, später dann mit Texten aus dem Mittelalter. Doch unabhängig von der Beschäftigung mit diesen Epochen und dem Fachwissen darüber kommt es vor allem darauf an, dass die Studierenden kompetent in der Problemanalyse sind, bündig argumentieren und Zusammenhänge schnell erkennen können. Das sind drei Kompetenzen, die sie genauso gut erwerben können, wenn sie sich beispielsweise an der Universität von Sevilla mit einem philosophischen Text von Hegel aus dem frühen 19. Jahrhundert auseinandersetzen. Deshalb kann genau dies selbstverständlich auch als Studienleistung anerkannt werden.«

Das ist dann aber nicht mehr Philosophie des Mittelalters. Wenn Frau Dreyer den Seminarschein aus Sevilla anerkennt, rettet er vielleicht diesem oder jenem Studierenden das Bafög; aber er bezieht sich nicht auf die Lehre im eigenen Fach. Im Gegenteil: Mancher Politiker könnte auf die Idee kommen, das Fach Philosophie des Mittelalters einfach abzuschaffen. In den Punktzahlen der – geeignet gestellten – Abschlussklausur würde sich das Defizit nicht bemerkbar machen. ◀

QUELLEN

Blum, W. et al.: Bildungsstandards Mathematik: konkret Sekundarstufe I: Aufgabenbeispiele, Unterrichts Anregungen, Fortbildungsideen. Cornelsen, Berlin 2006

Kaenders, R., Weiss, Y.: Mathematische Schneeschmelze. In: Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 25, S. 82–89, 2017

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!

€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und mehr als 160 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt

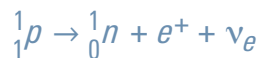


FREISTETTERS FORMELWELT SEGENSREICHER BETAZERFALL

Ob morgen die Sonne scheint, sagt einem – vielleicht – der Wetterdienst. Aber warum scheint sie überhaupt? Um das zu verstehen, braucht man eine besondere Art von Formeln.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1580898](http://spektrum.de/artikel/1580898)

Manche Formeln sehen aus wie Mathematik, sind aber genau genommen keine. Zum Beispiel handelt dieser Ausdruck nicht von Zahlen, sondern von den Bausteinen eines Atomkerns:



Hier dargestellt ist der Beta-plus-Zerfall. Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um, wobei gleichzeitig ein Positron und ein Elektron-Neutrino entstehen. Ausdruck dieser Art findet man überall in der Atom-, Kern- und Teilchenphysik. In gewissem Sinn beschreiben sie das, was die Alchemisten des Mittelalters vergeblich zu bewerkstelligen versuchten: die Umwandlung von Elementen.

Ein Atom besteht aus einem Atomkern, der aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist, und einer Hülle aus Elektronen. Die Anzahl der Protonen bestimmt dabei, um welches chemische Element es sich handelt. So ist ein Atomkern mit zwei Protonen immer Helium; Kohlenstoff dagegen hat stets sechs Protonen.

Die Zahl der Neutronen im Atomkern eines Elements kann dagegen variieren. 98,9 Prozent aller Kohlenstoffatome haben sechs Protonen und sechs Neutronen. Neben diesem Kohlenstoff-12 gibt es aber auch ein Isotop, das acht Neutronen im Kern hat und daher Kohlenstoff-14 oder kurz C-14 heißt.

Es ist allerdings nicht stabil, sondern radioaktiv mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren. Beim Zerfall eines C-14-Atoms wandelt sich ein Neutron in seinem Atomkern in ein Proton um und gibt dabei ein Elektron und ein Antineutrino ab. Das ist genau die Umkehrung des Prozesses, der in der Gleichung oben beschrieben wird – ein Beta-minus-Zerfall. Da der Atomkern nach dem Zerfall nun sieben anstatt sechs Protonen besitzt, handelt es sich nicht mehr um Kohlenstoff, sondern um Stickstoff: Ein chemisches Element hat sich in ein anderes umgewandelt.

Die Kraft, die für den radioaktiven Zerfall verantwortlich ist, bleibt uns im Alltag verborgen. Es handelt sich um die schwache Kernkraft. Im Gegensatz zur Gravitation oder dem Elektromagnetismus, deren Reichweite unendlich groß ist und deren Auswirkungen wir jeden Tag am eigenen Körper spüren können, wirkt sie nur auf den winzigen Skalen der Atomkerne.

Trotzdem ist sie für unsere Existenz unerlässlich. Denn ohne den Betazerfall würde unsere Sonne nicht scheinen. Damit unser Stern in seinem Inneren Licht und Wärme freisetzen kann, müssen dort jeweils vier Wasserstoffatomkerne zu einem Heliumkern (He-4) verschmelzen.

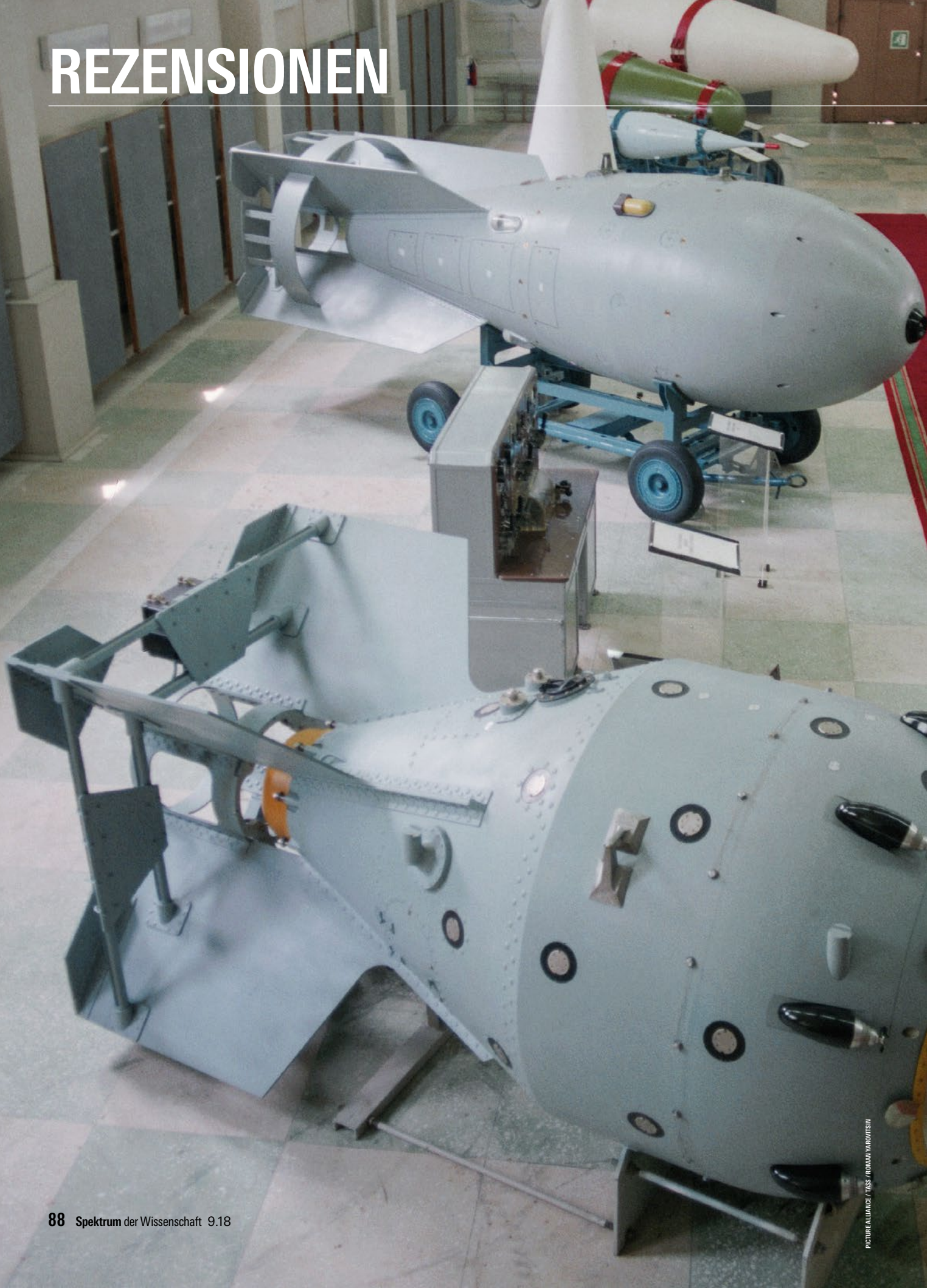
Diese Kernfusionsreaktion, die auch in der Wasserstoffbombe und vielleicht irgendwann in einem Fusionskraftwerk stattfindet, verläuft in mehreren Schritten. Zunächst entsteht aus zwei Wasserstoffatomkernen der Kern eines Deuteriumatoms. Wasserstoff ist das simpelste chemische Element überhaupt; sein Atomkern besteht nur aus einem einzigen Proton. Deuterium dagegen ist ein Isotop des Wasserstoffs, das neben dem Proton auch ein Neutron besitzt.

