

Spektrum

der Wissenschaft

Wie schnell expandiert das Weltall?

Streit um die Hubble-Konstante

ELEKTROMOBILITÄT Werden die Rohstoffe für Batterien knapp?
GEOLOGIE Als noch Wasser auf dem Mars floss
HERDENSCHUTZHUNDE Die Rückkehr des Bankhar

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69. (Angebotspreise nur für Privatkunden)



CRAIGRID / GETTY IMAGES / ISTOCK



CRAIGRID / GETTY IMAGES / ISTOCK





EDITORIAL MARS IM VISIER

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Als 1877 der italienische Astronom Giovanni Schiaparelli mit seinen Adleraugen den Mars durch sein Fernrohr genauer betrachtete, glaubte er linienförmige Strukturen zu erkennen, die er für dünne Rinnen oder Kanäle auf der Oberfläche des Planeten hielt. Für viele Zeitgenossen war das ein Beleg für intelligentes Leben, das wohl hinter solchen künstlichen Bauwerken stecken musste. Die »Marskanäle« befeuerten in der Folge die Fantasie der Astronomen und inspirierten indirekt etwa auch Schriftsteller – als bekanntestes Beispiel wäre wohl »Der Krieg der Welten« von H. G. Wells von 1897 zu nennen. Zu diesem Zeitpunkt war die Euphorie aber schon wieder etwas abgeklungen, zumal sich allmählich Hinweise darauf verdichteten, dass der Mars weder fließendes Wasser noch genügend Sauerstoff in seiner Atmosphäre für höheres Leben hat. Die angeblichen Marskanäle stellten sich im Lauf der Zeit als Mischung von natürlichen Geländestrukturen und verschiedenen optischen Effekten und Täuschungen heraus.

Heute ist klar, dass es weder die berühmten Marsmännchen noch andere hoch entwickelte oder gar intelligente Lebensformen auf dem Roten Planeten gibt. Trotzdem ist seine genauere Untersuchung äußerst spannend. Wie die Geologin Emily Lakdawalla ab S. 56 im Detail beschreibt, belegen die seit 2012 vom Marsrover Curiosity gesammelten Erkenntnisse, dass die Marsoberfläche bis vor etwa 3,5 Milliarden Jahren fließendes Wasser und lebensfreundliche Bedingungen aufwies. Damals entstanden möglicherweise auch einfache Lebensformen – die sogar heute noch in tieferen Schichten überdauern könnten.

Und wer weiß: Vielleicht wird es ja doch eines Tages intelligentes Leben auf dem Mars geben – wenn nämlich die Pläne zur Kolonisation des Planeten realisiert werden. Irgendwann werden die dort lebenden Menschen ihn dann als ihr Zuhause und sich selbst als Marsianer betrachten, wie es der amerikanische Sciencefiction-Autor Ray Bradbury am Ende seiner »Mars-Chroniken« beschreibt:

»Ich wollte schon immer einen Marsianer sehen«, sagte Michael. (...) »Da sind sie«, sagte Paps, und er hob Michael auf seine Schulter und zeigte nach unten. Und da waren die Marsianer. Timothy begann zu zittern. Die Marsianer blickten sie an – Spiegelbilder im Wasser des Kanals. Timothy und Michael und Robert und Mama und Paps.

Herzlich
Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser Spektrum Spezial Physik – Mathematik – Technik 2.18 informiert Sie über aktuelle Erkenntnisse aus der Teilchenphysik.

AUTOREN DIESER AUSGABE



DOMINIK J. SCHWARZ

Seit Jahren beobachtet der Bielefelder Astrophysiker, wie seine Kollegen über den Wert der so genannten Hubble-Konstante streiten. Ab S. 12 beschreibt er, wie sich diese Kontroverse über einen Grundpfeiler der Kosmologie auflösen lassen könnte.



MATTHIAS BUCHERT

Der promovierte Chemiker entwickelt Strategien für eine nachhaltige Versorgung mit Rohstoffen wie Lithium oder Kobalt. Die werden für die Batterien von E-Autos bald in großen Mengen benötigt (S. 46).



SABINE EICKHOFF

1636 tobte in Brandenburg eine der größten Schlachten des Dreißigjährigen Kriegs. Gut 3000 Söldner starben, 125 davon wurden in einem Massengrab beigesetzt, das die Archäologin untersucht (S. 78).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Gaias Himmelspanorama

Schneidbares Quarzglas

Lepra: Ursprung der Seuche

FCKW kehrt zurück

Migräne durch höhere
Kältetoleranz

Das Ende der Sonne

Ameisen mit Navigations-
talent

22 FORSCHUNG AKTUELL

Dauer-Maser durch Diamant

Ein Kristall ermöglicht
stimulierte Emission von
Mikrowellen.

Origami mit einzelsträngiger DNA

Lange Molekülketten
verknüpfen sich selbst zu
flächigen Formen.

Auf dem Weg zur chroma- tischen Zahl der Ebene

Einem Hobbymathematiker
gelingen Fortschritte bei
einem alten Problem.

Chemischer Hilferuf der Blüten

Pflanzen locken Spinnen als
Kammerjäger an.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Wo erleben wir?

Der Sitz des Bewusstseins
ist umstritten.

64 SCHLICHTING!

Winzige Tröpfchen ganz groß

Versprühte Flüssigkeiten
offenbaren faszinierende
Eigenschaften.

73 FREISTETTERS FORMELWELT

L'art pour l'art

Mathematik kann nützlich
sein – sie muss aber nicht.

12 KOSMOLOGIE **STREIT UM HUBBLES ERBE**

Wie schnell expandiert das Weltall? Physiker kommen in dieser Frage seit Jahren zu unterschiedlichen Ergebnissen. Deutet der Disput auf unbekannte Naturgesetze hin?

Von Dominik J. Schwarz

32 NATURSCHUTZ **FREUND UND HELFER IN DER MONGOLISCHEN STEPPE**

Ein traditioneller Herdenschutzhund soll mongolische Hirten bei der Raubtierabwehr unterstützen und damit Überweidung eindämmen.

Von Jason Overdorf

38 SCHIZOPHRENIE **DIE STECKNADEL IM GENHAUFEN**

Trotz aufwändiger Studien fand sich bislang kein einzelner Erbfaktor für Schizophrenie. Die Umwelt mischt offenbar stärker mit als gedacht.

Von Michael Balter

46 ELEKTROMOBILITÄT **AUSGEBREMST DURCH ROHSTOFFMANGEL?**

Serie: Elektromobilität (Teil 3) Der Absatz von E-Autos könnte schon bald stark zulegen – und damit der Bedarf an Batterierohstoffen.

Von Matthias Buchert

52 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **PHOSPHOR: TEUFELISCHES ELEMENT DES LEBENS**

Die Geschichte eines Elements, das Leben schafft – und vernichtet.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

56 PLANETOLOGIE **EIN ROBOTER-GEOLOGE FÜR MARS**

Der NASA-Rover Curiosity erkundet die klimatische Vergangenheit des Roten Planeten. Er hat wichtige Erkenntnisse über eine Zeit geliefert, in der auf dem Mars Wasser floss.

Von Emily Lakdawalla

66 ROBOTIK **SELBSTSTÄNDIG LERNENDE ROBOTER**

Ein Zweig der Forschung an künstlichen Intelligenzen versucht, die Lernprozesse von Kleinkindern nachzubilden.

Von Diana Kwon

74 STROMWIRTSCHAFT **BREMSKLOTZ FÜR DIE ENERGIEWENDE**

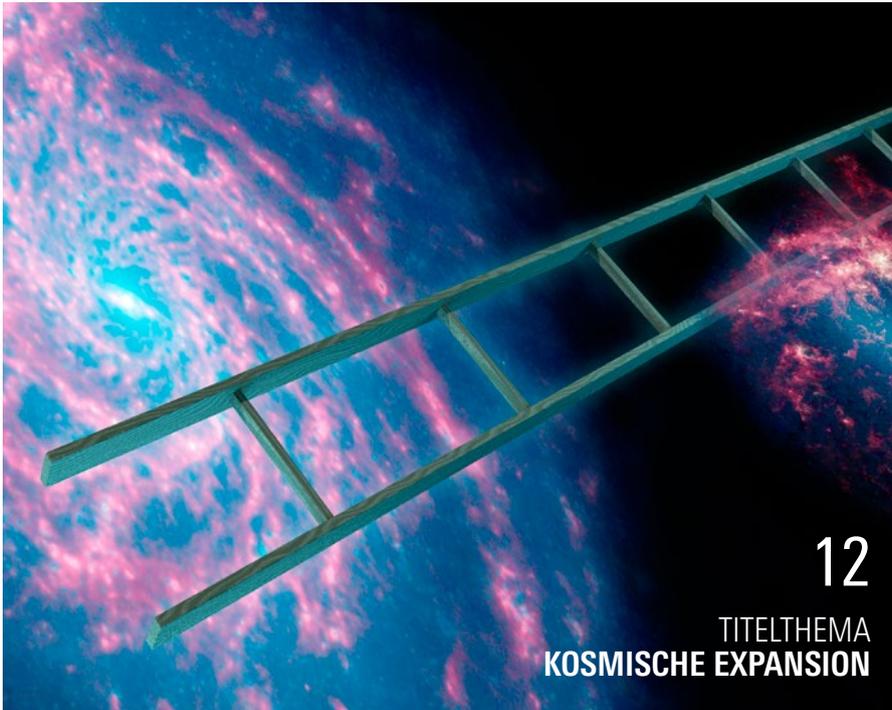
Ingenieure mögen noch so ausgetüftelte Ideen vorlegen – oft blockieren Interessengruppen und historisch gewachsene Strukturen den Fortschritt.

Von Peter Fairley

78 ARCHÄOLOGIE **SO LEBTEN UND STARBEN DIE SÖLDNER**

Serie: Der Dreißigjährige Krieg (Teil 2) Tausende junge Männer fielen in der Schlacht von Wittstock, 125 von ihnen fanden in einem Massengrab ihre letzte Ruhestätte.

Von Sabine Eickhoff



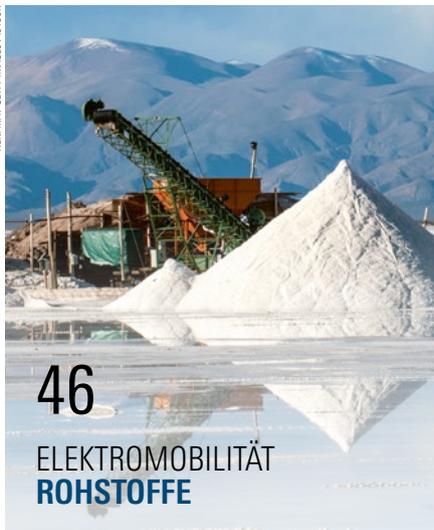
12

TITELTHEMA
KOSMISCHE EXPANSION



32

NATURSCHUTZ
HELFENDE HÜNDE



46

ELEKTROMOBILITÄT
ROHSTOFFE



56

PLANETOLOGIE
MARS



78

ARCHÄOLOGIE
DREISSIGJÄHRIGER
KRIEG

86 REZENSIONEN

- Bruno P. Kremer:** Schmetterlinge in meinem Garten
- Hanno Steckel:** Genial beweglich!
- Carolyne Larrington:** Fit für Walhalla
- Frank Böttcher, Jonathan Böttcher:** Reise durch das Extremwetter der Erde
- Greg N. Frederickson:** Ernest Irving Freese's Geometric Transformations
- Wolfram Eilenberger:** Zeit der Zauberer
- Jorge Cham, Daniel White-son:** No Idea

94 LESERBRIEFE

95 ZEITREISE

Von einem neuen Stern zu Karthagos Wurzeln

96 FUTUR III

Der algorithmische Präsident

Diesmal sind Sie dran.

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

Titelbild: metamorworks / Getty Images / iStock; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft



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

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

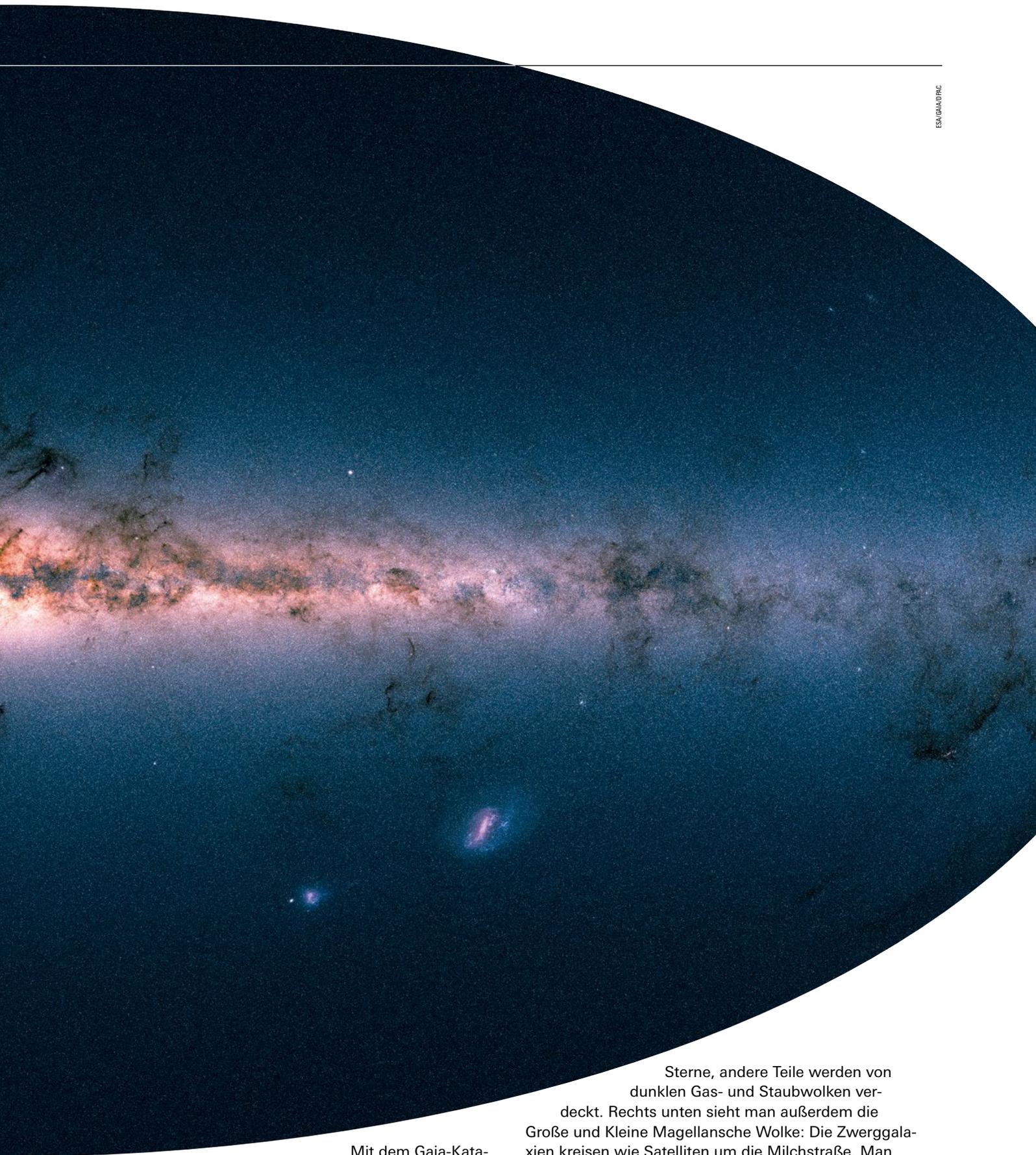
SPEKTROGRAMM

ESA/GAIA/DPAC

GAIAS HIMMELS- PANORAMA

Wissenschaftler der ESA haben die genaueste Karte unserer näheren kosmischen Umgebung angefertigt. Die Teleskope der 2013 gestarteten Raumsonde Gaia tasten nach und nach den gesamten Himmel ab und haben so die Position, Helligkeit und Farbe von 1,7 Milliarden Sternen erfasst. Damit sind zwar nicht einmal zwei Prozent der Milchstraße kartiert.

Der Datensatz ist aus Sicht vieler Astronomen dennoch ein enormer Fortschritt, der viele neue Erkenntnisse bringen soll.



Mit dem Gaia-Katalog lässt sich auch das hier abgebildete detailreiche Panorama unserer Galaxie erstellen. Rund um ihr Zentrum tummeln sich besonders viele

Sterne, andere Teile werden von dunklen Gas- und Staubwolken verdeckt. Rechts unten sieht man außerdem die Große und Kleine Magellansche Wolke: Die Zwerggalaxien kreisen wie Satelliten um die Milchstraße. Man kann allenfalls erahnen, dass jede von ihnen viele weitere Milliarden von Sternen enthält.

ESA-Mitteilung, April 2018

SPEKTROGRAMM

MATERIALWISSENSCHAFT SCHNEIDBARES QUARZGLAS

► Quarzglas ist in der Optik und Medizintechnik sehr begehrt, da es auch bei hohen Temperaturen stabil bleibt und chemisch äußerst resistent ist. Es ist allerdings schwierig, das spröde Material mechanisch zu bearbeiten, meist sind dafür Diamantwerkzeuge nötig. Wissenschaftler um Bastian Rapp vom Karlsruher Institut für Technologie haben nun eine Methode entwickelt, mit der sich Quarzglas einfacher formen lässt. Die Gruppe vermengte feinstes

Das Glas-Kunststoff-Gemisch härtet durch Erwärmung oder Belichtung zu einem Feststoff aus, der sich leicht bearbeiten lässt.

Glaspulver mit einem flüssigen Polymermix, der die gerade mal 100 Nanometer großen Glaspartikel wie ein Kleber zusammenhält. Das Gemisch ließ sich anschließend wie ein Kunststoff verarbeiten, berichten die Forscher.

So konnten sie selbst mikroskopisch kleine Nanostrukturen dauerhaft in die Oberfläche der Masse prägen. Nach dem Aushärten unter UV-Licht ließ sich das Verbundmaterial sogar fräsen und schneiden, was mit Glas normalerweise nicht ohne Weiteres möglich ist. Um nach der Formgebung hochreines, festes Quarzglas zu erhalten, mussten die Materialwissenschaftler aber noch das Plastik entfernen. Dazu



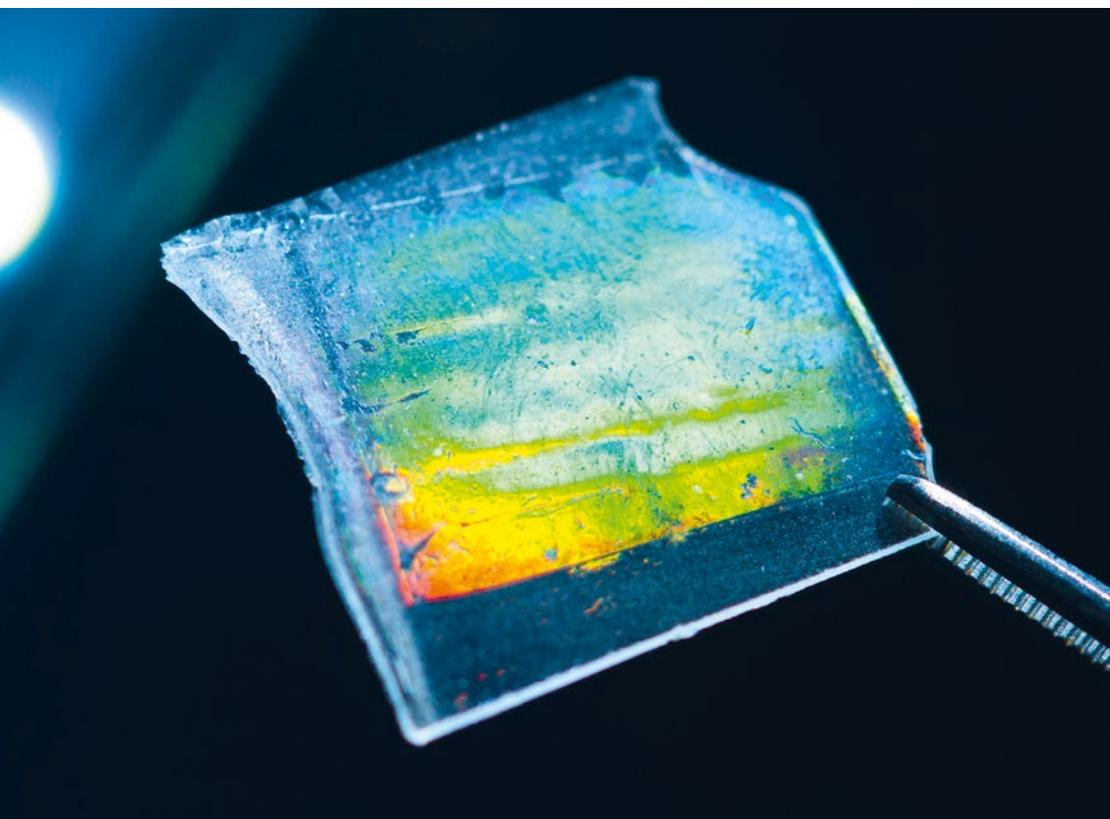
MARIUS BRÉG, KIT

Auch komplexe Formen sind möglich, hier etwa Schrauben und Gewinde.

erhitzten sie das Material zunächst auf 600 Grad Celsius. Dabei verbrannte der Kunststoff, der 40 Prozent der Masse ausmacht, restlos zu Kohlendioxid. Die zurückbleibenden Hohlräume verschwanden, sobald die Forscher die Temperatur auf 1300 Grad erhöhten. Gleichzeitig schrumpfte das Volumen bei diesem Backvorgang um etwa ein Sechstel.

Um zu illustrieren, wie gut sich Glas mit dem Verfahren formen lässt, hat das Karlsruher Team Schrauben mit passgenauer Mutter gefertigt (siehe Bild oben). Auch Linsen für Smartphones haben die Wissenschaftler mit der Technik bereits hergestellt. Mit der Methode könnte Quarzglas stärker als bisher in der Massenproduktion zum Einsatz kommen, hoffen die Forscher.

Adv. Mater. 10.1002/adma.201707100, 2018



MARIUS BRÉG, KIT

PALÄOGENETIK LEPRA: URSPRUNG DER SEUCHE

► Lepra ist eine der ältesten historisch überlieferten Infektionskrankheiten. Bis ins 16. Jahrhundert kam sie in Europa vor, und noch heute infizieren sich jährlich mehr als 200 000 Menschen damit, vor allem in tropischen und subtropischen Ländern. Bisher vermuteten Forscher, dass der Ursprung der Seuche außerhalb von Europa liegt und sie im Mittelalter aus anderen Erdteilen hierher gelangte.

Paläogenetiker um Verena Schönemann vom Institut für Naturwissenschaftliche Archäologie in Tübingen haben nun jedoch gezeigt, dass Europa bei der Ausbreitung der Krankheit vermutlich eine größere Rolle spielte als bisher angenommen. Möglicherweise könnte es sogar die Ursprungsregion sein.

Die Wissenschaftler stützen ihre These auf zehn neu sequenzierte Genome des Krankheitserregers *Mycobacterium leprae*. Sie gewannen die Bakterien-DNA aus den Knochen von zirka 90 Lepraopfern, die zwischen dem 5. und

15. Jahrhundert in Dänemark, Großbritannien, Italien, Ungarn und Tschechien begraben wurden.

Schönemann und ihre Kollegen stießen dabei auf eine überraschende genetische Vielfalt. So identifizierten sie neben den zwei bereits bekannten mittelalterlichen Bakterienstämmen noch zwei weitere, die damals wohl gleichzeitig in Europa grassierten. Überträger könnten unter anderem Eichhörnchen gewesen sein, deren Felle beliebt waren und die vermutlich sogar gegessen wurden.

Bei den mittelalterlichen Keimen handelt es sich

außerdem zum Großteil um Vorfahren moderner Erreger, berichten die Paläogenetiker. Insgesamt deutet der nun vorliegende Stammbaum der Leprabakterien darauf hin, dass die Krankheit bereits im frühen Mittelalter in Europa verbreitet war. Damit ist allerdings immer noch denkbar, dass die Lepra ursprünglich aus anderen Regionen stammte, schließlich standen Menschen verschiedener Erdteile bereits länger miteinander in Kontakt. Klarheit werden wohl erst weitere Gendaten bringen.

PLoS Pathog. 5, 2018

UMWELT FCKW KEHRT ZURÜCK

► Die erste globale Umweltkrise der Menschheit galt eigentlich schon als überwunden. Spätestens im Jahr 2050, verkündete die Weltorganisation für Meteorologie im Jahr 2014, werden sich die Ozonlöcher über den Polargebieten weitgehend geschlossen haben. Doch möglicherweise war das zu optimistisch: Einige der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die seit Beschluss des Montreal-Protokolls vor gut 30 Jahren verboten sind, werden anscheinend seit einigen Jahren nachproduziert. Darauf deuten jedenfalls Analysen einer Arbeitsgruppe um Stephen A. Montzka von der Nationalen Ozean- und Atmosphärenbehörde (NOAA) in den USA hin, die auf den Daten von zwölf um den Globus verteilten Messstationen basieren.

Demnach nimmt die Konzentration der Substanz Trichlorfluormethan, kurz CFC-11, seit 2012 deutlich weniger schnell ab als zuvor. Bis heute ist CFC-11 die Quelle für etwa ein Viertel des Chlors in der Stratosphäre, und es verschwindet nur sehr langsam aus der Umwelt. Seit Mitte der 1990er Jahre, als die Maßnahmen der Montreal-Vereinbarung zu greifen begannen, ist seine Konzentration um lediglich etwa elf Prozent gesunken. Grund dafür sind die fast anderthalb Millionen Tonnen CFC-11, die noch in Schäumen und anderen technischen Produkten stecken und langsam ausgasen.

Bis zum Jahr 2002 beschleunigte sich immerhin die Rate, mit der das Gas aus der Luft verschwand. Wie die Daten der NOAA zeigen, stagnierte sie in den

Forscher überwachen weltweit das Ozon in der Atmosphäre, wie hier mit einem Wetterballon am Südpol.



NOAA

darauf folgenden zehn Jahren, und von 2012 an nahm die Konzentration Jahr für Jahr um bis 50 Prozent langsamer ab als zuvor. Diese Kehrtwende zeigt sich vor allem in Daten von der Nordhalbkugel, die zum Beispiel auf dem Mauna Loa auf Hawaii gesammelt werden. Dort beobachteten die Forscher auch eine Korrelation der CFC-11-Konzentration mit der von Industrieabgasen, die für Ostasien typisch sind. Die Forscher gehen deshalb davon aus, dass es dort eine bisher unbekannte Quelle der verbotenen Stoffe geben muss, die jährlich etwa 13 000 Tonnen CFC-11 freisetzt.

Nature 557, S. 413–417, 2018

GENETIK MIGRÄNE DURCH HÖHERE KÄLTE- TOLERANZ

► Migräne tritt nicht überall auf der Welt gleich oft auf. In Europa ist die Kopfschmerzkrankung besonders häufig, in Afrika hingegen eher selten. Als Ursache dieser geografischen Verteilung verdächtigen Wissenschaftler jetzt eine Genvariante, die Menschen des Nordens hilft, besser mit kalter Witterung umzugehen.

Die Forscher um Felix M. Key vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig hatten in

menschlichen DNA-Datenbanken weltweit einen Erbgutabschnitt verglichen, der das Gen *TRPM8* reguliert. Dieser Erbfaktor wiederum kodiert für den Ionenkanal TRPM8 (Transient Receptor Potential Ion Channel Member 8), der an der Wahrnehmung von Kälte beteiligt ist. Dabei erwies sich eine Genvariante als extrem ungleich verteilt. Sie fand sich bei fast 90 Prozent aller heutigen Finnen, in Nigeria hingegen bei gerade einmal fünf Prozent aller Menschen.

Dieses Phänomen ist nach Ansicht der Forscher wahrscheinlich durch positiven Selektionsdruck

bedingt: Die nördliche Variante helfe ihren Trägern, mit dem kalten Klima besser zurechtzukommen. Doch für diese Anpassung zahlten viele Europäer und Asiaten den Preis einer höheren Anfälligkeit für Migräne. Denn aus früheren Studien war die fragile *TRPM8*-Variante bereits als einer der bedeutendsten genetischen Risikofaktoren der Erkrankung bekannt.

Ein Zusammenhang zwischen Migräne und Temperaturempfinden zeigte sich auch darin, dass Betroffene empfindlicher auf Kältereize reagieren und Migräneanfälle durch das Trinken von kaltem Wasser

ausgelöst werden können, bemerken die Wissenschaftler.

Wie die nördliche Genvariante wirkt und warum sie besser vor Kälte schützt, ist allerdings noch unklar – Gleiches gilt für ihre Rolle bei Migräne. Offenbar erwies sich in der Evolution des Menschen eine bessere Kälteanpassung als vorteilhaft. Eine ähnliche Kosten-Nutzen-Bilanz steckt hinter der Entwicklung von heller Haut. Sie erlaubt es den Bewohnern hoher Breitengrade, auch bei wenig Sonnenlicht ausreichend Vitamin D zu produzieren – zum Preis eines Sonnenbrands.

PLoS Genet. 14, e1007298, 2018

ASTRONOMIE DAS ENDE DER SONNE

► In rund fünf Milliarden Jahren geht unserer Sonne der Brennstoff aus. Dann bläht sie sich zu

einem Roten Riesen auf, der Helium- statt Wasserstoffkerne miteinander fusioniert. Erst schluckt der immer weiter anschwellende Feuerball Merkur und Venus – und schließlich wohl auch die Erde. Sobald der Riesenstern sämtliche

Heliumvorräte in Kohlenstoff umgewandelt hat, fällt er in sich zusammen. Übrig bleibt eine kleine, milchig schimmernde Sternleiche, ein so genannter Weißer Zwerg.

Weniger klar ist, wie das Umfeld dieses Materiefriedhofs aussehen wird. Sterne mit der zwei- bis achtfachen Sonnenmasse hinterlassen einen Planetarischen Nebel. Er besteht aus den äußeren Schichten des Roten Riesen, die kurz vor dem Kollaps ins All geblasen und von der Strahlung des sterbenden Sterns zum Leuchten angeregt wurden. Sie dehnen sich Tausende von Jahren aus und erscheinen auf Teleskopaufnahmen als bunt leuchtende Nebel (siehe Bild links).

Bisher gingen Astrophysiker davon aus, dass allenfalls Sterne solch ein Kunstwerk hinterlassen, die mindestens 1,2-mal so viel Masse wie die Sonne

haben. Nun argumentieren Astrophysiker um Krzysztof Geśicki von der Nicolaus Copernicus University in Toruń, Polen, dass auch unser Zentralgestirn dazu im Stande sein könnte. Das Relikt werde jedoch deutlich schwächer leuchten als die Planetarischen Nebel schwererer Sterne.

Die Wissenschaftler stützen ihre Prognose auf Computersimulationen, mit denen sie die Entwicklung unterschiedlich massereicher Sterne mit verschiedenen voluminösen Hüllen durchgespielt haben. Dabei zeigte sich, dass sich die Kerne Roter Riesen nach dem Abwurf ihrer Hülle schneller erhitzen als bisher gedacht. Somit hätten selbst kleinere Sterne eine Chance, das kurz vor dem Kollaps ins All gepustete Material zum Leuchten anzuregen.

Nat. Astron. 10.1038/s41550-018-0453-9, 2018

Der etwa 700 Lichtjahre von der Erde entfernte Helixnebel entstand am Lebensende eines Sterns, als dieser zum Weißen Zwerg wurde.

MASA, NASA, ESA, THE HUBBLE HELIX NEBULA TEAM, M. MEINER (STSCI), AND T.A. RECTOR (NASA)



ERIK FRANK, UNIVERSITÄT LUISLAGE / UNIVERSITÄT WÜRZBURG

ZOOLOGIE AMEISEN MIT NAVIGATIONSTALENT

► Ameisen sind bekannt für ihren erstaunlichen Orientierungssinn. Offenbar finden sie sogar dann die

schnellste Route zum Ziel, wenn sie dabei vom direkten Weg abweichen müssen, berichtet ein Team um Erik T. Frank von der Universität Würzburg.

Die Biologen hatten bei Freilandversuchen in der Elfenbeinküste sowie im La-

Nach erfolgreicher Termitenjagd tragen die Ameisen ihre Beute in den Bau.

bor um ein Nest von Matabele-Ameisen (*Megaponera analis*) glatte und grasbestandene Flächen angelegt. Den Vorteil ersterer wussten ausgesendete Späher zu nutzen: Die von ihnen markierten Straßen führten in rund 60 Prozent der Fälle zumindest teilweise über das einfachere Geläuf und brachten der Kolonie im Schnitt eine Zeitersparnis von über einem Drittel gegenüber dem direkten Weg ein. Das Verhalten der einzelnen Späherameisen lasse sich nach Ansicht der Forscher am besten mit der Suche nach dem schnellsten – und nicht dem kürzes-

ten – Weg erklären. Am Ende der von den Scouts angelegten Straßen liegen typischerweise Futterstellen von Termiten, die bevorzugte Nahrung von *Megaponera analis*. Um daran zu gelangen, organisieren die Ameisen mehrmals täglich regelrechte Raubzüge: In Kolonnen von bis zu 600 Tieren marschieren sie los, greifen die Termiten an und schleppen sie zurück in den Bau, um sie hier zu verspeisen. Auch für Kolonienmitglieder, die beim Kampf mit den Termiten das Nachsehen haben, ist gesorgt: Ein Sanitätskorps trägt die Verwundeten wieder heim ins schützende Nest (siehe **Spektrum** Juni 2017, S. 9).

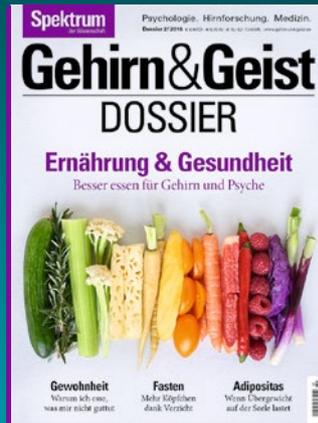
J. Exp. Biol. 10.1242/jeb.174854, 2018

Unsere Neuerscheinungen!

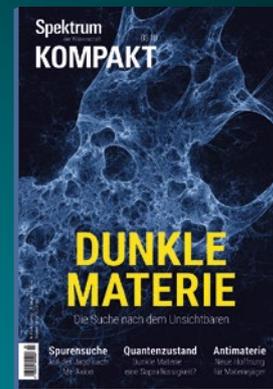
Ausgewählte Sonderhefte auch im PDF-Format



Volksglaube: Leben in einer Welt voller Magie • Philosophiegeschichte: Sorge um das Selbst • Hexenjagd: Der Terror der Verzweifelten • Humor: Hat Jesus gelacht? • Wahrnehmung: Eine kurze Kulturgeschichte des Riechens • € 8,90



Gewohnheit: Warum ich esse, was mir nicht guttut • Fasten: Mehr Köpfchen dank Verzicht • Adipositas: Wenn Übergewicht auf der Seele lastet • Demenz: Ein Training gegen Alzheimer • Macht Schlafmangel dick? • € 8,90;



Teilchenphysik: Die Tür ins dunkle Universum • Die Schwarzen Löcher des Urknalls • Dunkle Galaxien: Aufgebaut aus Dunkler Materie • Auf der Jagd nach Mr. Axion • Milchstraße: Eine Spur verschwindet • € 5,90;

Hier bestellen:

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

www.spektrum.de/shop

KOSMOLOGIE STREIT UM HUBBLES ERBE

Wie schnell expandiert das Weltall? Physiker kommen in dieser Frage seit Jahren zu unterschiedlichen Ergebnissen. Deutet der Streit um die »Hubble-Konstante« auf unbekannte Naturgesetze hin?

Überall Galaxien, aber wie weit sind sie von uns entfernt? Das Standardverfahren, um diese Frage zu beantworten, ist die so genannte Entfernungleiter: Astronomen kombinieren mehrere Messmethoden, die wie Sprossen aufeinander aufbauen.



Dominik J. Schwarz ist Professor an der Universität Bielefeld und forscht zu verschiedenen Themen der Kosmologie und Astroteilchenphysik.

» spektrum.de/artikel/1567830

Albert Einstein war wohl der bedeutendste Physiker des 20. Jahrhunderts. Das zeigt sich auch daran, dass sich selbst in seinen Irrtümern noch Weisheit verbarg. Das vielleicht berühmteste Beispiel hierfür stammt aus dem Jahr 1916. Im Jahr zuvor hatte Einstein seine allgemeine Relativitätstheorie präsentiert, nun suchte er eine Lösung seiner berühmten Feldgleichungen, die das Weltall als Ganzes beschreibt.

Jedoch schien jedes Universum, das er auf dem Reißbrett entwarf, zu kollabieren. Daher fügte Einstein seinen Gleichungen einen weiteren Term hinzu, die so genannte »kosmologische Konstante«. Mit ihr beschrieb die Relativitätstheorie das Universum endlich so, wie es sich die Gelehrten seiner Zeit vorstellten: als statisches Volumen, das sich mit der Zeit nicht verändert und daher schon immer und bis in alle Ewigkeit besteht.

Später sollte Einstein seinen Entschluss gründlich bereuen, er soll ihn gar als »größte Eselei« seines Lebens bezeichnet haben. Zwar erlebte die kosmologische Kon-

AUF EINEN BLICK RASANTES WACHSTUM

- 1** Die Raumzeit dehnt sich seit dem Urknall immer weiter aus, alle Abstände im Weltall werden dadurch laufend gestreckt. Die Hubble-Konstante gibt die Rate dieser Expansion an.
- 2** Seit einigen Jahren streiten Astrophysiker um den richtigen Wert der Größe. Denn mit verschiedenen Messmethoden kommen sie zu Ergebnissen, die sich deutlich voneinander unterscheiden.
- 3** Es erscheint zunehmend unwahrscheinlich, dass eines der Teams einen Fehler gemacht hat. Eher deutet die Diskrepanz darauf hin, dass wir die Abläufe im Universum noch nicht richtig verstehen.

tante letztlich ein Comeback, als Forscher 1998 das rätselhafte Phänomen der »Dunklen Energie« entdeckten, die das Universum auseinanderdrückt. Aber vor 100 Jahren sah es zunächst so aus, als hätte sich Einstein getäuscht: Der Niederländer Willem de Sitter erkannte 1917, dass die kosmologische Konstante dazu führt, dass sich andere Galaxien von uns entfernen und deren Fluchtgeschwindigkeit mit wachsendem Abstand sogar zunimmt. Die Konstante würde also zu einer explosionsartigen Ausdehnung führen und das Universum instabil machen.

De Sitters Überlegung veranlasste den US-Astronomen Edwin Hubble dazu, der Frage mit Hilfe von Teleskopen nachzugehen. Er und andere Wissenschaftler konnten

Ende der 1920er nachweisen, dass das Universum tatsächlich expandiert. Die Entdeckung gilt als Geburtsstunde der modernen Kosmologie. Und eine nach Hubble benannte Messgröße etablierte sich als Maß dafür, wie schnell sich das All ausdehnt.

Nach heutigem Wissen hat diese Hubble-Konstante ungefähr einen Wert von 70 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec (km/s/Mpc; siehe »Hubble-Diagramm und Hubble-Konstante«, rechts). Das bedeutet: Mit jedem Megaparsec Entfernung (die Distanz entspricht etwa 3,26 Millionen Lichtjahren) wächst die Expansionsgeschwindigkeit um 70 Kilometer pro Sekunde. Eine Galaxie, die 100 Megaparsec von der Erde entfernt ist, wird demnach doppelt so schnell von uns fortgetragen wie ein nur halb so weit entferntes Objekt.

Aber wie groß ist Hubbles Konstante genau? Oder anders formuliert: Wie schnell expandiert das Universum heute? Generationen von Astrophysikern sind dieser Frage mit immer besseren Instrumenten nachgegangen – und haben sich dabei immer wieder in die Haare gekriegt. Der Disput um den genauen Wert währt bis heute, und seit einigen Jahren streiten meine Kollegen wieder besonders intensiv.

Denn mehrere Teams haben mit verschiedenen, jeweils sehr ausgeklügelten Messmethoden unterschiedliche Werte der Hubble-Konstante ermittelt. Seitdem ist guter Rat teuer. Hat eines der Teams ein wichtiges Detail übersehen? Oder sind wir hier auf eine spannende Fährte gestoßen, die letztlich zur Entdeckung neuer physikalischer Phänomene führen könnte?

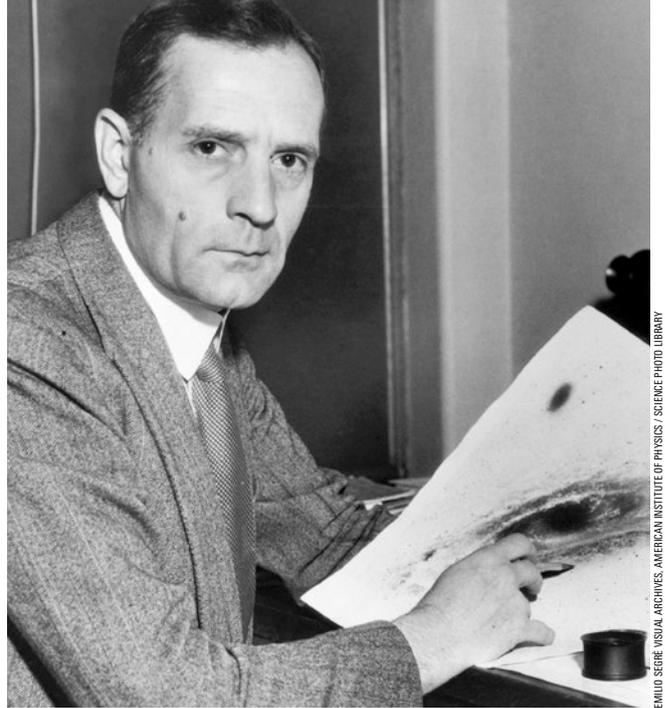
Das All expandiert wie ein Hefeteig im Ofen

Wer interessierten Laien von der Hubble-Konstante erzählt, wird schnell mit der Frage konfrontiert, wie man sich ein expandierendes Universum überhaupt vorstellen kann. Ich erkläre es gerne so: Verfolgt man die Entwicklung eines Volumens mit einer großen Zahl von Galaxien darin, dann wächst dieser Teil des Universums mit der Zeit an. Zum besseren Verständnis kann man sich auch einen Hefeteig mit Rosinen vorstellen, der im Backofen aufgeht.

Die einzelnen Rosinen entfernen sich darin voneinander, weil sich der Teig zwischen ihnen ausdehnt. Zwei Rosinen an gegenüberliegenden Seiten des Teigs bewegen sich dabei schneller voneinander fort als zwei benachbarte in der Mitte, da sich zwischen ersteren mehr aufgehendes Backmaterial befindet. In ähnlicher Weise bläht sich seit dem Urknall die Raumzeit auf.

Das Bild ist allerdings nicht ganz korrekt: Im Gegensatz zu einem Kuchen ist das Weltall von Anfang an unendlich groß, mit der Zeit wachsen darin jedoch alle Abstände. Das ist zugegebenermaßen schwer vorstellbar, doch so besagen es die Formeln der Kosmologie. Zusätzlich dazu können sich im Weltraum die Galaxien und Galaxienhaufen selbst bewegen, was die Sache verkompliziert.

Es ist zudem leicht, die Bedeutung der Hubble-Konstante falsch zu verstehen. Sie ist ein Maß dafür, wie schnell sich das All *heute* ausdehnt. Da die Expansionsgeschwindigkeit des Weltalls zunimmt, ändert sie sich mit der Zeit. Im Hier und Jetzt müsste sie aber im ganzen



EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Edwin Powell Hubble (1889–1953) war Experte für Galaxienklassifizierung. Anhand von weit entfernten Sterninseln ermittelte er 1929, wie schnell sich das Weltall ausdehnt.

Weltall mehr oder weniger gleich sein, daher sprechen wir von einer Konstante. Dahinter steht die Annahme von uns Physikern, dass die Naturgesetze überall im All identisch sind und dass die Welt im Großen keine besondere Richtung und keinen Ort bevorzugt (das so genannte kosmologische Prinzip).