Aus den zwei Protonen kann also nur dann der Kern eines Deuteriumatoms entstehen, wenn eines von ihnen sich in ein Neutron umwandelt. Genau das passiert beim Beta-plus-Zerfall. Würde der nicht stattfinden, dann entstünde im Inneren der Sonne kein Deuterium – und kein Helium, denn das entsteht in den nächsten Schritten aus zwei Deuteriumkernen.

Weil die schwache Kernkraft so schwach ist, läuft der Beta-plus-Zerfall sehr langsam ab. Aber genau das ist gut für uns, denn nur deswegen kann die Sonne so lange leuchten. Sie setzt schon seit 4,5 Milliarden Jahren Energie frei und wird das mindestens noch weitere 5 bis 6 Milliarden Jahre tun.

Ohne die schwache Kernkraft und den radioaktiven Betazerfall wäre es bei uns auf der Erde schon lange dunkel geworden – oder gar nicht erst hell.

REZENSIONEN



GESCHICHTE WISSENSCHAFT UNTER DEM ROTEN STERN

Trotz punktueller Durchbrüche sei die sowjetische Wissenschaft im Großen und Ganzen gescheitert, urteilt der Journalist Simon Ings.

▶ Nach der russischen Revolution 1917 versuchten die Bolschewiki, den neuen Staat auf ein solides wissenschaftliches Fundament zu stellen. Daher investierten sie massiv in naturwissenschaftliche Bildung und Forschung. Das Leben russischer beziehungsweise sowjetischer Biologen und Physiker, die zwischen 1900 und 1960 wirkten, schildert der britische Wissenschaftsjournalist und Autor Simon Ings in diesem Buch, wobei er die jeweiligen historischen Hintergründe ausleuchtet.

Die 1920er Jahre dominierte der Nobelpreisträger Iwan Pawlow (1849–1936), der mit dem kommunistischen Staat kollaborierte. Seine These, wonach sich mittels Konditionierung bestimmte Verhaltensweisen herbeiführen lassen, die an die Folgegenerationen vererbt werden, wurde zwar widerlegt und sogar von Pawlow selbst relativiert. Sie passte aber gut in das Konzept einer marxistischen Wissenschaft, die das Bewusstsein durch Veränderungen der Umwelt steuern wollte. So wurde Ende der 1920er Jahre die Psychoanalyse, die Verhaltensänderungen durch Selbstreflexion erreichen

will, als nicht marxistisch aus der sowjetischen Psychologie verdrängt.

Die meisten Wissenschaftler, die schon in der Zarenzeit gewirkt hatten, bejahten das bolschewistische Regime, das ihnen allerdings umgekehrt misstraute. 1928, als die neu gegründeten sowjetischen Hochschulen ein ganzes Heer von Nachwuchswissenschaftlern ausgebildet hatten, rief Stalin zu einem Sturm auf die Bastionen der »bürgerlichen Wissenschaft« auf und forderte eine Wissenschaft, die sich allein am Nutzen orientiere. Zu dieser Ausrichtung passte der Agrarwissenschaftler Trofim Lyssenko (1898–1976), der im Fokus des Buchs steht. Sein Aufstieg begann um 1930, als Stalin mit der Kollektivierung des rückständigen Agrarlands die Industrialisierung durchpeitschen wollte und dem Lyssenkos Ideen dabei nützlich erschienen. Der Agronom vertrat die These, die Eigenschaften von Lebewesen würden nicht durch Gene, sondern Umweltbedingungen bestimmt. Er propagierte die Entwicklung neuer Nutzpflanzenarten binnen dreier Jahre, was der Empirie widersprach.

Die Sowjetunion litt in ihren ersten Jahrzehnten immer wieder unter verheerenden Hungersnöten, die Millionen Menschen das Leben kosteten. Dass Lyssenkos Konzepte, um dieses Problem zu bewältigen, praktisch alle scheiterten und die Hungerkrisen sogar verschärften, schadete seinem Ruhm nicht. Erst 1962 wurde er entmachteter, nachdem etliche

seiner Forschungsergebnisse als gefälscht entlarvt worden waren.

Eines von Lyssenkos vielen Opfern war der Botaniker Nikolai Wawilow, der über Genetik forschte – eine Disziplin, die in der Sowjetunion zunehmend in Ungnade fiel. Nach massiven persönlichen Kontroversen ebnete Lyssenko den Weg zu Wawilows Verhaftung; der Botaniker wurde zu Geständnissen gezwungen und zum Tod verurteilt. Viele seiner Kolleg(inn)en waren bereits den stalinistischen Säuberungen der späten 1930er Jahre zum Opfer gefallen. Ihre Ängste und Leiden schildert der Autor sehr eindringlich.