Doch wie lässt sich die Ausdehnung des kosmischen Hefeteigs überhaupt messen, wo das sichtbare Universum Distanzen von Milliarden Lichtjahren umspannt? Wir können ja nicht einfach gigantische Meterstöcke auslegen, einige Millionen Jahre warten und dann die Übung wiederholen. Die klassische Methode besteht daher darin, die Entfernung und die Geschwindigkeit von Galaxien am Firmament zu messen.

Wie schnell sich eine Galaxie relativ zur Erde bewegt, lässt sich vergleichsweise leicht bestimmen, indem man ihr Lichtspektrum auswertet. Bewegt sich die Galaxie von uns weg, sind markante Absorptions- und Emissionslinien im Spektrum wegen des Dopplereffekts zu größeren Wellenlängen hin verschoben, das Licht erscheint also etwas »röter«. Auf uns zurasende Galaxien haben hingegen einen Blaustich.

Würden die von der Erde aus sichtbaren Galaxien alle in zufällige Richtungen fliegen, so fände man genauso viele rot- wie blauverschobene Lichtspektren. Aber bereits der US-amerikanische Astronom Vesto Melvin Slipher stellte in den frühen 1920er Jahren fest, dass fast alle Spektren der am Firmament sichtbaren Galaxien rotverschoben sind. Sie bewegen sich demnach von uns weg. Nur wenige Ausnahmen in der näheren kosmischen Umgebung der Milchstraße kommen auf uns zu.

Edwin Hubble war der Erste, der den Abstand vieler Galaxien in unserer kosmischen Nachbarschaft ermittelte. Auch notierte er jeweils ihre Rotverschiebung und verglich sie mit dem Abstand. In seinen Aufzeichnungen entsprach

jede Galaxie einem Punkt in einem Koordinatensystem. Für Hubble sah es so aus, als könne man die Messpunkte in diesem Entfernungs-Geschwindigkeits-Diagramm (siehe Grafik unten) einfach mit einer Geraden verbinden. Entfernung und Geschwindigkeit schienen also in einem linearen Zusammenhang zu stehen: Je größer die Distanz zu einer fernen Galaxie war, desto schneller schien sie sich von uns fortzubewegen – ein erster Hinweis darauf, dass der kosmische Raumzeitteil zwischen den Sternen aufgeht.

Die Steigung einer Geraden in einem Entfernungs-Geschwindigkeits-Diagramm ergibt die Rate, mit der sich die Geschwindigkeit ändert. In Hubbles Diagramm entsprach die Steigung folglich der nach ihm benannten Konstante, die der Amerikaner im Jahr 1929 auf 500 km/s/Mpc taxierte. Indem er die so ermittelte Ausdehnung zurückrechnete, konnte Hubble sogar das Alter des Universums abschätzen.

Er kam auf zwei Milliarden Jahre – und lag damit aus heutiger Sicht deutlich daneben. Tatsächlich spekulierten bereits damals Geologen auf Basis von radioaktiven Zerfällen und Isotopenverhältnissen in Gesteinen, dass die Erde und damit das Universum viel älter sein müsste. Aber erst in den 1950er Jahren erkannten Astronomen, dass Hubble zum Teil falsche Annahmen bei den Entfernungsmessungen getroffen hatte, was den Widerspruch auflöste.

Von da an stand fest, dass die Erde wohl etwa 4,5 Milliarden Jahre alt ist und das Universum damit schon deutlich länger existieren muss. Im Lauf der Jahrzehnte gab es immer wieder Debatten um Hubbles Konstante. Dank

besserer Teleskope und Analysemethoden sowie einem tieferen Verständnis der Physik von Sternen und Galaxien konnten Astronomen die Expansion des Alls mit der Zeit immer exakter messen. 1956 kamen sie auf 180 km/s/Mpc, 1958 auf 75 km/s/Mpc und in den 1970er Jahren auf 55 km/s/Mpc. Damit ergab sich ein Weltalter von mehr als 10 Milliarden Jahren, was dem heute weithin akzeptierten Wert von 13,8 Milliarden schon recht nahekam.

Diese Messungen waren allerdings noch sehr ungenau. In den 1960er Jahren lag das, was Wissenschaftler den »statistischen Fehler« nennen, bei 100 Prozent. Man konnte also nicht ausschließen, dass der Wert der Konstante in Wahrheit doppelt so groß war. Noch in den 1990er Jahren debattierten Astronomen, ob die berühmte Konstante nun den Wert von 50 oder 90 km/s/Mpc hat.

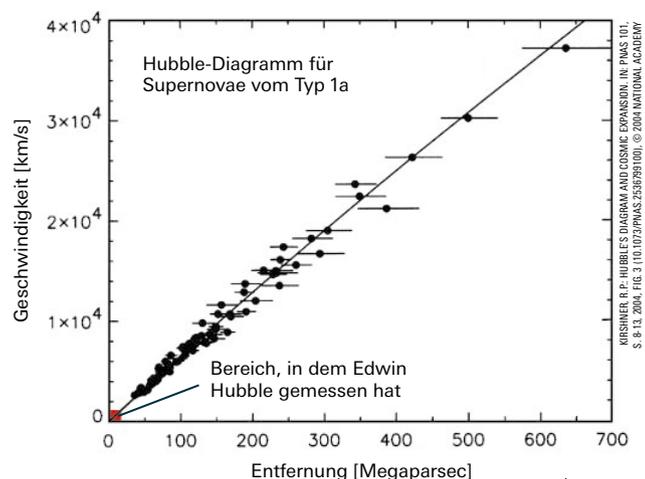
Eine deutliche Eingrenzung brachte erst das berühmte Hubble-Weltraumteleskop (HST), dessen Name nochmals verdeutlicht, wie wichtig Hubbles Arbeiten für unser Verständnis des Universums waren. Mit Hilfe des Spähers im Erdorbit taxierten Forscher die Hubble-Konstante im Jahr 2001 auf ungefähr 72 km/s/Mpc, wobei eine Messungenauigkeit von 8 km/s/Mpc oder 11 Prozent blieb.

Bei der Bestimmung der Hubble-Konstante müssen Wissenschaftler ein grundsätzliches Problem lösen: Abstände in den Weiten des Alls lassen sich – anders als Relativgeschwindigkeiten – bis heute nur schwer ermitteln. Die einfachste Möglichkeit ist die Triangulierung, die traditionelle Methode der Seefahrer, Landvermesser und Astronomen.

Hubble-Diagramm und Hubble-Konstante

Physiker verwenden die so genannten Friedmann-Gleichungen aus Einsteins Relativitätstheorie, um das Weltall als Ganzes zu beschreiben. Mit ihnen kann man ausrechnen, wie schnell die Energie aus dem Urknall den Weltraum mit einer bestimmten Materiemenge darin auseinandertrieb. Diese Expansion dehnt jede Strecke im All, sämtliche Abstände werden also immer größer. Im Lauf der 13,8 Milliarden Jahre, die unser Universum inzwischen alt ist, hat sich die Geschwindigkeit verändert: Zum einen sinkt laufend die Dichte der Materie, die der Expansion entgegenwirkt. Gleichzeitig treibt die rätselhafte Dunkle Energie – die in den Friedmann-Gleichungen als »kosmologische Konstante« auftaucht – das All immer stärker auseinander.

Ein Hubble-Diagramm (rechts) veranschaulicht, wie sich die Expansionsgeschwindigkeit mit dem Abstand von der Erde ändert. Jeder Punkt darin entspricht einer Galaxie, für die Forscher sowohl die Distanz (in der Maßeinheit Megaparsec, die ungefähr 3,26 Millionen Lichtjahren entspricht) als auch die Relativgeschwindigkeit (in Kilometern pro Sekunde) bestimmt haben. Wenn man nur Entfernungen bis hin zu einigen hundert Megaparsec betrachtet, lassen sich die Messpunkte mit einer Geraden verbinden. Ihre Steigung ist die Hubble-Konstante: Sie gibt die Rate der Expansion im heutigen Universum an, entsprechend ist ihre Maßeinheit der Quotient aus den Maßeinheiten von Geschwindigkeit und Distanz, also Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec. Bei größeren Abständen wird sichtbar, dass sich die Ausdehnungsgeschwindigkeit seit dem Urknall verändert hat. Die Punkte im Diagramm lassen sich dann nur noch durch eine Kurve verbinden, und die Hubble-Konstante ist die Steigung der Tangente am Koordinatenursprung.



Bei ihr misst man die so genannte Parallaxe, also die scheinbare Verschiebung einer Sternposition, wenn die Erde im Lauf eines Halbjahres einen Halbkreis um die Sonne macht. Da die Strecke, welche die Erde in dieser Zeit zurücklegt, gut bekannt ist, lässt sich mit einer sehr präzisen Winkelmessung und einfacher Trigonometrie die Distanz zwischen der Erde und dem Stern berechnen. Auf diesem Verfahren basieren die Karten unserer nächsten stellaren Nachbarschaft. Erst kürzlich hat das Team des ESA-Satelliten Gaia mit Parallaxenmessungen die Position von etwa 1,3 Milliarden Sternen in unserer Umgebung ermittelt (siehe Bild S. 6/7).

Die Triangulierung liefert allerdings nur innerhalb der Milchstraße brauchbare Ergebnisse. Dennoch dient sie als wichtige Grundlage für größere Abstandsmessungen: Ist eine astronomische Länge sehr gut bekannt, so kann sie als kosmisches Lineal verwendet werden, mit dem sich noch größere Abstände messen lassen. Astronomen vergleichen das Vorgehen mit dem Erklimmen einer Leiter: Um an ihr nach oben zu klettern, muss man sich auf weiter unten liegende Sprossen stützen.

Die Parallaxe naher Sterne ist hier die erste Leitersprosse. Aus dem Abstand eines Sterns kann man als Nächstes seine absolute Helligkeit erschließen, also ein Maß für ihre tatsächliche Leuchtkraft, denn die Intensität einer Quelle nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Das bedeutet: Wenn man zwei identische Sterne in vier und acht Lichtjahren Entfernung betrachtet, erscheint uns der vier Lichtjahre entfernte Stern nicht doppelt so hell wie sein weiter entfernter Zwilling, sondern vierfach so hell.

Über das so genannte Hertzsprung-Russell-Diagramm ist die absolute Helligkeit eines Sterns wiederum eindeutig mit seiner Spektralklasse (gewissermaßen seiner Farbe) verknüpft. Sie kann man anhand von charakteristischen

Emissionslinien auch dann noch bestimmen, wenn ein Stern zu weit weg ist für eine Parallaxenmessung. Dann kann man die gemessene Helligkeit mit der im Hertzsprung-Russell-Diagramm vermerkten absoluten Helligkeit des betrachteten Sterntyps vergleichen – und so bequem den Abstand des betrachteten Sterns ermitteln. Dies ist die zweite Sprosse in der Entfernungsleiter, die noch für Objekte in der Milchstraße und ihren Satellitengalaxien akzeptable Ergebnisse liefert.

Bei noch größeren Distanzen greift man auf so genannte Standardkerzen zurück, sie bilden die dritte Sprosse. Zu ihnen zählen verschiedene Typen von Himmelsobjekt, die jedoch zwei Gemeinsamkeiten haben: Man kann sie auch aus großer Entfernung eindeutig identifizieren, und man weiß genau, wie viel Strahlung sie aussenden. Das vielleicht berühmteste Beispiel ist eine seltene Art von Riesenstern, die so genannten Cepheiden. Sie dehnen sich im Rhythmus mehrerer Tage oder Wochen aus und ziehen sich wieder zusammen, weshalb ihre Helligkeit in periodischen Abständen schwankt.

Dabei stehen Periode und Leuchtkraftänderung in direktem Verhältnis zueinander. Und dank dem Hertzsprung-Russell-Diagramm von Sternen in der Nachbarschaft einiger relativ naher Cepheiden ist deren Abstand von der Erde bekannt, und damit ihre tatsächliche Leuchtkraft. Aus der Pulsationsdauer eines Cepheiden lässt sich also generell seine Entfernung berechnen, auch wenn der Stern zu weit weg ist für eine Parallaxenmessung.

Ein anderer Typ von Standardkerze sind Supernovae vom Typ 1a. Sie ereignen sich in Doppelsternsystemen, in denen vermutlich nach und nach Materie eines ausgedehnten Sterns auf einen kompakten Weißen Zwerg übergeht. Erreicht dieser Begleiter etwa 1,4 Sonnenmassen, explodiert er, wobei die Kaskade physikalischer Prozesse stets mehr oder weniger gleich abläuft. Daher gibt es einen klar definierten Zusammenhang zwischen Dauer der hellsten Phase der Supernova und ihrer absoluten Leuchtkraft. Sobald das Licht einer Sternexplosion dieses Typs die Erde erreicht, können Astronomen auf Basis dieser Werte bestimmen, in welchem Abstand von der Erde das Ereignis stattgefunden hat.

Diesem Typ von Sternentod verdankt die Kosmologie übrigens die Wiederauferstehung von Albert Einsteins kosmologischer Konstante: Bis ins Jahr 1998/99 gingen Wissenschaftler davon aus, dass das Weltall mit einer abnehmenden Geschwindigkeit expandiert. Basierend auf einem genialen Beobachtungsplan fanden das Supernova Cosmology Project und das High-Z Supernova Search Team dann jedoch heraus, dass die relative Geschwindigkeit zwischen zwei weit entfernten Galaxien mit der Zeit zunimmt. Die Expansion des Alls beschleunigt sich also offenbar, wofür wir die rätselhafte Dunkle Energie verantwortlich machen. Sie wird heute in den kosmologischen Feldgleichungen durch die von Einstein verworfene Konstante dargestellt. Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt und Adam Riess erhielten für diese Entdeckung 2011 den Physik-Nobelpreis.

Mittlerweile haben Astrophysiker und Kosmologen alle Sprossen der Entfernungsleiter sehr genau vermessen.

NASA/ESA, THE HUBBLE KEY PROJECT TEAM AND THE HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH TEAM
(WWW.SPACETELESCOPE.ORG/IMAGES/OP099191/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

1994 leuchtete ein heller Punkt am Rand der 55 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie NGC 4526 auf (Pfeil): eine Supernova vom Typ 1a. Die Sternexplosionen dienen Forschern als »Standardkerzen«, da sie stets gleich viel Licht aussenden und so ihren Abstand zu uns verraten.





NASA, ESA, AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSC/AURA)-HUBBLE/EUROPE COLLABORATION (WWW.SPACETElescope.ORG/IMAGES/HEIC1323A1) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Der Cepheiden-Stern RS Puppis ist 6200 Lichtjahre von der Erde entfernt und von Staubwolken umgeben. In einem mehrwöchigen Rhythmus ändert sich seine Helligkeit, die zeitweise auf ein Fünftel des Höchstwerts einbricht.

gende Lichtstrahlen gewissermaßen eine Kurve machen. Bei bestimmten geometrischen Anordnungen sieht ein Beobachter eine Quelle sogar mehrfach, da das Licht auf verschiedenen Seiten um den Massenklumpen im Vordergrund herumläuft – so wie ein Lichtstrahl, der von einer Linse gebündelt wird.

Besonders interessant ist diese Anordnung, wenn die Helligkeit einer Quelle im Hintergrund variiert, was beispielsweise bei aktiven Galaxienkernen, den Quasaren, der Fall ist. Befindet sich die Gravitationslinse dann außerdem minimal neben der kürzesten Verbindung zwischen Quelle und Beobachter, erscheint dieses Flackern auf der Erde nicht gleichzeitig, sondern für die jeweiligen Bilder der Quelle kurz hintereinander, da ihr Licht unterschiedlich lang unterwegs war.

Letztlich können Forscher auf diese Weise abschätzen, wie weit die Quelle entfernt ist. Zusammen mit der Rotverschiebung lässt sich so für sehr weit entfernte Objekte die Expansionsrate des Alls ermitteln. Das H0LiCOW-Projekt (H_0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring) veröffentlichte 2017 auf Basis dieser Methode einen Wert von $71,9 + 2,4 - 3,0$ km/s/Mpc, was einer Messgenauigkeit von knapp vier Prozent entspricht – und gut zur Hubble-Konstante aus der Entfernungsleiter passt.

Die Geschichte wäre hier vermutlich zu Ende, wenn man die Expansionsgeschwindigkeit des Kosmos nur mit den beiden besprochenen Methoden bestimmen könnte. Seit Längerem gibt es jedoch ein weiteres Verfahren, das sehr genau ist und außerdem eine besondere Rolle in der Kosmologie spielt. Es wird vom Team des ESA-Satelliten Planck angewendet, der äußerst präzise den kosmischen Mikrowellenhintergrund vermisst. Damit ermittelten die Wissenschaftler im Jahr 2016 eine deutlich kleinere Hubble-Konstante von $66,88 \pm 0,91$ km/s/Mpc, wobei die Messungenauigkeit gerade einmal 1,3 Prozent betrug.

Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung gilt als Meilenstein der Kosmologie. Sie gelang Arnold A. Penzias und Robert W. Wilson bereits im Jahr 1964, wofür die beiden 14 Jahre später den Physik-Nobelpreis erhielten. Denn bei dem diffusen Strahlungshintergrund handelt es sich um nicht weniger als ein an jedem Punkt des Firmaments aufspürbares Nachglimmen des Urknalls. Es entstand rund 380 000 Jahre nach der Entstehung des

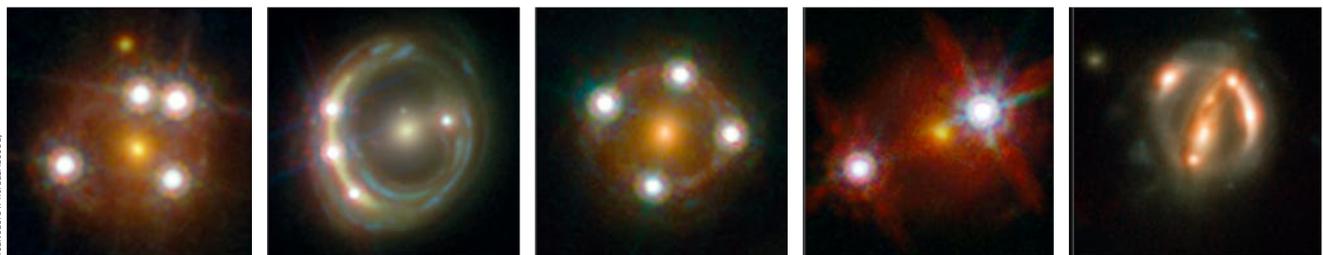
Außerdem haben sie auf jeder Stufe verschiedene Verfahren entwickelt, um systematische Fehler in den Griff zu bekommen. Damit ist es nun möglich, die Hubble-Rate mit einer Unsicherheit von gerade einmal 2,4 Prozent zu bestimmen. Ein Team um Adam Riess, das sich SH0ES-Kollaboration (Supernova H_0 for the Equation of State) nennt, hat auf diese Weise 2016 den Wert $73,24 \pm 1,74$ km/s/Mpc ermittelt. Mit den jüngsten Gaia-Daten und Aufnahmen des Hubble-Teleskops hat die Gruppe diesen Wert sogar noch etwas präzisiert und kommt nun auf $73,52 \pm 1,62$ km/s/Mpc.

Die kosmische Hintergrundstrahlung erzählt eine ganz andere Geschichte

Das Ergebnis von Riess und Kollegen passt gut zu dem Resultat einer zweiten Messmethode, die in den vergangenen Jahren Aufsehen erregt hat. Hier ist die Idee, zeitlich variable Quellen, beispielsweise aktive Galaxienkerne, mit Hilfe so genannter Gravitationslinsen zu beobachten. Darunter verstehen Astrophysiker sehr massereiche Objekte, etwa Galaxienhaufen oder Galaxiengruppen, die sich auf der Linie zwischen unseren Teleskopen und einem Objekt im Hintergrund befinden.

Durch ihre gewaltige Masse krümmen die Galaxienansammlungen die Raumzeit sehr stark, weshalb vorbeiflie-

Gravitationslinsen in Aktion: Liegt eine massereiche Galaxie auf der Linie zwischen uns und einem Quasar, sehen wir mehrere Bilder von ihm. Durch solch besondere Konstellationen können Astrophysiker die Hubble-Konstante abschätzen.



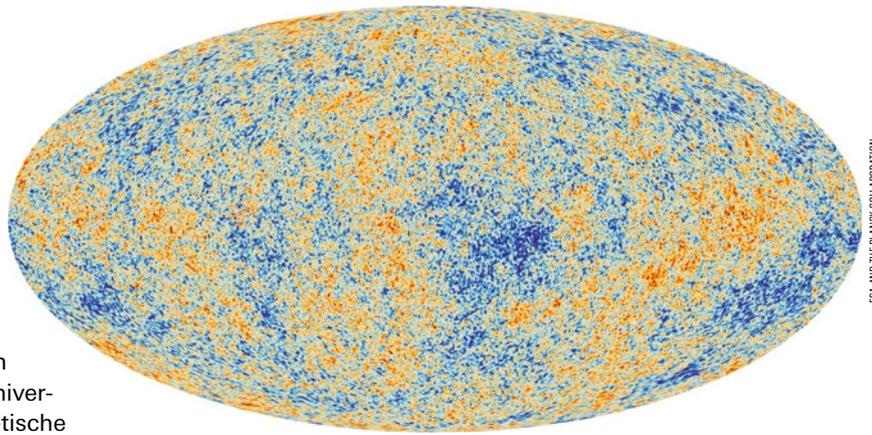
ESA/HUBBLE, MASA, SUIVI ET AL. (WWW.SPACETElescope.ORG/IMAGES/HEIC1323A1) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Der kosmische Mikrowellenhintergrund (rechts) ist ein Schatz für Kosmologen: Winzige Schwankungen in der Strahlungstemperatur (gelbe und blaue Flecken) verraten Experten, wie das Weltall 380 000 Jahre nach dem Urknall aussah.

Universums, als der rasch expandierende Kosmos gerade so weit abgekühlt war, dass Protonen und Elektronen zu Wasserstoffatomen zusammenfinden konnten. Damit wurde das Universum mit einem Mal durchsichtig; elektromagnetische Strahlung, die vorher nach kurzer Strecke absorbiert worden war, konnte sich nun ungehindert ausbreiten.

Als Penzias und Wilson den Mikrowellenhintergrund aufspürten, sah es so aus, als hätte seine Strahlung stets dieselben Eigenschaften, egal in welche Richtung man blickte. Das diffuse Leuchten glich dabei dem eines Schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 2,7 Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt. 1992 spürten Forscher mit dem COBE-Satelliten der NASA dann jedoch winzige Schwankungen in der Hintergrundstrahlung auf – das Nachglimmen war an manchen Stellen etwas stärker, an anderen etwas schwächer.

Diese Unterschiede entsprechen einer Temperaturdifferenz von nur einigen zehntausendstel Grad. Sie sind aber dennoch so spektakulär, dass es 2006 für ihre Entdecker John C. Mather und George F. Smoot erneut einen Physik-Nobelpreis gab. Wir gehen heute davon aus, dass die Variationen Dichteschwankungen im jungen Universum widerspiegeln, die in der kosmischen Hintergrundstrahlung gewissermaßen verewigt wurden. So gesehen enthält der Mikrowellenhintergrund einer Aufnahme des jungen Universums, lange bevor die ersten Sterne zu leuchten begannen.



ESA AND THE PLANCK COLLABORATION

der Hintergrundstrahlung können Forscher rekonstruieren, welche dieser Schwingungen damals dominant waren. Daraus lassen sich mehrere Schlüsselparameter ableiten, darunter die Krümmung des Universums sowie die Dichten der sichtbaren und der Dunklen Materie.

Experten können aus den Schwingungsmoden auch einen Wert für die Hubble-Rate ermitteln. Dazu bestimmen sie mit Hilfe der Atomphysik von Wasserstoff und Helium – damals die einzig relevanten Elemente im All – zunächst die Temperatur, bei der die atomare Ursuppe für Strahlung durchsichtig wurde. Sie liegt bei etwa 3000 Grad. Auf Basis der zuvor gewonnenen Dichten von sichtbarer und Dunkler Materie schätzen Kosmologen anschließend ab, wie alt das Universum damals war und wie viel Raum die dominanteste baryonisch-akustische Schwingung zu diesem Zeitpunkt eingenommen hat.

Daraus ergibt sich dann, wie groß die Strukturen im jungen Kosmos waren, die sich hinter den Flecken in der heute sichtbaren Hintergrundstrahlung verbergen. Diese Größe ist gewissermaßen der »Meterstock« der Mikrowellenhintergrund-Kosmologie. Da man weiß, welchen Raumwinkel die zu ihm korrespondierenden Flecken am heutigen Firmament einnehmen, kann man mit einfacher Trigonometrie abschätzen, in welchem Abstand von der Erde die Hintergrundstrahlung einst freigesetzt wurde.

Um die Hubble-Rate zu bestimmen, muss man nun noch diese Entfernung in Bezug zur Rotverschiebung der Strahlung setzen. Dazu vergleicht man die Temperatur, die das Weltall 380 000 Jahre nach dem Urknall hatte, mit der heutigen Temperatur des Alls. Weil man den theoretischen Zusammenhang zwischen Entfernung und Rotverschiebung kennt, kann man auf Basis dieser Werte und der anderen kosmologischen Parameter berechnen, wie groß die Hubble-Rate heute ist.

Generell ist es beeindruckend, wie viel Kosmologen aus der Hintergrundstrahlung herauslesen können. Aber der Weg dorthin ist komplex, und es fließen viele Annahmen über das frühe Universum ein. Man darf also fragen, wie robust die so ermittelte Hubble-Konstante ist. Auffällig ist, dass andere Teams, die den Mikrowellenhintergrund analysieren, zu abweichenden Ergebnissen kommen.

Beispielsweise die Wissenschaftler des South Pole Telescope, das eine höhere Winkelauflösung als der Planck-Satellit hat, aber nur einen kleineren Teil des Him-



YURIY MAZUR / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

380 000 Jahre nach dem Urknall zerrten sowohl der Strahlungsdruck als auch die Schwerkraft an der heißen Materie im Weltall. Mancherorts verdichtete sich dieses Plasma, wohingegen es in anderen Regionen verdünnt wurde. Letztlich durchliefen diese Schwankungen als Druck- und Dichtewellen mit großer Geschwindigkeit das damalige Weltall, ähnlich wie Schallwellen, die sich in Luft ausbreiten. Wissenschaftler sprechen von »baryonischen akustischen Schwingungen«.

Ihre Bedeutung für die moderne Kosmologie ist kaum zu überschätzen. Denn anhand der Unregelmäßigkeiten in

mels beobachtet, wodurch besonders weiträumige Dichteschwankungen nicht in die Auswertung einfließen. Die Astrophysiker haben auf Basis dieser Daten einen Hubble-Wert ermittelt, der sehr viel näher an dem von Adam Riess und seiner Entfernungsleiter-Methode liegt. Analysiert man allerdings nur den Teil der Daten, die für Planck und das South Pole Telescope übereinstimmen, so kommt man zu ähnlichen Ergebnissen. Das macht es unwahrscheinlich, dass eine der beiden Gruppen einen groben Fehler gemacht hat.

Mitglieder des Planck-Teams wenden außerdem ein, dass man noch auf einem anderen Weg zu einem vergleichbaren Wert kommt: Die Spuren der baryonischen akustischen Schwingungen sind nicht nur im Mikrowellenhintergrund enthalten. Sie lassen sich – entsprechend der Expansion des Universums enorm vergrößert – auch in der großräumigen Verteilung heutiger Galaxien beobachten, wie ambitionierte Himmelsdurchmusterungen der letzten Jahre zeigen, etwa der Sloan Digital Sky Survey.

Auf Basis weiterer Messungen hat ein Team um Graeme E. Addison auf diese Weise die Hubble-Konstante abgeschätzt und das Ergebnis von $66,98 \pm 1,18$ km/s/Mpc erhalten – in guter Übereinstimmung mit und unabhängig von der Messung des Planck-Teams. Man macht es sich also vermutlich zu einfach, wenn man argumentiert, Letzteres habe schlichtweg etwas übersehen.

Ein genauer Blick zeigt, wie tief der Graben ist

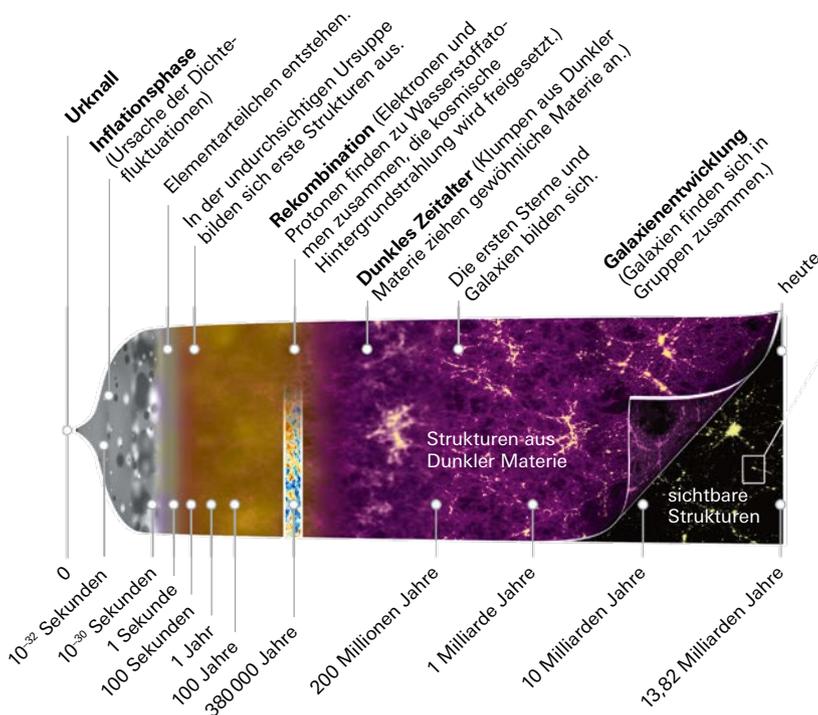
Es stehen sich also zwei Lager gegenüber: auf der einen Seite jene Wissenschaftler, die auf Basis der Entfernungsleiter auf einen Hubble-Wert von ungefähr 72 bis 75 km/s/Mpc kommen. Auf der anderen Seite die Astrophysiker, die mit der Hintergrundstrahlung und den größten Strukturen im Universum arbeiten und ein um 5 bis 8 km/s/Mpc niedrigeres Ergebnis erhalten. Auf den ersten Blick scheinen die Streithähne gar nicht so weit voneinander entfernt zu sein, insbesondere wenn man die Situation mit frühe-

ren Kontroversen um die Hubble-Konstante vergleicht. Aber ein genauerer Blick zeigt, wie tief der Graben ist: Obwohl alle Teams ihre Ergebnisse in jahrelanger Arbeit nach systematischen Fehlern abgesucht haben, lassen sich die Werte im Rahmen ihrer Messungenauigkeiten nicht in Einklang bringen. Wer also hat Recht?

Fest steht, dass alle Methoden Schwachpunkte haben. Bei den Verfahren, die auf der kosmischen Hintergrundstrahlung fußen, ist dies unter anderem die Abhängigkeit vom kosmologischen Standardmodell, das eine Reihe wichtiger Annahmen macht. Wählt man beispielsweise für die Dunkle Energie ein alternatives Modell zur – stets gleich bleibenden – kosmologischen Konstante, so wirkt sich das unmittelbar auf die Hubble-Konstante aus. Diese Schwäche teilt auch das Verfahren, das aktive Galaxienkerne durch Gravitationslinsen betrachtet. Die so gewonnenen Ergebnisse hängen zudem von den Details des Linsenmodells ab, das man benötigt, da die genaue Massenverteilung in fernen Galaxienhaufen unbekannt ist.

Anders die direkten Messungen auf Basis der Entfernungsleiter. Sie kommen ohne solche Annahmen zum Weltmodell aus. Dafür haben sie ein anderes Problem: Es ist keineswegs sicher, dass ihre Ergebnisse für das ganze Universum gelten, schließlich ermitteln wir damit nur die Hubble-Konstante im Hier und Jetzt. Wenn wir weit entfernte Galaxien beobachten, blicken wir hingegen in die Vergangenheit, da ihr Licht sehr lange braucht, um zu uns zu kommen. Und vermutlich wurde es in einer Zeit ausgesandt, als das Universum noch mit einer anderen Geschwindigkeit expandierte.

Der Gedanke läuft darauf hinaus, dass man durch das eingangs erwähnte Geschwindigkeits-Entfernungs-Diagramm der Galaxien definitiv keine Gerade legen kann, zumindest nicht, wenn man ein Volumen von mehreren Milliarden Lichtjahren betrachtet. Einen linearen Zusammenhang von Geschwindigkeit und Abstand würde man



Kurze Geschichte des Universums: Am Anfang war die Materie im All noch unvorstellbar heiß. Nach 380.000 Jahren konnten sich Elektronen und Protonen zu Atomen zusammenfinden, später folgten Galaxien, Sterne und Planeten.



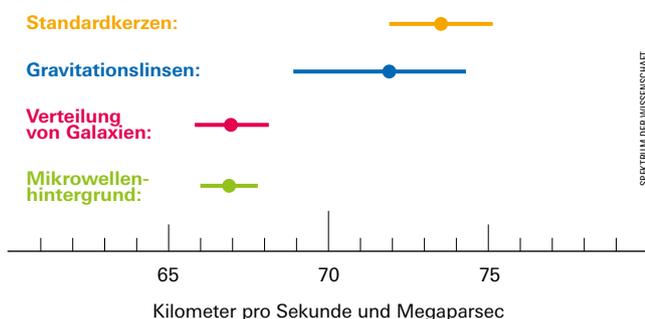
nur dann erwarten, wenn sich das Universum mit gleich bleibender Geschwindigkeit ausdehnt.

Wegen der Dunklen Energie nimmt die Expansionsgeschwindigkeit des Alls mit der Zeit aber zu. Jedenfalls muss man davon ausgehen, dass sich die Punkte im Hubble-Diagramm durch eine Kurve verbinden lassen, die – je nach Weltmodell – nach oben oder unten gebogen ist. Die für unsere unmittelbare kosmische Umgebung gültige Hubble-Konstante ist dann die Steigung der Tangente an dieser Kurve bei Abstand null. Die Tangentensteigung bei anderen Distanzen liefert hingegen die Hubble-Rate zu einem früheren Zeitpunkt. Lebten auf einer Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie andere intelligente Lebewesen mit Teleskopen, so hätten sie damals also einen anderen Wert der Expansionsrate gemessen.

Nun kommt das Dilemma: Um den lokalen Wert der Hubble-Konstante mittels der Entfernungsleiter zu bestimmen, müssen wir Objekte in unserer näheren kosmischen Umgebung beobachten, für die wir die Lichtlaufzeit gegenüber dem Alter des Universums vernachlässigen können. Bei diesen Messungen spielt aber die Struktur der Materie im Universum eine wesentliche Rolle, also Galaxien, Galaxienansammlungen sowie große Leerräume. Sie wirkt sich direkt auf die Eigenbewegung der Galaxien aus, die nicht immer bekannt ist, die aber die Expansionsbewegung des Alls überdecken kann.

Erst ab Abständen von knapp 100 Megaparsec beziehungsweise 300 Millionen Lichtjahren sind diese Eigenbewegungen klein genug für gute Messungen der Hubble-Konstante. Ein guter Kompromiss sind etwa 300 bis 500 Millionen Lichtjahre entfernte Objekte. Für sie ist die Expansionsrate bereits groß genug und ähnelt auch noch der heutigen. Der Abstand von der Erde ist dann allerdings bereits so enorm, dass wir ihn nicht mehr so genau bestimmen können wie bei näheren Sternen

Messungen der Hubble-Konstante



Über die kosmische Hintergrundstrahlung (Planck) und großräumige Strukturen im heutigen Universum (zum Beispiel Sloan Digital Sky Survey) kommen Astronomen auf einen anderen Wert für die Hubble-Konstante als auf Basis der Entfernungsleiter (unter anderem Hubble und Gaia). Die Analyse besonderer Gravitationslinsen (HOLiCOW) liefert einen weniger präzisen Messwert zwischen den beiden Lagern. Die horizontalen Linien in obigem Diagramm veranschaulichen die jeweiligen Unsicherheiten der Messungen.

und Galaxien. Das trägt maßgeblich zur Unsicherheit der auf diese Weise gewonnenen Ergebnisse bei, zumal es knifflig ist, die Eigenbewegungen der Galaxien zu modellieren.

Daneben könnte es Unsicherheiten geben, die man bislang übersieht. Forscher versuchen daher, Alternativen zu den bisherigen Leitersprossen zu entwickeln. Eine Möglichkeit sind beispielsweise so genannte Megamaser, die oft viele hundert Millionen Lichtjahre entfernt sind. Bei ihnen handelt es sich vermutlich um supermassereiche Schwarze Löcher mit vielen Millionen Sonnenmassen, die von Molekülwolken umkreist werden.

Dank der markanten Strahlung, die diese Systeme aussenden, kann man unter anderem den Abstand der Wolken vom Schwarzen Loch ermitteln, und auf Umwegen letztlich ihren Abstand von uns. Leider sind bisher nur wenige solcher Systeme bekannt. Eine Verbesserung der Entfernungsleiter stellen auch die Daten von Gaia in Aussicht, die erst in einigen Jahren komplett vorliegen sollen. Mit ihnen können Forscher dann die zweite Sprosse der Entfernungsleiter komplett überspringen.

Was ist mit den globalen Messungen auf Basis der kosmischen Hintergrundstrahlung? Ist hier ein Messfehler denkbar? Ich halte das wie weiter oben ausgeführt für eher unwahrscheinlich. Es ist aber gut möglich, dass in unserem kosmologischen Modell noch etwas fehlt beziehungsweise dass unser Verständnis des frühen Universums nicht vollständig ist. Vielleicht sehen wir hier sogar ein erstes Anzeichen für neue physikalische Phänomene.

Es gibt zahlreiche Vorschläge, wie sich der Streit auflösen ließe

Kollegen von mir haben hierzu bereits auch zahlreiche Vorschläge gemacht. So könnte im Prinzip eine zusätzliche Neutrinoart das Rätsel lösen, beispielsweise die so genannten sterilen Neutrinos. Denkbar sind aber ebenso bisher unbekannt Wechselwirkungen unter den drei bekannten Neutrinosorten. Oder Dunkle Materie, die auf bisher unverstandene Weise mit gewöhnlicher Materie interagiert. Alle diese Möglichkeiten hätten die Prozesse im frühen Universum erheblich verändert, was zu einem anderen Wert der Hubble-Rate aus der Hintergrundstrahlung führen würde. Bislang passt allerdings keine der Theorien, sofern sie theoretisch gut unterfüttert sind, perfekt zu allen Beobachtungen.

Generell sollte man zudem in Betracht ziehen, dass weder die lokale noch die globale Messung falsch ist, sondern dass die beiden Werte gar nicht übereinstimmen müssen. Das klingt zunächst kontraintuitiv, aber warum sollte es eigentlich nicht so sein? Die lokale Messung bezieht sich auf einen Bruchteil des bekannten Universums, die globale Messung auf Basis der Hintergrundstrahlung mittelt über den gesamten sichtbaren Kosmos. Wir erwarten bei der morgendlichen Wettervorhersage im Radio ja auch nicht, dass der Sprecher die mittlere Jahrestemperatur durchsagt, sondern die an diesem Tag erwarteten Durchschnittswerte.

Es ist also auch im Weltall naheliegend, dass die lokal gemessene Expansionsgeschwindigkeit von Ort zu Ort

Das Schwarze Loch im Herzen der 25 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie Messier 106 schießt immer wieder Materie ins All. Sie regt die Atome in Molekülwolken an, die dann starke Radiowellen (lila) aussenden. Solche »Megamaser«-Systeme ermöglichen eine unabhängige Ermittlung der Hubble-Konstante, sie sind aber relativ selten. Auf dem Bild ist auch UV-Strahlung (blau) und Infrarot-Licht (rot) zu sehen.

kleine Variationen aufweist. Grund hierfür könnten beispielsweise lokale Unterschiede in der Materiedichte sein. Verschiedene Gruppen sind in den letzten Jahren zu dem Ergebnis gekommen, dass diese einen Einfluss auf die Expansionsrate haben müssten, was die Diskrepanz zwischen den Hubble-Werten zumindest verkleinern würde. Ein Team, zu dem ich gehörte, wies 2014 zum Beispiel nach, dass dieser Unterschied bis zu 2 km/s/Mpc betragen könnte. Für die jüngeren Analysen von Riess und Mitarbeitern ist allerdings ein kleiner Wert zu erwarten, da dort ein größeres lokales Volumen betrachtet wird.

In jedem Fall sind weitere Messdaten nötig, um das Rätsel aufzulösen. Eine spektakuläre neue Möglichkeit, die Expansion des Kosmos zu vermessen, bieten etwa auf der Erde nachweisbare Gravitationswellensignale, die unter anderem bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne entstehen. Im Jahr 2017 zeigten Wissenschaftler der aLIGO/VIRGO Kollaboration, dass manche dieser Erschütterungen der Raumzeit mit kurzen Gammablitzes einhergehen (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 58).

Die Form der Gravitationswellen ermöglicht hierbei eine sehr gute Messung der Entfernung. Aus der Rotverschiebung des Lichtblitzes lässt sich daneben die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxie ermitteln, in der das Ereignis stattfand. Gemeinsam liefern diese Daten einen Punkt im Hubble-Diagramm. Die Genauigkeit der Methode beträgt bisher, wo man erst ein einziges solches Ereignis beobachtet hat, nur zehn Prozent, was für eine allererste Messung mit einer komplett neuen Methode aber sehr beeindruckend ist.

Wer in dieser Richtung schnelle Fortschritte erwartet, wird sicherlich enttäuscht werden. Die Empfindlichkeit der Gravitationswellendetektoren von aLIGO/VIRGO wird zwar nochmals deutlich steigen, wenn sie im Herbst 2018 erneut ihren Betrieb aufnehmen. Dadurch dürften die Kollegen weitere Neutronensternverschmelzungen nach-

weisen können. Allerdings werden diese Ereignisse nach kosmischen Maßstäben noch recht nahe sein. Dadurch wird – ähnlich wie bei der Entfernungleiter – die Relativbewegung der Galaxien relevant, was die Genauigkeit dieser Methode vermutlich vorerst begrenzen wird.

Parallel dazu werden andere Instrumente immer genauere Messdaten liefern, darunter das Planck-Team, dessen neueste Analyse von Messdaten ihres Satelliten bald erscheinen soll. Auch von den erwähnten Megamasern verspreche ich mir Fortschritte, da sie es erlauben, mehrere Sprossen der Entfernungleiter zu überspringen. In naher Zukunft geht auch eine Reihe von wissenschaftlichen Großprojekten an den Start, etwa das Radioteleskop-Netzwerk SKA in Südafrika und Australien, das Riesenspiegelteleskop ELT in Chile oder das Weltraumteleskop Euclid, das die Dunkle Energie genauer erforschen soll. Generell wird die Frage nach dem Wert der Hubble-Konstante die Kreativität der Wissenschaft weiter anfachen. Vielleicht muss die Idee, die das Problem lösen kann, einfach noch geboren werden. ◀

QUELLEN

Addison, G. E. et al.: Elucidating Λ CDM: Impact of Baryon Acoustic Oscillation Measurements on the Hubble Constant Discrepancy. In: *Astrophysical Journal* 853, 119, 2018

Ben-Dayan, I. et al.: Value of H_0 in the Inhomogeneous Universe. In: *Physical Review Letters* 112, 221301, 2014

Bovin, V. et al.: H0LiCOW – V. New COSMOGRAIL Time Delays of HE 0435–1223. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 465, S. 4914–4930, 2017

Planck Collaboration: Planck Intermediate Results. XLVI. Reduction of Large-Scale Systematic Effects in HFI Polarization Maps and Estimation of the Reionization Optical Depth. In: *Astronomy and Astrophysics* 596, A107, 2016

Riess, A. G. et al.: A 2.4% Determination of the Local Value of the Hubble Constant. In: *Astrophysical Journal* 826, 56, 2016

QUANTENTECHNIK DAUER-MASER DURCH DIAMANT

Die Mikrowellenvariante des Lasers ließ sich bisher nur mit hohem Aufwand handhaben. Viele Maser brauchten extrem niedrige Temperaturen oder lieferten nur kurze Strahlungspulse. Nun betreiben Wissenschaftler ein Exemplar auf Basis eines millimetergroßen Kristalls kontinuierlich und bei Raumtemperatur.