Die sowjetischen Physiker waren dem existentiellen Druck weniger stark ausgeliefert, wie Ings zeigt. Stalin brauchte sie für die sowjetische Atombombe, die 1949 zum ersten Mal gezündet wurde. Doch auch vor ihnen machte sein Misstrauen nicht Halt; so soll er mit Blick auf sie gesagt haben: »Die können wir später erschießen.«

Trotz punktueller Durchbrüche wie der Entwicklung sowjetischer Kernwaffen beurteilt Ings den bolschewistischen Versuch, dem Kommunismus mit wissenschaftlichen Methoden auf die Sprünge zu helfen, als gescheitert. Das lag an den politischen Repressionen, vor allem aber an der engstirnigen Hybris, Mensch und Natur mit technischen Großprojekten unterwerfen zu können.

Der Rezensent Hans-Martin Schönherr-Mann lehrt politische Philosophie an der Ludwigs-Maximilians-Universität München sowie Theorie der Bildung an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.



Simon Ings
TRIUMPH UND TRAGÖDIE
Stalin und die Wissenschaftler
Hoffmann und Campe,
Hamburg 2018
Aus dem Englischen von
Brigitte Döbert
592 S., € 34,-

Die erste sowjetische Atombombe RDS-1 (vorn) wurde 1949 erfolgreich getestet – einer der Durchbrüche der sowjetischen Wissenschaft. In Kontrast dazu standen unhaltbare Konzepte wie der »Lyssenkoismus«, der in der sowjetischen Agrarwissenschaft großen Einfluss hatte.

TIERMYTHEN ERKENNTNISSE DER ZOOLOGIE

Eine Biologin blickt zurück auf die Geschichte der Tierforschung.

► Von Sexpraktiken der Fledermäuse über Biber, die sich angeblich selbst kastrieren: In lockerem Umgangston, in 13 Kapiteln und anhand verschiedener Tierarten befasst sich die Autorin mit der Erkenntnisgeschichte der Zoologie. Dabei greift sie bestehende Tiermythen auf und stellt sie aktuellen Erkenntnissen gegenüber.

Lucy Cooke hat Zoologie in Oxford studiert und ist mehrfach für ihre Dokumentarfilme (unter anderem für BBC und National Geographic) ausgezeichnet worden. 2010 gründete sie eine Organisation für die Wertschätzung von Faultieren und ist häufig als Moderatorin aktiv. Ihr ausgeprägtes Engagement für unpopuläre Tierarten spiegelt sich in diesem Buch lebhaft wieder, denn es behandelt vorwiegend eher wenig geschätzte Zeitgenossen wie Geier und Hyänen, allerdings auch heimische Sympathieträger wie Frösche und Störche. Meist nimmt die Autorin einen Irrglauben zum Anlass, ins Thema einzusteigen. Dieser bezieht sich häufig auf verborgene Eigenschaften der Tiere, die für Missverständnisse und Spekulationen sorgten. Anschließend schildert Cooke Hypothesen und Experimente früherer Zoologen, die dabei halfen, diese Irrtümer aufzuklären.



Lucy Cooke
DIE ERSTAUNLICHE WAHRHEIT ÜBER TIERE
Was Mythen und Irrtümer über uns verraten
Aus dem Englischen von Gabriele Gockel, Christa Prummer-Lehmair, Jochen Schwarzer
Malik, München 2018
368 S., € 22,-

Schließlich geht sie auf den aktuellen Kenntnisstand ein.

Die Autorin bemüht sich sehr darum, das Ansehen der behandelten Tierarten, zum Beispiel der ungeliebten Aasfresser, aufzubessern. Auch erzählt sie, wie der spanische Historiker Gonzalo Fernández de Oviedo y Valdés im 16. Jahrhundert die Faultiere als »unbeholfen und langsam« beschrieb, gefolgt von dem Entdecker William Dampier (1651–1715), der ihnen sogar unterstellte, sie kämen in neun Minuten nur drei Zoll voran. Cooke betont, dass Faultiere sich zwar nur mit maximal 1,5 Kilometer pro Stunde durch die Bäume bewegen, der Grund dafür aber ihr unglaublich langsamer Stoffwechsel sei. Anschließend geht sie auf Physiologie, Tarnung, Fortpflanzungsrituale und Fortbewegungsstrategien

der Tiere ein. Das Buch bietet Fakten ebenso wie Anekdoten und dürfte interessierten Schnelllesern gefallen. Bei gründlicherer Lektüre vermisst man allerdings wiederholt den roten Faden. Der abwechselnd klagende, ironische oder despektierliche Tonfall, in dem Cooke die durchaus brutalen Experimente früherer Zoologen schildert, transportiert außerdem eine klare Wertung.

Formulierungen wie »der versnobte Kreis der europäischen Naturforscher«, »(...) spie der großspurige Comte de Buffon in einer seiner Tiraden« oder »Ovidos Lüge vom lethargischen Faultier« werden viele als störend empfinden. Darüber rücken spannende Informationen, etwa dass Geier einer bestimmten Art einen Schnabeldruck von 1,4 Tonnen pro Quadratzentimeter ausüben, etwas in den Hintergrund. Auch die Komik, die sich angesichts der Absurdität früherer Hypothesen oft ganz von selbst einstellt, leidet phasenweise unter dem unsachlichen Schreibstil.

Zwar präsentiert Cooke immer wieder überraschende und teils amüsante Fakten, die wegen ihres ungewöhnlichen Charakters gut im Gedächtnis bleiben. Da waren zum Beispiel jene Frösche, denen Wissenschaftler Unterhosen bastelten, und da ist der »feministische« Lebensstil von Hyänen. Dennoch läuft das Buch Gefahr, seine seriösen Leser schon nach wenigen Seiten zu verlieren.

Die Rezensentin Donata von Bistram studiert Biologie und ist Praktikantin bei Spektrum der Wissenschaft.

PHYSIK DIE WUNDER DES KOSMOS

Der theoretische Physiker Lawrence M. Krauss erklärt, warum wir das Allerkleinste erforschen müssen, um das Allergrößte zu verstehen.

► Die Welt, in der wir leben, scheint keinen Plan zu haben, und unsere Existenz ist offenbar ein merkwürdiger Zufall. Diese Ansicht vertritt Lawrence M. Krauss in seinem neuen Buch. Als theoretischer Physiker forscht Krauss an den Grenzen unseres Wissens. Er leitet das Origins-Projekt an der Arizona State University, dass sich mit den Ursprüngen des Kosmos, des Menschen und des Bewusstseins befasst. Eben



Lawrence M. Krauss
DAS GRÖSSTE ABENTEUER DER MENSCHHEIT
Vom Versuch, das Universum zu entschlüsseln
Aus dem Englischen von Helmut Reuter
Knaus, München 2018
383 S., € 26,-

diese Grenzen zeigt uns Krauss in dem Werk auf.

Der Autor erläutert zuerst die Grundlagen der Physik und stellt sie in den historischen Kontext. Er erzählt von den bahnbrechenden Erkenntnissen Galileo Galileis und den revolutionären Schriften Isaac Newtons. Doch dann wird es rasch komplizierter. Zunächst kommt die Physik Michael Faradays und James Clerk Maxwells ins Spiel, dann die Relativitätstheorie Albert Einsteins, bis alles in der modernen Teilchenphysik, Gravitationsphysik und Quantenelektrodynamik kulminiert. Für die Leser sind physikalische Vorkenntnisse von enormen Vorteil, auch wenn es im Buch nur eine Formel zu lesen gibt, nämlich $E=mc^2$.

Seit den 1970er Jahren ist das Wissen um die Beschaffenheit des Universums explodiert. Dabei hat sich immer klarer gezeigt: Was im Aller kleinsten abläuft, auf der Ebene der Elementarteilchen, ist intuitiv kaum oder gar nicht zu erfassen. Die Welt der Quanten hat ihre eigenen Gesetze. »Unter der Oberfläche finden sich seltsame innere Funktionen, die unserem Verständnis zuwiderlaufen und unsere Ansichten, was Sinn ergibt, in Frage stellen, wie ein Universum, das aus dem Nichts hervorgeht«, schreibt Krauss.

Krauss stellt die Arbeiten zahlreicher Physik-Nobelpreisträger der letzten Jahrzehnte vor. Viele von ihnen haben an Teilchendetektoren oder Beschleunigern gearbeitet, deren Funktionsweise der Autor

erläutert. Diese Abschnitte zeichnen das Buch positiv aus und heben es von anderen Werken ab. Denn sie vermitteln den Lesern eine kompakte Erläuterung dazu, welchen Erkenntnisgewinn die wissenschaftlichen Großeinrichtungen wie das CERN in der Schweiz oder das Experiment Kamiokande in Japan gebracht haben.

Deutlich wird, dass man das gewaltige Universum vor allem im Aller kleinsten erforschen muss, um seine ganz großen Zusammenhänge zu verstehen. Dabei geht es etwa darum, welche Rolle die Neutrinos oder das Higgs-Teilchen im Kosmos

spielen. Zudem zeigt Krauss gut nachvollziehbar auf, dass unser Wissen um die Quantenwelt, ebenso wie das um die Galaxien, Schwarzen Löcher und Dunkle Materie, noch sehr begrenzt ist. Mit jeder Erkenntnis werden neue Fragen aufgeworfen, tun sich neue weiße Flecken auf der Landkarte der Physik auf. Die Expedition dorthin ist eine Reise ins Unbekannte, wie man beim Lesen deutlich spürt – ein Abenteuer, das für die Menschheit gerade erst beginnt.

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

POLITIK WEGE AUS DER GLOBALISIERUNGSKRISE

► Zu den aktuellen Problem der Weltpolitik gehört in den westlichen Ländern ein neuer Protektionismus sowie die Angst, politischen Entwicklungen hilflos ausgeliefert zu sein. In den Entwicklungs- und Schwellenländern bereitet vor allem der wirtschaftliche Stillstand Sorge. Die Autoren um Michael Hüther, Direktor des Instituts der deutschen Wirtschaft, erklären all diese Erscheinungen als Symptome einer Globalisierungskrise. Sie resultiere aus fehlenden wirtschaftspolitischen Institutionen in Entwicklungs- und Schwellenländern sowie aus mangelnder Verantwortung und Gestaltung in multilateralen Organisationen wie der UNO oder der WHO. Hinzu komme der Konflikt zwischen westlichem und chinesischem Wertesystem. Zur Überwindung der Krise plädieren die Autoren für eine »inklusive« Globalisierung. Diese müsse gegen Korruption vorgehen, aber auch die Zivilgesellschaften stärken und ein einheitliches Rechtssystem auf Basis von Privateigentum und Vertragsfreiheit fördern. All diese Gedanken erscheinen plausibel, aber nicht neu. Das Buch, das sich vor allem an Fachleute richtet, bietet dennoch eine umfassende Analyse der Globalisierung.

Martin Schneider



Michael Hüther, Matthias Diermeier, Henry Goecke

DIE ERSCHÖPFTE GLOBALISIERUNG

Zwischen transatlantischer Orientierung und chinesischem Weg

Springer, Wiesbaden 2018
424 S., € 19,99

BIOLOGIE REISEBEGLEITER FÜR DIE KÜSTE

Der versierte Naturführer »Düne, Strand und Watt« stellt diese Habitate und ihre Bewohner vor.

► Die generell ansprechend und üppig bebilderten Kosmos-Naturführer sind ziemlich beliebt. Das wird wohl auch diesem Band so gehen, der sich mit Tieren und Pflanzen unserer heimischen Küsten befasst. Geschrieben haben ihn der Zoologe Klaus Janke von der Nationalparkver-

REZENSIONEN

waltung Hamburgisches Wattenmeer sowie der Botaniker Bruno P. Kremer, der als Buchautor überaus produktiv ist. Janke und Kremer bilden ein bewährtes Autorenteam; sie haben zusammen bereits mehrere Bücher über den Lebensraum Meer verfasst.



»Düne, Strand und Watt« beginnt mit einer etwa 40-seitigen Einführung über das Meer und seine Bewohner; über Habitate an der Küste wie Düne, Strand und Watt; und über die Unterschiede zwischen Nord- und Ostseeküste. Auch ein Abschnitt über den Naturschutz und die Nationalparks an der deutschen Küste ist dabei. Anschließend stellen die Autoren einzelne Pflanzen- und Tiergruppen vor, eingeteilt in die drei Bereiche Flechten und Pflanzen, Wirbellose sowie Wirbeltiere. Nützliche Adressen, Literaturtipps zum Weiterlesen und ein ausführliches

Stichwortverzeichnis runden das Werk ab.

In bewährter Kosmos-Manier präsentieren Janke und Kremer die Organismen in Wort und Bild. Jeweils auf der linken Buchseite finden sich Texte für zwei bis vier verschiedene Arten, auf der rechten Seite die zugehörigen Fotos. Die Leser erfahren zu jeder Spezies, welche Merkmale sie aufweist, wo sie vorkommt und was sich sonst noch über sie zu wissen lohnt. Grau hinterlegte Boxen heben noch einmal die drei wichtigsten Fakten zu jeder Art hervor. Ein Farbkode am oberen Seitenrand erleichtert es, die Lebewesen den drei Hauptkategorien zuzuordnen. Dabei fällt auf, dass die Wirbellosen etwa so viel Platz einnehmen wie die Flechten, Pflanzen und Wirbeltiere zusammen. Hier herrscht offensichtlich die größte Vielfalt, angefangen von Schwämmen über verschiedene Würmer, Schnecken, Muscheln und Krebstiere bis hin zu Insekten, Stachelhäutern und Seescheiden. Insgesamt behandeln die Autoren mehr als 400 Arten, darunter landlebende Küstenbewohner genauso wie echte Meerestiere, beispielsweise Fische und Tintenfische.

Optisch besonders ansprechend ist das zusätzliche Inhaltsverzeichnis im vorderen Einband, das sich ausklappen lässt und die Tiergruppen mit einer jeweils charakteristischen Zeichnung und den zugehörigen Seitenzahlen auflistet. Im hinteren Einband

finden sich 32 Fotos typischer Strandfundstücke, darunter Steine mit Löchern von Bohrmuscheln, Moostierchen-Kolonien und »Nixentaschen« (Eikapseln vom Nagelrochen). Das kompakte Buch passt in jede Tasche, ist auch für den schmalen Geldbeutel erschwinglich und lässt sich gut auf Wattwanderungen und Küstenspaziergänge mitnehmen.