»Stickstofffehlstellen« im wenige Millimeter kleinen Diamanten lassen den Kristall unter grünem Laserlicht rot fluoreszieren.

Im Labor gelang die erste so genannte stimulierte Emission von Mikrowellen sogar noch vor der ersten von Licht. Allerdings hat der »Maser« (kurz für »micro-wave amplification by stimulated emission of radiation«, auf Deutsch Mikrowellenverstärkung durch stimulierte Emission) seinen Startvorsprung in der Praxis schnell verloren. Aus dem Alltag kennen wir stattdessen seinen kleinen, kurzwelligeren Bruder, den Laser. Dieser eroberte mit etlichen Anwendungen die Grundlagenforschung, Materialbearbeitung und Elektronik. Heute prägen in jedem Haushalt miniaturisierte und günstige Laser von DVD-Laufwerken bis zu Katzenspielzeugen die Freizeitgestaltung, während der ältere Bruder nur in technischen Nischen zu finden ist. Komplex konstruierte und entsprechend teure Maser beispielsweise geben in hochgenauen Uhren den Takt an oder verstärken in Radioteleskopen schwache kosmische Signale.

Ein Grund für die unterschiedliche Entwicklung: Forscher konnten die klobigen Maser nicht von einigen harschen, aber notwendigen Betriebsbedingungen befreien. Dazu gehören etwa Vakuum oder extreme Kälte. Nun hat eine Arbeitsgruppe um den Materialwissenschaftler Jonathan Brezee vom Imperial College London einen Maser vorgestellt, der ohne derlei aufwändige Maßnahmen bei Raumtemperatur kontinuierlich arbeitet.

Vor allem die Suche nach einem dafür geeigneten Werkstoff hat den Weg so beschwerlich gemacht. Der

Erfolg stellte sich erst ein, als das britische Team Stil bewies und Diamant wählte.

Maser und Laser basieren auf dem quantenmechanischen Prinzip, dem zufolge Materialien Energie in bestimmten Portionen aufnehmen und abgeben. Normalerweise befinden sich dabei die meisten Teilchen im Grundzustand niedrigster Energie. Nur einzelne absorbieren einen äußeren Impuls – etwa einen Lichtblitz – und springen dadurch kurzfristig auf ein höheres Niveau.

Bei der stimulierten Emission ist das Gegenteil der Fall. Hier pumpt eine äußere Quelle unablässig elektromagnetische Energie in das System. So befördert sie Teilchen in höher gelegene Zustände, bis sich die meisten von ihnen dort befinden anstatt auf den niedrigeren Niveaus – es herrscht »Besetzungsinversion«. Immer wieder jedoch fallen einzelne Partikel zurück. Dabei senden sie Strahlung aus und regen andere an, dasselbe zu tun.

Ein so genannter Resonator hält einen Teil der ausgesandten Photonen gefangen. Im einfachsten Fall sind das zwei Spiegel in einem zur Frequenz passenden Abstand, zwischen denen die Strahlung der gewünschten Wellenlänge hin- und herläuft und sich gewissermaßen aufschaukelt. Ein Teil der Lichtteilchen verlässt die Apparatur gebündelt – je nach Variante als Maser- oder Laserstrahl.

Unter günstigen Umständen kann eine solche Apparatur kontinuierlich arbeiten. Leitet das Material allerdings aufgestaute Wärme nur langsam wieder ab, läuft man

Gefahr, dass die Hitze es zerstört. Dann kann es nur kurze Strahlungspulse liefern.

Während die Konstrukteure von Lasern inzwischen viele geeignete Stoffe für den Dauerbetrieb bei verschiedensten Wellenlängen gefunden haben, ist die Auswahl für die Maser noch immer gering. Als Medium besonders begehrt sind Festkörper. Im Vergleich zu Gas ermöglichen sie eine einfachere und kompaktere Bauweise. Bereits der erste Laser 1960 basierte auf einem solchen, dem Rubin, und lief bei Raumtemperatur. Doch erst 2012 entwickelten Forscher um Mark Oxborrow am britischen National Physical Laboratory einen Maser auf Basis eines organischen Kristalls, der auch ohne aufwändige Kühlung Mikrowellenstrahlung abgab. Die empfindlichen organischen Moleküle halten aber keine hohen Temperaturen aus und leiten Wärme schlecht ab. Darum ließ sich der Maser nur gepulst betreiben. Immerhin war endlich ein Material gefunden, bei dem auch ohne extreme Kühlung die Maserstrahlung emittierenden Zustände lange genug erhalten blieben.

Ein Diamant strahlt unvergänglich

Kurz darauf funkelte Diamant als Masermedium auf. 2014 hatten Physiker aus Sankt Petersburg und Würzburg seine grundsätzliche Eignung erkannt. Dass ein effizienterer Betrieb als beim organischen Maser theoretisch möglich ist, haben Wissenschaftler aus Hongkong und Stuttgart 2015 mit Modellrechnungen gezeigt. Entscheidend dafür sind als Stickstofffehlstellen bezeichnete Verunreinigungen im Kristall. Dabei sitzt an einigen Orten im Gitter ein Stickstoffatom, und das benachbarte Kohlenstoffatom fehlt. Dadurch sind Bindungen nicht besetzt. Die entsprechenden Elektronen können drei mögliche Zustände einnehmen. Die Energieniveaus solcher »NV-Zentren«

Um Maserstrahlung zu erzeugen, steckt der Diamant in einem Ring aus Saphir sowie einem Kupferresonator (nicht abgebildet). Ein angelegtes Magnetfeld trennt die Energieniveaus auf die passenden Frequenzabstände.

waren unter Forschern bereits für ihre ausgeprägte Stabilität bekannt. Für die Rolle im Maser bedeutet das: Man muss die Elektronen nicht so oft anstoßen, um eine Besetzungsinversion aufrechtzuerhalten – die Zustände halten etwa 50-mal länger als bei Oxborrows organischem Material. Außerdem leitet Diamant Wärme vieltausendfach besser. Zusammengenommen weckte das Hoffnungen, ein Diamant würde die vergleichsweise wenige entstehende Hitze ausreichend schnell abführen, um einen Maser auch bei Raumtemperatur kontinuierlich zu betreiben.

Jonathan Breeze hat die Idee aufgegriffen und aus einem solchen Kristall einen Maser gebaut. Der Materialkundler hatte bereits an Oxborrows Experiment von 2012 mitgearbeitet. Für den neuen Aufbau verwendete er einen wenige Millimeter kleinen Diamantwürfel (siehe Foto linke Seite; unter Tageslicht wirkt er, anders als die bekannten Schmucksteine, wegen der gezielt eingebrachten Verunreinigungen fast schwarz). Er umhüllte den Kubus mit Resonatoren in Form eines passgenauen Rings aus Saphir (siehe Bild unten) und einem etwa drei Zentimeter großen Hohlraum aus Kupfer. Ein von außen angelegtes Magnetfeld trennte zunächst die möglichen Elektronenzustände in unterschiedliche Energien auf. Anschließend regte ein grüner Laser die Fehlstellen im Diamanten an.

Mit diesem Aufbau erreichten die Forscher schließlich tatsächlich stimulierte Emission und damit ihr Ziel. Statt auf dem niedrigsten Niveau tummelten sich die Elektronen also mehrheitlich auf höheren und sandten kollektiv Mikrowellenstrahlung aus – bei Raumtemperatur und ohne Unterbrechung. Bei einem Testlauf lieferte die Quelle zehn Stunden lang eine gleich bleibende Leistung. Darüber hinaus lässt sich die Frequenz der Mikrowellen prinzipiell steuern: Dazu muss ein stärkeres oder schwächeres Magnetfeld lediglich die Unterschiede zwischen den Energieniveaus passend verändern. Dieses Prinzip könnten Physiker für zahlreiche Anwendungen weiterentwickeln, in denen aufwändigere Maser bisher unpraktikabel waren.

Viele Bereiche der Kommunikationstechnik basieren bereits heute auf herkömmlichen Mikrowellen. Ein Maser ist für extrem rauscharme Datenübermittlung und Signalverstärkung interessant und besonders für quantentechnische Anwendungen geeignet. Ohnehin untersuchen Forscher Diamanten mit Stickstofffehlzentren seit Jahren intensiv als mögliche Speicher quantenmechanischer Informationen. Nun gibt es ein neues Instrument, um solche Zustände zu handhaben oder Informationen daraus zu übertragen. Jetzt könnten Maser aus dem Schatten ihres kleinen Bruders treten. ◀

Mike Beckers ist Physiker und Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLEN

Breeze, J. D. et al.: Continuous-Wave Room-Temperature Diamond Maser. In: *Nature* 555, S. 493–496, 2018

Jin, L. et al.: Proposal for a Room-Temperature Diamond Maser. In: *Nature Communications* 6, 8251, 2015

Oxborrow, M. et al.: Room-Temperature Solid-State Maser. In: *Nature* 488, S. 353–356, 2012



THOMAS ANDRUS / JONATHAN BREEZE, IMPERIAL COLLEGE LONDON

NANOSTRUKTUREN ORIGAMI MIT EINzelSTRÄNGIGER DNA

Eine lange, raffiniert konstruierte Kette des Vererbungsmoleküls verknüpft sich selbst zu flächigen Formen.

Die Grundidee ist: Man begnügt sich damit, eine Kette aus Bauteilen in einer vorgegebenen Abfolge zusammenzusetzen, und wie von Geisterhand nimmt diese Kette eine bestimmte räumliche Form an. Besonders reizvoll ist diese Vorstellung, wenn die Kette so mikroskopisch klein ist, dass man ihre Glieder nicht einzeln anfassen kann. Das Wunderwerk gelingt dadurch, dass zwischen den individuellen Kettengliedern Anziehungskräfte wirken, deren Zusammenspiel genau die gewünschte Form hervorbringt und keine andere.

Nach diesem Verfahren falten sich Proteine. Aber wie genau die Anziehungskräfte aus der linearen Aminosäurekette das biologisch aktive Molekül machen, ist nach wie vor nicht geklärt. Bei der DNA, dem anderen Kettenmolekül, das in der lebenden Zelle eine wesentliche Rolle

spielt – und vor allem die Aminosäurefolge der Proteine kodiert –, gibt es ebenfalls solche Anziehungskräfte, doch deren Folgen sind weitaus übersichtlicher. Ein Kettenglied besteht aus einem Stück »Rückgrat« und einer von vier Basen, die sich wiederum in zwei Paare gliedern. Jede Base fühlt sich zu ihrer Paar-Partnerin hingezogen, und zwei Kettenstücke mit zueinander passenden (»komplementären«) Basen lagern sich bevorzugt zusammen. Dabei winden sie sich umeinander, wodurch die bekannte, stabile Doppelhelix entsteht.

Die Anziehungskräfte sind so stark, dass die beiden Einzelstränge einer Doppelhelix, die beispielsweise durch hohe Temperaturen auseinandergerissen wurde, spontan wieder zusammenfinden. Wenn man nun Einzelstränge, die nur auf einem Teil ihrer Länge komplementär sind, miteinander in Kontakt bringt, lagern sie sich auch bloß zum Teil zusammen und sind auf dem Rest ihrer Länge zu neuen Paarungen bereit. So kann man zum Beispiel vier Einzelstränge, deren jeder zur Hälfte zu einem der anderen passt, zusammennageln, worauf sie sich zu vier halblangen Doppelsträngen zusammenlagern, die durch eine Art Knoten in der Mitte verbunden sind.

Aus noch mehr geeignet präparierten Einzelsträngen entstehen auf diese Weise die kompliziertesten Gebilde. Die Technik hat unter dem Namen »DNA-Origami« in letzter Zeit große Erfolge zu verzeichnen.

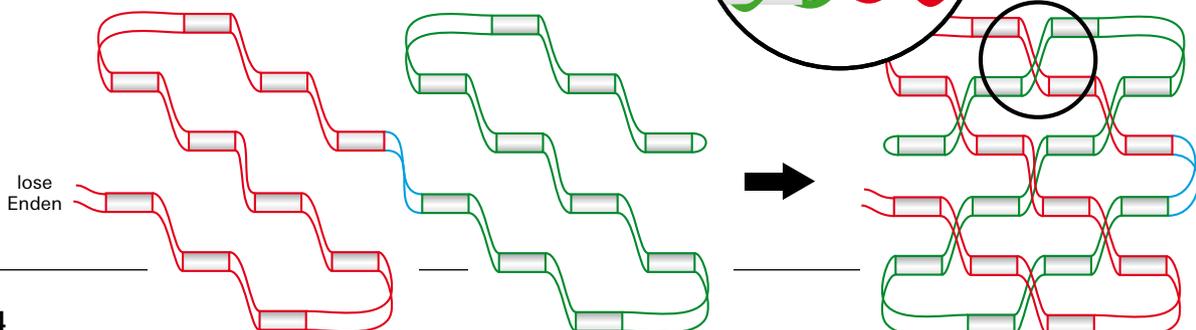
Ein Blatt aus DNA

Ein langer Einzelstrang aus DNA wird gewissermaßen in der Mitte geknickt und legt sich selbst zu einem »lückenhaften« Doppelstrang zusammen. In dem Bild sind die beiden losen Enden ganz links und die Knickstelle ganz rechts. Der Doppelstrang besteht abwechselnd aus Abschnitten mit komplementären Basenpaaren, die zur Doppelhelix gewunden sind (als Rechtecke gezeichnet), und Abschnitten mit vorläufig

ungebundenen Einzelsträngen. Man darf sich den Strang wie dargestellt zurechtgelegt denken. Das Produkt wird dann einfach dadurch vollendet, dass die rechte (grüne) Hälfte auf die linke (rote) geklappt wird. Dabei geraten die bisher ungebundenen Abschnitte aus der grünen und der roten Hälfte aufeinander und halten zusammen, weil die Basen an den entsprechenden

Kreuzungspunkten – und nur an diesen – komplementär sind. Die Operation ist knotenfrei, da an keiner Stelle ein grünes Stück unter ein rotes gerät. Die Detailansicht im Kreis illustriert die Vorstellung von Würsten, die von zwei Schnüren umwickelt sind.

Die Folge der Basen stellt sicher, dass sich der Strang nur an den vorgesehenen Stellen mit sich selbst zu verbinden vermag.



Eine zwölfköpfige Forschergruppe um Dongran Han von der Harvard University und Xiaodong Qi von der Arizona State University hat es nun unternommen, derlei Konstruktionen mit lediglich einem einzigen, sehr langen DNA-Strang zu realisieren. Weitere Mitglieder der Gruppe arbeiten in Hefei (China) und San Francisco.

Schwer zu handhaben, doch einfach herzustellen

Ein einzelner langer Strang verheddert sich eher als mehrere kurze, was die Sache zunächst schwieriger macht. Für die ferne Zukunft dagegen könnte die Beschränkung zweckmäßig sein.

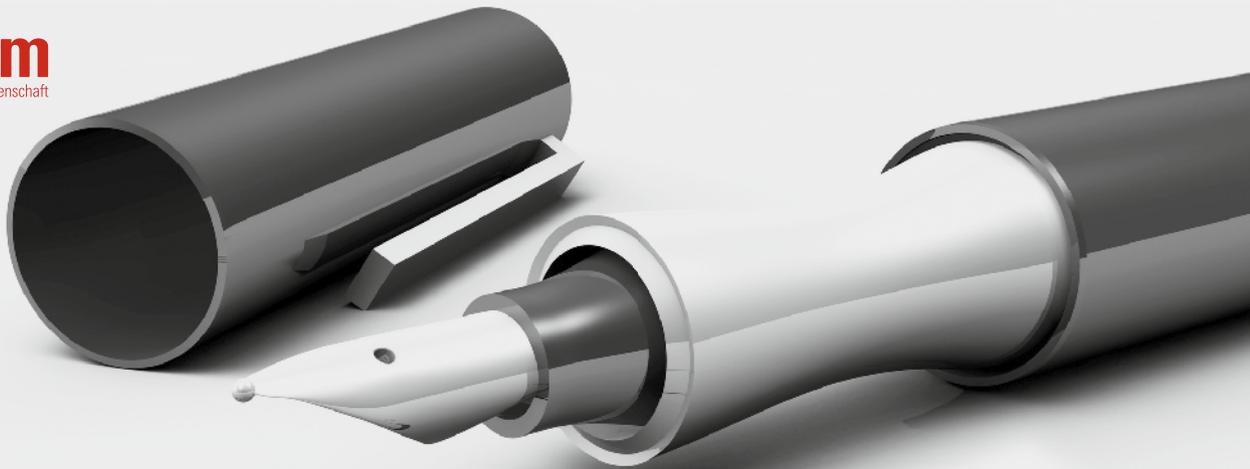
Denn hinter dem DNA-Origami steckt die Vorstellung, dass man einen einmal gefundenen funktionierenden Strang auf künstlichem Weg (mittels DNA-Polymerase) oder naturnah (durch Einbau in ein Bakteriengenom) beliebig vervielfältigen könnte. Da ist ein langer Strang wesentlich einfacher herzustellen als viele kurze; vor allem entfällt das Problem, die zahlreichen kurzen Stränge in genau den richtigen Mengenverhältnissen bereitzustellen.

Für das Folgende ist es hilfreich, sich das DNA-Molekül eher realitätsfern als eine lange Wurst vorzustellen, die von zwei parallelen, schräg verlaufenden Schnüren umwickelt ist. Wenn beispielsweise ein flächiges Gebilde herauskommen soll, würde man die lange Wurst zunächst

mehrfach knicken und die Teilwürste parallel nebeneinanderlegen. Eine solche Form würde echte DNA von allein niemals annehmen, geschweige denn beibehalten; damit das geschieht, muss man die Teilwürste miteinander verknoten wie die dicken Stränge eines Flokati-Teppichs. Dazu schneidet man bei zwei benachbarten Würsten an geeigneter Stelle je zwei Fäden durch und verbindet jeden mit dem passenden Faden der Nachbarwurst. Um ein dichtes, haltbares Gewebe herzustellen, führt man diese Verknüpfung so oft durch, wie es die Struktur des Materials hergibt. Das heißt möglichst jedes Mal oder zumindest jedes zweite Mal, wenn die beiden Fäden eine komplette Runde um die Wurst vollendet haben.

Natürlich kann man das Aufschneiden und Wiederverknoten nicht mit echter DNA durchführen. Vielmehr nahmen Han und seine Kollegen den theoretischen Flokati zum Vorbild, um die Basensequenz des DNA-Strangs zu ermitteln, der sich in die gewünschte Form falten sollte. Entlang dem neu geknüpften Faden waren die Basen so zu wählen, dass in den ungestörten Abschnitten komplementäre Basen einander gegenüberstanden, während das in den Verknotungsabschnitten gerade nicht der Fall sein durfte. Darüber hinaus mussten die Forscher dafür Sorge tragen, dass ein Strang sich nicht »versehentlich« an der falschen Stelle an ein Stück seiner selbst binden konnte.

Spektrum
der Wissenschaft



SCHREIBWERKSTATT

Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg
Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«; Preis: € 139,- pro Person;
Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-

Telefon: 06221 9126-743 | service@spektrum.de
spektrum.de/schreibwerkstatt

Schließlich sollte der Strang sich in die gewünschte Form falten, ohne sich unterwegs mit sich selbst zu verknöten. Auch zu den Bewegungen, die beim gewöhnlichen Nähen dem Endprodukt eine besondere Haltbarkeit verleihen – einen langen Faden durch eine Schlinge ziehen, die von demselben Faden gebildet wird –, wird man echte DNA unter keinen Umständen verlassen können. Also mussten Han und seine Kollegen sicherstellen, dass der von ihnen vorgesehene Fadenverlauf im Sinne der mathematischen Knotentheorie dem trivialen Knoten äquivalent ist. Um dies zu überprüfen, unterwarfen sie ein Computermodell des fertigen Gebildes den simulierten Wirkungen von Hitze (zum Aufbrechen der Komplementärbindungen) sowie Schwerkraft (zum Auseinanderziehen) und konnten beobachten, wie sich ihre Struktur, an beiden Enden des Fadens aufgehängt, knotenfrei aufrübelte.

Indem die Forscher die Folge der Basen so festlegten, dass der Strang sich genau an den vorgesehenen Stellen – und an keiner anderen – mit sich selbst verband, wäre ihre Arbeit theoretisch erledigt gewesen: Man bestellt den Strang mit der vorgegebenen Basensequenz bei einer darauf spezialisierten Firma, gibt ihn in wässrige Lösung, und alles andere geschieht von selbst.

So einfach ist es dann doch nicht. Damit alles funktioniert, muss der Strang beim Selbstverknöten die richtige Reihenfolge einhalten. Dazu stellten die Wissenschaftler zunächst mittels DNA-Polymerase zwei halbe Stränge her und verknüpften sie erst unmittelbar, bevor sie sie in Lösung brachten: das Prinzip Knaben- und Mädcheninternat zur Verhinderung unerwünschter, vorzeitiger Paarungen. Das gemeinsame Bad hat zunächst 95 Grad und wird binnen zwei Stunden auf 25 Grad abgekühlt («DNA annealing»). So bilden sich zuerst die Bindungen, die auch heftiger Wärmebewegung standhalten, und dann die übrigen.

Mit diesem »schnellen« Kühlprozess kommt zumindest das rautenförmige Blatt zu Stande, das Han und seine Kollegen als Erstes herstellten. Größere und kompliziertere Formen benötigen beim Abkühlen mehr Geduld. Der Rekord liegt bei einem Strang von ungefähr 10000 Basenpaaren Länge.

Einmal etabliert, erlaubt das Prinzip allerlei Variationen. So kann man aus dem eng geknüpften Faden einzelne einsträngige Schlaufen heraushängen lassen, an die wiederum andere Moleküle andocken – fast so, wie wenn man ein Gewebe mit Druckknöpfen versieht.

Auch für die Massenproduktion haben die Forscher schon Vorarbeit geleistet. So gelang es ihnen, ihren langen Faden in ein Plasmid (ringförmiges DNA-Stück) eines Kolibakteriums einzubauen und aus dessen Nachkommen zahlreiche Kopien zu ernten. ◀

Christoph Pöppe ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLE

Han, D. et al.: Single-Stranded DNA and RNA Origami. In: Science 358, eaao2648, 2017; Zusammenfassung in Science 358, S. 1402, 2017

MATHEMATIK AUF DEM WEG ZUR CHROMATISCHEN ZAHL DER EBENE

Wie viele Farben braucht man mindestens, um eine Ebene so auszumalen, dass jeweils zwei Punkte mit gleichem Abstand unterschiedlich gefärbt sind? Ein Hobbymathematiker, der hauptberuflich das Altern bekämpfen will, hat bei diesem berühmten Problem den ersten Fortschritt seit 60 Jahren erzielt.

► 1950 stellte der damalige Student Edward Nelson eine Frage, die Mathematiker seitdem beschäftigt. Er ersann dazu einen Graphen (eine Sammlung von als Knoten bezeichneten Punkte, die durch Kanten verbunden sind), dessen Kanten alle gleich lang sind und gemeinsam mit den Knoten in einer Ebene liegen. Nelson fragte sich, wie viele Farben man mindestens braucht, um einen beliebigen Graphen dieser Art – selbst einen mit unendlich vielen Knoten – zu kolorieren, wenn zwei verbundene Knoten niemals die gleiche Farbe haben dürfen.

Dieses Rätsel, das heute auch als »Hadwiger-Nelson-Problem« oder »Frage nach der chromatischen Zahl der Ebene« bekannt ist, hat das Interesse vieler Mathematiker geweckt. Schnell fanden einige Experten heraus, dass ein solcher Graph nicht weniger als vier und nicht mehr als sieben Farben benötigt. Andere Forscher fanden in den folgenden Jahrzehnten weitere Teilergebnisse, aber niemandem gelang es, die chromatische Zahl der Ebene weiter einzuschränken.

Doch nun hat der britische Bioinformatiker Aubrey de Grey einen Fachartikel veröffentlicht, in dem er einen Graphen einheitlicher Kantenlänge konstruiert, der nicht durch bloß vier Farben koloriert werden kann. Dieser Fund ist der erste größere Fortschritt für das Hadwiger-Nelson-Problem seit dessen Veröffentlichung. »Ich hatte außerordentlich viel Glück«, sagte de Grey. »Man findet nicht jeden Tag eine Lösung zu einem 60 Jahre alten Problem.«

De Grey ist ein ungewöhnlicher mathematischer Wegbereiter: Seit rund 20 Jahren vor allem als Biogerontologe tätig, ist er für seine vielfach kritisierten Aussagen bekannt, dass heute lebende Menschen nahezu unbeschränkt alt werden könnten. Er ist Mitgründer und Chief Science Officer (CSO) der SENS-Foundation, deren Ziel es ist, Technologien zu entwickeln, welche »die negativen Aspekte des Alterns aufheben«.

Sein Interesse an der Mathematik entdeckte de Grey durch ein Brettspiel: Vor einigen Jahrzehnten war er als exzellenter Othello-Spieler aktiv und traf so auf einige Mathematiker, die sich ebenfalls für dieses Strategiespiel begeisterten. Sie führten ihn in die Graphentheorie ein, mit der er sich seither hin und wieder beschäftigt. »Manchmal,

De Greys Graph mit 1581 Knoten.

wenn ich eine Pause von meinem eigentlichen Job brauche, denke ich über Mathematik nach«, sagte er. In den Weihnachtsfeiertagen 2017 hatte er mal wieder die Gelegenheit dazu – mit Erfolg.

Es ist zwar ungewöhnlich, aber nicht vollkommen neu, dass Laien wichtige Fortschritte in lange bestehenden mathematischen Problemen erzielen. In den 1970er Jahren stieß beispielsweise Marjorie Rice, eine Hausfrau ohne mathematischen Hintergrund, auf eine Kolumne in »Scientific American« über Fünfecke, die eine Ebene pflastern (siehe »Unordentliche Fünfeckspflasterungen«, **Spektrum** November 2015, S. 62). Sie fügte daraufhin vier bisher unbekannte Arten von Pentagonen zu der damaligen Liste hinzu.

Wenn Länder verknotet werden

Das Hadwiger-Nelson-Problem ist nicht das einzige Graphenfärbungsproblem. Das vielleicht berühmteste unter ihnen ist der »Vier-Farben-Satz«. Er besagt, dass eine beliebige Landkarte, in der jedes Land aus einem zusammenhängenden Stück besteht, mit nur vier Farben so ausgemalt werden kann, dass keine zwei aneinander angrenzenden Länder gleich gefärbt sind.

Da die genaue Größe und Form der Länder dabei keine Rolle spielt, haben Mathematiker dieses Problem in die Welt der Graphentheorie übertragen: Jedes Land stellen sie dabei als Knoten dar und verbinden benachbarte Länder durch eine Kante.

Anders als beim Hadwiger-Nelson-Problem enthält der Graph einer Landkarte keine sich kreuzenden Kanten und nur endlich viele Knoten. Bei der Frage nach der chromatischen Zahl der Ebene entspricht dagegen jeder Punkt der Ebene einem Knoten des Graphen – daher gibt es unendlich viele von ihnen.

Um einen Mindestwert für diese Zahl festzulegen, genügt es allerdings bereits, einen endlichen Graphen zu finden, der eine bestimmte Anzahl an Farben benötigt. Das hat de Grey in seiner Veröffentlichung getan.

Sein Graph basiert auf einem mathematischen Konstrukt namens Moser-Spindel, benannt nach den zwei Brüdern Leo und William Moser. Es besteht aus nur sieben

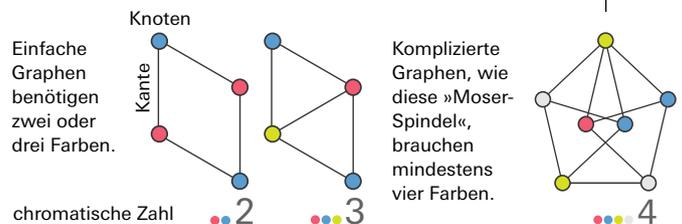
Knotenpunkten und elf Kanten, hat trotz seiner scheinbaren Einfachheit aber die chromatische Zahl Vier. De Grey verband durch einen komplizierten Prozess und etwas Computerunterstützung einige Kopien der Moser-Spindel mit weiteren Punkten zu einem Monstrum aus 20425 Knoten, das sich nicht mit bloß vier Farben ausmalen lässt. Er konnte den Graphen später auf 1581 Knoten verkleinern und mit seinem Computer nachprüfen, dass auch dieser die chromatische Zahl Fünf besitzt.

Die Entdeckung war eine beachtliche Leistung, doch nun möchten Mathematiker herausfinden, ob es auch einen kleineren Graphen gibt, der mehr als vier Farben benötigt. Vielleicht würde ein kleinerer – oder der kleinstmögliche – Fünf-Farben-Graph den Wissenschaftlern einen tieferen Einblick in das Hadwiger-Nelson-Problem verschaffen. Im besten Fall könnten sie so beweisen, dass genau fünf Farben sogar ausreichen, um einen unendlichen Graphen zu kolorieren, oder aber sechs oder sieben.

De Grey wandte sich an den Mathematiker Terence Tao (siehe »Universelle Gesetze«, **Spektrum** Januar 2014, S. 60), um Unterstützung bei der Suche nach einem minimalen Fünf-Farben-Graphen zu bekommen. Er schlug ihm vor, sein Vorhaben zu einem »Polymath-Problem« zu machen. Timothy Gowers von der University of Cambridge rief das webbasierte Mathematikprojekt Polymath vor etwa zehn Jahren ins Leben; es soll die Zusammenarbeit von Wissenschaftlern an mathematischen Problemen vereinfachen. Die Arbeiten an Polymath-Problemen erfolgen öffentlich, und jeder kann zu ihnen beitragen. De Grey war bereits an

Das Knotenfärbungsproblem

Graphen bestehen aus Knoten, die durch Kanten verbunden sind. Wenn man jeden Knoten in einem Graphen einheitlicher Kantenlänge färbt und dabei verlangt, dass verbundene Knoten unterschiedliche Farben haben – was ist dann die minimale Anzahl an benötigten Farben?



Wissenschaftler haben nun Graphen mit der chromatischen Zahl Fünf gefunden. Damit stellt sich die Frage, ob man jeden Graphen, selbst einen mit unendlich vielen Knoten, mit nur fünf Farben kolorieren kann.

OLIVIERO TOSCANI / QUANTA MAGAZINE; IANCHI / AUBREY DE GREY

LUCY READING: IKKANDA / QUANTA MAGAZINE

einer Polymath-Kollaboration beteiligt, die zu wichtigen Fortschritten im Bereich der Primzahlzwillinge führte.

Laut Tao eignet sich nicht jedes Problem für Polymath; de Greys Vorschlag erfülle aber einige wichtige Kriterien. Es sei gut zu verstehen, und es ließe sich auch einfach daran arbeiten. Außerdem könne man den Fortschritt klar messen: Man muss dazu nur die Anzahl der Knotenpunkte gegenüber de Greys Ergebnis verringern. Inzwischen hat Tao die Suche nach einem minimalen Fünf-Farben-Graphen in das Projekt aufgenommen, es ist nun das 16. Polymath-Problem. Schnell fanden Dustin Mixon von der Ohio State University und sein Mitarbeiter Boris Alexeev einen Graphen mit 1577 Knoten. Kurz darauf hat Marijn Heule, Informatiker an der University of Texas in Austin, einen Graphen mit nur 874 Knoten entdeckt – und reduzierte ihn inzwischen sogar auf 278 Punkte.

Diese Arbeit weckt die Hoffnung, dass es sich lohnen dürfte, erneut einen Blick auf das 60 Jahre alte Hadwiger-Nelson-Problem zu werfen. »Für ein solches Problem könnte die endgültige Lösung unfassbar tiefgründige

Mathematik enthalten«, sagte Gordon Royle, Mathematiker an der University of Western Australia. »Oder es braucht einfach nur den Einfallsreichtum von jemandem, der einen Graphen mit einer großen chromatischen Zahl findet.« ◀

Evelyn Lamb ist Wissenschaftsjournalistin und Mathematikerin an der University of Utah.

QUELLE

De Grey, A. D. N. J.: The Chromatic Number of the Plane is at least 5. In: arXiv, 1804.02385, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Decades-Old Graph Problem Yields to Amateur Mathematician« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



ÖKOLOGIE CHEMISCHER HILFERUF DER BLÜTEN

Der Feind meines Feindes ist mein Freund. Dreiecksbeziehungen dieser Art sind in der Natur keine Seltenheit. So locken Blüten, die von Raupenfraß bedroht sind, mit ihrem Duft Krabbenspinnen als Kammerjäger an – und nehmen dabei in Kauf, dass diese auch Nützlinge wie Bienen erbeuten oder vertreiben. Dank der Überzahl der Blütenbestäuber überwiegt dennoch der Vorteil.

▶ Mit ihrem glatten, häufig leuchtend bunt gefärbten Körper entsprechen Krabbenspinnen kaum dem verbreiteten Klischee vom abstoßenden, düster behaarten Getier. An das Leben auf Blüten bestens angepasst, entgehen sie trotz ihrer Schönheit leicht dem Auge des Betrachters, liegen sie doch meist reglos und farblich gut getarnt auf der Lauer. Sie erbeuten anfliegende Insekten durch blitzschnelle Überraschungsangriffe – Krabbenspinnen bauen keine Fangnetze, auch wenn sie mit weltweit mehr als 2000 Arten eine der größten Familien der Webspinnen darstellen. An die namensgebenden Krabben erinnert ihr Jagdverhalten ebenso wie ihre ersten beiden, auffällig langen Beinpaare.

Da dem Appetit der Spinnen Blütenbestäuber zum Opfer fallen, galten sie bislang als ungebetene Gäste, die den Fortpflanzungserfolg der Pflanze mindern. Gelegentlich stehen jedoch auch Blätter oder Blüten fressende Insekten auf ihrem Speisezettel, was die Arbeitsgruppe um Florian Schiestl von der Universität Zürich zu einer Kosten-Nutzen-Rechnung veranlasste. Eine auf steinigem Wiesen und Geröllfeldern der Alpen weit verbreitete Pflanze, das Glattfrüchtige Brillenschötchen (*Biscutella laevigata*), erwies sich dafür als ideales Untersuchungsobjekt, da es nur in tiefen Regionen von der Krabbenspinne *Thomisus*

onustus aufgesucht wird. In höheren Lagen, wo die Spinnenart nicht vorkommt, liefert die Natur dem Beobachter eine unbesiedelte Kontrollpopulation.

Angelockt werden Krabbenspinnen wie auch Insekten vom Blütenduft. Als besonders attraktiv erwies sich β -Ocimen, ein bei Pflanzen häufig vorkommender Duftstoff aus der Gruppe der Terpene. Das zeigten Laborexperimente der Schweizer Forscher, in denen die Spinnen ihr Ziel anhand einzelner Substanzen aus dem Blütenduftcocktail auswählten. Dazu passend residierten die Krabbenspinnen im Freiland vor allem auf denjenigen Pflanzen, die sehr viel β -Ocimen produzierten, hier im Schnitt auf jedem dritten Blütenstand. Auch Bienen werden von diesem Duftstoff angezogen, wobei jedoch ihre Vorliebe anderen Blütenduftkomponenten wie Aromaten gilt. Hielt eine Krabbenspinne den Blütenstand besetzt, besuchten die Bestäuber trotz des verlockenden Dufts seine Blüten seltener. Die Tarnung der Krabbenspinnen erwies sich somit als nicht perfekt. Das Ausbleiben der Bestäuber könnte daher den Samenansatz und damit die Vermehrung der Pflanzen beeinträchtigen, selbst wenn in unberührter Natur die Mannschaft der Bestäuber – Honig- und Wildbienen, Hummeln sowie zahlreiche andere Insekten – durch den Jagdeifer der Krabbenspinnen kaum merklich abnimmt.

Braucht der Mensch ein Gegenüber?

Unser Gegenüber zeigt uns, dass wir existieren und, im besten Fall, dass wir mit unserer Existenz etwas bewirken. Denn erst die Begegnung mit Anderen verschafft uns Identität.

Begegnen Sie jetzt ZEIT WISSEN - dem Magazin, das Sie auf gute Gedanken bringt.

ZEIT WISSEN



**BRINGT SIE AUF
GUTE GEDANKEN.**

**Jetzt
gratis
testen!**

Bestellen Sie Ihr kostenloses Probeheft:  www.zeit.de/zw-spektrum



ANINA C. KNAUER, UNIVERSITÄT ZÜRICH (UZH)



Doch die Bilanz wäre unvollständig ohne die florivoren, also Blüten fressenden Schädlinge, die im Bergland auf fast jeder zweiten Pflanze zu finden sind und mit den Blüten auch die Samenanlagen verzehren. Deshalb setzten die Forscher als Dritte im Bund Raupen der Kohlschabe (*Plutella xylostella*) auf die Blütenstände. Die Krabbenspinnen nahmen sie bereitwillig als Futter an; neun von zehn der während des Experiments erbeuteten Tiere waren solche Raupen. Dadurch halbierte sich nicht nur die Raupenzahl auf den Blüten, sondern auch das Ausmaß der Fraßschäden. Somit steigt bei gleichzeitiger Anwesenheit von florivoren Schädlingen der Fortpflanzungserfolg der mit Krabbenspinnen vergesellschafteten Pflanzen – und die Waagschale dieser ambivalenten Wechselwirkung neigt sich zum Nutzen für das Brillenschötchen.

Da sich Pflanzen nicht fortbewegen und Fraßschädlingen nicht ausweichen können, haben sie ihre eigenen Strategien entwickelt, aktiv auf den Schädlingsbefall zu reagieren: Indem *B. laevigata* verstärkt β -Ocimen-haltigen Duft bildet, steigert es seine Attraktivität für die Krabbenspinnen. Wie die Forscher herausfanden, fiel dieser »Hilfe-

Krabbenspinnen warten in Blütenständen auf Beute. Sie stürzen sich auf bestäubende Insekten wie Bienen (oben), aber auch Fraßschädlinge wie Schmetterlingsraupen fallen ihnen zum Opfer (unten).

ruf« bei den Brillenschötchen in niedrigen Lagen etwa doppelt so stark aus wie in den höheren Bergregionen der Schweizer und italienischen Alpen, wo die Krabbenspinne fehlt, also durch β -Ocimen nicht bei Bedarf kurzfristig angelockt werden kann. Diese unterschiedliche Reaktion der beiden Populationen ein und derselben Pflanzenart werten die Wissenschaftler als lokale Anpassung an das Vorkommen der Spinnen – ein Beispiel für Mikroevolution.

Meister der Tarnung und Täuschung

Der Lockstoff β -Ocimen ist für Botaniker kein unbeschriebenes Blatt. Bei der Mehrzahl der Pflanzenfamilien gehört die Substanz zusammen mit Benzaldehyd, Limonen und Linalool zu den dominierenden Komponenten des Blütendufts. Verletzte Blätter können bei Schädlingsbefall ebenfalls den Stoff aussenden, um räuberische Insekten zu den Pflanzen zu locken. Und manche Schädlinge meiden bei der Eiablage β -Ocimen verströmende Pflanzen. Demnach verfügen solche Arten mit β -Ocimen über einen vielseitig einsetzbaren Signalstoff, der bei Bestäubern, Schädlingen und Räubern jeweils unterschiedliche Reaktionen auslöst.

In diesem Zusammenhang interessieren sich Biologen auch für die Frage, ob und wie Insekten die für das menschliche Auge verblüffend gut getarnten Krabbenspinnen wahrnehmen können. Dabei kommt unter anderem zum Tragen, dass Bienen das für den Menschen nicht sichtbare UV-Licht registrieren. Indem der Körper mancher Krabbenspinnen genau jenen Anteil des Sonnenlichts reflektiert, imitieren sie die so genannten Saftmale der Blüten. Diese kontrastreichen, leuchtend gelb gefärbten oder das UV-Licht reflektierenden Zeichnungen auf der Blüte weisen bestäubenden Insekten den Weg zur Futterquelle. So gelingt es einer australischen Verwandten der alpinen Krabbenspinne, *Thomisus spectabilis*, durch ihr UV-Signal die Attraktivität von Chrysanthemen-Blüten für Insekten zu steigern. Krabbenspinnen sind demnach nicht nur Meister der Tarnung, sondern können auch Köder auslegen, die ihre Beute täuschen und in die Falle locken. ◀

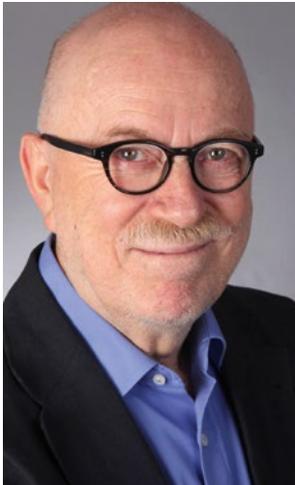
Annette Hille-Rehfeld ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Stuttgart.

QUELLEN

Farré-Armengol, G. et al.: β -Ocimene, a Key Floral and Foliar Volatile Involved in Multiple Interactions between Plants and Other Organisms. In: *Molecules* 22, 1148, 2017

Heiling, A. M. et al.: Pollinator Attraction: Crab-Spiders Manipulate Flower Signals. In: *Nature* 421, S. 334, 2003

Knauer, A. C. et al.: Crab Spiders Impact Floral-Signal Evolution Indirectly through Removal of Florivores. In: *Nature Communications* 9, 1367, 2018



SPRINGERS EINWÜRFE WO ERLEBEN WIR?

Zwei konkurrierende Theorien orten den Sitz des Bewusstseins im Gehirn unterschiedlich. Das hat Folgen für die Frage, ob es je bewusste Maschinen geben kann.

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

» spektrum.de/artikel/1567832

Nicht nur Philosophen interessieren sich seit jeher für die Voraussetzungen, unter denen wir einer Farbe oder eines Schmerzes gewahr werden. Naturforscher fragen: Lässt sich für bewusstes Empfinden ein eng umschriebenes Hirnareal verantwortlich machen – oder reicht nicht einmal das gesamte Gehirn dafür aus? Brauchen wir nicht stets auch einen Körper? Und muss ich nicht immer schon mit anderen Bewusstseinsträgern kommuniziert haben, damit ich mich als Ich erlebe?

Um nicht in diesem Problemirrgarten verloren zu gehen, ist die Suche nach den minimalen Voraussetzungen sinnvoll. Was sind die »neuronalen Korrelate des Bewusstseins«? Welche »Bewusstseinsneurone« sind mindestens immer dann aktiv, wenn wir etwas empfinden? Auf diese absichtlich reduktionistische Frage antwortet Christof Koch vom Allen Institute for Brain Science in Seattle (US-Bundesstaat Washington): Sie sitzen in einem bestimmten Bereich der hinteren Hirnrinde (*Nature* 557, S. S8–S12, 2018).

Es geht nicht bloß um die genaue Lage im Gehirn

Dem widersprechen schon seit Längerem die Hirnforscher Jean-Pierre Changeux und Stanislas Dehaene vom Collège de France in Paris. Für ihr komplexeres Modell sprechen die Ergebnisse, die ein Team um den niederländischen Neurologen Bram van Vugt, das auch Dehaene umfasste, aus Blickexperimenten mit Affen bei gleichzeitiger Messung derer Hirnaktivitäten gewann. Sobald die Versuchstiere aktiv – »bewusst« – auf visuelle Stimuli reagierten, zeigte ihr Gehirn eine deutliche, anhaltende Aktivität der Stirnhirnrinde; die blieb aus, wenn das Tier den Reiz nicht bemerkte und sich passiv verhielt (*Science* 360, S. 537–542, 2018).

Beim Dissens zwischen Koch und Dehaene geht es nicht bloß darum, ob das Bewusstsein im Gehirn eher

vorn oder hinten sitzt. Dehaenes Ansatz ist weniger reduktionistisch. Er postuliert einen »globalen neuronalen Arbeitsspeicher«. Dieser generiert visuelles Bewusstsein, indem er eine stabile, über Rückkopplungsschleifen konsolidierte Nervenverbindung aufrechterhält, die zwischen dem visuellen Kortex im Hinterhirn und dem Frontallappen verläuft. Solange diese quer durch die Hirnrinde laufenden Nervenbahnen aktiv bleiben, so Dehaene, herrscht bewusste Wahrnehmung, sonst nicht.

Interessant ist, welche unterschiedliche Positionen die Forscher zu der Frage einnehmen, was Bewusstsein eigentlich ausmacht. Wie Dehaene meint, könne man darüber, ob jemand bei Bewusstsein ist, nur anhand des beobachtbaren Verhaltens etwas aussagen. Deshalb will er nicht ausschließen, dass man nicht nur Tiere, sondern auch hypothetische intelligente Maschinen, so sie sich einmal entsprechend komplex verhalten, bewusst nennen darf.

Koch verneint das strikt: Niemals vermöge eine noch so raffinierte Maschine Schmerz zu empfinden oder Farben zu erleben; sie simuliere das höchstens. Er vergleicht das mit der Computersimulation eines Schwarzen Lochs, die ja auch nicht tatsächlich den Raum krümme. Damit bekommt Koch zwar gewiss Beifall von jenen, die das menschliche Bewusstsein vor der schnöden Gegenüberstellung mit Affen und Robotern schützen möchten – aber sein Vergleich hinkt gewaltig. Tiere und künstlich-intelligente Maschinen sind keine mathematischen Simulationen, sondern handfeste Parallelentwicklungen einer biologischen beziehungsweise technologischen Evolution.

Man könnte aus dem Zwist der Hirnforscher ganz allgemein schließen, dass ein besonders reduktionistischer Standpunkt, wie ihn Koch vertritt, in Gefahr gerät, die reale Komplexität der Vorgänge zu unterschätzen und deshalb ewige Rätsel dort zu sehen, wo keine sind.

NATURSCHUTZ FREUND UND HELFER IN DER MONGOLISCHEN STEPPE

Die Wiedereinführung eines traditionellen Herdenschutzhundes soll der Überweidung in der mongolischen Steppe Einhalt gebieten: Der Bankhar, der in der Ära sozialistischer Planwirtschaft fast ausgestorben ist, verteidigt Ziegen und Schafe gegen Raubtiere und bringt die Nomaden dazu, sich mit kleineren Herden zu begnügen.



Jason Overdorf ist Journalist in Neu-Dehli (Indien) und berichtet über Politik, Wirtschaft und Gesellschaft in Asien.

» spektrum.de/artikel/1567834



SONY/BOLO SERGEYEV

AUF EINEN BLICK RÜCKKEHR EINES HERDENSCHUTZHUNDES

- 1** Mongolische Hirten halten immer größere Ziegen- und Schafherden, um Viehverluste durch Klimaveränderungen und Beutegreifer auszugleichen. Dies führt zu Bodenzerstörungen durch Überweidung.
- 2** Früher besaßen die Nomaden Bankhars, die als Herdenschutzhunde das Vieh gegen Wölfe und Schneeleoparden verteidigten. Das Wissen um diese traditionelle Hunderasse ist inzwischen fast verloren gegangen.
- 3** Das Mongolian Bankhar Dog Project will den Hund durch Neuzüchtungen wieder einführen. Trotz Anfangserfolgen erweist sich die Umsetzung des Programms als schwierig.

Mongolische Nomaden führen ein hartes Leben. Sie trotzen dem rauen Klima der Steppe, hungrige Raubtiere bedrohen ihre Ziegen und Schafe. Ein Bankhar an der Seite des Hirten erweist sich dabei als nützlicher Gefährte.

Die zerklüfteten Ausläufer des Altaigebirges ziehen sich in das verbuschte Grasland der südlichen Gobi hinein. Diese abgelegene mongolische Region – zwei Tagesreisen von der Hauptstadt Ulan-Bator und mehr als 100 Kilometer von der chinesischen Grenze entfernt – stellt mit hungrigen Wölfen und Schneeleoparden sowie strengen Wintern eine raue Heimat für die hier lebenden Hirten dar. Einer von ihnen ist der 57-jährige Otgonbayar, ein wettergegerbter Nomade mit einer Herde von mehr als 1000 Kaschmirziegen und zwei Dutzend Schafen, die er vom Motorradsattel seiner chinesischen 100-Kubik-Maschine aus hütet.

»Die Wölfe waren in diesem Winter schrecklich«, erzählt Otgonbayar an einem Frühlingstag 2016, während seine Frau einen verbeulten Aluminiumtopf mit russischen Keksen und anderen Süßigkeiten herumreicht. »Ohne meine Hunde wären meine Verluste aber noch viel größer gewesen.« Gerade ein paar Tage zuvor hatten Wölfe vier seiner Tiere getötet; normalerweise können sie pro Saison 50 oder auch mehr reißen.

Seit den 1990er Jahren haben Hirten wie Otgonbayar ihre Herden gewaltig vergrößert, um so Einbußen durch Raubtiere und raues Wetter auszugleichen. Dies führte jedoch zur Überweidung der Steppe und damit zu einem Teufelskreis aus immer größeren Herden und immer stärkerer Umweltzerstörung. Jetzt will ein amerikanischer Unternehmer namens Bruce Elfström dieses Muster durch ein seit Jahrtausenden bekanntes Haustier durchbrechen: den einheimischen Herdenschutzhund Bankhar. »Es galt, die altbewährten Hunde, die schon die Großväter der heutigen Hirten hielten, zu finden, zu züchten und sie den Menschen zurückzugeben. Denn ohne Angst vor Raubtieren brauchen die Leute nicht mehr so viele Ziegen, und die Steppe kann sich wieder erholen«, beschreibt Elfström sein Ziel.

Bis zum Zusammenbruch der kommunistischen Herrschaft in den 1990er Jahren diktierte in der Mongolei die sozialistische Planwirtschaft, wie viele Tiere ein Hirte aufziehen darf. Maßnahmen wie ein regelmäßiger Weidewechsel verhinderten eine Übernutzung, und die Regierung sorgte dafür, dass auch Schäfer in entlegenen Gebieten ihr Fleisch und ihre Wolle vermarkten konnten. Beim Übergang zur Marktwirtschaft löste sich dieses System auf. Die Regierung privatisierte die Herden, doch das Weideland blieb Allgemeingut. Die Hirten fühlten sich dadurch ermuntert, ohne Rücksicht auf die Umwelt immer mehr Tiere aufzuziehen. Gleichzeitig stieg im prosperierenden China der Bedarf nach Kaschmir, erklärt die Doktorandin Zara Morris-Trainor von der schottischen University of Aberdeen, die den Einfluss des Handels auf die Schneeleoparden der Mongolei untersucht.

Der Kollaps der Sowjetunion 1991 ließ den bilateralen Handel zusammenbrechen und führte die Mongolei in eine größere Abhängigkeit von China. Fast über Nacht setzten die Nomaden, die traditionell gemischte Herden aus Kamelen, Ziegen, Pferden, Schafen, Rindern und Yaks gehalten hatten, verstärkt auf Kaschmirproduktion mit immer größeren Ziegenherden. Die spitzen Hufe der Tiere beschädigen zunehmend die oberste Bodenschicht und

fördern so die Winderosion. Lag der Anteil an Ziegen früher unter 20 Prozent, bildeten sie 1996 schon ein Drittel von etwa 29 Millionen domestizierten Weidetieren. 2015 war die Ziegenpopulation bereits auf fast 24 Millionen bei einer Gesamtzahl von 56 Millionen Stück Vieh angestiegen.

Die mongolischen Wüstengebiete wachsen im gleichen Ausmaß. Seit 1996, als die Mongolei dem Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung beitrug, verdreifachte sich der Anteil der von Desertifikation bedrohten Gebiete auf etwa 260 000 Quadratkilometer – ein Sechstel der Landesfläche. Bis zu 80 Prozent des Schadens sind auf Überweidung zurückzuführen, wiesen Wissenschaftler von der Oregon State University 2014 anhand von Satellitenbildern der Vegetation nach.

Töten aus Rache

Im gleichen Zeitraum verschwanden durch unkontrollierte Jagd und Zerstörung des Lebensraums 75 bis 90 Prozent der Beute von Wölfen und Schneeleoparden. Die Raubtiere mussten daher ihre Nahrung beim Vieh der Nomaden suchen. Zusätzlich häuften sich die als Dsud bekannten Winterstürme, denen Millionen von Herdentieren erlagen. Mangels ausreichender Versicherungen nahmen die Nomaden die Dinge selbst in die Hand: In guten Zeiten vergrößerten sie ihre Herden in der Hoffnung, im Frühling wenigstens ein paar Schafe und Ziegen übrig zu haben; in schlechten trieben sie ihre Tiere auf engem Raum zusammen, um sie besser schützen zu können. Beide Strategien verstärken das Problem der Wüstenbildung.

Hilflos den Stürmen, dem Schnee und der Klimaveränderung ausgesetzt, richtet sich die Wut vieler Hirten gegen die Raubtiere. Zuverlässige Daten über die Folgen gibt es kaum, aber immerhin 14 Prozent der befragten mongolischen Hirten gaben 2002 zu, Schneeleoparden aus Rache

Der kräftig gebaute Bankhar wirkt durchaus beeindruckend. Sein dichtes Fell schützt ihn vor den extremen Temperaturen, die in der mongolischen Steppe vorherrschen.



SYMBALUUS/STREIFEN



Als Herdenschutzhund lebt ein Bankhar mit den Weidetieren zusammen. Daher verteidigt er seine Herde auch gegen äußere Gefahren etwa durch Wölfe oder Schneeleoparden.

für gerissenes Vieh getötet zu haben. Experten wie Bayarjargal Agvaantseren, der in der Mongolei die Arbeit des Snow Leopard Trust koordiniert, halten solche Vergeltungsmaßnahmen für eine der Hauptbedrohungen der großen Katzen. Aber auch Wölfe geraten ins Fadenkreuz. »Manche Kommunen organisieren immer noch jährliche Wolfsjagden«, sagt Agvaantseren. Naturschutzbiologen sehen schwarz für die Zukunft beider Arten in der Mongolei.

Bruce Elfström glaubt, helfen zu können. 2013 entwickelte er ein Programm, das den Verlust an Weidetieren reduzieren und dabei gleichzeitig Beutegreifer schützen soll. Schlüssel hierzu ist der Bankhar, ein großer schwarzbrauner mongolischer Hund. Das Mongolian Bankhar Dog Project gründete in der Nähe von Ulan-Bator ein Zucht- und Trainingszentrum und brachte die Hunde zu Nomaden, deren Herden stark von Beutegreifern bedroht sind. Zu den ersten Teilnehmern des Projekts gehört Otgonbayar. »Sobald das Projekt läuft, wollen wir es den Mongolen übergeben, damit überall im Land Zuchtzentren entstehen«, erklärt der 51-jährige Elfström, der im Osten der USA eine Geländewagen-Fahrschule betreibt.

Bankhars gab es früher überall in der mongolischen Steppe. In Anspielung auf ihr Furcht erregendes Naturell lautet der traditionelle mongolische Gruß: »Halte deinen Hund fest.« Hunde sind die einzigen Tiere, denen Mongolen Namen geben. Zahlreiche Sagen und Legenden – einschließlich des Gründungsmythos der Mongolei, der die Abstammung von Dschingis Khan auf einen blaugrauen Wolf und eine weiße Hirschkuh zurückführt – zeugen von der Auffassung traditioneller Nomaden, nach der Mongolen und ihre Hunde aus dem gleichen Holz geschnitzt seien, erklärt der Anthropologe Gaby Bamana, der als Gastwissenschaftler an der niederländischen Universität Groningen forscht.

Trotz ihrer kulturellen Bedeutung gibt es seit der kommunistischen Zeit kaum noch Bankhars. Als Symbol für Unabhängigkeit passten die wilden territorialen Hunde nicht zur damaligen Ideologie mit staatseigenen Herden, in denen nur sieben Tiere pro Person als Privatbesitz er-

laubt waren. In den 1930er Jahren waren bei Moskauern sogar Bankhar-Felle äußerst beliebt. Kreuzungen wie jene mit dem Deutschen Schäferhund, der in den 1940er Jahren während des Baus der Transsibirischen Eisenbahn ins Land kam, sowie mit Haushunden der über 100 000 sowjetischen Soldaten, die in den 1960er Jahren in die Mongolei gezogen waren, veränderten zusätzlich den Genpool der ursprünglichen Bankhar-Population. So lässt sich heute kaum noch ein reinrassiger Bankhar finden. Das von Schäferhundzüchtern bevorzugte Einkreuzen von Jagdtrieben beeinträchtigte zusätzlich die Eignung als Beschützer von Weidevieh.

Durch die Zwangskollektivierungen, die den Einsatz der Hunde lähmten, ging auch das traditionelle Wissen verloren. Nur wenige Hirten, die mit ihren Familien in der Steppe leben, erinnern sich noch daran, wie man Herdenschutzhunde züchtet oder dressiert.

Bestens angepasst an das raue Klima der Steppe

Warum setzt dann Elfström ausgerechnet auf den Bankhar? Schließlich gibt es immer noch auf der ganzen Welt andere Herdenschutzhunde, wie etwa den Owtscharka im Kaukasus, den Anatolischen Hirtenhund in der Türkei oder den Pyrenäenberghund in Westeuropa (siehe »Herdenschutzhunde in Europa«, S. 36). Warum importiert man nicht einfach diese Tiere in die Mongolei?

Da wären zunächst biologische Gründe zu nennen. Genauso wie andere Herdenschutzhunde entstand der Bankhar nicht durch sorgfältige Zucht wie etwa die Deutsche Dogge oder der Golden Retriever. Vielmehr entwickelte sich die Rasse durch eine Kombination aus natürlicher und künstlicher Selektion: Die besten Individuen gediehen, wohingegen die Nomaden die nutzlosen nicht fütterten und diejenigen ausmerzten, die Weidetiere jagten oder töteten. Heraus kam ein Hund, der Nutztiere unter harten Bedingungen zu beschützen vermag.

Mit einer Schulterhöhe zwischen 65 und 80 Zentimetern und einem Gewicht zwischen 40 und 60 Kilogramm sind Bankhars besonders gut an die Herausforderungen der mongolischen Steppe angepasst, wo die Temperatu-

Herdenschutzhunde in Europa

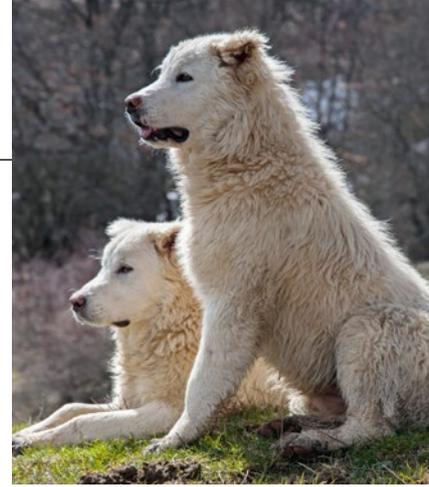
Weltweit setzten Hirten traditionell Hunde ein, um ihre Herden zu schützen. Auch in Europa waren Herdenschutzhunde seit der Domestizierung von Schafen und Ziegen verbreitet. Die nahezu komplette Ausrottung von Beutegreifern wie Wolf, Bär und Luchs sowie veränderte Weidebedingungen durch die Intensivierung des Ackerbaus erforderten neue Aufgaben für die Hunde: Gefragt war nun ein Arbeitstier, das zusammen mit dem Schäfer seine Herde führt.

Solche **Hütehunde**, die ab dem 18. Jahrhundert gezüchtet wurden, unterscheiden sich grundsätzlich von **Herdenschutzhunden**: Erstere sind auf den menschlichen Hirten fixiert und treiben auf Kommando auf Grund ihres Jagdinstinkts die Herde zusammen; gegenüber Raubtieren erweisen sie sich jedoch meist als unterlegen. Herdenschutzhunde wachsen dagegen schon als Welpen in ihrer Herde auf und bauen somit eine engere soziale Bindung zu den Schafen oder Ziegen als zum Hirten auf. Entsprechend agieren sie selbstständig und verbellen jeden, der sich ihrer Herde zu sehr nähert. Die Hirten brauchen hierfür mindestens zwei, bei größeren Herden auch bis zu vier Hunde.

Das Wissen um die Herdenschutzhunde geriet in Europa nahezu in Vergessenheit; in Deutschland wurden sie im 20. Jahrhundert praktisch nicht mehr eingesetzt. In abgelegenen Regionen konnten sich jedoch bestimmte Rassen halten. So entstand in Italien durch eine Kreuzung von Hunden aus der Maremma und den Abruzzen der **Maremmano** (Cane da Pastore Maremmano Abruzzese, siehe Bild). In den französischen Pyrenäen passt der **Pyrenäenberghund** (Patou des Pyrénées) auf seine Herde auf. Das spanische Gegenstück heißt **Pyrenäen-Mastiff** (Mastín del Pirineo). In Ungarn hat sich der **Kuvasz** bewährt, in Polen der **Tatra-Hirtenhund** (Polski Owczarek Podhalanski). Und aus dem Kaukasus stammt der **Kaukasische Owtscharka**.

Seitdem es in Deutschland wieder Wölfe gibt, werden Herdenschutzhunde auch bei uns interessant. Entsprechende Projekte laufen etwa in Sachsen, Brandenburg und Bayern.

Andreas Jahn



TINBERG / BETTY IMAGES / ISTOCK

ren im Sommer auf bis zu 40 Grad Celsius ansteigen und im Winter auf minus 45 Grad fallen können. Unter ihrem zotteligen Haarkleid, das sich fast wie Kaschmir anfühlt, sitzt ein dickes Unterfell, das sie winters wie summers vor extremen Temperaturen schützt. Mitunter vergraben sich die Tiere auch, um der Hitze zu entkommen. Zusätzlich fressen Bankhars vermutlich auf Grund eines langsameren Stoffwechsels weniger als gleich große Hunde – ein entscheidender Vorteil in einer Gegend, wo viele Familien nur wenig abzugeben haben.

Einem extremen Klima könnten zwar andere zentralasiatische Herdenschutzhunde wie der Owtscharka ebenfalls trotzen; dem stehen jedoch kulturelle Vorbehalte gegenüber. Jahrzehntelange sowjetische Einmischung haben die Mongolen argwöhnisch gegenüber ausländischen Beratern gemacht. Besonders skeptisch reagieren sie, wenn ihnen irgendwelche Amerikaner, die anscheinend eine Ziege nicht von einem Schaf unterscheiden können, etwas beibringen wollen. Dagegen ist der einheimische Bankhar für die Mongolen immer noch von großer Bedeutung: Traditionalisten sind davon überzeugt, dass der von ihnen geradezu verehrte Hund Kontakt zur Geisterwelt hat; moderner eingestellte Hirten betrachten Bankhars als kraftvolles Symbol ihrer Nation. »Jeder will einen Bankhar«, betont Elfström. Zudem: Lassen sich die Hirten über das Bankhar-Projekt erreichen, reagieren sie vielleicht auch gegenüber anderen Schutzbemühungen aufgeschlossener.

Mit DNA-Tests stöberten Elfström und sein Team die wenigen Exemplare reinrassiger Bankhars auf und konn-

ten daraus mittlerweile mehr als 60 Tiere aufziehen und an Hirten übergeben. Erste Daten des noch in der Anfangsphase laufenden Projekts belegten nach Elfströms Angaben einen Rückgang der von Räufern gerissenen Nutztiere um 90 bis 95 Prozent. Mittlerweile interessieren sich auch Non-Profit-Organisationen wie der Snow Leopard Trust und die Wildlife Conservation Society (WCS) für das Programm. So half die WCS 2016 dabei, drei Familien in einem Gebiet der Gobi mit einem starken Raubtierdruck durch Wölfe mit sechs Hunden zu versorgen, erzählt Onon Bayasgalan, WCS-Naturschützerin in der Mongolei. »Wenn sich die Bankhars bei diesen Hirten bewähren, wollen wir noch mehr Familien Hunde geben. In Zukunft könnten wir auch in anderen Gegenden mit dem Bankhar-Projekt zusammenarbeiten.«

Die Naturschützer hoffen, dass ein Erfolg die Hirten auch für andere Projekte begeistert wie zum Beispiel für »nachhaltiges Kaschmir«. Dabei sollen die Nomaden kleinere Herden halten, um qualitativ hochwertige Wolle zu produzieren, die sie dann für einen höheren Preis verkaufen könnten. Die Zuweisung eines Welpen gilt bereits als informelle Belohnung für ausgewählte Hirten wie Otgonbayar, dessen Weideland in der Nähe eines Schutzgebiets für Schneeleoparden liegt. Sobald Elfström beweisen kann, wie effektiv die Hunde Beutegreifer abschrecken, möchte er weitere Anreize für die Hirten anbieten, um sie vom Töten der Raubtiere abzuhalten.

Die Umsetzung des Projekts erwies sich allerdings als Hindernislauf: 2016 zwangen Umweltauflagen der Mongo-

lei, das Zuchtzentrum in den Norden des Landes in die Nähe des Hustai-Nationalparks zu verlagern, was einem Neuanfang des Projekts gleichkam. Dann verlor das Team durch einen Unfall ihren zuverlässigen Geländewagen, mit dem sie Hunde und Ausrüstung transportiert hatten. Und auch wenn die Hirten Bankhars haben wollen, erweist sich das Trainingsprogramm immer wieder als schwierig. Um die Welpen zu Herdenschutzhunden zu erziehen, müssen sie zwischen der 6. und 13. Woche mit dem Weidevieh zusammen aufwachsen, damit sie eine Bindung zu den Ziegen und Schafen aufbauen. Das ist zwar nicht kompliziert, erfordert aber die Bereitschaft der Hirten, sich strikt an die Regeln zu halten.

Zudem ist die Zusammenarbeit mit dem Snow Leopard Trust zum Stillstand gekommen. Trotz einiger Fortschritte lassen sich laut Gustaf Samelius, dem stellvertretenden wissenschaftlichen Direktor der Stiftung, kaum Hunde aus Elfströms Bankhar-Projekt unterbringen, da alle Nomaden in den Gebieten, in denen die Organisation arbeitet, bereits Hunde besitzen. »Die Leute, mit denen ich gesprochen habe, scheinen alle mit ihren eigenen Hunden glücklich zu sein«, sagt Samelius.

Diese Behauptung frustriert Elfström besonders. Ausnahmslos handele es sich um Streuner oder Kreuzungen, die nicht als Herdenschutzhunde aufgezogen worden sind, sagt er. Sie schreckten zwar Raubtiere ab, wenn sie nachts bellen, sobald sich ein Schneeleopard dem Pferch nähert. Man kann sich aber nicht darauf verlassen, dass sie das Vieh auf der Weide beschützen, weil sie an die Familie und nicht an die Tiere gebunden sind. Sie folgen eher den Hirten zurück in die Jurte, statt über ihre Herde zu wachen.

»Viele Wissenschaftler glauben immer noch, alle Hunde seien gleich«

Trotz der Aussage von Samelius, dass kein Bedarf für Hunde bestünde, schickt das Bankhar-Team seine Welpen ebenfalls in die Gebiete, in denen der Snow Leopard Trust aktiv ist – wenn vielleicht auch nicht zu den Familien, die angeblich mit ihren eigenen Vierbeinern zufrieden sind. Manchmal bezeichnen Hirten ihre untrainierten Kreuzungen aus Stolz oder Loyalität als Bankhars. Doch wenn sie erst einen richtigen Bankhar aus dem Zuchtprojekt kennen gelernt hätten, so Elfström, »verwandeln sich ihre Hunde urplötzlich zu einer Promenadenmischung, und sie wollen unsere«.

»Viele Leute, darunter auch Wissenschaftler, glauben immer noch, alle Hunde seien gleich – trotz der Schwemme an Publikationen, die das Gegenteil beweisen«, meint Elfström. »Hirten wissen, dass Bankhars nicht irgendwelche Hunde sind.« Wie Forscher beweisen konnten, wirken sich ähnliche Herdenschutzhunde in Afrika, Australien, Europa und dem westlichen Teil der Vereinigten Staaten durchaus positiv aus: Rassen wie der Pyrenäenberghund oder der Anatolische Hirtenhund konnten die Weideviehverluste durch Geparden, Kojoten, Dingos, Füchse, Bären und Wölfe reduzieren oder völlig verhindern. In Namibia führte die Einführung von ungefähr 450 Anatolischen Hirtenhunden in den letzten zwei Jahrzehnten dazu, dass Geparde fast keine Nutztiere mehr reißen. Dies wiederum

setzte dem Töten von jährlich mehr als 1000 dieser großen Katzen ein Ende. In der Mongolei, wo die Schutzbemühungen für Beutegreifer noch in den Kinderschuhen stecken, könnten die Auswirkung ähnlich dramatisch sein, glaubt Elfström.

Wenn das Projekt genug Hunde züchten kann und ausreichend Nomaden findet, die sie richtig dressieren, sollten Tötungen aus Rache deutlich abnehmen. Bei anderen erfolgreichen Programmen wie Cheetah Outreach in Südafrika haben sich Farmer vertraglich verpflichtet, keine Geparden zu töten – und die Vergeltungsmaßnahmen gingen tatsächlich stark zurück. Ein Impfprogramm des Snow Leopard Trust in Pakistan wiederum zeigt, dass die Farmer durch verringerte Herdenverluste auch weniger Tiere halten: Mit Hilfe des Programms sanken die Herdengrößen um 17 Prozent.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



GRIGORITA KO / STOCK.ADOBE.COM

Doch selbst wenn Elfström einige Hirten überreden kann, ihre Herden zu verkleinern, bleibt das nur ein Tropfen auf dem heißen Stein, solange nicht weitere Maßnahmen zum Schutz der mongolischen Steppe und ihrer Bewohner greifen. Glücklicherweise entstehen bereits solche Programme. So wirbt die Firma Sor Cashmere in Ulan-Bator für Kaschmir aus Kamel- oder Yakwolle, weil diese Tiere weniger Umweltschäden als Ziegen verursachen. Und die Wildlife Conservation Society arbeitet mit Hirten und Bergbauunternehmen zusammen, um Projekte zur ökologischen Schadensminimierung ins Leben zu rufen und nachhaltiges Ziegenkaschmir zu fördern.

»Wir wollen, dass die Hirten stärker umherziehen. Wir wollen, dass sie Herden mit unterschiedlichen Tieren halten. Wir wollen nicht, dass sie immer mehr Tiere haben müssen, um die Verluste auszugleichen«, sagt Elfström. »Dafür müssen wir mit anderen Nichtregierungsorganisationen zusammenarbeiten. Wir können nicht alles allein machen.«

QUELLEN

Bamana, G.: Dogs and Herders: Mythical Kinship, Spiritual Analogy, and Sociality in Rural Mongolia. In: Sino-Platonic Papers 245, S. 1–18, 2014

Hilker, T. et al.: Satellite Observed Widespread Decline in Mongolian Grasslands Largely due to Overgrazing. In: Global Change Biology 20, S. 418–428, 2014

WEBLINK

www.bankhar.org

Das Mongolian Bankhar Dog Project unterstützt die Wiedereinführung des Bankhars bei mongolischen Hirten.



OSTILL / BETTY IMAGES / ISTOCK
© 2010 BLOOMBERG VIA GETTY IMAGES

SCHIZOPHRENIE DIE STECKNADEL IM GENHAUFEN

Trotz aufwändiger Studien lässt sich bislang kein einzelner Erbfaktor für Schizophrenie ausmachen. Die Forscher müssen ihre Suche entscheidend erweitern.



Michael Balter ist Biologe und Wissenschaftsjournalist in San Francisco (USA). Er schreibt unter anderem regelmäßig für »Scientific American«.

» spektrum.de/artikel/1567836

Im Jahr 2016 meldeten US-Forscher, sie hätten ein Gen entdeckt, das eng mit dem Risiko zusammenhänge, an Schizophrenie zu erkranken. Und wie so oft reagierte die Tagespresse mit vorschnellem Enthusiasmus. Der Medienrummel ist verständlich, gleicht doch die Geschichte der Schizophrenieforschung einer langen Kette enttäuschter Erwartungen.

Die biologische Grundlage dieses besonders rätselhaften und komplexen seelischen Leidens ist seit Langem umstritten. Einigkeit besteht nur über das Ausmaß des Schadens, den es anrichtet: Berücksichtigt man sowohl den unmittelbaren Betreuungsaufwand als auch die indirekten Verluste durch Arbeitsunfähigkeit und vorzeitigen Tod, so summieren sich etwa in den USA die sozialen Kosten auf mehr als 60 Milliarden Dollar pro Jahr. Allein dadurch käme jeder Forschungserfolg einem enormen Fortschritt gleich.

Groß angelegte genetische Studien wecken seit mehr als einem Jahrzehnt die Hoffnung auf neue Erkenntnisse und Therapien. Die wären auch dringend nötig: Die vorhandenen Psychopharmaka mildern bloß die offensichtlichsten Symptome wie Wahnvorstellungen und Halluzinationen. Dabei verursachen sie aber oft schwere Nebenwirkungen und helfen kaum gegen chronische Symptome wie Vereinsamung und kognitive Defizite.

Doch bisher enttäuschten all diese Studien die in sie gesetzten Erwartungen. Die Suche nach Genen für Schizophrenie, Depression, Zwangserkrankungen und bipolare Störung ergab, dass höchstwahrscheinlich in keinem Fall ein einzelner Erbfaktor allein für das jeweilige Leiden verantwortlich ist.

Das Fahren nach den erblichen Ursachen seelischer Krankheiten ist an sich wohlbegründet. Seit Jahrzehnten legen Ergebnisse aus der Familien- und Zwillingsforschung eine starke genetische Komponente der Schizophrenie nahe. Dafür spricht schon das nahezu konstante Auftreten der Erkrankung: Ihre Häufigkeit beträgt weltweit rund ein

Prozent – trotz der riesigen sozioökonomischen und umweltbedingten Unterschiede, die auf dem Globus herrschen.

Um verdächtige Genversionen aufzuspüren, bedarf es eines enormen statistischen Aufwands – mit Zehntausenden von Kranken und Kontrollprobanden. Angesichts dieser Herausforderung gründeten Wissenschaftler 2007 das Psychiatric Genomics Consortium (PGC), das derzeit über mehr als 800 Mitarbeiter aus 38 Ländern verfügt und bereits statistische Daten von über 900 000 Personen gesammelt hat.

Mit einer so genannten genomweiten Assoziationsstudie (GWAS) erzielte die Schizophrenie-Arbeitsgruppe des PGC 2014 einen Durchbruch (siehe »Die Suche nach dem richtigen Gen«, S. 42/43). Bei der Analyse von rund 37 000 Schizophreniefällen und 113 000 Kontrollpersonen identifizierten die Wissenschaftler um den Genetiker Michael O'Donovan von der britischen Cardiff University 108 genetische Regionen, die mit der Krankheit zusammenhängen; darunter einige, die für Signalsysteme im Gehirn zuständig sind, an denen gängige Antipsychotika angreifen.

Ein lohnendes Ziel

Die deutlichste Verbindung zur Schizophrenie zeigten DNA-Abschnitte, die für Proteine des Haupthistokompatibilitätskomplexes MHC (major histocompatibility complex) kodieren. Diese Eiweißverbindungen stellen sicher, dass der Körper fremde Moleküle erkennt, und alarmieren das Immunsystem. Die MHC-Region erwies sich somit als lohnendes Ziel, das die Arbeitsgruppe des Genetikers Steven McCarroll von der Harvard Medical School in Boston daraufhin durchforstete. Die Entdeckung der Forscher sorgte für die Schlagzeilen 2016: Eine Variante des MHC-Gens *C4* erhöhte in den untersuchten Testgruppen das Schizophrenierisiko – allerdings lediglich von 1 auf 1,27 Prozent.

Die aufgespürten Variationen im *C4*-Gen betrafen nicht bloß die Abfolge der DNA-Bausteine, sondern auch die Länge sowie die Anzahl von Kopien dieses Gens. Frühere Untersuchungen ließen bereits vermuten, dass bei Schizophrenie Abweichungen in der Genkopienzahl eine wichtige Rolle spielen könnten. Die neue Studie bestätigte den postulierten Zusammenhang zwischen Kopienzahlvariation und Schizophrenie: Als das Team das Gehirn sowohl lebender als auch verstorbener Schizophreniepatienten mit dem von Kontrollpersonen verglich, stießen sie bei den Erkrankten auf deutlich mehr *C4*-Protein, wahrscheinlich auf Grund der zusätzlichen Exemplare des dafür zuständigen Gens.

Welche molekularen Mechanismen stecken dahinter? Wie weitere Experimente der Forscher mit Mäusegehirnen zeigten, sorgt das *C4*-Protein für den Abbau von Nervenverbindungen, die im Lauf der Hirnentwicklung nicht länger gebraucht werden. Falls dieser an sich normale Hirnreifungsprozess ungebremst fortschreitet und dabei zu viele Synapsen gestutzt werden, könnte das die Ursache für manche Schizophreniesymptome sein. Tatsächlich weisen Erkrankte eine dünnere Hirnrinde und weniger Synapsen auf. Außerdem treten Schizophrenie und andere Psychosen meist erst im späten Jugend- und

AUF EINEN BLICK ERBKRAKHEIT SCHIZOPHRENIE?

- 1 Mit aufwändigen so genannten genomweiten Assoziationsstudien (GWAS) suchen Forscher nach Erbfaktoren, die für den Ausbruch psychischer Störungen wie Schizophrenie verantwortlich sein könnten.
- 2 Trotz einiger Erfolge sind die bisherigen Ergebnisse enttäuschend. Ein einzelnes Gen lässt sich für Schizophrenie offenbar nicht ausmachen; die auffälligen Genversionen korrelieren nur schwach mit dem Erkrankungsrisiko.
- 3 Neben erblichen Risikofaktoren müssen künftige Studien auch schädigende Umwelteinflüsse einbeziehen, die bei der Hirnentwicklung von Kindern und Jugendlichen eine Rolle spielen.

Fragwürdige Erbllichkeit

Schizophrenie gilt als hochgradig erblich. Dabei wird Erbllichkeit oft als Maß für die relative Rolle der Gene interpretiert und in Prozent ausgedrückt. Vor allem Zwillingsstudien dienen dazu, die Erbllichkeit der Schizophrenie zu messen; entsprechende Schätzungen liegen bei rund 80 Prozent. Viele Forscher halten solche Aussagen jedoch für irreführend. Sie bezweifeln vor allem die Grundannahme, eineiige und zweieiige Zwillinge unterlägen denselben Umwelteinflüssen.

Einige Forscher kritisieren den Erbllichkeitsbegriff noch grundsätzlich. Ihrer Ansicht nach sagen die Berechnungen gar nichts über die relative Rolle von Genen und Umwelt aus. In Wahrheit messe die Erbllichkeit nur, inwieweit die Variation eines Merkmals – ob Körpergröße, Intelligenzquotient oder Schizophrenie – genetische Unterschiede in einer bestimmten Population widerspiegelt.

Als Beispiel dafür, wie irreführend Erbllichkeitsschätzungen sein können, verweist der Genetiker

Eric Turkheimer von der University of Virginia auf die Eigenschaft der Zweiarmigkeit: Nahezu jeder Mensch in einer beliebigen Population besitzt zwei Arme. Und diesbezüglich unterscheiden sich eineiige Zwillinge mit identischer DNA nicht von zweieiigen Zwillingen, die nur rund die Hälfte ihrer Gene teilen. Nach den üblichen Kriterien ergäbe das eine berechnete Erbllichkeit von null Prozent – obwohl wir wissen, dass Zweiarmigkeit natürlich fast ausschließlich genetisch bedingt ist.

frühen Erwachsenenalter auf, wenn die Hirnreifung im Wesentlichen abgeschlossen ist.

Die Ergebnisse schienen zunächst zu bestätigen, dass sich aufwändige Assoziationsstudien lohnen. GWAS hätten eine »erstaunliche und nie da gewesene Explosion unseres Wissens« über Geisteskrankheiten ausgelöst, meint der Genetiker Patrick Sullivan von der University of North Carolina in Chapel Hill. Auch David Goldstein von der Columbia University in New York – eigentlich ein GWAS-Skeptiker – räumt ein, mit der Bostoner *C4*-Studie »liefert eine GWAS zum ersten Mal das, was wir von ihr erwarten«.

Andere führende Genetiker äußern sich allerdings weniger begeistert. »GWAS werden nichts zur biologischen Erklärung der Schizophrenie beitragen«, behauptet Mary-Claire King von der University of Washington in Seattle, die 1990 das Gen *BRCA1* als Brustkrebs-Risikofaktor identifiziert hatte.

Hinter den meisten Schizophreniefällen stecken vermutlich Hunderte oder gar Tausende von Genen. »Wie GWAS zeigen, ist Schizophrenie derart polygen, dass sich vielleicht gar nichts finden lässt außer einem undefinierbaren genetischen Rauschen«, meint der Verhaltensgenetiker Eric Turkheimer von der University of Virginia in Charlottesville.

So gesehen könnte die *C4*-Studie vor allem dazu dienen, manchen Forschern allzu simple Vorstellungen über genetische Ursachen psychischer Krankheiten auszutreiben – zerstören doch alle bisherigen Befunde die Hoffnung, Schizophrenie lasse sich auf einige wenige Mutationen zurückführen. Jeder der 108 mit der Krankheit in Zusammenhang gebrachten Genorte trägt lediglich einen Bruchteil zum Risiko bei. Und die wenigen hochriskanten Gene sind nur für ein paar Fälle verantwortlich. Deshalb werden die neuen Erkenntnisse in nächster Zeit kaum zu Therapien führen.

Wie wichtig ist das *C4*-Gen überhaupt für die Krankheit? In McCarrolls Studie trugen 27 Prozent der fast 29 000 Schizophreniepatienten eine als riskant eingestufte Variante des *C4*-Gens – aber auch 22 Prozent von 36 000 gesunden Kontrollpersonen! »Selbst wenn die *C4*-Geschichte stimmt, erklärt sie nur einen unbedeutenden Anteil der Schizophreniefälle«, betont der Evolutionsgenetiker Kenneth Weiss von der Pennsylvania State University. »Der Nutzen ist fraglich.« Wie McCarroll einräumt, beweist seine Studie nicht einen direkten Zusammenhang zwischen Synapsenabbau und Schizophrenie, sondern zeigt nur mögliche biologische Mechanismen auf.

Methodische Schwächen

Die GWAS-Analyse weist zudem methodische Schwächen auf: Um die notwendigen riesigen Stichprobengrößen zu erreichen, unterscheiden die Genetiker zwischen Kranken und Kontrollpersonen je nachdem, ob der Betreffende formal als Schizophrener diagnostiziert wurde oder nicht. Die Kriterien dafür sind allerdings vage. Sowohl nach dem »Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders« der American Psychiatric Association wie auch nach der »International Classification of Diseases« der Weltgesundheitsorganisation können ganz unterschiedliche Symptome – Wahnvorstellungen, Halluzinationen oder kognitive Störungen – zur Diagnose führen.

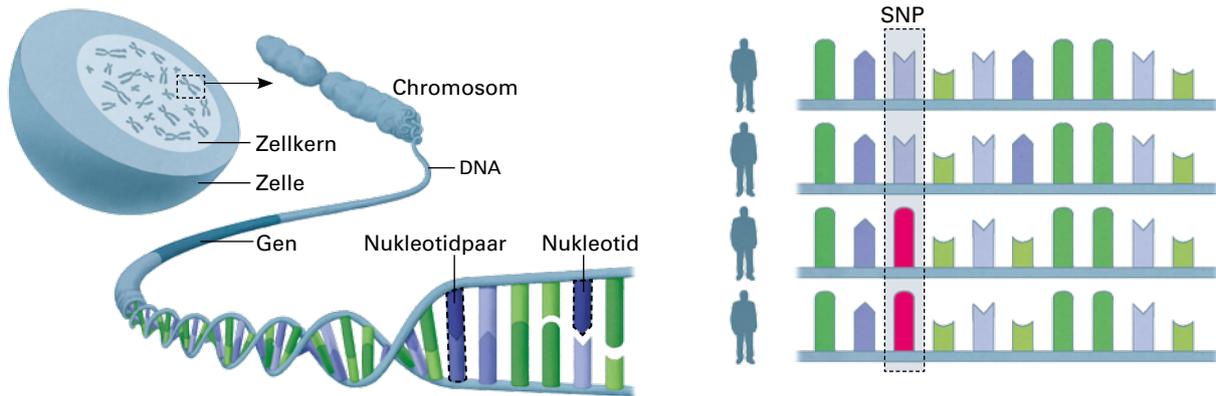
Die Neurologin Hannelore Ehrenreich vom Max-Planck-Institut für Experimentelle Medizin in Göttingen betrachtet Schizophrenie nicht als definierte Krankheit, sondern als Oberbegriff für eine Reihe unterschiedlicher Leiden. »Wir konzentrieren uns hier auf Menschen, die als Teil eines Kontinuums am extremen Ende des Spektrums menschlicher Wahrnehmungen stehen.« So weit möchte der Psychiater und Schizophrenie-Experte William Carpenter von der University of Maryland zwar nicht gehen, räumt aber ein, dass es sich nicht um eine klar umrissene Krankheit,

Die Suche nach dem richtigen Gen

Das Humangenomprojekt lieferte im Jahr 2000 erste Genkarten des Menschen. Davon erhofften sich Wissenschaftler den Beginn einer Ära der

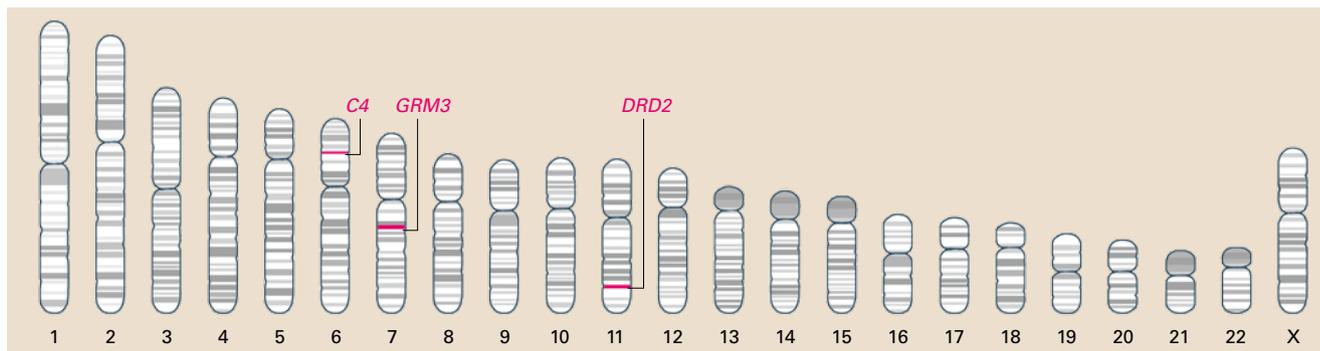
personalisierten Medizin, die gezielte Gentherapien für viele körperliche und seelische Leiden verspricht – auch für Schizophrenie. Umfangrei-

che Untersuchungen identifizierten zwar Genvariationen, die das Schizophrenierisiko erhöhen; neue Behandlungsformen stehen aber noch aus.



Der Zellkern des Menschen beherbergt 23 Chromosomenpaare, die aus langen DNA-Fäden bestehen. Die DNA-Bausteine, so genannte Nukleotide, bilden paarweise die Buchstaben des genetischen Kodes. Eine Nukleotidsequenz, die Informationen für die Herstellung eines Proteins liefert, heißt Gen; seine Varianten werden Allele genannt.

In manchen Genvarianten ist nur ein einziges Nukleotid verändert. Treten diese Einzelnukleotidpolymorphismen oder kurz SNPs (von englisch: single-nucleotide polymorphisms; rot) bei Erkrankten häufiger auf, können sie entweder selbst das Krankheitsrisiko erhöhen, oder sie weisen auf benachbarte mutierte Allele hin.