Die Rezensentin Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

PALÄONTOLOGIE SPANNENDE SAURIER

Die Rezeptionsgeschichte der »Dinos« ist immer zugleich eine natur- und kulturwissenschaftliche, schreibt Erfolgsautor Bernhard Kegel.

Der Berliner Biologe, Chemiker und renommierte Autor Bernhard Kegel nimmt uns in seinem neuen Buch mit auf einen Trip durch die Geschichte der Dinosaurier. Er erzählt diese Geschichte nicht nur aus der Sicht der Paläontologie, sondern hinterfragt auch, welche Rolle die gewaltigen Landwirbeltiere in Kinderzimmern, Abenteuerfilmen und Computerspielen spiel(t)en. Kegel vergleicht dabei stets das Bild, das Forscher sich von den »schrecklichen Echsen« machten, mit jenem, das die Populärkultur zeichnet(e). Auf diese Weise stellt er sowohl die Geschichte der Wissenschaft als auch die der medialen Aufbereitung



anschaulich dar, womit er vor allem erwachsene Leser ansprechen möchte. Warum gehören die Tiere, die seit dem Ende der Kreidezeit vor etwa 65 Millionen Jahren ausgestorben sind, heute fest zur Populärkultur? Was wissen wir gesichert über sie, und was gehört ins Reich der Fantasie? Solchen Fragen geht der Autor nach.

Jede neue Entdeckung, schreibt Kegel, verändere das Bild, das sich die Menschen von den »Dinos« machten. So regten die Fisch- und Flugsaurierfossilien, die Mary Annings (1799–1847) in Südengland fand, den Geologen Henry Thomas de la Bèche (1796–1855) dazu an, das Aquarell »Duria Antiquior« anzufertigen. Auf dem Bild kämpfen ein *Plesiosaurus* und ein *Ichthyosaurus* miteinander. Fossilienfunde in Nordamerika um die Mitte des 19. Jahrhunderts wiederum veranlassten die Menschen dazu, sich Dinosaurier als riesige drachenähnliche Wesen vorzustellen. Schon

bald hielten die Tiere Einzug in die US-Konsumkultur, indem sie beispielsweise als Logo des Unternehmens Sinclair Oil auf Tankstellen abgebildet wurden. Deutlich revidiert wurde das Bild von den »schrecklichen Echsen«, als der chinesische Paläontologe Lida Xing auf einem Markt in Myanmar auf 99 Millionen Jahre alten Bernstein stieß, in dem ehemalige Wirbelknochen samt Federkleid eingeschlossen waren: der Schwanz eines kleinen Dinosauriers.

Die Vorstellung, die sich die Menschen von den aus gestorbenen Tieren machten, wandelte sich so vom schwerfälligen Ungetüm zum wendigen Jäger, von der kriechenden Riesen-

eidechse zum zweibeinigen Drachen und schließlich zum gefiederten Riesenhuhn. Heute, so Kegel, sei bekannt, dass die Artenvielfalt der Dinosaurier enorm war und ihre Körpergrößen von der eines Spatzen bis zu jener eines Jumbojets reichten. Oft ist das aber nur Kennern klar. Laien werden in aller Regel stark von Filmen wie »Godzilla« oder »Jurassic Park« geprägt, deren Bildwelten sich bei Kinderzimmertapeten, Kuscheltieren, Playmobilfiguren sowie in Büchern, Videospielen und Vergnügungsparks wiederfinden.

Kegel betont, die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse widersprechen oft den medialen Konstrukten. So sei längst bekannt,

dass Vögel und Reptilien gemeinsame Vorfahren haben, weshalb auch viele Dinosaurier Federn besaßen, was sich in etlichen Filmen nicht spiegelt. Zudem wäre das klischeehafte Brüllen und Trampeln, das den Tieren oft zugeschrieben wird, dem täglichen Überlebenskampf eher abträglich gewesen, denn es hätte sowohl Jagd- und An-schleichenstrategien durchkreuzt als auch ein Verstecken unmöglich gemacht. Der Autor zeichnet ein realitätsnäheres Bild der Tiere, das infolge immer neuer wissenschaftlicher Entdeckungen einem stetigen Wandel unterliegt. Dabei erzählt er interessante Details, etwa dass die Ausscheidungen eines

80 Tonnen schweren Dinos vermutlich um die 1,5 Tonnen täglich umfassten oder dass einige Saurierarten in Herden von mehreren tausend Tieren zusammenlebten.

Die Lektüre vermittelt Wissenswertes über die einstigen Erdbewohner und macht klar, dass die (Rezeptions-)Geschichte der Dinosaurier immer zugleich eine natur- und kulturwissenschaftliche ist. Das Werk lässt sich uneingeschränkt empfehlen, auch jenen Lesern, die bisher keine eingefleischten Dinofans waren.

Die Rezensentin Julia Schulz ist Veterinärmedizinerin und Journalistin. Als Erstere arbeitet sie in der Wild- und Zootiermedizin, als Zweitere im Wissenschafts- und Kulturjournalismus.

SPEZIAL Biologie Medizin Hirnforschung



Die **Spektrum Spezial**-Reihe **BMH** beschäftigt sich mit dem breiten Themenfeld der Lebenswissenschaften. Jahresabo der Reihe (4 Ausgaben pro Jahr): Print € 29,60; Digital € 21,-; Kombiabo Print + Digital € 33,60 (Printpreise inkl. Versandkosten Inland)

www.spektrum.de/spezialabo



MATHEMATIK HIMMLISCHE HERRSCHAFT DER ZAHLEN

Auf wundersame Weise gehorcht das Universum mathematischen Regeln. Doch für wichtige Bereiche suchen die Forscher noch nach den richtigen Formeln.

Im 18. Jahrhundert entdeckten die deutschen Gelehrten Johann Titius und Johann Bode einen numerischen Zusammenhang zwischen den Bahnradien der meisten Planeten im Sonnensystem. Diese Titius-Bode-Reihe könnte bloßer Zufall sein, denn sie gilt weder streng noch allgemein. Oder steckt vielleicht doch mehr dahinter? An dieser Frage demonstriert der britische Mathematiker Ian Stewart, dass Newtons Gravitationsgesetz zwar im Prinzip die Planetenbahnen wunderbar erklärt – aber längst nicht alle Abweichungen, die durch die Wechselwirkung der Himmelskörper entstehen. Ursache der Titius-Bode-Reihe sind möglicherweise so genannte Resonanzen, das heißt einfache Zahlenverhältnisse zwischen den Umlaufzeiten zweier Planeten. Bei einer 5:3-Resonanz liegen die beiden Körper nach fünf beziehungsweise drei Umläufen auf einer Linie zum Mutterstern, und das könnte beide Bahnen stabilisieren, während die Himmelskörper bei einem anderen Zahlverhältnis in chaotisches Trudeln gerieten.