YOUSUN KOH, NACH EMILY COOPER MIT SNP-DATEN NACH RIPPKE, S.: BIOLOGICAL INSIGHTS FROM 108 SCHIZOPHRENIA-ASSOCIATED GENETIC LOCUS IN: NATURE 511, S. 421-427, 2014 / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2017

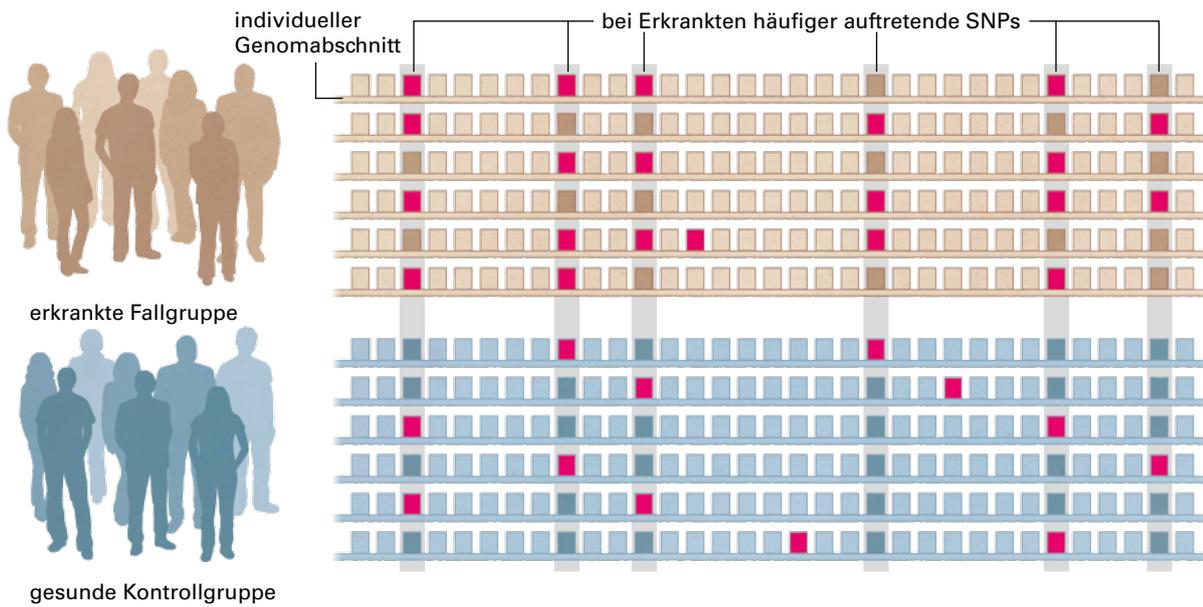
sondern um eine Gruppe von Störungen oder Symptomen handelt. »Das macht sie zu einem schwer zu treffenden Ziel für die Suche nach Genen.«

»Besessen von Symptombekämpfung«

Besonders skeptisch äußern sich Psychiater, Patientenvertreter sowie frühere Patienten. Der GWAS-Ansatz fokussierte einseitig auf die Entwicklung neuer Medikamente zur Symptomlinderung. »Die Besessenheit von der reinen Symptombekämpfung deckt sich nicht mit den Interessen der Patienten«, meint der Psychiater Jim van Os von der Universität Maastricht in den Niederlanden. Die Betroffenen wünschten sich vor allem ein produktives, sozial integriertes Leben – und das erfordere nicht unbedingt mehr Medikamente.

Van Os sowie immer mehr Patientenvertreter halten den Begriff »Schizophrenie« selbst für einen Teil des Problems; stigmatisiere er doch die Patienten, ohne richtig anzugeben, was ihnen fehlt. Tatsächlich haben mehrere asiatische Länder, darunter Japan, Südkorea und Singapur, die traditionelle Klassifikation ganz abgeschafft. Der japanische Ausdruck »Geistspaltungskrankheit« für Schizophrenie wurde 2002 durch »Integrationsstörung« ersetzt; in Korea spricht man inzwischen von »Abstimmungsstörung«.

Etlliche Forscher und Interessenvertreter kritisieren, die gängige Nomenklatur – sowie die Suche nach Genen – beschränke das Leiden auf eine Hirnerkrankung. »Wenn manche Menschen durch genetische Variationen dazu neigen, diese Erlebnisse zu haben, dann müssen wir dafür



Bei genomweiten Assoziationsstudien (GWAS) durchforsten Wissenschaftler die DNA von tausenden Personen, um mit aufwändigen statistischen Verfahren solche Gen-

varianten aufzuspüren, die bei Kranken etwas häufiger auftreten. Dabei interessieren sich die Forscher besonders für SNPs – Genversionen mit einem einzigen veränderten Baustein.

Eine GWAS eignet sich vor allem für komplexe Leiden, bei denen nicht eine einzelne Mutation, sondern viele verschiedene Genversionen zum Risiko beitragen.

Eine Schizophrenie-GWAS mit 37 000 Patienten und 113 000 Kontrollpersonen identifizierte 108 SNPs, die mit der Krankheit korrelierten – ein unmittelbares »Schizophrenie-Gen« fanden die Forscher allerdings nicht. Doch einige der Gene kodieren für Proteine, welche die Signalübertragung im Gehirn beeinflussen und somit an der Ausprägung von Schizophreniesymptomen zu tun haben könnten. Drei Gene fielen besonders auf:

C4 auf Chromosom 6: hilft beim Kappen von nicht mehr benötigten Synapsen. Ist das zum Immunsystem gehörende C4-Protein überaktiv, stützt es zu viele Nervenverbindungen – und trägt damit vielleicht zur Schizophrenie bei.

GRM3 auf Chromosom 7: beeinflusst die Signalübertragung durch den Neurotransmitter Glutamat. Mehrere SNPs dieses Gens werden mit Schizophrenie und anderen psychischen Störungen assoziiert.

DRD2 auf Chromosom 11: interagiert mit dem Neurotransmitter Dopamin. Am Dopaminrezeptor DRD2 setzen antipsychotische Medikamente an.

sorgen, dass ihre Umwelt so etwas nicht auslöst«, betont Jacqui Dillon, die das britische Hearing Voices Network leitet. Die Aktivistin, bei der als Jugendliche Schizophrenie diagnostiziert wurde und die noch heute Stimmen hört, ist davon überzeugt, die Schizophreniegenetik »ändert nichts an dem, was wir tun müssen, um zu verhindern, dass Menschen verrückt werden«.

Einige Forscher halten die Suche nach Genen überhaupt für einen Irrweg, da sie den Anteil der Umwelt sowie persönlicher und familiärer Risikofaktoren ignoriere. Gelegentlich wird sogar die vorwiegend aus Familien- und Zwillingsstudien abgeleitete Grundidee in Frage gestellt, Schizophrenie sei weitgehend »erblich«. Dabei liefert der komplexe Begriff Vererbung gar kein direktes Maß dafür, wie »genetisch« eine bestimmte Eigenschaft – etwa eine

formal diagnostizierte Schizophrenie – wirklich ist (siehe »Fragwürdige Erbllichkeit«, S. 41).

Die soziale Umwelt verursacht nach Überzeugung mancher Wissenschaftler ein deutlich größeres Schizophrenierisiko als die meisten der bisher identifizierten Gene. Epidemiologischen Studien zufolge reichen die Risikofaktoren vom Leben in städtischer Umgebung über Immigrantensstatus und Armut bis hin zu sexuellem Missbrauch.

So stellte ein israelisches Team 2016 fest, dass Holocaust-Überlebende häufiger an Schizophrenie leiden. Andere Forscher fanden ein erhöhtes Risiko bei Menschen, welche die bürgerkriegsähnlichen Unruhen in Nordirland durchlitten hatten. Wie all diese Umweltfaktoren zum Erkrankungsrisiko beitragen, bleibt allerdings unklar.

Offenbar müssen die Forscher ein breites Ursachenpektrum in Betracht ziehen. Manche Menschen sind wohl genetisch bedingt anfällig für geistige Störungen, aber vermutlich stoßen erst familiäre oder andere soziale Faktoren eine labile Person über die Schwelle zur ersten psychotischen Episode. Es gilt also herauszufinden, wie genetische und umweltbedingte Einflüsse dabei zusammenwirken. Selbst hartnäckige Verfechter der reinen Vererbungslehre geben zu, dass Umweltfaktoren eine gewisse Rolle spielen müssen. »Gene sind kein Schicksal«, gesteht McCarroll ein und verweist auf Zwillingsstudien: Wenn bei einem einseitigen Zwilling Schizophrenie vorliegt, leidet der andere nur in der Hälfte aller Fälle ebenfalls daran. Das ist ein deutliches Indiz dafür, wie wichtig nichtgenetische Einflüsse sein müssen. So ergab eine 2012 von Jim van Os und seinen Mitarbeitern veröffentlichte Metastudie, dass an psychotischen Symptomen leidende Patienten mit fast dreifach erhöhter Wahrscheinlichkeit traumatische Kindheitserlebnisse durchgestanden hatten. Mit solchen Zahlen kann kein bisher per GWAS identifiziertes genetisch bedingtes Risiko auch nur entfernt mithalten.

Genetische Studien und Umweltfaktoren für den Weg zu neuen Therapien

2014 zeigten Hannelore Ehrenreich und ihre Kollegen, wie die Kombination genetischer und umweltbedingter Daten neue Erkenntnisse zu liefern vermag. Das Team berichtete über 750 männliche Schizophreniepatienten in Deutschland, bei denen ausnahmsweise sowohl GWAS-Resultate als auch detaillierte Daten zur sozialen Umwelt vorlagen. Bei Schizophrenie entscheidet bekanntlich das Alter, in dem die Krankheit ausbricht, über deren weiteren Verlauf: Je früher sie beginnt, desto schlimmer wird sie. Wie die Forscher nun herausfanden, korrelierten Umweltfaktoren wie frühe Hirnschädigung, Kindheitstrauma, städtische Umgebung, Migrationshintergrund und vor allem Cannabiskonsum signifikant mit einem frühen Krankheitsbeginn: Patienten, auf die vier oder mehr dieser Faktoren zutrafen, erkrankten fast zehn Jahre früher als die von Umweltrisiken verschonten Fälle. Hingegen zeigten die aus den GWAS-Daten berechneten polygenen Risikowerte keinen erkennbaren Zusammenhang mit dem Zeitpunkt des Krankheitsbeginns.

Ehrenreich schließt daraus keineswegs, Gene seien irrelevant. Vielmehr scheinen »genetische Faktoren von einem Menschen zum nächsten so stark zu variieren, dass jeder aus einem anderen Grund krank wird«. Unterdessen untersuchen weitere Forscher im Rahmen der so genannten Epigenetik, ob Umweltstress Gene ein- und ausschalten vermag. Die GWAS-Forscher sollten nach Meinung von Ehrenreich und anderen Wissenschaftlern endlich beginnen, in ihre Studien möglichst viele Informationen einzubeziehen, um daraus ein statistisches Modell für das Zusammenwirken von Genen und Umwelt bei Schizophrenie zu entwickeln. »Es ist eine Schande, wie einige der finanziell und technisch aufwändigsten genetischen Studien Umweltdaten vernachlässigen«, meint der Psychiater Rudolf Uher von der kanadischen Dalhousie University.

Leider ist das Kombinieren von Epidemiologie und Genetik leichter gesagt als getan. »Umweltdaten zu sammeln, ist ungeheuer kostspielig, und über die Definition dieser Umweltvariablen besteht keineswegs Einigkeit«, mahnt Genetiker O'Donovan.

Die große Frage bleibt freilich, ob die Gensuche selbst unter Berücksichtigung der Umwelt letztlich zu neuen Therapien führen wird. Nach Meinung der meisten Experten dürfte das noch etliche Jahre dauern. Die Genetik habe »erste belastbare biologische Hinweise zum Verständnis der Schizophrenie geliefert«, erklärt der australische Genetiker Peter Visscher von der University of Queensland. »Noch lässt sich nicht sagen, ob diese Entdeckungen zu neuen Therapien führen – aber nichts spricht dagegen.«

Parallel zu genetischen Studien verfolgen Schizophrenieforscher viele andere Spuren. Sie suchen nach Biomarkern, also verräterischen Molekülen im Blut oder Auffälligkeiten in Hirnscans, die auf ein Krankheitsrisiko hindeuten. Das könnte zu einem früheren Behandlungsbeginn führen – was zahlreichen Untersuchungen zufolge den langfristigen Therapieerfolg steigert. Und da Kinder, deren Mutter während der Schwangerschaft an einer Infektion erkrankte, anscheinend häufiger schizophren werden (vermutlich weil das alarmierte mütterliche Immunsystem das Gehirn des Fötus schädigt), gelten auch entzündungshemmende Medikamente als viel versprechend.

Mehrere klinische Studien legen nahe, dass kognitive Verhaltenstherapie und andere psychosoziale Ansätze die Symptome und das Leiden der Patienten lindern. Obwohl diese Forschungsrichtung umstritten ist und bisher nur bescheidene Erfolge vorweisen kann, werden ihre Anhänger in Europa und den USA zunehmend anerkannt. In Großbritannien beispielsweise empfehlen die Gesundheitsbehörden die kognitive Verhaltenstherapie generell bei neu auftretenden Psychosen. »Die finanzielle Bevorzugung genetischer und pharmakologischer Forschung gegenüber psychosozialen Ansätzen muss korrigiert werden«, fordert der Neurologe Brian Koehler von der New York University.

Wegen der Komplexität des Leidens bleiben umfassende neue Therapien einstweilen Zukunftsmusik. Vielleicht erlauben es eines Tages Hirnscans oder andere diagnostische Tests, ein Schizophrenierisiko schon bei Jugendlichen zu erkennen. Dann könnten neue Medikamente und Psychotherapien den ersten psychotischen Ausbruch hinauszögern oder ganz verhindern. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Biologen und Soziologen aber erst einmal gemeinsam ein interdisziplinäres Profil der wohl kompliziertesten seelischen Erkrankung erarbeiten. ◀

QUELLEN

Balter, M.: Talking back to Madness. In: Science 343, S. 1190–1193, 2014

Schizophrenia Working Group of the Psychiatric Genomics Consortium: Biological Insights from 108 Schizophrenia-Associated Genetic Loci. In: Nature 511, S. 421–427, 2014

Sekar, A. et al.: Schizophrenia Risk from Complex Variation of Complement Component 4. In: Nature 530, S. 177–183, 2016

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM
40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Künstliche Intelligenz, Roboter und Deep Learning

Wann? 20. Juli 2018, 16.00–19.00 Uhr

Wo? Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Seminar mit Prof. Dr.-Ing. Tamim Asfour und Prof. Dr.-Ing. Rainer Stiefelhagen, beide vom Institut für Anthropomatik und Robotik am KIT. Erleben Sie bei einem Laborbesuch einen humanoiden Roboter!

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.

Tickets und Anmeldungen:

Spektrum.de/live

ELEKTROMOBILITÄT AUSGEBREMST DURCH ROHSTOFFMANGEL?

SERIE ELEKTROMOBILITÄT In den nächsten Jahrzehnten sollen weltweit hunderte Millionen E-Autos auf die Straßen kommen. Deren Antriebsbatterien benötigen gewaltige Menge an Rohstoffen wie Lithium und Kobalt. Hier könnte es zu Engpässen kommen. Batterierecycling sollte bei der zukünftigen Rohstoffversorgung daher eine zentrale Rolle spielen.

► Allem Anschein nach steht das Elektroauto vor dem großen Durchbruch. Entsprechend steigt der Bedarf an Technologiemetallen, um daraus die nötigen Antriebsbatterien herzustellen. Schon 2015 lösten etwa Lithium-Ionen-Batterien die Keramik- und Glasbranche als Hauptanwendungsgebiet für Lithium ab. Die Massenproduktion dieser Batterien bedarf großer Mengen an Schlüsselmaterialien, die sich nicht – oder nur bedingt – ersetzen lassen. Aber liegen überhaupt weltweit ausreichend Rohstoffe im Boden, um die Nachfrage der Autohersteller langfristig zu bedienen?

Neben der Verfügbarkeit spielen in der öffentlichen Debatte die ökologischen und sozialen Folgen der Roh-

stoffgewinnung eine immer stärkere Rolle. Denn die Grundstoffe leistungsfähiger Batterien stammen nicht selten aus Ländern, in denen niedrige Umweltstandards gelten; bisweilen befeuert ihre Förderung sogar Gewaltkonflikte. Auch um Imageschäden zu vermeiden, dürfte die Automobilindustrie daher ein großes Interesse daran haben, ausgediente Lithium-Ionen-Batterien so weit wie möglich zu recyceln und kritische Bestandteile wiederzuverwenden. In welchem Maße gelingt das bereits heute, und welchen Anteil an der Rohstoffversorgung kann Batterierecycling zukünftig realistisch abdecken?

Diese Fragen haben meine Kollegen und ich am Öko-Institut 2017 in der Studie »Strategien für die nachhaltige



Matthias Buchert leitet den Bereich Ressourcen & Mobilität am Darmstädter Öko-Institut, das Strategien für eine nachhaltige Zukunft entwickelt.

► spektrum.de/artikel/1567838

Rohstoffversorgung der Elektromobilität« zu beantworten versucht. Dabei haben wir uns auf Prognosen der Internationalen Energieagentur (IEA) dazu gestützt, wie sich die Technologien und die Verkaufszahlen von E-Fahrzeugen in den nächsten Jahrzehnten entwickeln werden. Die IEA-Prognosen für die Autobranche beruhen auf zwei denkbaren Klimaschutzszenarien: einem optimistischen, welches davon ausgeht, dass das Pariser Zwei-Grad-Ziel eingehalten wird (2°C-Szenario), sowie einem pessimistischen, das eine globale Erwärmung von vier Grad Celsius bis Ende des 21. Jahrhunderts annimmt (4°C-Szenario).

Die Erderwärmung auf vier Grad Celsius zu begrenzen, ist wenig ambitioniert und würde nur einen geringen technischen Fortschritt sowie lediglich moderate politische Maßnahmen erfordern. Für viele Regionen der Welt wären die Folgen eines Temperaturanstiegs, der deutlich über die Vereinbarungen der Weltklimakonferenz hinausgeht, verheerend. Das 4°C-Szenario gilt daher als nicht wünschenswert – kann angesichts des nach wie vor steigenden globalen Verbrauchs fossiler Brennstoffe jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Elektromobilität für den Klimaschutz

Wenn die mittlere Temperatur der Erde bis 2100 nicht um mehr als zwei Grad gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter ansteigen soll, sind hingegen ehrgeizige Schritte notwendig, etwa ein deutlicher Ausbau öffentlicher Transportmittel und weniger Individualverkehr. Gleichzeitig müssen leistungsfähige, elektrisch betriebene Autos, Lkws und Busse entwickelt werden. Erreicht werden könnte dies laut IEA, indem man zum Beispiel Kraftstoffsteuern erhöht und alle Subventionen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren streicht. Eine Kfz-Steuer, die an die Höhe der CO₂-Emission gekoppelt ist, könnte die für einen elektrifizierten Verkehr notwendige Infrastruktur und zusätzliche Forschung im Bereich E-Mobilität finanzieren.

SERIE **Elektromobilität**

Teil 1: Mai 2018
Die Ökobilanz der E-Mobilität
Christopher Schrader

Energiespeicher für eine elektromobile Gesellschaft
Dominic Bresser

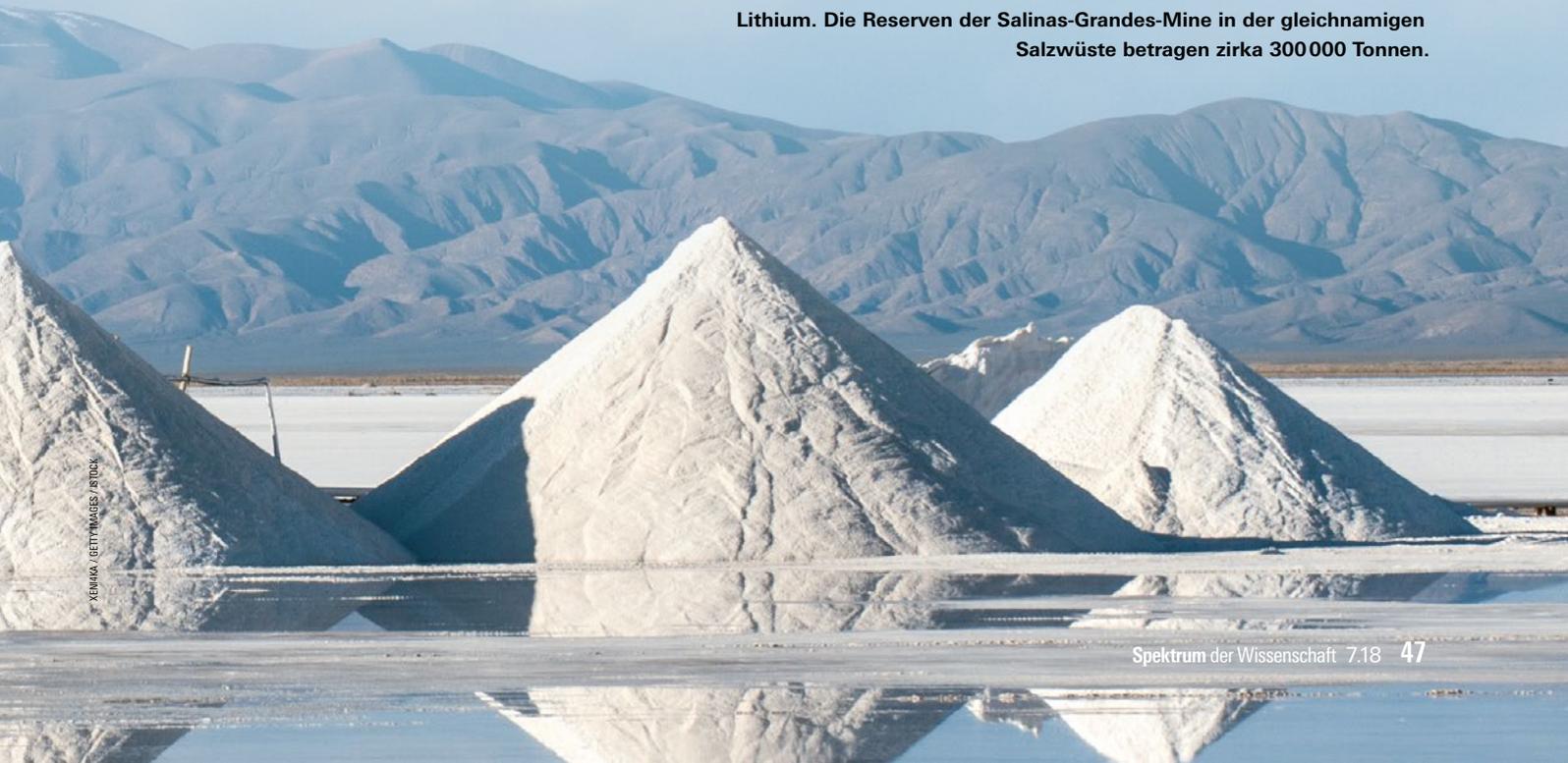
Teil 2: Juni 2018
Fahren unter Strom
Martin Doppelbauer

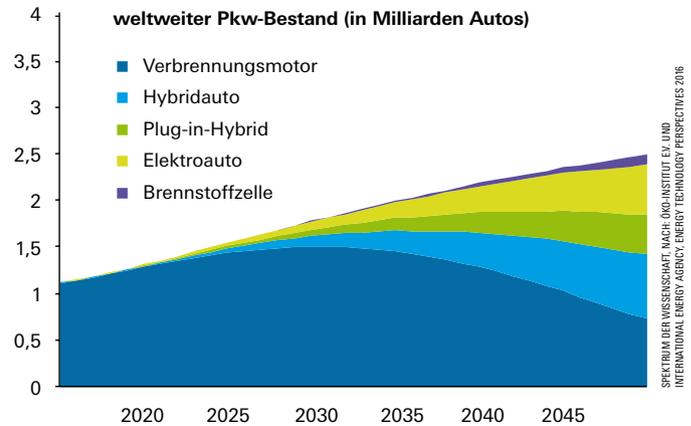
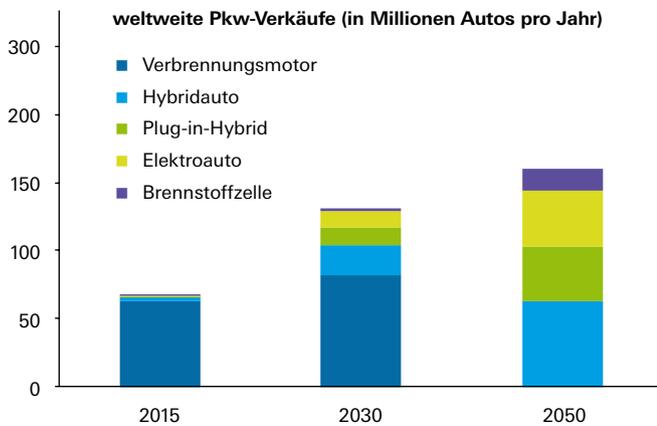
Teil 3: Juli 2018
Ausgebremst durch Rohstoffmangel?
Matthias Buchert

Wie würden sich diese Maßnahmen auf die Verkaufszahlen von konventionellen und elektrischen Fahrzeugen und damit auf den Bedarf an Lithium sowie anderen Batterierohstoffen auswirken? Im Jahr 2015 gelangten weltweit rund 66 Millionen Pkws neu auf die Straße, so dass der Gesamtbestand auf knapp 1,1 Milliarden stieg. Unter den Neuzulassungen waren zirka 2,6 Millionen Hybridautos, 220 000 so genannte Plug-in-Hybride, deren Batterien sowohl über den Motor als auch über das Stromnetz geladen werden können, und 330 000 reine E-Autos. Der Verkauf alternativer Antriebssysteme macht also derzeit nur fünf Prozent des Jahresumsatzes im Pkw-Sektor aus.

Bis 2030 verdoppeln sich im 2°C-Szenario die jährlichen Pkw-Verkäufe, so dass der Gesamtbestand auf rund 1,8 Milliarden klettert. Gleichzeitig erreicht die Flotte an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hier ihren Höhepunkt. Der jährliche Absatz von Verbrennern steigt nach dieser

Argentinien gehört zu den Hauptförderländern des Batterierohstoffs Lithium. Die Reserven der Salinas-Grandes-Mine in der gleichnamigen Salzwüste betragen zirka 300 000 Tonnen.





Prognose der Neuzulassungen von Pkws unter der Annahme ehrgeiziger Klimaschutzmaßnahmen. Will man die Erderwärmung bis 2100 auf zwei Grad begrenzen, müssen mehr Autos mit alternativen Antrieben auf die Straße.

Hochrechnung um 30 Prozent (plus 19 Millionen gegenüber 2015). Den deutlich größeren Anteil am erwarteten Verkaufszuwachs haben E-Autos, Plug-in-Hybride und konventionelle Hybridfahrzeuge, von denen 2030 etwa 47 Millionen pro Jahr vom Band rollen könnten – ein Plus von über 1400 Prozent. Dazu kommen noch rund eine Million Pkws, die auf Brennstoffzellen als Antriebstechnologie setzen. Insgesamt machen alternative Antriebe im 2°C-Szenario dann bereits 16 Prozent des weltweiten Bestands und 37 Prozent des Umsatzes aus.

Rechnet man die mutmaßlichen Klimaschutzmaßnahmen noch weiter in die Zukunft, werden Pkws mit Verbrennungsmotor um das Jahr 2050 überhaupt nicht mehr verkauft, und nur noch etwa jeder vierte weltweit wird ausschließlich mit Benzin oder Diesel unterwegs sein. Die

Anzahl der Neuzulassungen könnte bis Mitte des Jahrhunderts auf 160 Millionen pro Jahr steigen. Davon wären mehr als ein Drittel Hybride, je ein Viertel Plug-in-Hybride und ausschließlich batteriebetriebene Autos sowie rund ein Zehntel Brennstoffzellenfahrzeuge, so die Prognose unserer Studie. Der Gesamtbestand erreicht 2050 demnach rund 2,5 Milliarden Pkws.

Und wenn der Wandel im Mobilitätssektor nicht forciert wird und die Erderwärmung auf vier Grad zusteuert? Dann schlängeln sich bis 2050 fast drei Milliarden Autos durch das globale Straßennetz – die meisten davon angetrieben durch fossile Brennstoffe: Weniger als 30 Prozent setzen in der 4°C-Zukunft auf alternative Antriebssysteme, und nur konventionelle Hybride spielen mit zirka 20 Prozent aller Neuwagen eine größere Rolle auf dem Fahrzeugmarkt. E-Autos bleiben in diesem pessimistischen Szenario ein Nischenprodukt.

Der Preis bestimmt die Lithium- und Kobaltreserven

In der Debatte um eine mögliche Verknappung von Materialien, die für die Produktion von Batterien unverzichtbar sind, spielen zwei Elemente eine zentrale Rolle: Lithium und Kobalt. Lithium-Kobalt-Verbindungen dienen in Batterien als Elektrodenmaterial und Lithiumionen als Ladungsträger. Welche Mengen dieser Schlüsselrohstoffe lagern noch unter der Erde, und welcher Bedarf ergibt sich aus dem prognostizierten Absatz von E-Autos für die kommenden Jahrzehnte?

Der aktuelle Report des United States Geological Survey (USGS) zu mineralischen Rohstoffen beziffert die globalen Lithiumressourcen – die bekannten natürlichen Vorkommen in der Erdkruste – auf mehr als 53 Millionen Tonnen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten lassen sich davon gegenwärtig etwa 30 Prozent nutzen, also 16 Millionen Tonnen. Man spricht von den so genannten Reserven. Diese Menge ändert sich jedoch ständig: Steigt die Nachfrage und damit der Marktpreis, lohnt es sich, vormals unprofitable Vorkommen zu erschließen – und nach neuen zu suchen. Durch den zunehmenden Bedarf der Batterieindustrie sind die Lithiumreserven in den letzten Jahren stetig angewachsen.

2017 wurden weltweit rund 43 000 Tonnen Lithium abgebaut. Hauptförderländer sind Argentinien, Australien, Chile und China, die gleichzeitig über mehr als 95 Prozent

AUF EINEN BLICK KRITISCHE ROHSTOFFE FÜR ELEKTROAUTOS

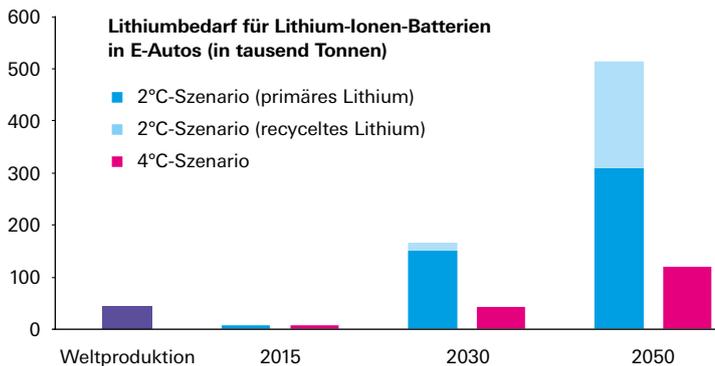
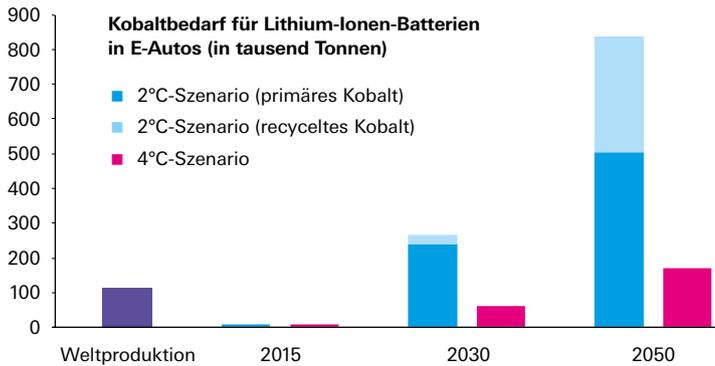
- 1 Für den flächendeckenden Umstieg vom Verbrenner auf batteriebetriebene Fahrzeuge werden erhebliche Mengen an Lithium, Kobalt und anderen Metallen benötigt.
- 2 Die geologischen Reserven von Schlüsselmaterialien für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien sind groß genug, um die globale Versorgung langfristig zu sichern. Temporäre Verknappungen bestimmter Rohstoffe sind jedoch möglich.
- 3 Ausgediente Antriebsbatterien werden schon heute teilweise recycelt. Ein Ausbau von Anlagen zur Rückgewinnung kritischer Elemente kann helfen, zukünftige Rohstoffengpässe zu vermeiden

der Reserven verfügen. Im 2°C-Szenario steigt der jährliche Bedarf bis 2030 auf knapp 160 000 Tonnen und erreicht 2050 gut 500 000 Tonnen – mehr als das Zehnfache der heute nachgefragten Menge. Eine erheblich geringere Elektrifizierung des Mobilitätssektors schlägt sich auch in einer deutlich schwächeren Zunahme der Lithiumnachfrage nieder: Bei vier Grad Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts beträgt sie 2050 nur etwa ein Fünftel verglichen mit dem optimistischeren Klimaszenario. Angesichts der großen Lithiumreserven – die noch zunehmen dürften – ist also trotz eines voraussichtlich stark ansteigenden Bedarfs der Autobranche langfristig nicht mit einer physischen Verknappung zu rechnen.

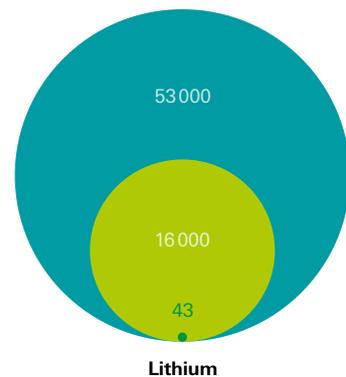
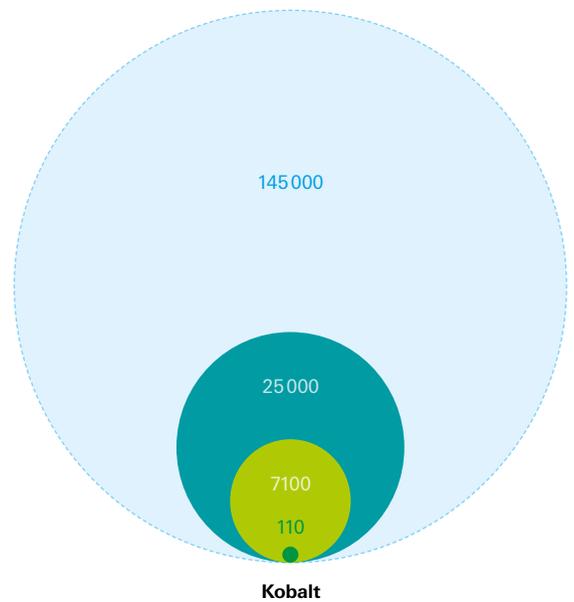
Wie sieht es mit Kobalt aus? Die globalen Ressourcen betragen laut USGS zirka 145 Millionen Tonnen. Davon lagern jedoch nur etwa 17 Prozent an Land, der Rest findet sich in so genannten Kobaltkrusten oder eingeschlossen in Manganknollen am Grund der Ozeane. Die terrestrischen Reserven belaufen sich auf gut sieben Millionen Tonnen, wohingegen sich der Abbau in der Tiefsee derzeit noch nicht rechnet. Das aber könnte sich bald ändern: Verschiedene Staaten und private Unternehmen investieren vermehrt in Machbarkeitsstudien zum Tiefseebergbau. Allerdings sind viele Fragen zu den Auswirkungen auf das empfindliche Ökosystem Tiefsee völlig ungeklärt. Der mit Abstand größte Kobaltproduzent ist die Demokratische

Republik Kongo. 2017 wurden hier 64 000 Tonnen geschürft, fast 60 Prozent der weltweiten Fördermenge. Im Kongo lagern auch knapp die Hälfte aller Reserven – gefolgt von Australien und Kuba. Sollte sich der E-Mobilitätssektor gemäß dem 2°C-Szenario entwickeln, könnte der Bedarf an Kobalt 2030 etwa 260 000 Tonnen und 2050 mehr als 800 000 Tonnen betragen. Im 4°C-Szenario erreicht dieser bis 2050 lediglich 165 000 Tonnen pro Jahr.

Vergleicht man Angebot und Nachfrage, ist auch bei Kobalt nicht davon auszugehen, dass es im Lauf des 21. Jahrhunderts knapp wird. Problematisch ist hingegen die Abhängigkeit des Weltmarkts von den Minen im Kongo, der in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder durch gewalttätige Konflikte geprägt war – die sich zum Teil aus den Rohstofflösen finanzieren. Die Batteriehersteller sind daher bemüht, den Kobaltanteil in Lithium-Ionen-Zellen zu verringern, etwa indem man das Element durch Nickel ersetzt. Nickel kommt deutlich häufiger in der



In den kommenden 30 Jahren könnte der Bedarf an Lithium und Kobalt stark zunehmen (oben). Um die Nachfrage zu decken, müsste die weltweite Fördermenge und die Recyclingquote deutlich steigen. Knapp werden die Rohstoffe jedoch so schnell nicht (links).



● Ressourcen inklusive Tiefsee
● globale Ressourcen
● globale Reserven
● Fördermenge pro Jahr
 (in tausend Tonnen; Stand: 2017)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: IUGO-INSTITUT E.V. UND U.S. GEOLOGICAL SURVEY, MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2018

Erdkruste vor und ist damit günstiger als Kobalt. Außerdem sind große Fördernationen wie Kanada oder Australien weniger konfliktträchtig.

Neben Lithium, Kobalt und Nickel gibt es eine Reihe weiterer Elemente, die relevant sind für die Batterien von E-Autos: Graphit, Platin und Mangan. Für diese nimmt der prognostizierte Bedarf in den kommenden Jahrzehnten jedoch weniger stark zu. Eine physische Verknappung ist hier ebenfalls nicht zu erwarten, zum einen weil erhebliche Reserven bestehen (Mangan), zum anderen weil die Materialien synthetisch hergestellt werden können (Graphit) oder bereits heute eine Recyclingquote von fast 30 Prozent erreichen (Platin).

Man kann davon ausgehen, dass der Bedarf an Rohstoffen, die für den Ausbau der Elektromobilität wichtig sind, auch in anderen Bereichen steigen wird, etwa in der Unterhaltungselektronik oder in der Produktion von stationären Energiespeichern. Dennoch gilt die globale Entwicklung des Mobilitätssektors, der die Nachfrage in absoluten Mengen dominiert, als maßgebend für die Rohstoffmärkte der Zukunft – vor allem in Bezug auf Lithium und Kobalt.

Während kein Grund zur Annahme besteht, dass die weltweiten Lithium- oder Kobaltreserven in wenigen Jahrzehnten zur Neige gehen werden, sind zeitweilige Engpässe durchaus möglich, sollte die Rohstoffnachfrage auf Grund eines plötzlich einsetzenden E-Auto-Booms stark zunehmen. Die Ursachen dafür könnten vielfältig sein: politische Krisen in wichtigen Förderregionen, monopolarisierte Versorgungsstrukturen oder langwierige Genehmigungsverfahren beim Erschließen neuer Minen. Auch die Rohstoffpreise würden dann in die Höhe schnellen und den Umstieg auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge zumindest verlangsamen. Das ließe sich vor allem dadurch verhindern, dass man Schlüsselmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterien nach deren Ausmusterung wiederverwertet.



Das Recycling ausgedienter Lithium-Ionen-Batterien aus E-Autos ist aufwändig, aber ökologisch sinnvoll. Es verringert den Druck, immer neue Minen zu erschließen.

In unseren Zukunftsszenarien gehen wir davon aus, dass Sekundärrohstoffe aus recycelten Fahrzeugbatterien 2030 zehn Prozent und 20 Jahre später 40 Prozent des weltweiten Bedarfs an Lithium und Kobalt im Mobilitätssektor abdecken. Die Recyclingbranche hält das angesichts des technischen Fortschritts bei der Wiederverwertung von Batterien für durchaus realistisch.

Beim Recycling von großen Antriebsbatterien aus E-Fahrzeugen erfolgt nach sorgfältiger Entladung zunächst eine manuelle Demontage, bei der man Gehäuse, Kabel, das elektronische Batterie-Management-System und andere Komponenten voneinander trennt. Teilweise können diese bereits existierenden Recyclinganlagen zugeführt werden, um Aluminium, Kupfer und weitere Metalle wiederzugewinnen. Die Zellen der Lithium-Ionen-Batterien, die mittels elektrochemischer Reaktionen Strom erzeugen, bedürfen einer gesonderten Aufbereitung unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen.

Die Rückgewinnung konzentrierte sich bislang vor allem auf das Recycling von Kupfer, Nickel und Kobalt.

Elektrische Busse, Lkws und Roller

Neben Pkws sind gegenwärtig auch andere Fahrzeugtypen überwiegend mit Verbrennungsmotoren unterwegs. Hinsichtlich ihrer Elektrifizierung gibt es jedoch große Unterschiede: So ist zum Beispiel heute bereits ein Drittel aller weltweit verkauften Busse batteriebetrieben (allerdings fahren diese nahezu ausschließlich in China). E-Lkws sucht man hingegen vergeblich – um schwere Lasten über große Distanzen zu transportieren, bedürfte es gewaltiger Batterien oder etwa einer Stromversorgung via Oberleitung entlang wichtiger

Strecken. Auch bei Krafträdern setzt man immer öfter auf Strom. 2015 kamen etwa 100 Millionen neu dazu, knapp jedes dritte davon war elektrisch. Vor allem China und Südostasien sind wichtige Absatzmärkte für E-Scooter, die meist noch mit Blei-Säure-Batterien bestückt sind.

Zusammen mit Pkws dominieren Roller und Motorräder den Absatz von Elektrofahrzeugen. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts, so die Prognose gemäß 2°C-Szenario, wird der Verkauf von Krafträdern auf 150 Millionen pro Jahr steigen – und keines wird mehr an die

Zapfsäule müssen. Zwar transportieren in dieser Zukunft auch mehr als 90 Prozent der Busse und gut zwei Drittel der Lkws Menschen beziehungsweise Waren mit alternativen Antriebssystemen. Doch in absoluten Zahlen betragen die vorhergesagten Neuzulassungen von Bussen und Lkws 2050 nur einen Bruchteil derer von Autos und Zweirädern. Wegen der Größe der in E-Autos verbauten Batterien (im Vergleich zu Zweirädern) gilt die Entwicklung des Pkw-Segments als entscheidend für den zukünftigen Rohstoffbedarf der Fahrzeugindustrie.



PICTURE ALLIANCE / FREUTERS / JONNY HOGG

Fast 60 Prozent der globalen Kobaltproduktion entfallen auf den Kongo. Oft arbeiten hier Kinder in den Minen. Zudem heizt die Rohstoffförderung gewalttätige Konflikte an.

Seit einigen Jahren betreibt etwa das Unternehmen Umicore im belgischen Hoboken eine so genannte pyrometallurgische Anlage zum Wiederverwerten von Lithium-Ionen- und Nickel-Metallhydrid-Batterien. In der Anlage werden pro Jahr bis zu 7000 Tonnen Altbatterien zu einer kupfer-, nickel- und kobaltreichen Legierung eingeschmolzen. In einer anderen Anlage in Belgien gewinnt man daraus elementares Kupfer sowie Kobalt- und Nickelsalze in Batteriequalität – mit einer Ausbeute von 95 Prozent der ursprünglich eingesetzten Rohstoffe.

Vom Abfallprodukt zum zweiten Batterieleben

Bei dem pyrometallurgischen Verfahren gelangte das Lithium aus den Batterien bis vor Kurzem vollständig in die anfallende Schlacke, ein Nebenprodukt, das man als Zusatz für Baustoffe verwendet. Das Lithium zurückzugewinnen, war auf Grund des niedrigen Weltmarktpreises nicht attraktiv. Seit 2017 extrahiert Umicore es aus der Schlacke, da die Nachfrage der Batterieindustrie deutlich angezogen und sich der Rohstoff deshalb in den letzten Jahren verteuert hat. Lithiumrecycling ist ein wichtiger Schritt, um den Druck, neue Minen zu erschließen, zu verringern und mögliche Engpässe zu vermeiden.

Im nordrhein-westfälischen Krefeld hat die Firma Accurec 2016 ebenfalls eine Recyclinganlage für Lithium-Ionen-Batterien errichtet. In einem kombinierten thermischen und mechanischen Prozess entstehen hier aus Altbatterien Aluminium, Kupfer und eine so genannte schwarze Masse – Graphit mit einem hohen Anteil an Lithium, Kobalt und anderen Metallen. Die wertvollen Rohstoffe werden in anderen pyro- oder hydrometallurgischen Anlagen extrahiert und können dann – im Sinne einer Kreislaufwirtschaft – für die Fertigung neuer Batterien verwendet werden.

Batterien zu recyceln, ist aufwändig und energieintensiv. Analysen zur Ökobilanz verschiedener Recyclingverfahren zeigen jedoch, dass die Vorteile hierbei überwiegen. Vergleicht man Energiebedarf, CO₂-Emissionen und chemische Rückstände, ist die Wiederverwertung von Lithium-Ionen-Batterien nachhaltiger, als neue Metalle aus der Erde zu schürfen. Gleichzeitig bieten alle Prozesse

noch Optimierungspotenzial, vor allem bei der Rückgewinnung von Lithiumverbindungen im industriellen Maßstab.

Für dieses Ziel könnte in Europa auch eine Novelle der EU-Batterierichtlinie sorgen. Gegenwärtig stuft diese Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge als Industriebatterien und innerhalb dieser Kategorie als »sonstige Batterien« ein. Damit ist für Altbatterien aus E-Autos lediglich eine Recyclingquote von 50 Prozent vorgeschrieben – ohne dass man dabei nach Werkstoffen unterscheidet. Das heißt, die Batteriehersteller können die Richtlinie selbst ohne Rückgewinnung kritischer Rohstoffe wie Lithium oder Kobalt problemlos einhalten. Da zu erwarten ist, dass Lithium-Ionen-Batterien im Mobilitätssektor zukünftig in großem Umfang zum Einsatz kommen werden, empfehlen zahlreiche Experten, sie in einer überarbeiteten Richtlinie gesondert aufzuführen – mit spezifischen und möglichst ehrgeizigen Sammel- und Recyclingvorgaben. So könnte die Versorgung mit Batterierohstoffen gesichert werden. Insbesondere für Lithium, das man bisher nur in begrenztem Umfang wiederverwertet, scheint eine verbindliche Recyclingquote sinnvoll.

Neben gesetzlichen Regelungen, die eine stärkere Nutzung von Sekundärrohstoffen fördern, bedarf es zudem des flächendeckenden Aufbaus einer Recyclinginfrastruktur, sprich Batteriesammelstellen und Wiederverwertungsanlagen. Darüber hinaus könnten Leasing- oder Pfandsysteme Anreize bieten, ausgediente Lithium-Ionen-Batterien dem Rohstoffkreislauf zuzuführen. Die hohen Sammelquoten herkömmlicher Blei-Säure-Batterien zeigen, dass eine Mehrfachnutzung von Lithium, Kobalt und anderen wertvollen Ressourcen in größerem Umfang möglich ist als bislang praktiziert. ◀

QUELLEN

Buchert, M. et al.: Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Öko-Institut e.V. im Auftrag der Agora Verkehrswende (Hg.), Berlin, 2017

Buchert, M., Sutter, J.: Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien (Stand 09/2016). Öko-Institut e.V. (Hg.), Berlin, 2016

Hagelücken, C.: Recycling of Li-Ion Batteries – Imperative for Sustainable E-Mobility. Advanced Automotive Battery Conference, Mainz 2018

International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2016 – Towards Sustainable Urban Energy Systems. 2016

U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries. 2018

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

www.spektrum.de/elektromobilitaet



JOSJE1 / STOCKADobe.COM

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

PHOSPHOR: TEUFLISCHES ELEMENT DES LEBENS

Phosphor hat eine schaurigspannende Geschichte – und viele Gesichter: Er ist lebensnotwendig, aber auch tödlich.



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.

inhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

► spektrum.de/artikel/1567840

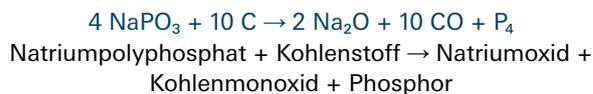
► Als Entdecker des Phosphors (Elementsymbol: P) gilt der Hamburger Alchemist Henning Brand. Wie viele andere dieser frühen Chemiker wollte er 1669 den Stein der Weisen herstellen und so seine Finanzen aufpolieren. Zwar war er durch Heirat zu Vermögen gekommen, hatte aber das gesamte Geld für seine Versuche ausgegeben. Mit dem Stein der Weisen, so glaubte man damals, könne man unedle Metalle in Gold verwandeln. Bei einem seiner Experimente hatte Brand mehr als 100 Liter menschlichen Urin so lange erhitzt, bis eine schwarze kohleartige Substanz und ein Salz entstanden waren. Dieses Gemisch überführte er in eine Retorte, ein mittelalterliches Destilliergefäß. Als er dieses auf ein Holzkohlefeuer setzte, erstrahlte das Innere des Gefäßes plötzlich in einem hellen Licht, begleitet von einer intensiven Rauchentwicklung.

Was ist bei Brands Versuch passiert? Im Körper des Menschen finden sich zahlreiche Phosphorverbindungen. So ist etwa Phosphat (PO_4^{3-}) ein wichtiger DNA-Baustein. Und das Molekül Adenosintriphosphat (ATP) dient in unseren Zellen als universeller Energieträger. Wir nehmen Phosphat mit der Nahrung auf und scheiden es über unseren Urin wieder aus. Dampft man Urin nun wie Brand über einem Feuer ein, fallen die darin enthaltenen Phosphate aus und bilden zum Beispiel das Salz Natriumammoniumhydrogenphosphat ($\text{NaNH}_4\text{HPO}_4$). Bei fortgesetztem Erhitzen reagiert es weiter zu Natriumpolyphosphat (NaPO_3)_n. Gleichzeitig zerfallen durch die starke

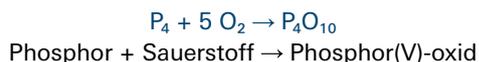


Weißer Phosphor verbrennt unter starker Rauchentwicklung. Er ist zudem hochreaktiv: In Pulverform entzündet er sich schon bei Raumtemperatur selbst. Um das zu vermeiden, bewahrt man ihn unter Wasser auf.

Wärmeentwicklung verschiedene organische Ausscheidungsprodukte zu Kohlenstoff (C). Damit hat man alle Zutaten für die Herstellung von weißem Phosphor, der gemäß folgender Reaktionsgleichung entsteht (aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Summenformel für Natriumpolyphosphat hier vereinfacht angegeben):



Weißer Phosphor (oft auch gelber Phosphor genannt) ist hochreaktiv, in Pulverform entzündet er sich bei Raumtemperatur von selbst. Auch größere Brocken reagieren schon bei etwa 50 Grad Celsius mit Luftsauerstoff. Um eine spontane Entzündung zu vermeiden, wird er in wassergefüllten Gefäßen aufbewahrt. Brand beobachtete bei seiner Suche nach dem Stein der Weisen zunächst, wie Phosphor zu Phosphor(V)-oxid verbrannte:



Er machte aber noch eine weitere, spektakuläre Entdeckung. Nachdem das intensive Glühen in der Retorte erloschen war, tropfte eine grünlich leuchtende Substanz aus dem Destilliergefäß: reiner Phosphor (der nicht oxidiert war). Dessen Name leitet sich vom griechischen Wort »phosphoros« ab und bedeutet »Lichtträger«. Weißer Phosphor ist sehr flüchtig und bildet als Dampf mit Luftsauerstoff leicht Phosphoroxid. Bei der Reaktion wird Licht emittiert – man spricht von Chemolumineszenz.

Brand war sich sicher, den Stein der Weisen gefunden zu haben, auch wenn seine Versuche scheiterten, unedle Metalle durch Kontakt mit der entdeckten Substanz in Gold zu verwandeln. Er hielt seine Entdeckung vorerst geheim. Später verkaufte er sein Wissen an den Kaufmann und Alchemisten Johann Daniel Krafft. Brand, Krafft und andere, die hinter das Geheimnis der Phosphorherstellung gekommen waren, versuchten daraus Profit zu schlagen. Sie führten den Stoff auf Jahrmärkten und an den Höfen der Fürsten vor und versuchten ihr Publikum auf äußerst bedenkliche Weise zu beeindrucken, wie dieses Zitat belegt:

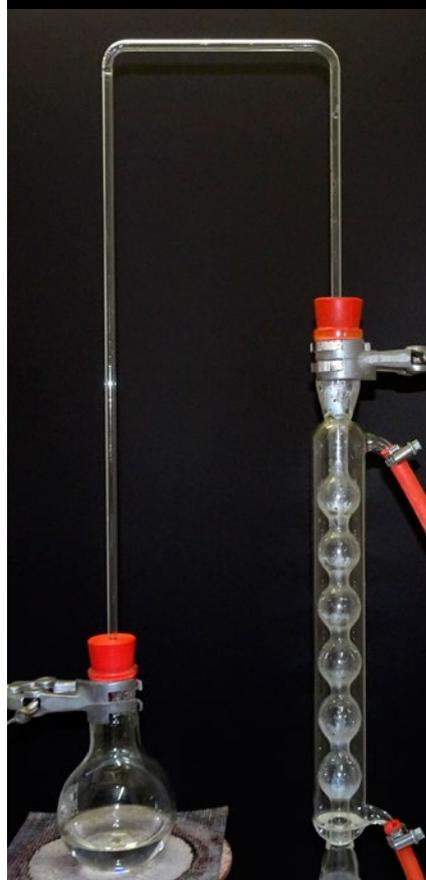
»Wenn man 10 Gran Phosphorus mit einer Unze Pomade nach und nach wohl vermischt, so bekommt man eine leuchtende Pomade. Reibt man mit dieser das Gesicht oder die Haare, so werden diese Orte im Dunkeln leuchten, und den Unwissenden in Verwunderung setzen.«

Die forensische Chemie überführt Giftmörder

Dies ist nicht zur Nachahmung empfohlen, denn weißer Phosphor ist hochgiftig. Schon 50 Milligramm können einen erwachsenen Menschen töten. Phosphor schädigt vor allem die Leber, bei einer Vergiftung treten nach einigen Tagen Symptome wie Gelbsucht auf. Auch Entzündungen und Blutungen im Magen-Darm-Trakt sowie Leberverfettung sind Anzeichen einer Phosphorvergiftung.

Die Phosphorsynthese aus Urin war aufwändig und Brands Ausbeute eher gering. 1769 entdeckte der Deutsche Carl Wilhelm Scheele, dass Knochen große Mengen des Elements enthalten, die sich leicht extrahieren lassen. Das erleichterte die Massenproduktion von weißem Phosphor, den man fortan etwa als Rattengift verwendete. Bisweilen wurde dieses zweckentfremdet, und vermutlich stehen nicht wenige ungeklärte Todesfälle aus damaliger Zeit in Zusammenhang mit einer Phosphorvergiftung.

Einen dieser Fälle sollte der Chemiker Eilhard Mitscherlich von der Berliner Friedrich-Wilhelms-Universität (heute Humboldt-Universität) 1854 im Auftrag des Königlich

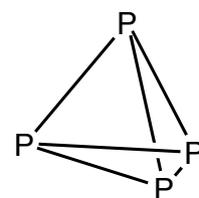


»Mitscherlich-Probe«: Der Rundkolben enthält eine Lösung aus weißem Phosphor und verdünnter Schwefelsäure (links). Erhitzt man diese, gelangt ein Phosphor-Wasserdampf-Gemisch in den Kugelkühler und kondensiert dort. Bei der Reaktion von Phosphor mit Luftsauerstoff zu Phosphoroxid entsteht ein grün leuchtender Ring (rechts).

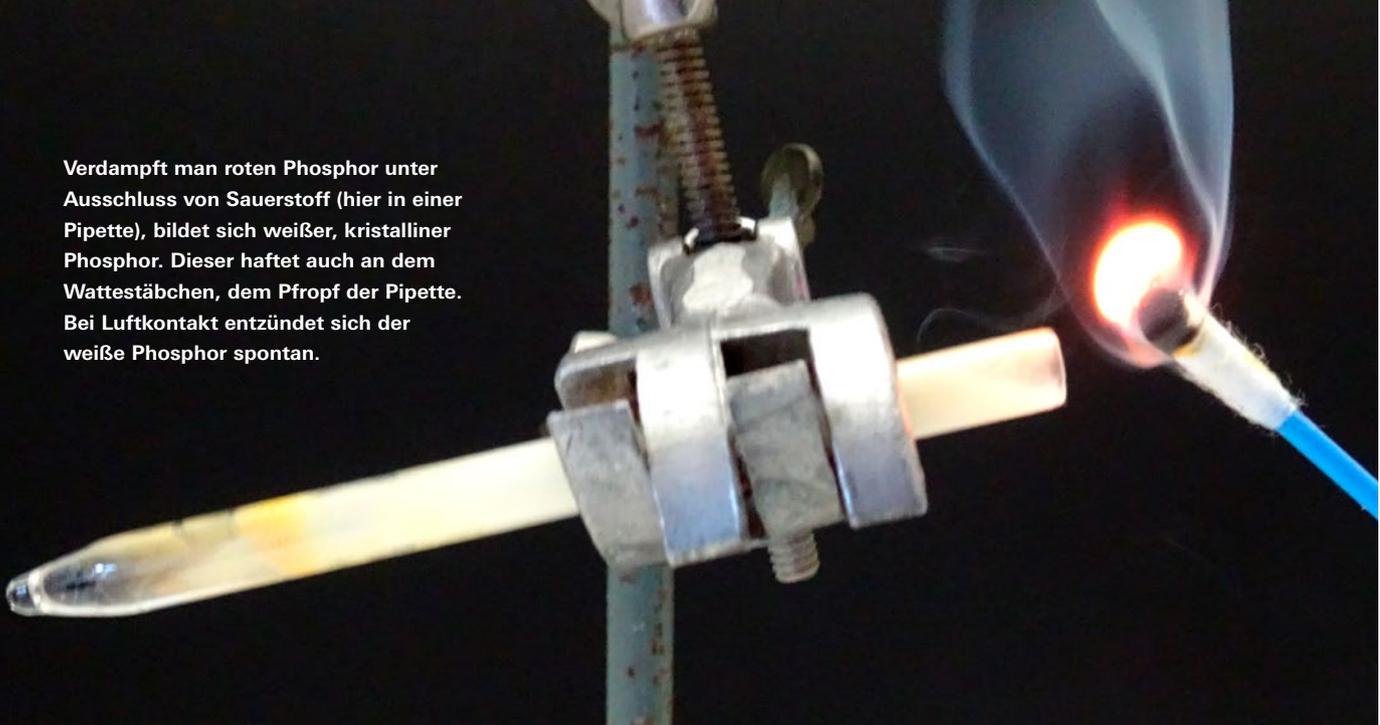
preussischen Medicinal-Collegiums untersuchen. Mitscherlich glaubte, dass Phosphor im wässrig-breiigen Mageninhalt nur sehr langsam oxidiert. Also brachte er diesen zum Sieden, in der Hoffnung, leuchtende Phosphordämpfe zu erzeugen und das Gift so nachzuweisen. Den Versuchsaufbau beschrieb Mitscherlich 1855 in seinem Aufsatz »Methode zur Entdeckung des Phosphors bei Vergiftungen« für die Zeitschrift »Journal für Praktische Chemie«:

»Das empfindlichste Mittel, Phosphor zu entdecken, besteht darin, dass man die verdächtige Substanz [...] mit etwas Schwefelsäure und der nöthigen Menge Wasser versetzt und in einem Kolben der Destillation unterwirft; mit dem Kolben bringt man ein Entbindungsrohr in Verbindung, und dieses mit einem gläsernen Kühlrohr [...], in diesem findet ein aufsteigender Strom von kaltem Wasser statt, wodurch die in das Rohr einströmenden Wasserdämpfe abgekühlt werden.« Wurde der Tote tatsächlich mit Phosphor umgebracht, könne man Folgendes beob-

Im weißen Phosphor sind die Atome (P) tetraedrisch angeordnet (rechts). Die Molekülstruktur der roten Variante (Modifikation) ist hingegen amorph und bildet kein regelmäßiges Muster.



Verdampft man roten Phosphor unter Ausschluss von Sauerstoff (hier in einer Pipette), bildet sich weißer, kristalliner Phosphor. Dieser haftet auch an dem Wattestäbchen, dem Pfropf der Pipette. Bei Luftkontakt entzündet sich der weiße Phosphor spontan.



MATTHIAS DUCCI

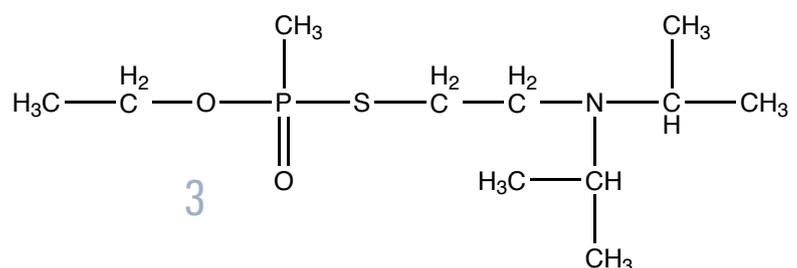
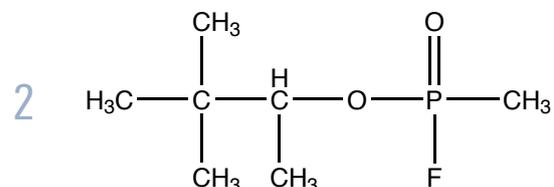
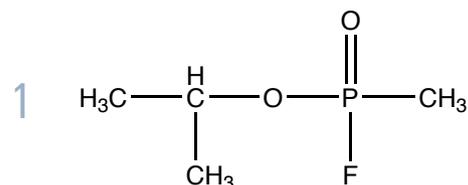
achten, so Mitscherlich weiter: »Da, wo die Wasserdämpfe oben in den abgekühlten Theil des Kühlrohrs einströmen, bemerkt man im Dunkeln fortdauernd das deutlichste Leuchten, gewöhnlich einen leuchtenden Ring.« Dieser Phosphornachweis – bekannt als »Mitscherlich-Probe« – lässt sich unter einem Laborabzug einfach demonstrieren (siehe Bild S. 53 oben).

In der chemischen Forensik half die Methode im 19. und 20. Jahrhundert zahlreiche Morde aufzuklären, da sie erlaubt, Spuren von Phosphor noch lange nach dem Tod festzustellen. So auch im Fall von Mary Elizabeth Wilson, die Mitte der 1950er Jahre als »Lustige Witwe von Windy Nook« in der britischen Presse für Schlagzeilen sorgte. Innerhalb von nur drei Jahren hatte Wilson vier tote Ehemänner zu beklagen, deren Ableben sie im Dorf mit morbide-memorischem Humor kommentierte. Die Polizei wurde auf sie aufmerksam und ordnete an, die Leichen ihrer zwei ersten Partner zu exhumieren. Ein Gerichtsmediziner erkannte bei beiden Toten eine Leberverfettung und konnte Phosphor im Gewebe nachweisen. Wilson wurde daraufhin wegen Doppelmordes zum Tode verurteilt (die Strafe wurde später in lebenslange Haft umgewandelt). Die Tatwaffe: phosphorhaltiges Insektengift, dem wahrscheinlich auch die Ehemänner drei und vier zum Opfer fielen.

Ab 1835 machte man sich eine weitere Eigenschaft von Phosphor zu Nutze: seine leichte Entflammbarkeit. Damit eignete sich das Element für die industrielle Herstellung von Zündhölzern. Die Köpfe der Hölzer enthielten neben Phosphor brennbaren Schwefel und Kaliumchlorat (KClO_3) als Oxidationsmittel, dazu weitere Inhaltsstoffe wie Gummi oder Kreide. Durch Reiben auf einer beliebigen Fläche entzündete sich das Streichholz – manchmal geschah das

auch spontan in der warmen Hosentasche. Im Jahr 1848 entdeckte Anton von Schrötter etwas, was Zündhölzer deutlich sicherer machte: Erhitzt man weißen Phosphor unter Luftabschluss, wird daraus roter Phosphor, der weder ungewollt in Flammen aufgeht noch giftig ist.

Die beiden Phosphormodifikationen sind unterschiedlich reaktiv, weil ihre Atome unterschiedlich angeordnet sind. Das Phänomen findet man etwa auch bei Diamant und Graphit – Kohlenstoffmodifikationen mit völlig verschiedenen Härten. Während die Atome im weißen Phosphor Tetraeder (P_4 -Einheiten) bilden, ist roter Phosphor amorph, sprich, die Atome formen keine geordneten Strukturen, sondern unregelmäßige Muster. Inzwischen sind weitere Modifikationen bekannt, zum Beispiel



Tödliche Organophosphate: 1939 entdeckten deutsche Chemiker durch Zufall das Nervengift Sarin (1). Die C-Waffen-Forschung der Nazis lieferte toxisches Soman (2), im Kalten Krieg wurde VX (3) synthetisiert.

MATTHIAS DUCCI

schwarzer und violetter Phosphor sowie die erst 2004 von deutschen Forschern entdeckten Phosphor-Nanostäbchen.

In einem einfachen und gleichzeitig eindrucksvollen Experiment – das jedoch nur erfahrene Chemielaboranten durchführen sollten – kann man roten Phosphor wieder in weißen verwandeln (siehe Bild links oben). Für den Versuch brechen wir die Spitze einer Tropfpipette ab und schmelzen das Glas an der Bruchstelle mit Hilfe eines Bunsenbrenners zu. Nachdem das Glas abgekühlt ist, geben wir eine Spatelspitze roten Phosphor in die Pipette und verdrängen die Luft daraus mit einem nicht brennbaren Kältespray. Anschließend führen wir ein Wattestäbchen so ein, dass der Abstand zum Phosphor etwa zwei Zentimeter beträgt. Nun erhitzen wir die Probe: Der Phosphor verdampft und bildet P_4 -Moleküle. Diese kristallisieren in den kälteren Bereichen der Pipette und auf dem Wattestäbchen als feiner, weißer Phosphor (Chemiker sprechen von Resublimation, wenn ein Stoff direkt von der Gasphase in einen Feststoff übergeht). Das Kältespray verhindert, dass der weiße Phosphor mit dem Luftsauerstoff reagiert. Ziehen wir das Wattestäbchen jedoch aus der Pipette heraus, entzündet er sich.

Phosphor als Massenvernichtungswaffe

Die niedrige Entzündungstemperatur und die starke Rauchentwicklung beim Verbrennen machten weißen Phosphor auch für militärische Zwecke interessant. So erzeugte man damit im Ersten Weltkrieg Nebelwände, um Truppenbewegungen zu verbergen. Im Zweiten Weltkrieg füllte man in England Millionen von Flaschen mit Benzol und Phosphor – im Fall einer deutschen Invasion hätte sich die Zivilbevölkerung mit diesen Molotowcocktails verteidigen sollen. Für schwere Verwüstungen und großes Leid sorgten Phosphorbomben, die die Alliierten etwa über Hamburg abwarfen. Bei der Operation Gomorrah fielen Ende Juli 1943 – neben hunderttausenden Magnesiumbrandsätzen und Sprengbomben – insgesamt 1900 Tonnen an Phosphorbomben auf die Hansestadt. Der dadurch entfachte Feuersturm kostete 40 000 Menschen das Leben.

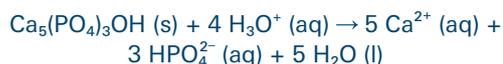
1939 entdeckten die deutschen Chemiker Schrader, Ambos, Ritter und van der Linde auf der Suche nach neuen Insektiziden eine organische Phosphorverbindung, die giftiger war als alles, was man bis dahin synthetisiert hatte: das Giftgas Sarin. War Sarin noch ein Zufallsfund, brachte gezielte Chemiewaffenforschung der Nazis ein noch tödlicheres phosphorhaltiges Molekül hervor: das Nervengift Soman. Obwohl Hitler die Kampfstoffe in großem Maßstab herstellen ließ, setzte er sie nie ein. Im Kalten Krieg produzierten sowohl die USA als auch die Sowjetunion große Mengen hochtoxischer Organophosphate, die unlängst wieder Schlagzielen machten: die Chemiewaffen VR und VX sowie jene der Nowitschok-Gruppe. 2017 wurde Kim Jong-nam, der Halbbruder des nordkoreanischen Diktators Kim Jong-un, mit VX vergiftet. Und es gibt Hinweise darauf, dass im März 2018 mit Nowitschok ein Anschlag auf den russischen Ex-Doppelagenten Sergei Skripal verübt wurde.

Kalziumphosphat macht Knochen hart. Aus diesem weichen Hühnerknochen wurde es mit Zitronensäure vollständig herausgelöst.



Zwar kann Phosphor tödlich sein, doch ohne das Element gäbe es auch kein Leben. Der Körper eines ausgewachsenen Menschen enthält zirka 800 bis 1000 Gramm Phosphor, den Großteil davon in den Knochen in Form von Phosphaten. Das folgende Experiment zeigt, welche wichtige Funktion Phosphat für das menschliche Skelett hat. Jeder kann den Versuch bedenkenlos zu Hause nachmachen: Wir nehmen einen dünnen Hühnerknochen und tauchen diesen in eine Entkalkerlösung auf Zitronensäurebasis. Ein Stein dient dabei als Beschwerer. Nach zwei Tagen nehmen wir den Knochen aus der Lösung und spülen ihn mit Leitungswasser ab. Er hat nun eine dunkle Farbe angenommen. Die überraschendste Veränderung aber ist: Der Knochen ist weich und biegsam, so sehr, dass man ihn verknoten kann (siehe Bild oben).

Woher rührt diese Elastizität? Ein Knochen besteht zu 40 Prozent aus Hydroxylapatit, einem Kalziumphosphat, das in Gegenwart von Säuren lösliches Kalziumhydrogenphosphat bildet (»s«, »aq« und »l« stehen für »fest«, »in Wasser gelöst« und »flüssig«):



Hydroxylapatit + Oxoniumion → Kalziumion + Hydrogenphosphation + Wassermolekül

Zurück bleiben nach dem Säurebad lediglich so genannte Kollagene, Strukturproteine, die optisch einen intakten Knochen vortäuschen. Das Experiment verdeutlicht, warum Phosphat neben dem Vorhandensein in DNA und ATP lebenswichtig ist und wir es mit der Nahrung ständig zu uns nehmen müssen. Der Biochemiker und Sciencefiction-Autor Isaac Asimov schrieb einst über die Bedeutung des Phosphors: »Lebewesen können sich vermehren, bis der Phosphor vollständig verbraucht ist. Unerbittlich kommt dann das Ende und niemand kann es verhindern.« ◀

QUELLEN

Asimov, I.: Asimov on Chemistry. Anchor Books, London 1975

Emsley, J.: Phosphor – ein Element auf Leben und Tod. Wiley-VCH, Weinheim 2001

Jansen, W., Ducci, M.: Phosphor: Element des Lebens – Element des Todes. In: CHEMKON 13/3, S. 133–142, 2006

Mitscherlich, E.: Methode zur Entdeckung des Phosphors bei Vergiftungen. In: Journal für Praktische Chemie 66, S. 238–244, 1855

PLANETOLOGIE EIN ROBOTER- GEOLOGE FÜR MARS

Der NASA-Rover Curiosity erkundet seit seiner Landung 2012 die klimatische Vergangenheit des Roten Planeten. Er hat bereits wichtige Erkenntnisse über eine Zeit geliefert, in der fließendes Wasser für prinzipiell lebensfreundliche Bedingungen gesorgt hat.



Emily Lakdawalla ist Geologin und Redakteurin bei The Planetary Society, einer US-Organisation zur Förderung der Sonnensystemforschung. 2018 erschien ihr Buch »The Design and Engineering of Curiosity« über die Technik des Marsrovers.

» spektrum.de/artikel/1567842



Gelegentlich schießt der Rover Selbstporträts mit seiner an einem langen Arm angebrachten, hochauflösenden Kamera. Nach dem Zusammenfügen der zahlreichen Einzelbilder erscheint der Arm selbst wie abgeschnitten. Dieses Foto entstand am 1065. Marstag des Rovers (5. August 2015) am Fuß des Kraterbergs.

AUF EINEN BLICK ENTDECKUNGSTOUR IM FELSENMEER

- 1** Im August 2012 landete der Rover Curiosity in einem Krater auf dem Mars. Seither hat das fahrbare Laboratorium mehr als 18 Kilometer zurückgelegt und den Gesteinsuntergrund ausgekundschaftet.
- 2** Mit Bildern, Bohrungen und chemischen Analysen rekonstruieren die Missionswissenschaftler die Bedingungen der Zeit vor etwa 3,5 Milliarden Jahren, als auf dem Mars Wasser floss.
- 3** Offenbar existierte lange genug eine feuchte und chemisch stabile Umgebung, um grundsätzlich Leben zu ermöglichen. Der Rover kann jedoch nicht direkt nach etwaigen biologischen Spuren suchen.



Das Mars Science Laboratory der US-Raumfahrtbehörde NASA ist wohl das am raffiniertesten konstruierte Gerät, das jemals die Umlaufbahn der Erde verlassen hat. Im August 2012 landete der besser unter dem Namen Curiosity bekannte Rover im weitläufigen Krater Gale auf dem Mars. Seither hat er eine mehr als 18 Kilometer lange Route erkundet. Er führt 17 Kameras, mehrere Spektrometer, verschiedene Wettermessgeräte und zwei Miniaturlaboratorien mit sich. Die zentrale Frage der Mission: Eigneten sich die Bedingungen auf dem Mars jemals für Leben?

Das setzt erstens flüssiges Wasser als Lösungsmittel für chemische Reaktionen voraus, zweitens Energiequellen sowie organische Verbindungen und drittens eine gewisse Stabilität über einen längeren Zeitraum, damit die entscheidenden Prozesse ungestört ablaufen können. Dafür darf das Wasser weder zu sauer noch zu salzhaltig sein. Außerdem sollte eine dicke Atmosphäre oder ein Magnetfeld die Oberfläche vor schädlicher Strahlung abschirmen.

Bereits vor dem Missionsbeginn waren Geochemiker optimistisch, dass der frühe Mars all diese Anforderungen erfüllt hat. Endgültige Beweise für das einstige Vorhandensein derart günstiger Umweltbedingungen hatten sie in den ältesten Gesteinen des Roten Planeten erwartet. Besonders interessant sind Tonminerale. Satelliten in Marsumlaufbahnen hatten zuvor Hinweise auf solche feinstkörnigen Stoffe gefunden. Diese dürften durch Verwitterung aus Vulkangesteinen hervorgegangen sein, die von neutralem oder alkalischem Wasser durchtränkt waren. In einem solchen Milieu hätte mikrobielles Leben entstehen können. Die Missionsplaner hofften darüber hinaus auf Sedimente, in denen vielleicht organische Moleküle konserviert geblieben sind.

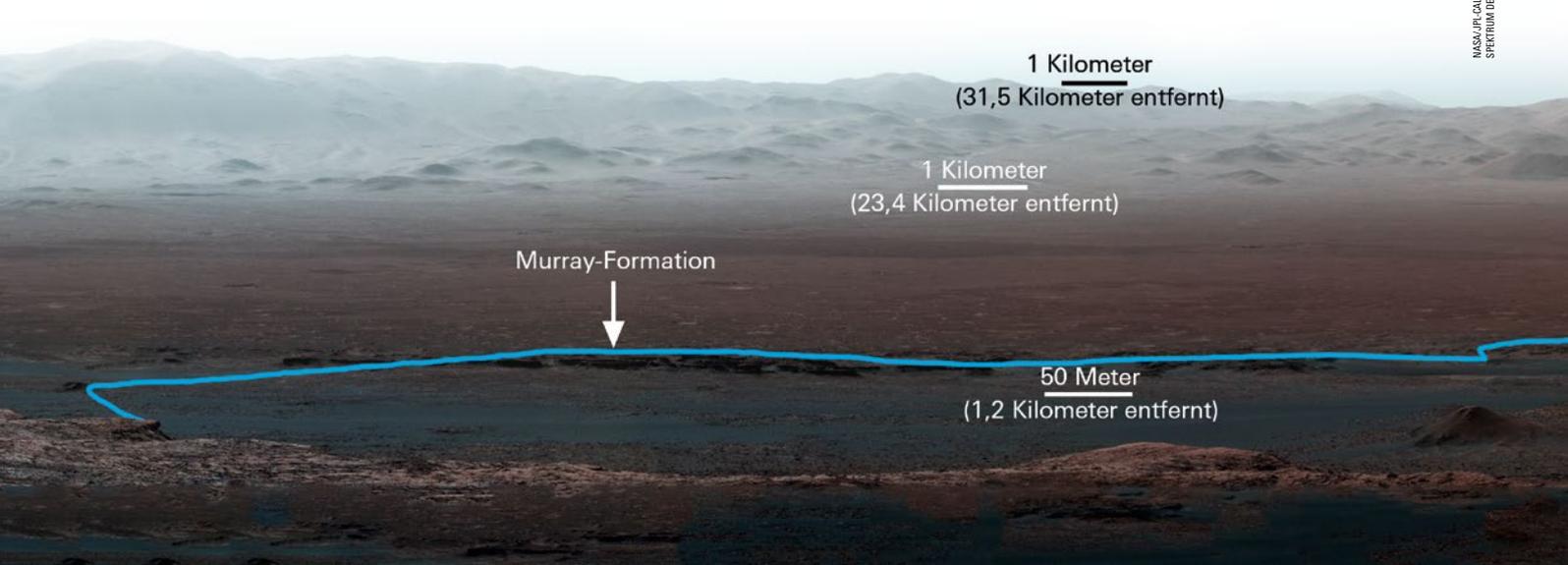
Vom höher gelegenen Vera Rubin Ridge aus hat der Rover nach 18 Kilometern Fahrt ein Panorama seiner bisherigen Route angefertigt. Auf dem Bild ist unter anderem die (relativ zur Aufnahmehöhe) 327 Meter tiefer gelegene Landestelle zu sehen. Fast alle Berge am Horizont gehören zum zwei Kilometer hohen Rand des Kraters Gale. Durch die dünne Marsatmosphäre sind hier selbst weit entfernte Objekte besser sichtbar, als wir von irdischen Aufnahmen gewohnt sind; die Skalen geben Längen in verschiedenen Abständen an.

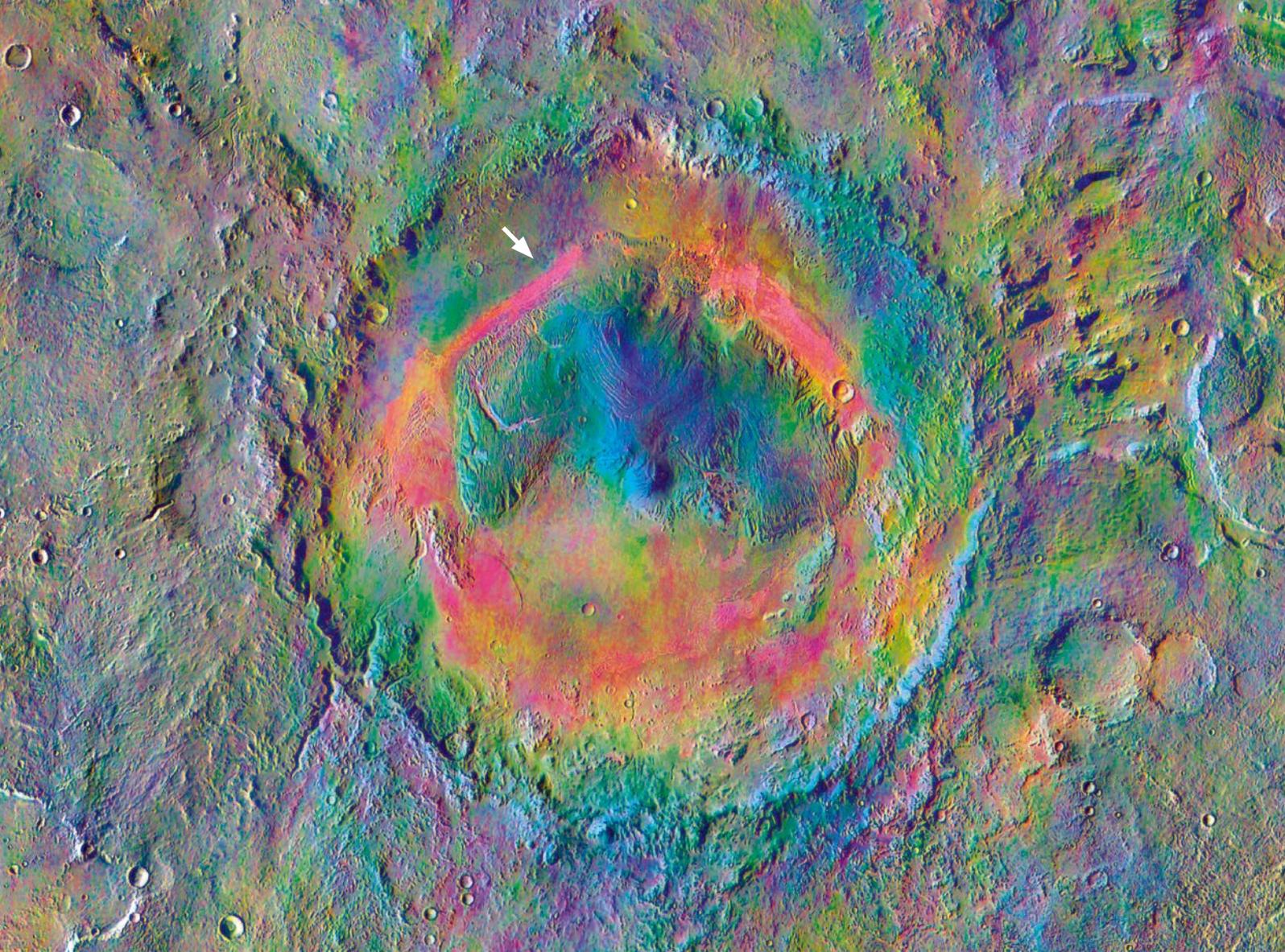
Der um vier Kilometer eingesenkte Gale-Krater (siehe Bild rechts) bot sich als Landeplatz besonders an. Er ist eines der tiefsten Becken auf dem Roten Planeten und liegt unmittelbar südlich des Marsäquators an der Grenze zwischen dem südlichen Hochland und dem nördlichen Flachland. Satellitenbilder hatten Hinweise auf einst vom Rand hinunterfließendes Wasser geliefert, das Schwemmfächer abgelagerte. Im Zentrum des Kraters ragt ein fünf Kilometer hoher Berg aus geschichteten Sedimenten auf. Sein offizieller Name lautet Aeolis Mons; das Team der NASA nennt ihn Mount Sharp nach dem kalifornischen Geologen Robert Sharp (1911–2004). Der Mars Reconnaissance Orbiter der NASA hat im Absorptionsspektrum der untersten Gesteinsschichten des Bergs Spektrallinien von Tonmineralen, Sulfaten und dem Eisenoxid Hämatit registriert. Sie alle bilden sich in feuchter Umgebung. Es handelt sich hierbei um die mächtigsten der bisher auf dem Mars gefundenen Sedimentgesteine. Sie sind die Überbleibsel mehrerer Milieus, in denen Leben möglich gewesen sein könnte. Dabei wurden die Bedingungen vom Fuß des Bergs nach oben hin immer trockener. Curiosity sollte diese Gesteine erreichen.

Ein Umweg für die erste große Entdeckung

Um auf Nummer sicher zu gehen, ließ das NASA-Team den Rover auf dem flachen Kraterboden nördlich des Bergs landen, acht Kilometer nordöstlich der zu erkundenden Ziele. Dazwischen lag eine buckelige Ebene mit weniger spannenden Felsen und Böden. Anschließend würde der Weg über einen riskanteren Streifen aktiver Sanddünen führen.

In der Nähe der Landestelle lag ein Bereich mit hellen Gesteinen, Yellowknife Bay genannt. Hier handelt es sich anscheinend um das Ende eines Sedimentfächers, den von Nordwesten in den Krater strömendes Wasser abgelagert hatte. Obwohl die Marssatelliten in der Gesteinsformation keine Tonminerale erkannt hatten, hoffte das NASA-Team, hier feinkörnige, in stehendem Wasser abgesunkene Verbindungen zu finden. Die Yellowknife Bay befand sich allerdings in entgegengesetzter Richtung zur geplanten Route des Rovers. Trotzdem ergriffen die Forscher die Chance, bereits hier einige Missionsziele zu erfüllen. Sie beschlossen, zuerst in Richtung Osten anstatt nach Südwesten zu fahren. Zunächst traf Curiosity dort vor allem isolierte Felsblöcke an. An einigen Stellen ragte





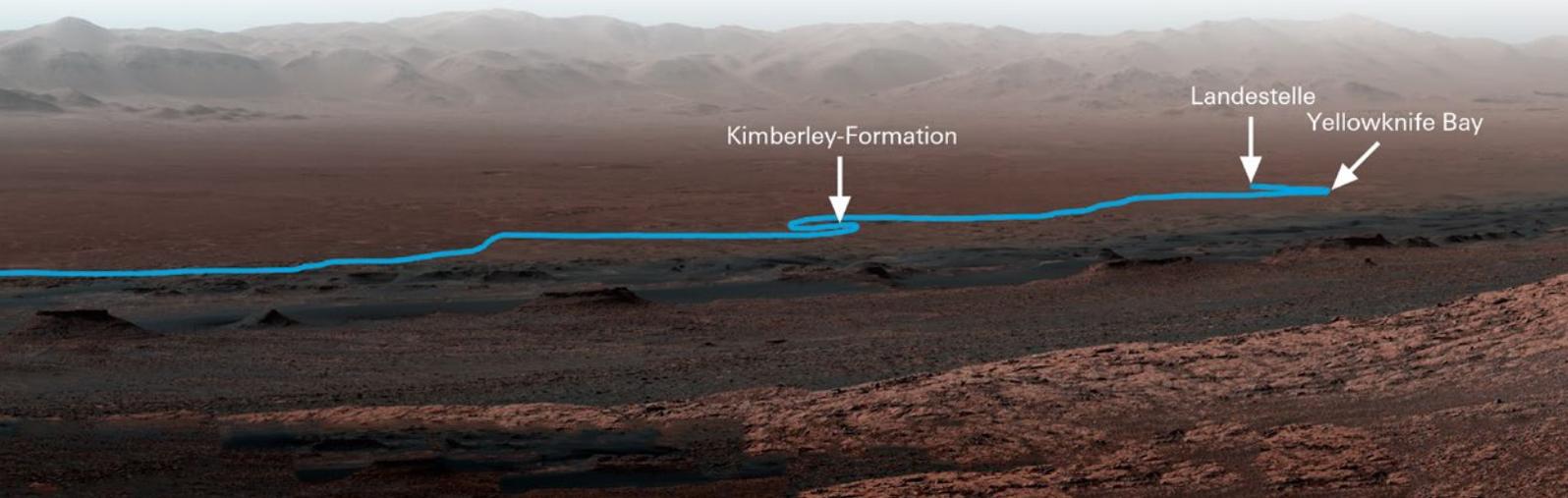
NASA/JPL-CALTECH/ASU

aber auch anstehendes Gestein aus dem Untergrund hervor. Speziell ein Sediment-Konglomerat begeisterte die Geologen. Es bestand aus locker miteinander verbundenen Geröllbrocken, die offenbar durch schnell fließendes, 10 bis 100 Zentimeter tiefes Wasser den Kraterhang hinabtransportiert worden waren.

Als Curiosity sich der Yellowknife Bay näherte, betrat er ein geologisches Wunderland. An einem Ort fand er schräg geschichtete, feinkörnige Sandsteine – Teile eines Schwemmfächers und somit Zeugen sedimentreicher

Mit Instrumenten an Bord von Satelliten schließen Wissenschaftler auf die Zusammensetzung des Marsbodens. Diese Falschfarbenaufnahme, die der NASA-Orbiter Mars Odyssey von dem Krater Gale machte, kodiert beispielsweise durch Wind verwehten Sand als rosa oder olivinreichen Basalt als violett. Solche Bilder haben den Missionsplanern geholfen, interessante Ziele auszuwählen. Die Landestelle von Curiosity befindet sich nordwestlich des zentralen Bergs (Pfeil). Der gesamte Krater hat einen Durchmesser von etwa 150 Kilometern.

NASA/JPL-CALTECH/AMSS-BEARBEITUNG:
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Fluten. Anderswo gab es ein dunkles Material unklarer, vermutlich vulkanischer oder sedimentärer Herkunft. Und grober Sandstein enthielt gerundete Körner aus verschiedenen Mineralen, die wohl von Stellen in den Ebenen außerhalb des Kraters stammten und dann gemeinsam in das Becken transportiert und dort abgelagert wurden.