Stewart, renommierter Autor und **Spektrum**-Lesern als Autor der »Mathema-

tischen Unterhaltungen« bekannt, erinnert an die Tatsache, dass Newtons Gesetz nur bei zwei Massen zu exakten Lösungen führt, während schon das Dreikörperproblem keine einfachen Vorhersagen erlaubt. Deshalb droht überall im Kosmos das vom französischen Mathematiker Henri Poincaré (1854–1912) entdeckte »deterministische Chaos«: Newtons strenge Regeln ergeben im Allgemeinen kein kosmisches Uhrwerk, sondern ein kompliziertes Massen- und Kräftegemenge. Nur wenn ein schweres Zentralgestirn seine vergleichsweise verschwindend leichten Planeten und Kometen bändigt, kommen als Bahnen die berühmten Kegelschnitte heraus: Ellipsen respektive Hyperbeln.



Ian Stewart
**DIE BERECHNUNG
DES KOSMOS**
Wie die Mathematik das
Universum entschlüsselt
Aus dem Englischen von Monika
Niehaus und Bernd Schuh
Rowohlt, Reinbek 2018
528 S., € 14,99

Der Autor, der selbst auf dem Gebiet des deterministischen Chaos geforscht hat, beschreibt die komplexen Vorgänge, aus denen die – lediglich 20 Meter

dicken! – Ringe des Saturn hervorgingen. Es waren Mathematiker, die schon im 19. Jahrhundert berechneten, dass die Ringe weder fest noch flüssig sein können, sondern aus unzähligen kleinen Körpern bestehen müssen. Heute wissen wir zudem um die stabilisierende Wirkung der »Hirtenmonde«, die Schneisen und feine Wellen in die Ringe schlagen.

Newtons Regeln ergeben im Allgemeinen kein kosmisches Uhrwerk

Eingehend befasst sich das Buch damit, wie heutige Raumsonden das einigermaßen geregelte Chaos des Planetensystems nutzen: Statt das Ziel, zum Beispiel Pluto, direkt anzu- steuern, schlagen sie komplizierte Umwege ein, um aus der Schwerkraft anderer Planeten Schwung zu holen.

Da der Autor möglichst umfassend vom Wissensstand der modernen Kosmologie berichten möchte, zeichnen sich nicht alle Kapitel durch jene Engführung von Mathematik und Kosmos aus, die der Buchtitel verspricht. Manches bleibt eher Pflichtübung und erzählt nach, was auch in anderen populären Büchern steht.

Einen persönlichen Touch hat Stewarts Schilderung des kosmologischen Standardmodells vor allem wegen der Skepsis, die er ihm entgegenbringt. Ist der Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren wirklich die einzige Erklärung der kosmischen Expansion? Wirft das Inflationsmodell – dem

zufolge sich das All unmittelbar nach dem Urknall derart rapide aufblähte, dass es heute homogen und flach erscheint – mehr Fragen auf, als es beantwortet? Brauchen wir die Dunkle Materie, um das Rotationsprofil der Galaxien zu erklären, wo doch die Suche nach dafür passenden Teilchen bisher erfolglos blieb?

Auch die Idee des Multiversums und des anthropischen Prinzips zieht Stewart in Zweifel. Ist unser Universum wirklich bloß unter unzähligen anderen just eines, in dem die physikalischen Gesetze zufällig die Existenz von Menschen zulassen? Der Mathematiker bringt ein durchaus interessantes Gegenargument vor: Er meint, es sei gar keine ungeheuer unwahrscheinliche Feinabstimmung aller physikalischen Konstanten nötig, damit unser Kosmos entstehen kann. Jedes komplexe Gebilde gehe im Lauf der Zeit, Schritt für Schritt, aus wenigen einfachen Anfangsbedingungen hervor – so wie ein fertiger Rennmotor aus einer Unmenge störanfälliger Komponenten besteht und dennoch das Resultat jeweils für sich einfach nachvollziehbarer Montageschritte ist.

Mit Recht weist Stewart auf die klaffenden Lücken im Standardmodell der Kosmologie hin, will aber dessen enorme Erklärungskraft nicht leugnen – und vermag auch keine bessere Alternative anzubieten. Die Highlights seines Buchs sind die Kapitel zum deterministischen Chaos im Sonnensystem.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Kolumnist bei **Spektrum** der Wissenschaft.

ZURECHTGEFUMMELTES ERGEBNIS

Untersuchungen widersprechen dem gängigen Bild vom geschlechtsspezifischen Gehirn. (»Die Legende vom weiblichen Gehirn«, *Spektrum* August 2018, S. 44)

Thomas Leichner, Wolfratshausen: Es wird nicht erwähnt, welchen Wert Daphna Joel in ihrer Studie für die Enden des Männlichkeits- beziehungsweise Weiblichkeitsspektrums benutzt und wie sie auf diesen kommt. Er spielt aber bei der Definition des bezüglich Männlichkeit oder Weiblichkeit konsistenten Gehirns die entscheidende Rolle.

Erhöht man den Prozentanteil für die Enden, bekommt man automatisch weniger konsistente Gehirne. Reduziert man ihn, bekommt man mehr. Man kann sich so das gewünschte Ergebnis zurechtsummeln. Was ebenso fehlt, ist der Nachweis, dass die untersuchten Eigenschaften der Gehirnregionen männliche beziehungsweise weibliche Verhaltensweisen beeinflussen – oder überhaupt menschliches Verhalten.

LEBEN AUF DEM MARS

Der NASA-Rover Curiosity hat seit 2012 zahlreiche Erkenntnisse über die geologische Vergangenheit des Roten Planeten ermöglicht. (»Ein Roboter-Geologe für Mars«, *Spektrum* Juli 2018, S. 56)

Harald Tummelsberger, Gütersloh: Als Resümee des Artikels heißt es: »Die Suche nach Lebensspuren bleibt einer künftigen Mission vorbehalten.« Seltsam, mir war so, als sei das die Mission von Curiosity und Co. gewesen. Und alles, was die Rover gefunden haben, waren Sand und Steine und die Erkenntnis, dass diese vor vielen Millionen Jahren von irgendeiner Flüssigkeit umspült wurden. Für Geologen sicherlich interessant, aber es stellt sich die Frage nach dem Preis-Leistungs-Verhältnis. Die »Suche nach Lebensspuren« ist gescheitert und dient nur noch als Legitimationshilfe für immer teurere Sonden.

Antwort von Redakteur Mike Beckers:

Curiosity hatte von Anfang an weder das Ziel noch die Ausrüstung, mögliche Organismen oder deren Überreste zu finden. Sein Auftrag waren Untersuchungen, ob die Marsumgebung jemals grundsätzlich für Leben geeignet war. Wahrscheinlich wird kein Rover mit seiner stets begrenzten Instrumentierung einen unzweifelhaften Nachweis für Leben liefern – dafür brauchen wir letztlich Proben in irdischen Laboren. Die neuen Erkenntnisse helfen den Wissenschaftlern also tatsächlich bei der Planung einer zukünftigen »Sample-Return«-Mission.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht.

WARUM 57 UND 55 KARTEN?