Schließlich untersuchte Curiosity am tiefsten Punkt der Formation ein helles, von glänzenden Adern durchzogenes Schichtgestein, dem das Team den Namen Sheepbed gab. Dieses Sediment war so fein, dass selbst Curiositys hochauflösende MAHLI-Kamera, die so nahe wie möglich herangefahren wurde, keine einzelnen Körner unterscheiden konnte. Es dürfte sich ursprünglich um Lehm oder Schlamm gehandelt haben. Winzige Partikel waren wohl im hangabwärts hinunterschießenden Strom in der Schwebelage gehalten und in den See hinausgetragen worden, bis sie sich in ruhigem Wasser allmählich am Grund absetzten. Dabei fingen sie anderes, in der Nähe treibendes Material ein, in dem sich vielleicht sogar organische Verbindungen befanden. Ein solches Milieu aufzuspüren war das Ziel der Curiosity-Mission.

Zweimal bohrte der Rover in das Sheepbed-Gestein. Eine erste Analyse durch die Sample Analysis at Mars (SAM) genannte Instrumentenreihe wies auf Schlammstein aus etwa 20 Prozent Tonmineralen hin, die sich in direktem Kontakt mit Wasser gebildet hatten. Allerdings handelte es sich nicht um saures, sulfatreiches Wasser – auf das hatten die Marsrover Spirit und Opportunity viele Jahre zuvor an anderen Orten Hinweise gefunden. Vielmehr war es neutral, also weder sauer noch alkalisch. Es dürfte sich um einen ruhigen und lebensfreundlichen Kratersee gehandelt haben. Nach diesem ersten Erfolg wollte das NASA-Team erkunden, in welcher Beziehung

die Yellowknife Bay zu dem Berg im Kraterzentrum steht. Ist sie älter oder jünger? Wie unterschieden sich die Umweltbedingungen? Wie viele Klimaumschwünge der Marsgeschichte sind in den geologischen Schichten des Gale-Kraters archiviert?

Doch inzwischen war Eile geboten, denn die Messkampagne in Yellowknife Bay hatte sieben Monate in Anspruch genommen. Der Rover würde rund 200 Marstage (»Sol«, etwa 24 Stunden und 39 Minuten) reine Fahrzeit für die acht Kilometer zum Fuß des Aeolis Mons benötigen. Inklusive Zwischenstopps war mit rund einem Erdjahr zu rechnen. Aber die Dauer der Mission war überhaupt nur auf zwei Jahre veranschlagt.

Zügig näherte sich Curiosity dem Berg und legte fast die Hälfte der Distanz in der zweiten Jahreshälfte 2013 zurück. Während der Fahrt prüfte SAM in regelmäßigen Zeitabständen auf der Suche die Marsluft auf Methan. Die Sonnenstrahlung zerstört das Gas innerhalb von etwa 300 Jahren. Ein etwaiger Methangehalt in der Atmosphäre sollte also allmählich abnehmen. Tatsächlich wurden aber von der Erde aus und von Sonden in der Umlaufbahn hin und wieder kurzzeitige Konzentrationsspitzen beobachtet. Also wird Methan auf dem Mars freigesetzt – biologisch oder nicht biologisch.

Bei den ersten von Curiositys Messungen lag der Methananteil in der Atmosphäre durchweg unterhalb von

Das erste Ziel des Rovers war eine Yellowknife Bay genannte Gesteinsformation. An der am tiefsten gelegenen Stelle (»Sheepbed«, Pfeil) hat der Rover in den Fels gebohrt und Proben zur Analyse genommen. Das Bild entstand am 137. Marstag nach der Landung.

NASA/JPL/CALTECH/MSSS



1,3 Teilen pro Milliarde (ppb). Doch an Sol 466 schnellte der Methangehalt auf 5,5 ppb hoch und stieg innerhalb der nächsten 60 Marstage weiter an. An Sol 573 war der Wert wieder auf weniger als 1 ppb zurückgefallen.

Wie genau es zu der Methanspitze kam, wissen die Forscher nicht. Sie haben seither Messungen in regelmäßigen Abständen vorgenommen und festgestellt, dass der Methangehalt mit den Jahreszeiten schwankt. Die niedrigsten Konzentrationen (etwa 0,3 ppb) fanden sich um die südliche Wintersonnenwende. Im Südsommer stieg der Gasgehalt auf Werte um 0,8 ppb. Das SAM-Team glaubt nicht an Mikroorganismen als Ursache. Vielmehr ist die Methankonzentration an saisonale Schwankungen der ultravioletten Sonnenstrahlung geknüpft, die organische Verbindungen am Boden zerstört. Geringe Mengen kohlenstoffreichen Materials regnen das ganze Jahr in Form von Mikrometeoriten hinab. Wenn der Mars der Sonne im Südsommer am nächsten steht, zersetzt das UV-Licht es in viele kleine Moleküle, darunter Methan.

Chemische Analysen für unterwegs

Während der Fahrt führte das wissenschaftliche Team von SAM verschiedene Analysen an Sedimenten durch, die Curiosity bei Yellowknife Bay in einige seiner Probenbehälter gefüllt hatte. Über den Gehalt an Kalium-40 und dessen radioaktives Zerfallsprodukt Argon ermittelten die Forscher für die Gesteine ein Alter von 4,2 Milliarden Jahren mit einer Messunsicherheit von 350 Millionen Jahren. Diese Zahl bezieht sich auf die Originalgesteine, die einst im Hochland und am Kraterrand anstanden, dann abgetragen und schließlich abgelagert wurden.

Zugleich identifizierte das SAM-Team Edelgasisotope, die entstanden, als kosmische Strahlung oberflächennahe

Atome bombardierte. Daraus leiteten die Forscher ab, dass die Sedimente nur rund 80 Millionen Jahre frei gelegen hatten. Also sind die Gesteine im Gale-Krater – zumindest am untersuchten Fundort – sehr alt, gelangten aber erst in jüngerer Zeit an die Oberfläche. Vermutlich wirkte der Wind wie ein Sandstrahlgebläse. Die nur kurzzeitige Exposition erleichtert die Suche nach organischen Verbindungen, denn Sonnenlicht und kosmische Strahlung hatten weniger Gelegenheit, etwaige interessante Moleküle zu zerstören.

Tatsächlich fanden sich organische Moleküle im Material, beispielsweise Chlorbenzol. Es entstand vermutlich bei der Reaktion von im Gestein vorhandenen Perchlorationen mit Kohlenwasserstoffmolekülen. Bereits 2008 hatte die Landesonde Phoenix Perchlorat im Marsboden aufgespürt. Es ist ein starkes Oxidationsmittel, das in Wasser organische Moleküle zersetzt. Sollte vor Jahrmilliarden Leben existiert haben, könnten Belege dafür damals ebenso eingeschlossen worden sein. Der Fund ist also viel versprechend für künftige Missionen.

Die Fahrt in Richtung Mount Sharp forderte dem Rover einiges ab. So stellte das NASA-Team schwere Schäden an den Aluminiumrädern fest. Der Wind hatte harte aufragende Steinstacheln frei gelegt, die an Haizähne erinnern. Unter dem Gewicht des Rovers zerbrachen sie nicht – stattdessen durchbohrten sie die Reifenflächen. Die Ingenieure lenkten den Rover nun vorsichtiger durch weniger gefährliche sandige Täler und untersuchten das Problem näher. Die neue Route war kurvenreicher als diejenige über die Plateaus und begrenzte die Sicht des Rovers. Das reduzierte die mögliche Geschwindigkeit erheblich.

Währenddessen steuerten die Forscher Curiosity auf eine gestreift aussehende Gesteinseinheit zu, die sie





NASA/JPL-CALTECH/MSS

Kimberley-Formation nannten. Die Streifen entpuppten sich als schräg gestellte, erodierte Sandsteinlagen. Nach langer Diskussion kamen die Wissenschaftler zum Schluss: Die Schichten mussten sich schon in dieser geneigten Ausrichtung gebildet haben. Sie wären an den Mündungsarmen eines Deltas entstanden, als sich ein Strom in einen stillen Wasserkörper ergoss und dort die mitgeführten Sandkörner fallen ließ. Wie eine radioaktive Altersbestimmung zeigte, sind die Gesteine schon seit einigen zehn Millionen Jahren exponiert.

Curiosity erreichte Mount Sharp Ende 2014, kurz nachdem die Mission verlängert worden war. Auf Fotos erschien der Gipfel so weit entfernt wie zuvor, doch die Wissenschaftler hatten es ohnehin nur auf die geschichteten Sedimente an seinem Fuß abgesehen.

Weiterhin lagen Dünen auf dem Weg. Sie hatten bei ihrer Wanderung über den Kratergrund eine 14 Meter dicke Gesteinsschicht frei gelegt, den untersten und ältesten an die Oberfläche tretenden Teil des Bergs. Dort lag ein weiterer, sehr feinkörniger Schlammstein, die so genannte Murray-Formation. Die Entdeckung bestätigte, dass sich im Zentrum des Kraters vor Jahrtausenden ein Gewässer befunden hatte, das sich allmählich mit Ablagerungen gefüllt hat.

Die Murray-Formation verzahnte sich mit schräg einfallenden Schichten von Flussdeltas, die der Kimberley-Formation ähnelten, lag aber auch über ihnen. Also war sie jünger. Der Rover bohrte an drei Stellen. Die Murray-Schichten waren extrem dünn und regelmäßig. Sie erinnerten an Lagen, die sich auf der Erde bilden, wenn sich

Curiositys Räder (mit etwa 50 Zentimeter Durchmesser) wurden immer wieder von spitzen, fest im Untergrund sitzenden Steinen durchstoßen. Dadurch riss die Aluminiumstruktur auf. Seit das Problem bekannt ist, meiden die NASA-Kontrolleure riskante Strecken.

stoßweise herbeigeführtes, sehr feines Sediment langsam im stillen Wasser eines Sees absetzt. Aus der Anzahl der Schlammschichten lässt sich schließen, dass der See im Gale-Krater über Jahrtausende hinweg existierte, möglicherweise mit Unterbrechungen.

Weiterhin gab es hier Belege für die Einwirkung von Wasser auf das Gestein nach dessen Ablagerung: Es war von einem Netz dünner Adern aus dem mit Borverbindungen gemischten Salz Kalziumsulfat durchzogen. Dies könnte auf eine durch Verdunstung entstandene, konzentrierte Sole hindeuten.

Curiosity fuhr anschließend in Richtung Westen und allmählich nach oben. Dabei entdeckte der Rover ein ungewöhnliches Silikatmineral namens Tridymit. Auf der Erde bildet es sich im Zusammenhang mit niedrigem Druck, aber extrem hohen Temperaturen, typischerweise bei explosiven, siliziumdioxidreichen Vulkanausbrüchen. Solche Vulkane waren auf dem Mars nicht vermutet worden, doch Geologen können sich die Entstehung von Tridymit nur so erklären – ein zusätzlicher Schlüssel zur Vergangenheit des Roten Planeten.

Nicht weit davon traf der Rover auf groben Sandstein, wahrscheinlich durch Wind abgelagert. Die Stimson

genannte Formation überdeckt Murray »diskordant« beziehungsweise unregelmäßig: Die Murray-Sedimente wurden abgelagert, verschüttet, zu Gestein verfestigt, frei gelegt und in einem trockenen Milieu erodiert, wo vom Wind herbeigetrager Sand sie schließlich zudeckte. Sedimentologen fanden sogar im unteren Teil der Stimson-Schichten Fetzen von Murray-Gestein. Wahrscheinlich trennt ein großer Zeitraum die Entstehung beider Verbände. Bei Stimson könnte es sich um das jüngste Gestein handeln, das Curiosity erkunden wird.

Der Rover fuhr die Formation hinauf und überquerte einen Sandsteinrücken nach dem anderen. Brüche zerschneiden die zu Tage tretenden Stimson-Gesteine, gesäumt von hellen Streifen, so genannten Halos. In einem solchen fand das Analyseinstrument ein Gestein, das fast ausschließlich aus siliziumdioxidreichen Tönen besteht. Seine weiteren Komponenten waren ausgewaschen worden, wie es auf der Erde manchmal mit sehr saurem Grundwasser vorkommt. Aus mehreren Gründen konnte das Wasser, das den Stimson-Sandstein auslaugte, nicht mit demjenigen identisch sein, das für die Sulfatadern in den Murray-Schlammsteinen verantwortlich war. Wie oft waren diese Gesteine zugedeckt und durchtränkt worden? Wie viel Zeit war zwischen den verschiedenen feuchten Episoden vergangen?

Die letzte Frage können die Instrumente von Curiosity nicht zuverlässig beantworten. Bislang wurde kein spezielles Gerät zur Altersdatierung zum Mars geschickt. Der geplante NASA-Rover Mars 2020 soll Proben für eine eventuelle Rückkehr zur Erde auch deshalb sammeln, um mit genaueren irdischen Untersuchungen die relativen Daten einzuordnen.

Aufstieg nach langem Anlauf

Schließlich konnte Curiosity an Sol 1369 (12. Juni 2016) durch eine Lücke in den Sanddünen direkt den Berg hinauffahren, anstatt ihn zaghaft zu umrunden. Im Verlauf des Sommers 2016 steuerte er durch die spektakulären Landschaften der Murray Buttes, Kuppen von Murray-Schlammstein, die von Stimson-Sandstein gedeckelt werden.

Nach vier Forschungsjahren verstand das Wissenschaftlerteam allmählich die Geschichte des Gale-Kraters. Über Jahrmillionen hinweg hatte sich dort ein See befunden, der vorwiegend neutrales Wasser enthielt. Von Zeit zu Zeit war er ausgetrocknet. Dabei könnte einsickerndes mineralreiches Grundwasser noch über einige zehn bis hundert Millionen Jahre hinweg für ein lebensfreundliches Milieu gesorgt haben. Obwohl dieses zeitweise sauer war, lag die Existenz von Mikroorganismen anscheinend weiterhin im Bereich des Möglichen. Doch die Suche nach Lebensspuren bleibt einer künftigen Mission vorbehalten.

Curiosity hatte das Dünenfeld überquert und nach rund einem Kilometer über Murray-Gesteine auch diese hinter sich gelassen. Die nächste Herausforderung war der Vera Rubin Ridge. Dieser steile Rücken stellt einen Bruch sowohl in der Topografie als auch in der Mineralogie dar. Sein Gestein enthält reichlich Hämatit, ein Eisenoxid, das

unter feuchten Bedingungen entsteht. Nach Überquerung des Rückens steuerte Curiosity ein Gestein an, dessen hoher Tongehalt schon von Spektrometern an Bord von Orbitern erkannt wurde. Der Rover verbrachte den Rest seiner zum zweiten Mal um zwei Jahre verlängerten Mission in den beiden Regionen und war dabei von einigen technischen Problemen geplagt, insbesondere mit seinem Bohrer.

Falls die Curiosity-Mission Ende 2018 zum dritten Mal verlängert wird und sich der Rover weiter den Hang emporarbeitet, dürfte er auf eine Stelle treffen, wo einst ein Fluss den Mount Sharp durchschnitt und sich in den ehemaligen See ergoss. Dabei entstand eine Fächerform. Die abgelagerten Sedimente und das Flussbett, aus dem sie stammten, verwandelten sich in Gesteine, die der Erosion größeren Widerstand boten als der Rest des Mount Sharp. So ragt das Flussbett nach einem langen Zeitraum der Verwitterung heute über die Umgebung heraus. Curiosity könnte diesen Kanal als Rampe benutzen, um den Berghang zu erklimmen. Er würde damit diejenigen Gesteine hinter sich lassen, die von einer Zeit in der Marsgeschichte erzählen, als Tonminerale aus neutralem Wasser ausfielen, und zu sulfatreicheren Gesteinen aus einer trockeneren Periode gelangen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



Oder auch nicht. Verschiedene Faktoren könnten sich auf die Lebenszeit des Rovers auswirken. Seine Räder sind noch das geringste Problem – bei einiger Vorsicht sollten sie lange genug durchhalten. Mehrere Instrumente zeigen jedoch Anzeichen von Altersschwäche. So sind etwa wichtige Komponenten des Bohrers bereits defekt, und er lässt sich nur noch eingeschränkt verwenden. Vor allem zerfallen die Radioisotope in der Batterie unaufhaltsam. Nach Ablauf von insgesamt 14 Jahren – das entspricht etwa dem Alter des noch immer funktionsfähigen, solarbetriebenen Marsrovers Opportunity – dürfte nicht einmal mehr genügend Energie bereitstehen, um die Grundfunktionen von Curiosity aufrechtzuerhalten. Spätestens das wird der Entdeckungstour des Rovers ein Ende setzen. ◀

© Sky & Telescope, April 2017

WEBLINKS

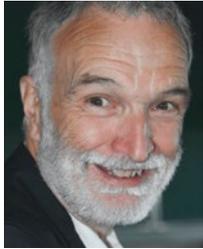
<https://mars.nasa.gov>

Die Website gibt einen Überblick über den Status der US-Marsmissionen und liefert aktuelle Informationen zum Rover Curiosity.

www.planetary.org/blogs/emily-lakdawalla/

In ihrem Blog schreibt die Autorin Emily Lakdawalla Hintergrundberichte über die jüngsten Missionsfortschritte.

SCHLICHTING! WINZIGE TRÖPFCHEN GANZ GROSS



Kleinste Flüssigkeitskugeln entstehen von selbst, wenn man ihnen nur auf die richtige Weise Energie zur Verfügung stellt.

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/1567844

Der Sturm fängt das aufsprühende Wasser auf und treibt es in breiten Nebelgardinen an der Flutlinie entlang

Harry Mulisch (1927–2010)

▶ Wer am brandenden Meeressaum oder am Gradierwerk eines Kurorts die Brise genießt, atmet salzhaltige Wassertröpfchen ein. Auch sprudelnder Sekt entsendet winzige Perlen in den Raum und gelangt so als prickelndes Aroma in unsere Nasen. Diese und viele weitere Flüssigkeiten werden als Schwebeteilchen zum Spielball der Luftströmungen. Das klappt nur, wenn sie sehr langsam zu Boden gehen, und dazu müssen sie ziemlich unscheinbar sein.

Jeder sich selbst überlassene Tropfen wird auf Grund seiner Gewichtskraft zur Erde hin beschleunigt. Dagegen übt die Luft eine Widerstandskraft aus. Diese wird mit zunehmender Fallgeschwindigkeit größer, bis schließlich beide Kräfte denselben Betrag haben. Sofern die Masse des Tropfens gleich bleibt, sinkt er fortan mit konstanter Geschwindigkeit.

Die Luftwiderstandskraft bei einem bewegten Gegenstand hängt nicht nur von seiner Geschwindigkeit ab, sondern auch von der Querschnittsfläche: Kleinere Tropfen erfahren einen geringeren Widerstand. Mit der Größe ändern sich die Kräfteverhältnisse insgesamt. Denn mit ihr nimmt zwar ebenfalls die Masse und damit die Gewichtskraft ab, jedoch nicht in gleichem Maß. Darum ist die Sinkgeschwindigkeit für kleine Tröpfchen eine andere.

Reduziert sich der Radius eines fallenden Tropfens um den Faktor 10, verringert sich seine Fläche um den Faktor 100. Das Volumen und die dazu proportionale



Eine solche Fixativspritze verwenden Maler zum Versprühen von Farbe oder Harzlösungen. Dazu stecken sie das dünnere Rohr in die Flüssigkeit und blasen in das dickere Mundstück.

Masse nehmen allerdings mit dem Radius hoch drei, also um das 1000-Fache ab. Das Gewicht reduziert sich daher viel schneller als der Luftwiderstand. Deswegen halten sich beide Kräfte bei kleineren Tröpfchen bereits bei viel niedrigeren Geschwindigkeiten die Waage – das Objekt sinkt deutlich langsamer. Will man also Flüssigkeiten beziehungsweise die mit ihnen transportierten Stoffe lange in der Luft halten, muss man die Tropfen möglichst klein machen.

Das ist leichter gesagt als getan. Denn um aus einer Kugel zwei zu machen, braucht es etwa ein Fünftel mehr an Oberfläche. Und das kostet Energie. Wie viel davon nötig ist, um eine gewisse Wassermenge in Tröpfchen zu versprühen, berechnet man, indem man die entstehende Gesamtfläche mit der charakteristischen Oberflächenspannung des Wassers multipliziert. Winzige Tropfen sind annähernd rund. Ihre individuelle Oberfläche multipliziert mit ihrer Anzahl, die aus dem Wasservolumen insgesamt entstehen kann, ergibt die totale Fläche. Eine kurze Rechnung zeigt, dass aus einem Liter Wasser hergestellte Tröpfchen mit einem Radius von zehn Mikrometern eine Gesamtfläche von 300 Quadratmetern einnehmen würden. Dafür wäre eine Energie von etwa 22 Joule aufzubringen. Das ist durchaus



Bei Springbrunnen lässt sich im Großen beobachten, wie Flüssigkeitslamellen oder -strahlen in einzelne Tropfen zerfallen.

Die Meeresbrandung wirbelt unzählige kleinste Salzwasserpartikel in die Luft.

beachtlich: Man könnte damit immerhin die gleiche Flüssigkeitsmenge um 2,2 Meter anheben.

Eine einfache Zerstäubungstechnik verschafft einen Eindruck von der bei der Tröpfchenproduktion benötigten Leistung. Dazu wird ein Röhrchen in einen Behälter beispielsweise mit Wasser gesenkt, und mit einem zweiten bläst man gegen die obere Öffnung des ersten (siehe Foto linke Seite). Ein durchsichtiger Strohhalm etwa lässt erkennen, wie währenddessen der Wasserspiegel darin steigt. Selbst wenn man es nicht sieht, hört man es an dem immer höheren Zischlaut – Ausdruck der sich ändernden Schwingungsfrequenz der schwindenden Luftsäule.

Was geschieht hier? Das erste Röhrchen behindert den dagegegebene Atem. Dieser muss einen Umweg darüber hinweg und seitlich vorbei nehmen. Die Teilchen werden schneller, da sie eine längere Strecke zurücklegen müssen, damit in gleicher Zeit weiterhin das gleiche Volumen befördert wird. Die derart gewissermaßen auseinandergesogene Strömung hat infolgedessen weniger Druck. Um den Unterschied aufzuheben, zieht sie aus allen Richtungen Luft an, insbesondere aus dem senkrechten Röhrchen. Schließlich gerät die steigende Flüssigkeitssäule in den Strom und wird in viele kleine Tröpfchen zerfetzt.

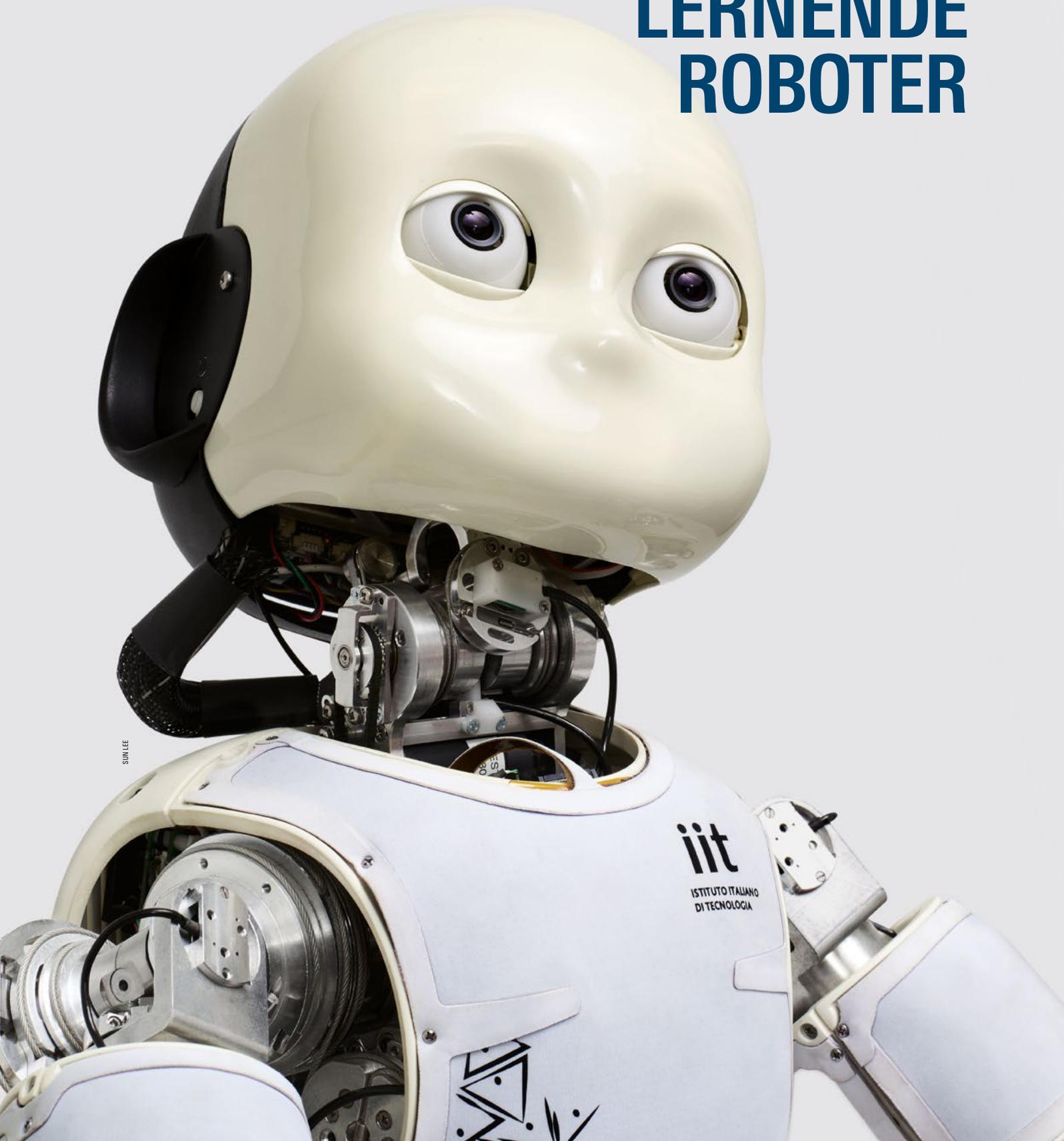
Die Zerstäubung erzeugt einen spürbar größeren Widerstand beim Blasen. Die zusätzliche Energie ist vor allem nötig, um die Oberfläche der unzähligen Tröpfchen zu schaffen. Die Wassersäule wird zunächst ähnlich wie bei Seifenblasen zu einer dünnen Lamelle aufgepusht. Das zwingt das Wasser in eine Form mit sehr großer Oberfläche. Bei Seifenlauge würden sich jetzt Blasen abschnüren (siehe »Himmlische Sphären«, **Spektrum** Juni 2016, S. 44). Eine Wasserlamelle hingegen ist wegen der beträchtlichen Oberflächenspannung des Wassers sehr instabil und zerreißt ziemlich schnell (siehe Foto ganz oben). Getrieben durch die Tendenz der Natur, bei allen



von selbst ablaufenden Vorgängen so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben, schnurren die Wasserfetzen sofort zu winzigen Kügelchen zusammen. Denn in dieser Form haben sie die geringste Oberfläche und benötigen am wenigsten Oberflächenenergie.

Seit Menschen erkannt haben, dass Substanzen mit kleinsten Flüssigkeitstropfen weiträumig und sehr fein dosiert verteilt werden können, entwickeln sie dem jeweiligen Verwendungszweck angemessene Verfahren, um solche Aerosole gezielt zu erzeugen. Für Zerstäuber gibt es zahlreiche wissenschaftliche und industrielle Anwendungen bis hin zum alltäglichen Auftragen von Parfüm oder Haarspray. Verbrennungsmotoren und Ölheizungen erreichen mit Einspritzung vor allem dank des großen Verhältnisses von Fläche zu Volumen eine optimale chemische Reaktion mit dem Sauerstoff. Die konkreten Techniken sind entsprechend sehr unterschiedlich. In jedem Fall ist die hineingesteckte Oberflächenenergie eine lohnende Investition.

ROBOTIK SELBSTSTÄNDIG LERNENDE ROBOTER



SUN LEE

iit
ISTITUTO ITALIANO
DI TECNOLOGIA

Ein Zweig der Forschung an künstlichen Intelligenzen versucht, die Lernprozesse von Kleinkindern nachzubilden – und erreicht damit sogar menschlich wirkende Fähigkeiten wie soziales Handeln. Zudem verhilft die Vorgehensweise zu tief greifenden Erkenntnissen darüber, wie Geist und Körper beim menschlichen Lernen zusammenspielen.

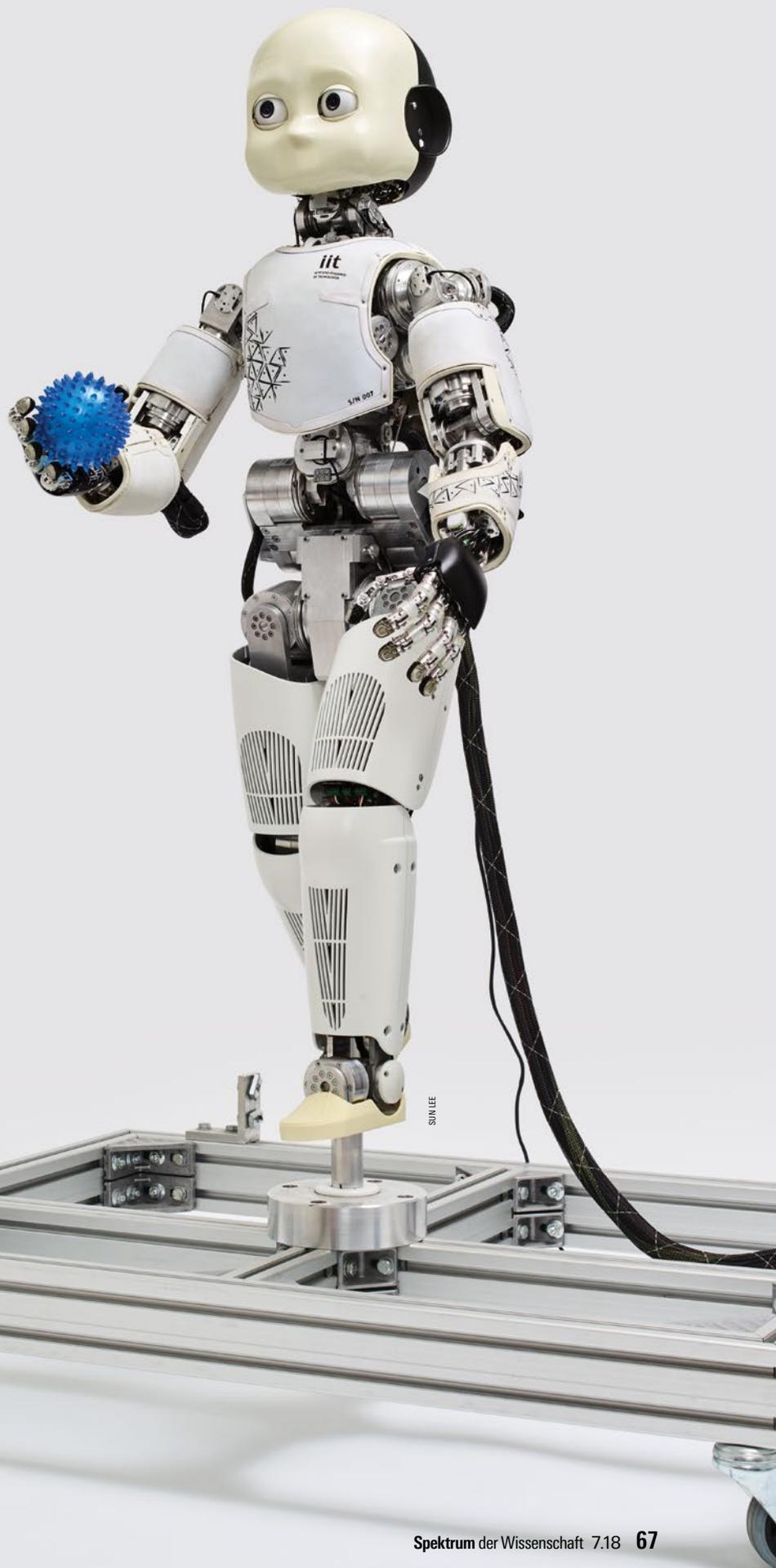


Diana Kwon studierte Neurowissenschaften an der McGill University im kanadischen Montreal. Heute lebt sie in

Berlin und schreibt als Journalistin über Gesundheit und Lebenswissenschaften.

» spektrum.de/artikel/1567846

Roboter nutzen ihren Körper bislang praktisch ausschließlich als Bewegungsmittel. Dass er ihnen auch als Lernmittel dienen könnte, wie einem Baby, das mit seinen Fingern spielt, ist ein relativ neues Konzept.



► In »Chappie«, einem Sciencefiction-Film von 2015, will der Ingenieur Deon eine denkende und fühlende Maschine erschaffen. Dazu schreibt er eine KI-Software, die auf dieselbe Weise lernt wie ein Kind. Chappie, sein Prototyp, erwirbt Allgemeinwissen, Sprache und komplexe Fähigkeiten durch einfaches Beobachten und Experimentieren. Das können heute selbst die fortschrittlichsten KI-Systeme noch nicht.

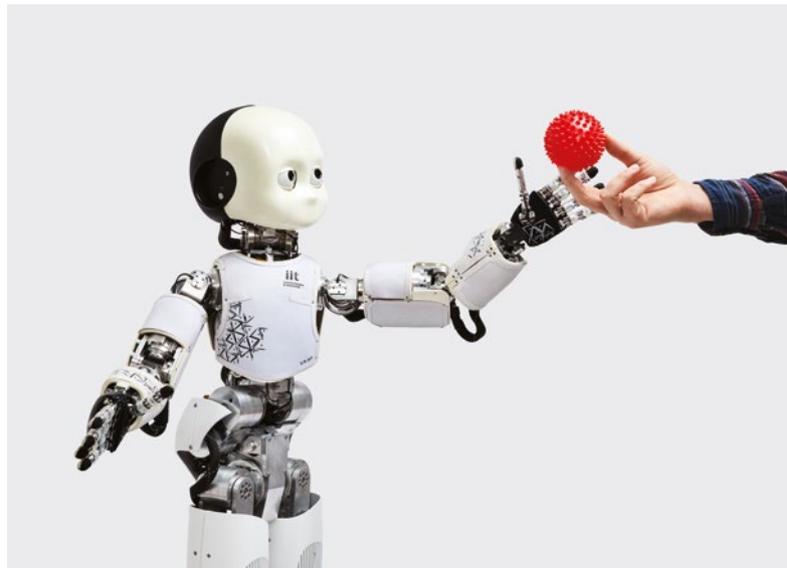
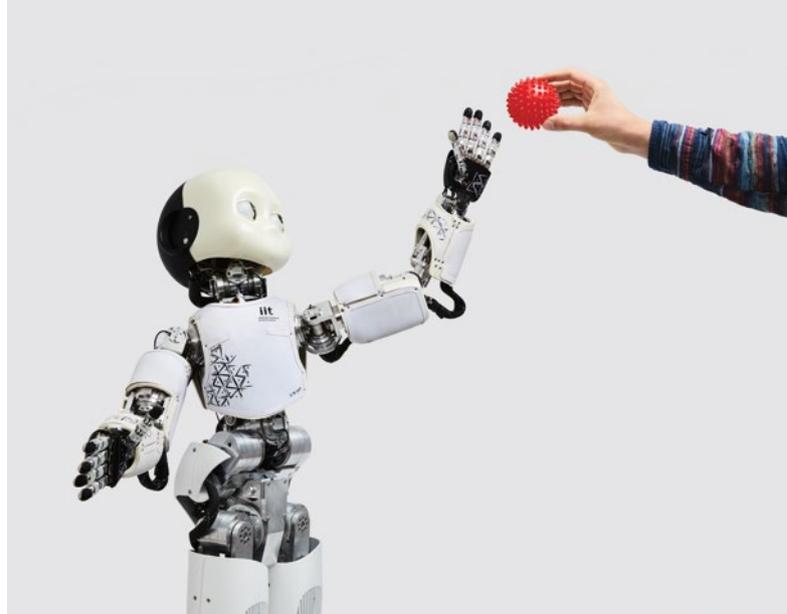
Natürlich gibt es Maschinen, die in manchen Bereichen den Menschen überlegen sind, etwa bei dem Wissensspiel »Jeopardy« (**Spektrum** Oktober 2011, S. 97) oder Brettspielen wie Schach oder dem fernöstlichen Go. Es erregte einiges Aufsehen, als das britische Unternehmen DeepMind im Oktober 2017 AlphaGo Zero vorstellte, die neueste Version seines Go spielenden Systems. Im Gegensatz zu seinem Vorgänger AlphaGo, der durch eine große Anzahl von Spielen zwischen Menschen trainiert wurde, sammelte die neue künstliche Intelligenz eigenständig Erfahrungen, indem sie gegen sich selbst antrat (**Spektrum** Januar 2018, S. 22 und S. 26).

Aber so bemerkenswert diese Leistung auch ist: Hier ging es nur darum, ein Spiel mit klar festgelegten Regeln zu beherrschen – und der Erwerb der übermenschlichen Fähigkeiten erforderte Millionen von Probespielen. Kinder dagegen lernen von Anfang an, indem sie ihre Umgebung erforschen und mit Bewegung und Sprache experimentieren. Sie sammeln selbstständig Daten, passen sich neuen Situationen an und sind zu geistigen Transferleistungen über verschiedene Gebiete hinweg fähig.

Seit der Jahrtausendwende versuchen Robotiker, Neurowissenschaftler und Psychologen, solche Fähigkeiten auf Maschinen zu übertragen. Inzwischen haben sie Androiden erschaffen, die Objekte bewegen können, einen Grundwortschatz sowie elementares Rechnen beherrschen und sogar Anzeichen von sozialem Verhalten zeigen. Gleichzeitig helfen diese KI-Systeme den Psychologen dabei, zu verstehen, wie das Lernen bei Kindern eigentlich abläuft.

Unser Gehirn versucht ständig, die Zukunft vorherzusagen und die so gewonnenen Erwartungen dann an die Realität anzupassen. Nehmen wir an, Sie sind vier Jahre alt, und Ihre Familie hat seit Kurzem einen netten kleinen Dackelwelpen. Wenn Sie nun zum ersten Mal Nachbars Katze begegnen, erwarten Sie aus Erfahrung, dass die sich genauso gern knuddeln lässt wie der junge Hund. Auf die ersten schmerzhaften Kratzer hin aktualisieren Sie Ihre Theorie über kuschelig aussehende Tiere mit Fell im Allgemeinen. Sie probieren nun zum Beispiel, ob das Kätzchen sich vielleicht streicheln lässt, wenn Sie ihm vorher ein Leckerchen anbieten. Diesmal bestätigt die Erfahrung die Theorie, und bei dem nächsten Objekt mit Fell und Schnurrhaaren versuchen Sie es gleich mit einem kleinen Häppchen, bevor Sie Ihre Finger in Gefahr bringen.

Das ist ein allgemeines Prinzip: Die Verarbeitungszentren des Gehirns verfeinern ständig ihre internen Modelle mit Hilfe der durch die Sinnesorgane aufgenommenen Signale. Nervenzellen im Auge verarbeiten zunächst die elementaren Komponenten eines Bilds; dann werden diese Informationen Schicht für Schicht in übergeordnete Berei-



SUN LEE

Der androide Roboter iCub lernt neue Wörter wie »Ball« einfacher, wenn das Objekt immer an der gleichen Stelle platziert ist, während der Experimentator es benennt.

che übertragen, bis schließlich die höchsten Schichten die gesamte Szene interpretieren.

Interessanterweise verlaufen neuronale Verbindungen auch in Gegenrichtung: von den höheren Gebieten im Schläfen- und Scheitellappen der Großhirnrinde hinunter zu niederen wie der primären Sehrinde und dem seitlichen Kniehöcker (Corpus geniculatum laterale). Einige Neurowissenschaftler glauben, dass diese Abwärtsverbindungen die Vorhersagen des Gehirns auf die niedrigeren Ebenen übertragen und so beeinflussen, was wir sehen (»Ein voraussagendes Gehirn«, S. 71).

Entscheidend ist, dass die Abwärtssignale von den höheren Ebenen des Gehirns auf jeder Ebene den Aufwärtssignalen von den Sinnen begegnen. Die jeweilige Ebene bestimmt aus beiden Signalen den Vorhersagefehler: den Unterschied zwischen dem, was wir erwarten, und dem, was wir erfahren. Diese Diskrepanz wird nach oben gemeldet und dient dort dazu, interne Modelle zu verbessern und daraus neue Erwartungen zu erzeugen. Die werden wieder nach unten gemeldet, mit den Sinnesindrücken abgeglichen, und so weiter.

Rajesh P. N. Rao, ein Computerwissenschaftler an der University of Washington – derselbe, der sich durch die statistische Analyse der rätselhaften Indus-Schrift hervorgetan hat (**Spektrum** September 2016, S. 54) –, drückt es so aus: »Das Vorhersagefehlersignal treibt das System in Richtung einer Einschätzung darüber, was da draußen wirklich ist.« Da auf diese Weise die Vorhersage bereits in die Kodierung der Sinnessignale eingeht, spricht man von prädiktiver Kodierung (predictive coding).

Während seiner Zeit als Doktorand an der University of Rochester testete Rao zusammen mit seinem Betreuer, dem Computer-Neurowissenschaftler Dana H. Ballard, jetzt an der University of Texas in Austin, die prädiktive Kodierung in einem künstlichen neuronalen Netz (»Neuronale Netze – klassisch und prädiktiv«, S. 70). Im Jahr 1999 simulierten Rao und Ballard in einem Computerexperiment neuronale Verbindungen im visuellen Kortex, und zwar in beide Richtungen. Nachdem sie das Netz mit Naturfotos trainiert hatten, konnte es charakteristische Merkmale eines Bilds wie zum Beispiel die Streifen eines Zebras wiedererkennen.

Mit den eigenen Fingern spielen ist wichtig – für Kleinkinder wie für Roboter

Noch haben wir Menschen vielen aktuellen KI-Systemen etwas Entscheidendes voraus: Wir können mit Hilfe unserer Körper innerhalb unserer Umgebung agieren. Babys und Kleinkinder probieren die Bewegungen ihrer Arme, Beine, Finger und Zehen aus und untersuchen alles, was sich in Reichweite befindet. So entwickeln sie sich, lernen selbstständig zu gehen, zu sprechen sowie Objekte und Personen zu erkennen. Wie sie all dies mit sehr wenig Anleitung schaffen, ist ein zentrales Forschungsthema sowohl für Entwicklungspsychologen als auch für Roboter. Ihre Zusammenarbeit führt zu überraschenden Erkenntnissen – in beiden Bereichen.

In einer Reihe bahnbrechender Experimente entwickelten der Roboter Jun Tani, damals bei Sony Computer

AUF EINEN BLICK PROGNOSEN UND IHRE ÜBERPRÜFUNG

- 1** Ein System lernt, indem es Vorhersagen über seine Umwelt macht und mit der Realität abgleicht. Das nennen Computerwissenschaftler prädiktives Kodieren.
- 2** Entsprechend programmierte Maschinen zeigen Lernverhalten ähnlich dem kleiner Kinder.
- 3** Die Verknüpfung zwischen einem Lerngegenstand und eigenen Körperbewegungen trägt wesentlich zum Lernerfolg bei.

Science Laboratories, und einige Kollegen Ende der 1990er Jahre ein prädiktives neuronales Netz, das einfache Bewegungen erlernen sollte, und testeten seine Funktion an echten Robotern. Sie konnten feststellen, dass ihre Maschinen in der Tat etwas gelernt hatten: sich in einfachen Umgebungen zurechtzufinden, Handbewegungen nachzuahmen und elementare verbale Befehle wie »Zeige auf X« oder »Drücke auf Y« zu befolgen.