Der Mathematiker Ralf Goertz analysierte das Kinderspiel »Dobble«. (»Kartenspiel-Algebra«, *Spektrum* Juni 2018, S. 72)

Dieter Föller, Seeheim-Jugenheim: Warum braucht Dobble mit je 8 Symbolen pro Karte exakt 57 Karten? Die im Text geforderte Bedingung für eine »symmetrische« Lösung lautet als Gleichung geschrieben $x \cdot h(h-1)/2 = x(x-1)/2$, um $x/2 \neq 0$ gekürzt $h(h-1) = x-1$ und schließlich nach x aufgelöst $x = h(h-1) + 1$. Für $h=8$ ist also eindeutig $x=57$. Sowohl die im Text formulierte Behauptung bezüglich $x=55$ als auch die Vermutung bezüglich $x=57$ sind in Wirklichkeit scharfe Aussagen.

Warum gibt es trotzdem Dobble mit nur $x=55$ Karten? Bei Wikipedia liest man: Damit sichergestellt ist, dass es auch bei drei Spielern eine Startkarte gibt. Es ist nämlich $57 \equiv 0 \pmod{3}$, aber $55 \equiv 1 \pmod{3}$ wie auch $55 \equiv 1 \pmod{2}$.

Antwort des Autors Ralf Goertz:

Sie haben mit Ihrer Gleichung Recht, und Sie kommen damit schnell zu derselben Folgerung wie ich. Dabei machen Sie aber zwei Voraussetzungen, deren Gültigkeit man eigentlich erst zeigen muss, dass nämlich erstens die Anzahl a der Symbole pro Karte und die Häufigkeit h eines einzelnen Symbols gleich sind und dass zweitens auch x (die Anzahl verschiedener Symbole) gleich der Anzahl s der Karten ist. Ohne diese Voraussetzungen lautet das System mit diesen Bezeichnungen daher: $a \cdot s = h \cdot x$ und (nach Kürzung von $1/2$) $x \cdot h(h-1) = s(s-1)$. Bekannt sind erst einmal nur $a=8$ und $s=55$, was auf die im Artikel genannte Teilerbetrachtung führt. Dass ich schreibe, die Rechnung mit 57 »könnte« aufgehen, soll auf die eigentliche Frage hinführen, ob es überhaupt möglich ist, mit $a=h=8$ und $s=x=57$ die Bedingung zu erfüllen, dass zwei Karten stets genau ein Symbol gemeinsam haben müssen. Das ist nicht trivial, wie das Beispiel mit sieben Symbolen pro Karte zeigt. Auch in diesem Fall geht die obige Rechnung auf ($a=h=7$ und $s=x=43$). Trotzdem kann es kein Dobble mit je 7 Symbolen auf 43 Karten geben.

Ich habe mich natürlich auch gefragt, warum 55 und nicht 57 Karten. Die Aussagen aus der Wikipedia sind für mich nicht überzeugend, da ein Weglassen von Karten immer möglich ist und man mit 57 Karten flexibler ist als mit 55. Vermutlich wollten die Macher einfach eine möglichst runde Zahl an Karten haben.

futur III

Das Treueversprechen

Kleine Geschenke erhalten die Freundschaft.

Eine Kurzgeschichte von D. A. Xiaolin Spires

Teller und Tassen türmten sich im Waschbecken zu einem wirren Haufen. Ich sah zu, wie der Autosorter sie einzeln in die Spülmaschine zog und ultraschallgerecht stapelte, während ich noch über den Anruf aus der Schule nachdenken musste: »Meiling hat wieder Ärger gemacht.« Stumm artikulierte ich »Los!«, und der Geschirrspüler begann zu summen; zugleich breitete sich Zitronenduft aus. Durch die transparente Hülle sah man die hypnotisch wirkenden, abgezirkelten Bewegungen des smarten Superspülers: Mechanische Gliedmaßen tanzten wie Spinnen über mein Porzellan und sangen es unhörbar sauber.

Die sonore Stimme der Eingangskontrolle riss mich aus meinen Gedanken: »Meiling ist angekommen.« Laut fiel die Tür ins Schloss, jemand trampelte die Treppe hinauf.

»Meiling, komm hierher!«, schrie ich. Die Schritte stoppten, dann hörte ich, wie sie wieder herunterkamen. Stampf, stampf. Treppab und durchs Esszimmer in die Küche.

Auf ihrer Baseballkappe prangte »Just 4 UR Evite«, der letzte Schrei auf dem Musikmarkt. Wie hießen die Typen noch? Josh, Kick und Enlai? Oder war das die Boygroup, die in der vorigen Woche noch in gewesen war?

»Nimm das Ding ab und schau mich an«, sagte ich. Sie schüttelte sich so heftig, dass das Hologramm auf dem Kappenschirm, der ihre Augen verbarg, bunte Schlieren zog.

Ich riss ihr die Kappe vom Kopf. Sie kreischte. Ihr schwarzes Haar sträubte sich unfrisiert. Wann hört die Pubertät endlich auf?

Während sie zornig mit den Armen herumfuchtelte und sich beklagte,

das sei unfair, sah ich, dass etwas an ihrem Hals baumelte.

»Was ist das?« Das Zeug war fleischfarben und leicht matschig, es glich einem toten, embryonal zusammengekrümmten Nacktmull.

Schlagartig strahlten Meilings Augen vor Vergnügen. Ihr Trotzanfall war wie weggewischt.

An der Halskette hing eine Art unförmiges, bleiches Medaillon.

»Mama, das verstehst du nicht. Du bist nicht mit DNA-Tausch und Hautplastik aufgewachsen, du weißt einfach nicht, wie viel das bedeutet!«

Sie nahm das Ding in die Hand und quetschte es ein wenig. Der Anhänger deformierte sich unter dem Druck ihrer Fingerspitzen.

»Du findest doch, ich soll nicht immer so materialistisch sein, Mama«, spottete Meiling. »Na, das hab ich Kyle erzählt. Er möchte ja schon länger mit mir gehen und wollte mir deshalb ein Geschenk kaufen. Ich sagte ihm also: Du sollst mir nichts kaufen, aber wenn du echt auf mich stehst, warum schenkst du mir nicht dein rechtes Ohr?«

Meine Tochter lachte. Für mich klang das wie ein grausames Spiel.

»Drauf er: Ohr? Meinst du, ich soll für dich hören? Ich könnte einen Chip installieren und dir in der Spanisch-

stunde beim Übersetzen helfen. Und ich: Nein danke, meine Schularbeiten mach ich selber. Ich will dein Ohr, ganz im Ernst. Er grinste, als wär's ein Witz.«

»Sein Ohr?«, stammelte ich ungläubig.

»Ja, Mama, bleib locker«, sagte sie und verdrehte die Augen. Ihre Finger streichelten die runden Fugen und Falten der blassen, elastischen Masse an ihrem Hals.

»Also, er hat es getan. Er gab es mir wirklich. Ich fand das echt romantisch, das ist irgendwie fast wie bei dem van Gogh im Kunstunterricht.«

»Das hier ist sein eigenes Ohr?« Mir wurde speiübel. Ich sah die Muschel, das Lappchen. Jedes Geräusch erstarb. Nur der Superspüler summt vor sich hin.

»Aber nein, Mama, sei doch nicht blöd.«

»Wie sprichst du mit deiner Mutter?!« Ich griff zögernd nach ihrem Anhänger und scheute dann doch vor dem weichen Knorpel zurück.

»Er hat es *gezüchtet*. Eigentlich war es als Übung für den Leistungskurs gedacht, aber er machte extra eines für mich. Auf seinem Arm. Trotz der Sommerhitze trug er lange Ärmel, weil er mich überraschen wollte. Es wuchs auf seinem Unterarm, knapp über dem Handgelenk.«

Sie zeigte auf ihre eigenen Hände. Ich strich darüber, unwillkürlich auf der Suche nach seltsamen neuen Noppen.

»Das macht die Sache nicht besser.«

»Er meint, die Muschel kann noch nicht hören, aber er arbeitet am Trommelfell und möchte damit dann

akustische Informationen in sein Zimmer übertragen. Auf die Weise können wir Kontakt halten.«

Ich weiß, dass Teenager spezielle Balzrituale haben, doch das ging mir nun wirklich zu weit.

»Gib das her.« Verärgert riss ich an ihrer Halskette.

»Nein!«, kreischte sie. Sie hielt die Kette fest. »Das ist doch sein Treueversprechen.«

Wir kämpften minutenlang miteinander. Sie schrie »Du hast mich nie verstanden!« und »Warum hab ich dir überhaupt davon erzählt!« und »Hätte ich nur gelogen!«.

Ich brüllte zurück »Alles nur, damit ich mich aufrege!« und »Na bitte, das hast du erreicht, aber jetzt wirf dieses eklige Stück Menschenfleisch endlich weg!«. Immer stärker erfüllte der frische Zitronenduft das Zimmer, und zugleich wuchs der Lärmpegel unseres Streits.

»Mama, das verstehst du nicht. Du bist nicht mit DNA-Tausch und Hautplastik aufgewachsen, du weißt einfach nicht, wie viel das bedeutet!«

Sie drehte sich abrupt herum und wollte davonlaufen.

Dabei flatterte ihr Hemd hinten kurz hoch, und für einen Augenblick sah ich einen kugeligen Auswuchs auf ihrem Rücken.

»Was ist das?«, fragte ich ungewöhnlich leise und mit drohend gesenkter Stimme.

Den Ton kannte Meiling. Jetzt wurde es ernst. Wenn sie mich weiter reizte, würde sie es wochenlang bereuen. Keine Holofonate, keine Nachtausflüge zum Kiosk, kein Kredit fürs E-Mobil.

»Das ist bloß eine Dekoration. Nur vorübergehend.« Sie strich ihr Hemd glatt.

Ich trat näher und inspizierte die Sache genau. Die Lippen meiner Tochter bebten.

Es war ein Auge. In Hüfthöhe sprang rechts neben der Wirbelsäule ein einzelner Augapfel vor.

»Nein, nein, nein ...«

»Versteh doch, ich kann ihn ja nicht so einfach hängen lassen. Liebe funktioniert gegenseitig. Und er sagt immer, ich hätte schöne Augen.« Meiling wand sich kokett.

Ich betrachtete die Pupille, die unverwandt meinen Bewegungen folgte. Dann blinzelte das Auge kurz. Seine kräftigen Adern erinnerten mich irgendwie an die mechanischen Beine des Superspülers. Wie Spinnenfäden strahlten sie über Meilings Rücken aus. Ich griff nach dem Holofon, artikulierte »Hautarzt« und fragte mich, was der chirurgische Eingriff kosten würde – und was er für die Beziehung zu meiner Tochter bedeutete. Hoffentlich bekam ich noch einen Termin vor den Sommerferien.

DIE AUTORIN

D. A. Xiaolin Spires schreibt fantastische Geschichten, die unter anderem in den Onlinemagazinen »Clarquesworld«, »Analog«, »Galaxy's Edge«, »Terraform« und »Broad Knowledge« erschienen sind. Mehr über sie unter:

daxiaolinspires.wordpress.com

nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 557, S. 604, 24. April 2018

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M. A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff (Volontärin), Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Director: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiertgartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Lt.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L) sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1. 1. 2018.

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: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. 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: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



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



VORSCHAU



ELIAS WIEBERT, WWW.VISUALWEIGHT.COM, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



OMITLU / GETTY IMAGES / ISTOCK

JAGD AUF NEUE WELLEN

Wie geht es weiter bei der Suche nach Gravitationswellen? In diesem Herbst startet die nächste Messkampagne. Dabei hoffen die Astrophysiker einerseits auf die Signale weiterer Verschmelzungen von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, andererseits auf exotische, bisher unbekannte Quellen der Raumzeitbeben.



STEREALPHOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIE ARKTIS SCHMILZT

Nirgends sonst wird der Klimawandel deutlicher als am Nordpol. Der rekordverdächtige Rückzug von Meereis und Gletschern trifft nicht nur die Bewohner der Arktis, sondern beschert der gesamten Nordhalbkugel mehr Extremwetter.

MÄCHTIGE ZUFALLSMATRIZEN

Ein neues universelles Gesetz nimmt Gestalt an. Wie bei jenem der großen Zahlen oder beim Zentralen Grenzwertsatz finden sich statistische Gesetzmäßigkeiten unabhängig von den Einzelheiten des zu Grunde liegenden Phänomens: seien es die Abfahrtszeiten der New Yorker U-Bahn, Energieniveaus schwerer Atomkerne oder Nullstellen der riemannschen Zetafunktion. Gemeinsam ist ihnen, dass sie durch mathematische Objekte namens Zufallsmatrizen beschrieben werden.



CHRISTIAN SCHAUDERNA FOTODESIGN

WISSENSCHAFT UND RELIGION

Die Physikerin und Christin Barbara Drossel streitet mit dem Primatenforscher und Agnostiker Volker Sommer über Glaube und Vernunft. Drossel ist überzeugt, die Wissenschaft könne die wichtigen Lebensfragen nicht beantworten; Sommer meint, wir bräuchten die Gotteshypothese nicht.

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

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), über 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:

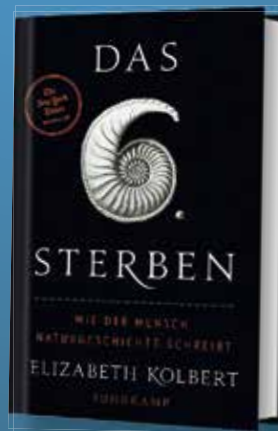
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Buch »Das 6. Sterben«

Ausgezeichnet mit dem Pulitzer-Preis. Wie keine andere Gattung zuvor haben wir Menschen das Leben auf der Erde verändert. In dem Bestseller erklärt uns Elizabeth Kolbert, wie das geschehen konnte.



Wählen Sie Ihr Geschenk



Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM 2017

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format.

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 2.700 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner



nature