Der Roboter Angelo Cangelosi von der University of Plymouth in England und Linda Smith, Entwicklungspsychologin an der Indiana University in Bloomington, haben aufgezeigt, wie wichtig der Körper für den Wissenserwerb ist. »Die körperliche Gestalt des Roboters und die Dinge, die er tun kann, beeinflussen die Erfahrungen, die er machen und aus denen er lernen kann«, sagt Smith. Als »Testperson« nutzen die Wissenschaftler vor allem den iCub, einen ungefähr 90 Zentimeter großen humanoiden Roboter, der am Istituto Italiano di Tecnologia in Genua zu Forschungszwecken gebaut wurde (Bilder S. 66/67 und links). Er verfügt über keine vorprogrammierten Funktionen; die Wissenschaftler können (und müssen) ihn für ihre Experimente vollständig mit Algorithmen ausstatten.

2015 luden Cangelosi und Smith auf einen iCub ein neuronales Netz, mit dem er einfache Assoziationen lernen konnte. Wie sie entdeckten, fiel es dem Roboter leichter, seinen Wortschatz zu erweitern, wenn die Namen von Objekten konsistent mit bestimmten Körperpositionen verknüpft waren. Wenn also die Experimentatoren ein Objekt wie »Ball« oder »Tasse« beim Namen nannten, legten sie den zugehörigen Gegenstand aus der Perspektive des Androiden stets an dieselbe Stelle, so dass für ihn das Objekt mit einer Bewegung verknüpft war, die er zum Betrachten ausführen musste – zum Beispiel den Kopf nach links drehen. Dann lernte der Roboter die Wörter besser, als wenn die Gegenstände an beliebigen Stellen erschienen.

Ähnliche Ergebnisse erhielten die Forscher, als sie das Experiment mit 16 Monate alten Kleinkindern wiederholten: Wenn Objekte mit bestimmten Körperhaltungen verbunden waren, half dies den Kindern, Wortassoziationen

nen zu lernen. Cangelosis Labor entwickelt die Technik weiter, um Robotern abstraktere Wörter wie »dieses« beizubringen.

Das Einbeziehen des eigenen Körpers hilft Kindern wie Robotern nicht nur bei Wörtern, sondern auch bei Zahlen. Studien zeigen, dass Kinder, die Schwierigkeiten haben, sich ihre Finger vorzustellen, auch beim Zählen und Rechnen schwächer sind. Im Jahr 2014 entdeckten Cangelosi und seine Gruppe, dass die neuronalen Netze der Roboter Zahlen besser repräsentieren konnten, wenn man ihnen nicht nur die Zahlwörter vorsagte, sondern ihnen zudem beibrachte, mit den Fingern zu zählen.

Kinder wie Roboter empfinden Ungewohntes als anregend – wenn es nicht zu viel auf einmal ist

Neue, völlig ungewohnte Erlebnisse liefern einen starken Anstoß zum Lernen. Aimee Stahl und Lisa Feigenson von der Johns Hopkins University berichteten 2015, dass Säuglinge, wenn sie etwas Unerwartetes wahrnehmen wie etwa einen festen Gegenstand, der durch die Wand zu gehen scheint, diesem Widerspruch forschend nachgehen. Vereinfacht ausgedrückt: Sie verfügen über einen inneren Antrieb mit dem Ziel, den Vorhersagefehler zu reduzieren, und der fördert ihre Entwicklung.

Pierre-Yves Oudeyer, Robotiker am Standort Bordeaux des französischen Informatik-Forschungsinstituts Inria, geht über diese Hypothese noch hinaus. Nach seiner Auffassung versuchen Kinder nicht nur einen Vorhersagefehler zu reduzieren, wenn er sozusagen von außen auf sie zukommt; sie suchen auch aktiv und mit überraschender Gewandtheit nach Situationen, die einen »angenehmen« Vorhersagefehler – nicht zu klein, nicht zu groß – erwarten lassen und entsprechend gute Lernmöglichkeiten bieten.

Neuronale Netze – klassisch und prädiktiv

Ein neuronales Netz ist ein Ensemble aus einfachen Einzelteilen (den »Neuronen«), die in Schichten übereinander angeordnet sind. Üblicherweise wandert in einem künstlichen neuronalen Netz die Information von der untersten Schicht, in der man sich beispielsweise die Sehzellen vorstellt, nach oben, wobei jede Schicht die Daten ihrer Vorgängerin zu neuen, umfassenderen Merkmalen zusammenfasst. Information fließt auch in Gegenrichtung, aber nur während des Lernprozesses zur Fehlerkorrektur (die »Backpropagation«, siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 12). Beim prädiktiven Kodieren dagegen fließen stets Informationen in beide Richtungen. Nach oben gemeldet wird nur der Vorhersagefehler, wenn er nicht verschwindend gering ist. Das entlastet die oberen Schichten von allem, was ohnehin mit ihrer Erwartung übereinstimmt.

So wird ein Kleinkind lieber mit einem Spielzeugauto als mit einem 100-teiligen Puzzle spielen, weil es bei seinem Kenntnisstand mehr Hypothesen über Ersteres aufstellen und austesten kann.

Um diese Vermutung zu überprüfen, statteten Oudeyer und seine Kollegen ein Robotersystem mit einer so genannten intrinsischen Motivation (einem »inneren Antrieb«) aus: Eine Verringerung des Vorhersagefehlers bringt eine Belohnung. Das klingt sehr menschlich, ist aber einfach umzusetzen. Man programmiert das System darauf, so zu handeln, dass es eine gewisse zahlenmäßige Größe maximiert. Ob der Programmierer diese Größe »Nutzen«, »Belohnung« oder auch »Lust« nennt, ist dabei irrelevant.

Tatsächlich fand ein geeignet programmierter Roboter vom Typ Aibo, eine kleine, hundeähnliche Maschine mit gewissen sensorischen und motorischen Fähigkeiten, autonom die Aufgaben mit dem größten Lernpotenzial. Dabei erwarb er Fähigkeiten wie Objekte zu greifen und mit anderen Robotern zu sprechen, ohne eigens darauf programmiert zu sein. Hier zeigt sich laut Oudeyer ein »Nebeneffekt, wenn ein Roboter, der von der Motivation getrieben wird, seine Vorhersagen zu verbessern, die Welt erforscht«.

Bemerkenswert war der Einfluss des Faktors Zufall: Auch wenn mehrere Roboter ähnliche Trainingsstufen durchliefen, erforschten einige etwas weniger, andere ein bisschen mehr und hatten am Ende dadurch verschiedene Dinge gelernt. Oudeyer zieht daraus den Schluss, dass Roboter selbst bei identischer Programmierung und ähnlichem Lernumfeld unterschiedliche Fähigkeiten erwerben – wie Schüler im Klassenzimmer.

In jüngerer Zeit beschäftigt sich Oudeyers Team mit dem Spracherwerb. Computersimulationen sollen zeigen, dass Roboter, die mit prädiktiven Algorithmen (und geeigneter Hardware zur Lauterzeugung) ausgestattet sind, auch Grundelemente der Sprache lernen könnten. Außerdem untersucht Oudeyer zusammen mit Jacqueline Gottlieb, einer kognitiven Neurowissenschaftlerin an der Columbia University in New York, ob sich die menschliche Neugier über eine intrinsische Motivation zusammen mit der prädiktiven Kodierung neurobiologisch erklären lässt. Mit Hilfe solcher Modelle könnten Psychologen besser verstehen, was im Gehirn von Kindern mit Entwicklungsstörungen vorgeht.

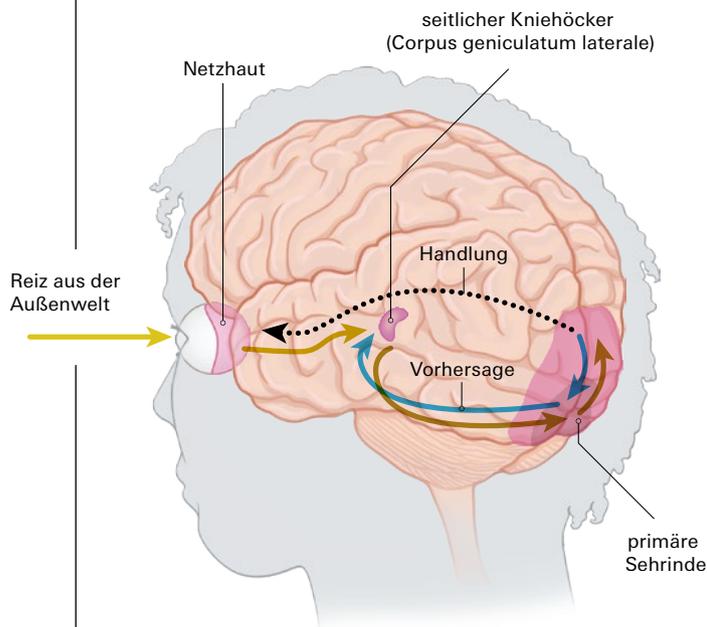
Auch in der Interaktion mit anderen versucht unser Gehirn ständig Vorhersagen zu treffen, zum Beispiel die Absichten unseres Gegenübers zu erkennen und seine nächsten Worte zu erraten. Dabei kann bereits das Bestreben, Vorhersagefehler zu reduzieren, für sich genommen elementares soziales Verhalten auslösen. Die Robotikerin Yukie Nagai und ihre Kollegen von der Universität Osaka (Japan) fanden 2016 heraus, dass ein iCub sich sozial verhielt, ohne eigens darauf programmiert zu sein, und zwar schon deswegen, weil er seinen Prognosefehler minimieren wollte. Nachdem der Androide gelernt hatte, einen Spielzeug-Lastwagen gezielt zu bewegen, beobachtete er, dass ein Experimentator an der gleichen Aktion scheiterte. In der Folge setzte er häufig von sich aus das Objekt an den richtigen Ort – einfach um seine Prognose

wahr zu machen, dass sich der Laster an einer bestimmten Stelle befindet. Nagai, die derzeit am National Institute of Information and Communications Technology in Japan und zugleich als Gastprofessorin am Exzellenzcluster CITEC in Bielefeld arbeitet, hält diese Erklärung für übertragbar auf Kinder. »Das Kind muss nicht beabsichtigen, anderen Menschen zu helfen«, argumentiert sie: Allein die Motivation, den Vorhersagefehler zu minimieren, kann elementares soziales Handeln auslösen.

Die Theorie der prädiktiven Informationsverarbeitung (predictive processing) könnte auch zum Verständnis von Entwicklungsstörungen wie Autismus beitragen. Vielleicht, so Nagai, liegt bei Autisten der Bereich, in dem sie den Prognosefehler als angenehm empfinden, besonders niedrig. Das würde erklären, warum sie durch ungewohnte sensorische Informationen rasch überwältigt werden, und ebenso, warum sie zu repetitivem Verhalten neigen: damit die Ergebnisse gut vorhersehbar sind.

Ein voraussagendes Gehirn

Unser Gehirn ist eine Vorhersagemaschine. Es nutzt Erfahrung und Vorwissen, um die Flut von Informationen aus unserer Umgebung zu verstehen. Viele Neurowissenschaftler und Psychologen glauben, dass fast alles, was wir tun – Wahrnehmung, Handeln und Lernen –, darauf beruht, dass wir Erwartungen produzieren und diese dann entsprechend aktualisieren.

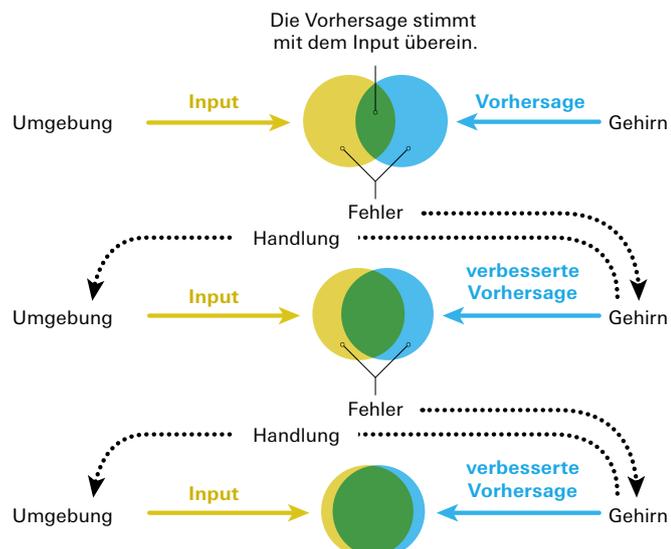


Beispiel: Visuelle Verarbeitung

Die Anatomie des Gehirns ist auf das Wechselspiel von Vorhersage und Korrektur angelegt. So empfängt die Sehrinde Signale vom Auge, aber es gibt auch Verbindungen in Gegenrichtung. Neurowissenschaftler glauben, dass diese »abwärts« gerichteten Verbindungen Vorhersagen von höheren Ebenen des Gehirns zu den niedrigeren transportieren, wie etwa der primären Sehrinde und dem Corpus geniculatum laterale. Diese treffen dort auf den sensorischen Input; aus beiden zusammen bestimmen die Neurone den Vorhersagefehler, das heißt den Unterschied zwischen dem, was Sie erwarten, und dem, was Sie sehen. Ein Signal, das diese Diskrepanz kodiert, wandert aufwärts zu den höheren Ebenen des Gehirns. Andere Signale werden in noch tiefere Schichten gesendet, um die Augenmuskeln zu bewegen und dadurch das Gesichtsfeld anzupassen.

Kaskade von Vorhersagen

Wenn das Gehirn einen Vorhersagefehler berechnet, aktualisiert es mit Hilfe dieser Informationen seine Erwartungen und vollzieht Handlungen mit dem Ziel, die Diskrepanz zwischen der Erwartung und dem Wahrgenommenen zu mindern. Wenn jemand etwa einen Gegenstand durch einfaches Betrachten nicht identifizieren kann, sendet sein Gehirn vielleicht den Befehl, das Ding in die Hand zu nehmen und näher zu inspizieren.



Genau entgegengesetzt verhält es sich möglicherweise bei Menschen mit Aufmerksamkeits-Hyperaktivitätsstörung (ADHS). Während Autisten dem Unbekannten ausweichen, fühlen diese sich von unvorhersehbaren Reizen in ihrer Umgebung unwiderstehlich angezogen, erklärt Harold Bekkering, Kognitionspsychologe an der niederländischen Radboud-Universität in Nimwegen. »Manche Menschen, die sensibel für die Welt sind, erforschen diese, während andere, die zu sensibel sind, sich selbst abschirmen. Im Rahmen der prädiktiven Kodierung kann man beide Muster sehr gut simulieren.« Bekkerings Labor versucht derzeit, diese Hypothesen am menschlichen Gehirn mit Hilfe bildgebender Verfahren zu überprüfen.



ISTOCK / OGIACIA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Nagai führt in diesem Kontext Studien zur »kognitiven Spiegelung« durch. Roboter, die mit prädiktiven Lernalgorithmen ausgestattet sind, interagieren mit Menschen. Während beide über Körpersprache und Gesichtsausdrücke kommunizieren, passt die Maschine ihr Verhalten dem ihres menschlichen Partners an. Dabei legt sie sich, so die Hypothese, dieselbe Präferenz für Vorhersagbarkeit zu wie ihr Gegenüber. Hinterher untersuchen die Forscher die derart etablierte neuronale Architektur des Roboters und versuchen daraus die des Menschen zu erschließen. »Wir können unsere Eigenschaften in Roboter auslagern, um uns selbst besser zu verstehen«, meint Nagai.

Von den Kindern etwas über die Roboter lernen – und umgekehrt

Studien robotischer »Kinder« haben dazu beigetragen, Schlüsselfragen der Psychologie zu beantworten: etwa zur Bedeutung der prädiktiven Verarbeitung und der des Körpers für die kognitive Entwicklung. Linda Smith meint: »Wir haben eine Menge darüber gelernt, wie komplexe Systeme funktionieren, in welcher Weise der Körper wichtig ist, und über wirklich grundlegende Dinge wie Erkundung und Vorhersage.«

Gleichwohl sind die Roboter von menschlicher Intelligenz noch weit entfernt. Chappie bleibt auf absehbare Zeit Sciencefiction. Erstens fehlt es den Robotern noch an Geschmeidigkeit der Bewegung und an Wahrnehmungsfähigkeit; immerhin ist hier Abhilfe in Sicht in Gestalt weicher Roboter (*Spektrum* Januar 2017, S. 22), solcher, die auf zwei Beinen gehen (*Spektrum* November 2016, S. 76), und verbesserter Bildverarbeitung. Das weitaus bedeutendere Hindernis ist aber die unglaubliche Komplexität des Gehirns selbst. Trotz vieler Bemühungen sind die Forscher

noch weit davon entfernt, eine Maschine zu entwickeln, die dem menschlichen Geist Konkurrenz macht.

Darüber hinaus ist es mit der richtigen Hardware und geeigneter Programmierung nicht getan: Es kommt entscheidend auf die Betreuung an. Für Menschenkinder ist das seit Urzeiten bekannt. Der Robotiker Tani hat sich dazu seine Gedanken gemacht: »Wenn mich jemand fragt, ob ein Roboter wirklich menschenähnlich werden kann, dann frage ich zurück, ob sich jemand um ihn wie um ein echtes Kind kümmern würde. Wenn ja, dann ist das vielleicht realisierbar; wenn nein, dann kann sich ein Roboter unmöglich wie ein richtiges menschliches Kind entwickeln.«

Außerdem läuft Lernen in vielen Einzelschritten ab. »Entwicklung ist ein sehr komplexes System von Kaskaden. Was an einem Tag passiert, legt den Grundstein für den nächsten«, sagt Linda Smith. Dementsprechend sei es wahrscheinlich unmöglich, eine künstliche Intelligenz auf menschlichem Niveau anders als in lauter kleinen Schritten aufzubauen.

Kurz vor seinem Tod schrieb der Physiker Richard Feynman die berühmt gewordenen Worte: »Was ich nicht erschaffen kann, verstehe ich nicht.« Jun Tani stellt in seinem 2016 erschienenen Buch »Exploring Robotic Minds« die umgekehrte Behauptung auf: »Ich kann verstehen, was ich erschaffen kann.« Der beste Weg, den menschlichen Verstand zu verstehen, sei es, ihn künstlich nachzubilden.

Eines Tages wird es Menschen vielleicht gelingen, einen Roboter herzustellen, der genau wie ein Kind seine Umgebung erforscht, sich anpasst und entwickelt, vielleicht mit Hilfe von Betreuern, welche die für gesundes Wachstum notwendige Zuwendung und Führung vermitteln. In der Zwischenzeit werden kindähnliche Roboter weiterhin wertvolle Einblicke in das Lernen von Heranwachsenden geben – und uns deutlich machen, was passieren kann, wenn die zugehörigen Mechanismen versagen. ◀

QUELLEN

Cangelosi, A., Schlesinger, M.: Developmental Robotics. From Babies to Robots. MIT Press, Cambridge (MA), 2015

Oudeyer, P.-Y., Smith, L. B.: How Evolution May Work through Curiosity-Driven Developmental Process. In: Topics in Cognitive Science 8, S. 492–502, 2016

Rao, R. P. N., Ballard, D. H.: Predictive Coding in the Visual Cortex: A Functional Interpretation of some Extra-Classical Receptive-Field Effects. In: Nature Neuroscience 2, S. 79–87, 1999

Stahl, A. E., Feigenson, L.: Observing the Unexpected Enhances Infants' Learning and Exploration. In: Science 348, S. 91–94, 2015

Tani, J.: Exploring Robotic Minds. Actions, Symbols, and Consciousness as Self-Organizing Dynamic Phenomena. Oxford University Press, 2016

LITERATURTIPP

Hawkins, J.: Die Zukunft der Intelligenz. Wie das Gehirn funktioniert und was Computer davon lernen können. Rowohlt Taschenbuch, Reinbek 2006
Ausführlichere Darstellung der prädiktiven Kodierung



FREISTETTERS FORMELWELT L'ART POUR L'ART

Manchmal ist die Mathematik wie Kunst: Sie benötigt für ihre Formeln keine Rechtfertigung – die Faszination genügt. Und der Nutzen kommt vielleicht später.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1567848](http://spektrum.de/artikel/1567848)

Der legendäre indische Mathematiker Srinivasa Ramanujan war bekannt für seine unorthodoxe Arbeitsweise und seine Formeln, die er – zumindest in den Augen seiner Kollegen – völlig unerwartet wie aus dem Nichts produzierte. Zu den aus meiner Sicht erstaunlichsten Gleichungen gehört diese hier:

$$p(11k + 6) \equiv 0 \pmod{11}$$

Sie sieht recht harmlos aus, aber das täuscht. Die Funktion p ist die Partitionsfunktion; $p(n)$ gibt die Anzahl der Möglichkeiten an, die positive ganze Zahl n in positive ganze Summanden zu zerlegen.

Beispielsweise lässt sich die Zahl 4 als $1+1+1+1$, $1+1+2$, $2+2$, $1+3$ oder einfach nur als 4 schreiben. Das sind fünf Möglichkeiten, also gilt $p(4)=5$. Die Zahl 5 kann man auf sieben Arten zerlegen, bei der Zahl 9 gibt es 30 Möglichkeiten, und die Zahl 100 lässt sich auf erstaunliche 190 569 292 unterschiedliche Arten aufsummieren.

Anfang des 20. Jahrhunderts beschäftigten sich Mathematiker damit, eine allgemein gültige Formel zu finden, um für jede beliebige Zahl direkt die Zahl der möglichen Partitionen zu berechnen. Bis dahin bestand die einzige Alternative im mehr oder weniger sturen Durchprobieren. Das war bei kleinen Zahlen noch möglich, wurde aber bei größeren Zahlen schnell sehr umständlich.

Auch Ramanujan beschäftigte sich mit dem Problem und stieß dabei auf das, was heute als »Ramanujan-Kongruenzen« bekannt ist. Obige Formel beschreibt eine von ihnen: Wenn eine Zahl um genau 6 größer ist als ein Vielfaches von 11, dann ist der Wert der zugehörigen Partitionsfunktion ein Vielfaches von 11. Anders gesagt: Berechnet man die Zahl der Partitionen für 6, 17, 28, 39, 50, 61 und so weiter, dann ist das Ergebnis jedes Mal ohne Rest durch 11 teilbar.

Angesichts solcher Aussagen ist es durchaus verständlich, wenn Kollegen von Ramanujan behaupteten,

alle positiven ganzen Zahlen wären dessen »persönliche Freunde«. Gemeinsam mit dem britischen Mathematiker Godfrey Harold Hardy gelang es Ramanujan, eine Näherungsformel zur Abschätzung von $p(n)$ zu finden und später sogar eine Formel zur direkten Berechnung des Funktionswerts.

Für mich ist diese Art der höchst kreativen und intuitiven Mathematik sich selbst genug. So wie die Kunst benötigt sie eigentlich keine weitere Begründung mehr; die solchen Formeln innewohnende Faszination ist als Existenzberechtigung absolut ausreichend. Dieser Meinung war auch Ramanujans Kollege und Freund Hardy, der Anwendungen der Mathematik – vor allem militärische – ablehnte und in seinen Memoiren schrieb: »Ich habe nie etwas »Nützliches« gemacht. Keine Entdeckung von mir hat je oder wird wahrscheinlich je, direkt oder indirekt, zum Guten oder Bösen einen Unterschied zum Wohlergehen der Welt machen.«

Damit hat er sich getäuscht. Früher oder später findet sich für die verschiedensten mathematischen Erkenntnisse eine entsprechende Anwendung. Die »reine« Zahlentheorie, die Hardy gemeinsam mit Ramanujan betrieb, bildet heute die Grundlage aller Verschlüsselungssysteme, mit denen wir Internet und Onlinehandel betreiben. Und selbst die so abstrakten Partitionen haben ihre Anwendungen in Informatik und Technik gefunden. Wenn es etwa darum geht, Rechenaufgaben auf Multiprozessorsystemen zu verteilen, so dass jeder Prozessor ungefähr die gleiche Menge an Arbeit zu erledigen hat, geht das nur mit der Berechnung der Partitionsfunktion.

Wenn also heute Wissenschaftler mit Supercomputern Klimamodelle erstellen oder die Explosion einer Atomwaffe simulieren, dann tun sie das unter anderem auf der Basis der Arbeit von Hardy und Ramanujan – und widerlegen damit – im Guten wie im Bösen – Hardys Behauptung, ihre Entdeckungen würden keinen Beitrag zum »Guten oder Bösen« leisten.

STROMWIRTSCHAFT BREMSKLOTZ FÜR DIE ENERGIEWENDE

Ingenieure mögen noch so ausgetüftelte Ideen für eine Versorgung mit erneuerbaren Energien vorlegen – oft blockieren Interessengruppen wie auch historisch gewachsene Strukturen den Fortschritt.



Peter Fairley ist Wissenschaftsautor in Victoria, Kanada.

► spektrum.de/artikel/1567850

► Seit mehr als einem Jahrzehnt wartet Wales auf das Gezeitenkraftwerk in der Swansea Bay. Machbarkeitsstudien zufolge könnte es elf Prozent der walisischen Haushalte mit Strom versorgen, denn die Bucht ist Teil des Bristol Channel, einer Meerenge mit bis zu 15 Meter Tidenhub. Doch nach wie vor sind die Baukosten unklar, ebenso die Auswirkungen auf den Fischbestand und die traditionellen Austernfarmen, ja auf die gesamte walisische Wirtschaft. Und so bleibt das Projekt vorläufig eine viel versprechende Idee.

Ob Gezeiten- oder Windkraftwerk, dergleichen geschieht häufig. »Planer unterschätzen meist die große Rolle politischer und wirtschaftlicher Prozesse«, erklärt die kanadische Historikerin Petra Dolata von der University of Calgary. Der Klimawandel dürfte daran nichts ändern. Um den Ausstoß an Kohlendioxid zu reduzieren, liegt es beispielsweise nahe, neue Kraftwerke dort zu bauen, wo sie besonders effizient arbeiten können. Deshalb versuchen



SJO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Forscher Wind, Sonneneinstrahlung, Regen und andere relevante Umweltgrößen zu ermitteln und dann mit immer besseren Modellen abzuschätzen, wo sich der technische und finanzielle Aufwand lohnt. Doch auch noch so rational begründete Programme lösen sich oft in nichts auf, wenn sie mit den Realitäten vor Ort konfrontiert werden.

Per Högselius, Wissenschafts- und Technologiehistoriker am KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, präsentiert in seinen Vorträgen zum Thema gern ein Bild von Schwäbisch Hall im 16. Jahrhundert. Damals war die Stadt ein Zentrum der Salzproduktion in Europa. Was wir heute ganz selbstverständlich als Würzmittel auf den Tisch stellen, diente damals auch dazu, Lebensmittel zu konservieren. Dementsprechend hoch war die Nachfrage, und so lohnte es sich, das dort salzhaltige Grundwasser aufzukochen und zu verdampfen. Der flämisch-deutsche Künstler Frans Hogenberg (1535 – 1590) erfasste in seinem Gemälde die dramatischen Auswirkungen dieser florierenden Industrie: kahle, baumlose Hänge. Im 16. Jahrhundert waren die Wälder rund um Schwäbisch Hall laut Högselius bereits abgeholzt und verfeuert. Der Künstler deutete sogar die damalige Lösung des Problems an, denn auf dem Fluss malte er treibende Stämme. »Als es vor Ort keine Wälder mehr gab, wechselte man also nicht zu einem anderen Brennmaterial oder gar einer anderen Industrie, sondern importierte Holz im großen Stil.« Das war zwar teuer, doch offenbar immer noch rentabel.

Die Lehre daraus lautet: Investitionen beziehungsweise die damit verbundenen Gewinnerwartungen, kulturelle Gewohnheiten sowie die Einbindung in Handelsnetze setzen ökonomische Prozesse in Gang, die den Status quo stabilisieren. »Sobald man eine bestimmte Richtung eingeschlagen hat, entsteht eine innere Logik, die es unabdingbar erscheinen lässt, den Weg weiterzugehen«, warnt Högselius.

Wegen dieser Eigendynamik setzen sich neue Energiequellen erst dann durch, wenn es mit den traditionellen nicht mehr geht. In Europa, China und anderen Teilen der Welt löste die Kohle das Feuerholz als Brennstoff erst ab, nachdem die Wälder im Zuge industriellen Wachstums großflächig verschwunden waren und globale Handelsnetze fossile Brennstoffe befördern konnten. Erdgas und Atomkraft setzten sich ebenfalls während solcher Energiekrisen in der Stromerzeugung durch. Diesen Zusammenhang erkannte allerdings nicht jeder Zeitgenosse. Auch heutzutage halten manche Interessengruppen an ihren eigenen, nicht immer rational nachvollziehbaren Vorstellungen fest, leugnen den Klimawandel oder lehnen die daraus abzuleitenden Konsequenzen aus wirtschaftlichen Gründen ab. Ökonomen arbeiten deshalb daran, Faktoren wie Gesundheit oder Umweltbelastung mathematisch zu erfassen und die Kraftwerks- und Stromnetzplanungen so transparenter zu machen.

Neue Kraftwerke für erneuerbare Energien werden zwar gründlich geplant, doch oft blockieren nicht technische oder ökologische, sondern soziale oder wirtschaftliche Probleme die Realisierung.

AUF EINEN BLICK EIGENNUTZ VOR UMWELTSCHUTZ

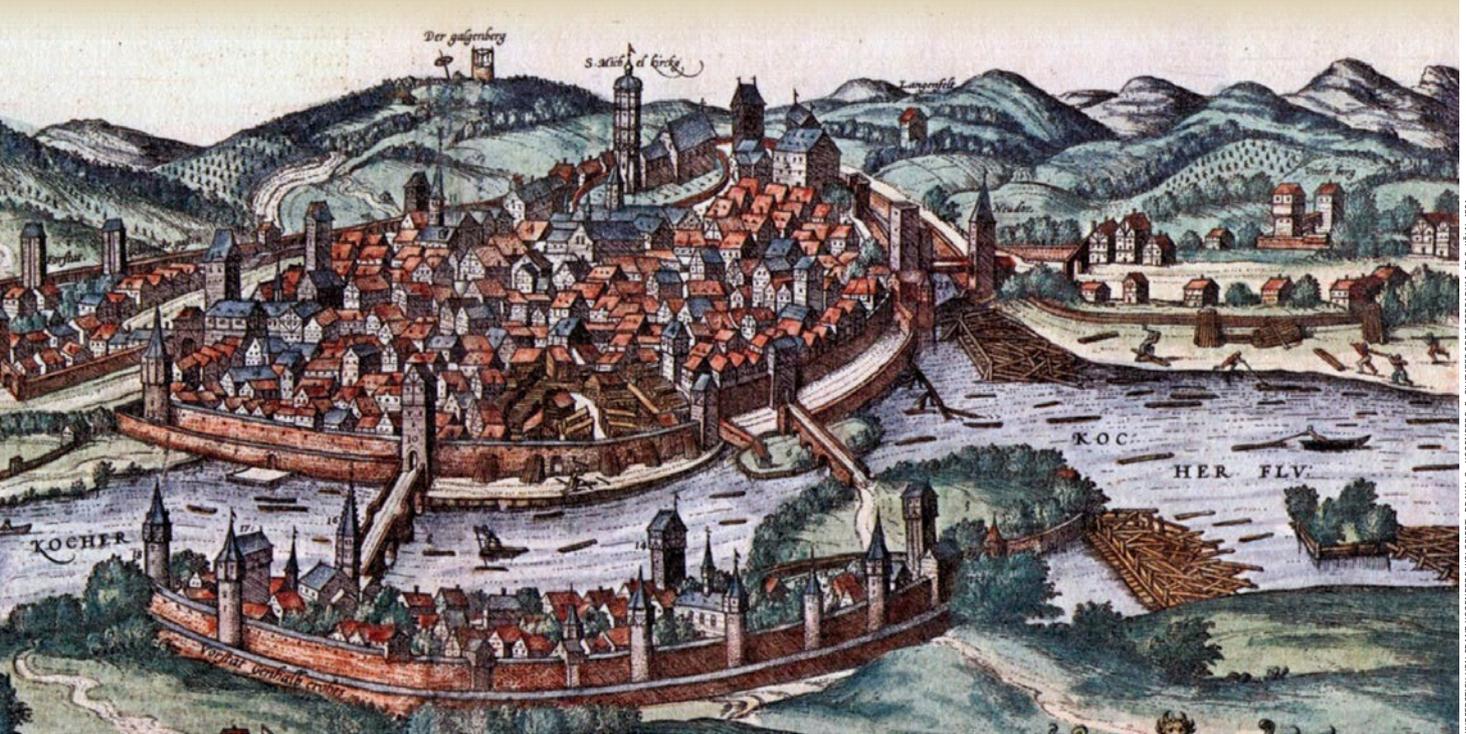
- 1** Strom erzeugende Kraftwerke sowie die zur Verteilung unabdingbaren Netze sollten sich in einer Weise entwickeln, die nachhaltige Energiequellen möglichst effizient einbindet.
- 2** Die erforderlichen Planungswerkzeuge stehen zur Verfügung, doch prallen die notwendigen Baumaßnahmen mitunter auf Umweltbedenken oder Anwohnerinteressen.
- 3** Das größte Hemmnis aber sind die Interessen von Unternehmen wie auch Staaten, bestehende Infrastrukturen weiter zu nutzen, um Investitionsgüter und Arbeitsplätze zu erhalten.

Unabhängig von sozialen und politischen Bedenken lautet das Kredo mancher Experten: Erneuerbare Energien lassen sich nur dann zuverlässig und kosteneffektiv nutzen, wenn die Kraftwerksstandorte in einem kontinentalen Maßstab optimiert werden. Das würde sogar den Bedarf an Energiespeichern reduzieren, wie eine Studie der US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) von 2016 ergab. Christopher Clack, Koautor der Studie und jetzt Geschäftsführer von Vibrant Clean Energy in Erie (Colorado), das Modelle für Stromversorgungsnetze entwickelt, versichert: »Wenn nur der teilnehmende Markt oder die Region groß genug ist, kann man Kohlendioxidemissionen und Kosten gleichzeitig reduzieren.«

Globalisierung der Stromwirtschaft

Das Konzept der Energieglobalisierung ersann 2004 der deutsche Energieberater Gregor Czisch, als er darauf hinwies, dass Windkraftwerke in Nordafrika und dem Mittleren Osten im Sommer maximale Leistung liefern, in Nordeuropa hingegen im Winter. Durch entsprechende Kombination ließen sich kosteneffektiv 100 Prozent des Energiebedarfs von 50 Ländern in Europa, Nordafrika und dem Mittleren Osten decken. Dabei ging er von mehreren hunderttausend Windturbinen aus, die noch von Biomasse- und schon existierenden Wasserkraftwerken unterstützt würden. Im Leitungsnetz zwischen Erzeugern und Verbrauchern sollte Gleichstrom fließen, der über lange Distanzen weniger Verluste verursacht als Wechselstrom.

Die NOAA-Studie konzentriert sich auf die USA im Jahr 2030. Die Autoren möchten den Ausstoß von Treibhausgasen vor allem durch Windenergie und große Solaranlagen reduzieren (Letztere waren 2004 noch zu teuer, kamen daher in Czischs Szenario nicht vor), ergänzt von wenigen Gas- und Kernkraftwerken. Treibhausgasemissionen durch die amerikanische Energieerzeugung würden so um bis zu 79 Prozent reduziert bei vermutlich gleichzeitig sinkenden Strompreisen. Eine Gruppe kanadischer, US-amerikanischer und mexikanischer Wissenschaftler entwickelt



KUPFERSTICH VON FRANZ JOSEPH VON BIRNBAUM, G. JOSEPH VON BIRNBAUM, E. JOSEPH VON BIRNBAUM, 1811

Die Salzproduktion von Schwäbisch Hall verschlang die Wälder der Umgebung. Im 16. Jahrhundert wurde Brennholz importiert, statt andere Energiequellen zu nutzen.

derzeit sogar einen Optimierungsplan für den ganzen Kontinent, der 2019 vorgestellt werden soll.

Ehrgeizige Stromoptimierungspläne, die die Installation tausender Kilometer von Hochspannungsleitungen erfordern, müssen aber immer noch entweder von einer Regierung oder von den zuständigen Behörden genehmigt werden. In den USA stehen dem oft Befürchtungen entgegen, dass lokale Energieerzeuger einem stärkeren Konkurrenzdruck ausgesetzt sind, wenn neue Leitungen Strom aus anderen Gebieten bringen. Netzbetreiber in Deutschland können damit umgehen, ringen jedoch um den Verlauf der als SuedLink bezeichneten Gleichstromtrasse, die Offshore-Windparks im Norden mit Süddeutschland verbinden soll. Denn viele Gemeinden lehnen es ab, dass überirdische Leitungen mitsamt Strommasten über ihr Gebiet führen.

Selbst in der Volksrepublik China bremsen sozialer und politischer Druck die Energiewende aus. Das Stromnetz wird dort einzig von der State Grid Corporation of China (SGCC) betrieben, dem größten Stromversorger der Welt. Dessen Umsätze übertrafen 2015 die von Duke Energy, dem größten amerikanischen Unternehmen dieses Wirtschaftssektors, um das 4-Fache. Die SGCC legt nicht nur

fest, wie viel Strom jedes einzelne Kraftwerk verkaufen darf, sie lässt oft bei Netzüberlastung Wind-, Solar- und Wasser- statt Kohlekraftwerke herunterfahren. Dies sei besser für die Netzstabilität, lautet die Begründung. Dem unabhängigen Energieberater Chi-Jen Yang zufolge sichert das Unternehmen damit aber lediglich seine Umsätze im konventionellen Bereich. »Die Zentralregierung hat starke Kapitalinteressen an der Kohleindustrie«, sagt er, »und mischt sich deshalb im Markt ein, um deren Profitabilität zu schützen.« Mit ernststen Folgen: Solches Abschalten der Kraftwerke reduzierte 2015 die Stromerzeugung durch Windkraft um 15 Prozent, die Ausbeute der Fotovoltaik um 10 Prozent. Um die Verluste nicht weiter steigen zu lassen, setzten die Behörden in Peking den Bau einiger Windfarmen aus.

Lange Leitungen für den Kohlestrom

Yang sagt, dass die SGCC ihr Leitungsnetz ausbauen könnte, um das Problem zu beheben. Und tatsächlich errichtet das Großunternehmen neue Gleichstromleitungen sehr schnell, weil es keine Rücksicht auf Einsprüche von Anrainern nehmen muss. Doch beim Entwurf neuer Stromtrassen hatte man nicht die Wind- und Sonnenenergie im Kopf, sondern den Kohlestrom, der vom Norden Chinas in die großen Städte im Osten, wie Peking, gebracht werden musste. Dort wurden nämlich nach Protesten gegen die Luftverschmutzung Kraftwerke abgeschaltet.

Die Entwickler haben aber noch einen gewissen Spielraum. So verschiebt sich laut Yang das Wachstum der Windenergieerzeugung vom Norden und Westen immer mehr auf küstennahe Standorte und Offshoreprojekte in den Ostprovinzen Chinas. Wenn die Windenergie näher an die Millionenstädte rückt, wird sie auch unabhängiger von Fernleitungen. Trotzdem schätzt er die Energiewende im Reich der aufgehenden Sonne im Vergleich zu den USA als unsicherer ein. Denn dort seien es Bundesstaaten und Konzerne, die den Ausbau erneuerbarer Energien vorantreiben, während in China alles vom Willen der Zentralregierung abhängt – und der könne sich schnell ändern.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

VISIONA / STOCK.ADOBE.COM

Indien hat ganz andere Sorgen. Dort leben derzeit mehrere hundert Millionen Menschen ohne Zugang zu Elektrizität. Dezentrale Lösungen könnten schnell Abhilfe schaffen, doch »selbst dort, wo das Hauptstromnetz immer wieder ausfällt, wollen die Leute unbedingt daran angeschlossen werden«, konstatiert Jamie Cross von der University of Edinburgh. Der Grund sei der auf dem Subkontinent verbreitete Mythos, große Kraftwerke brächten ökonomische Unabhängigkeit.

Indiens erster Premierminister Jawaharlal Nehru (1889–1964) nannte Megastaudämme die »Tempel des modernen Indien«. Mehr als 60 Jahre später sind solche Großvorhaben zwar in Verruf geraten, da sie die Umwelt zerstören und oft mit massiven Umsiedlungen einhergehen, der Mythos aber ist immer noch lebendig. Es hilft auch nicht, dass es inzwischen gute Möglichkeiten gibt, erneuerbare Energien einzusetzen, von solarbetriebenen Handlaternen bis zu Mikrostromnetzen für ganze Dörfer. Denn die können dann doch wenig mehr, als Handys aufzuladen und Lampen zum Leuchten zu bringen. Cross berichtet von einem Dorf im indischen Bundesland Bihar, wo die Bewohner 2014 ein Angebot von Greenpeace auf ein solches Mikronetz mit der Begründung ablehnten: »Wir wollen echte Elektrizität!« Ähnlich würden wohl auch die Bewohner von Goudaguda im indischen Bundesstaat Odisha reagieren. Sie gehören zu den Adivasi, einer in Indien wenig geachteten ethnischen Minderheit. Ihrer Meinung nach wird der Zugang zum Hauptstromnetz von Angehörigen

höherer Kasten blockiert. »Der ersehnte Anschluss wäre in ihren Augen ein Symbol dafür, dass der Staat sie als gleichberechtigte Bürger anerkennt.«

Dass solche Mythen auch in den Industriestaaten wirken, zeigt die Planung für das Gezeitenkraftwerk in der Swansea Bay. Das Projekt gilt in Wales als Zeichen des Neuanfangs – eine innovative Technologie sollte die einstige Bergbauregion zukunftsfähig machen. Als die britische Regierung 2015 Planungen für das Projekt genehmigte, glaubte der Gemeinderat, es würde Swansea als Musterbeispiel für die Erzeugung erneuerbarer Energien weltweit bekannt machen. Mehr als zwei Jahre danach diskutiert die Regierung aber immer noch über die Höhe der Subventionen. Das Projekt soll 1,5 Milliarden Euro kosten. Wie viel des Investitionsrisikos sollte der Staat übernehmen, um diese Technologie voranzubringen? Das ist nur eine weitere nichttechnische Frage die – zum Leidwesen der Politiker – kein Modell beantworten kann. ◀

QUELLE

MacDonald, A. E. et al.: Future Cost-Competitive Electricity Systems and their Impact on US CO₂ Emissions. In: Nature Climate Change 6, S. 526–531, 2016

nature

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature 551, S. S150–S152, 30. November 2017

Spektrum PLUS⁺

NEU!

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

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

- Download des Monats im Juli: **Spektrum** KOMPAKT »Maya, Inka und Azteken. Die Hochkulturen Lateinamerikas«
- Redaktionsbesuch bei **Sterne und Weltraum** am 13. August 2018
- Leserekursion zum Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen am 24. August 2018
- Ermäßigter Reisepreis für die Kurzreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein« vom 3. bis 7. Oktober 2018
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung!

Spektrum.de/plus

ARCHÄOLOGIE SO LEBTEN UND STARBEN DIE SÖLDNER

Vom Hunger bedroht, verdingten sich viele junge Männer in den katholischen und protestantischen Heeren. Tausende fielen in der Schlacht von Wittstock, 125 von ihnen fanden in einem Massengrab ihre letzte Ruhestätte.



Sabine Eickhoff forscht am Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseum über die Archäologie des Mittelalters und der Neuzeit.

» spektrum.de/artikel/1545911

SERIE

Der Dreißigjährige Krieg

Teil 1: Juni 2018

**Wie kam es zum
Dreißigjährigen Krieg?**

Axel Gotthard

Chronologie des Kriegs

Daniel Carlo Pangerl

Teil 2: Juli 2018

So lebten und starben die Söldner

Sabine Eickhoff

Teil 3: August 2018

War der Dreißigjährige Krieg europäisch?

Georg Schmidt

ALVA GROTHE, BRANDENBURGISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE UND ARCHÄOLOGISCHES LANDESMUSEUM, BOBANI

125 Leichen waren nach der Schlacht von Wittstock in einem Massengrab in vier Lagen verscharrt worden. Die Archäologen konnten 88 Individuen identifizieren (oben farbig dargestellt). Grau gezeichnet sind Skelette in dem bei Bauarbeiten zerstörten Bereich, die sich anhand von Einzelknochen rekonstruieren ließen (großes Foto: Schädel aus der zweiten Lage, kleines Foto: vollständige Überreste der dritten Lage).



ANJA GROTHE, BOLOW



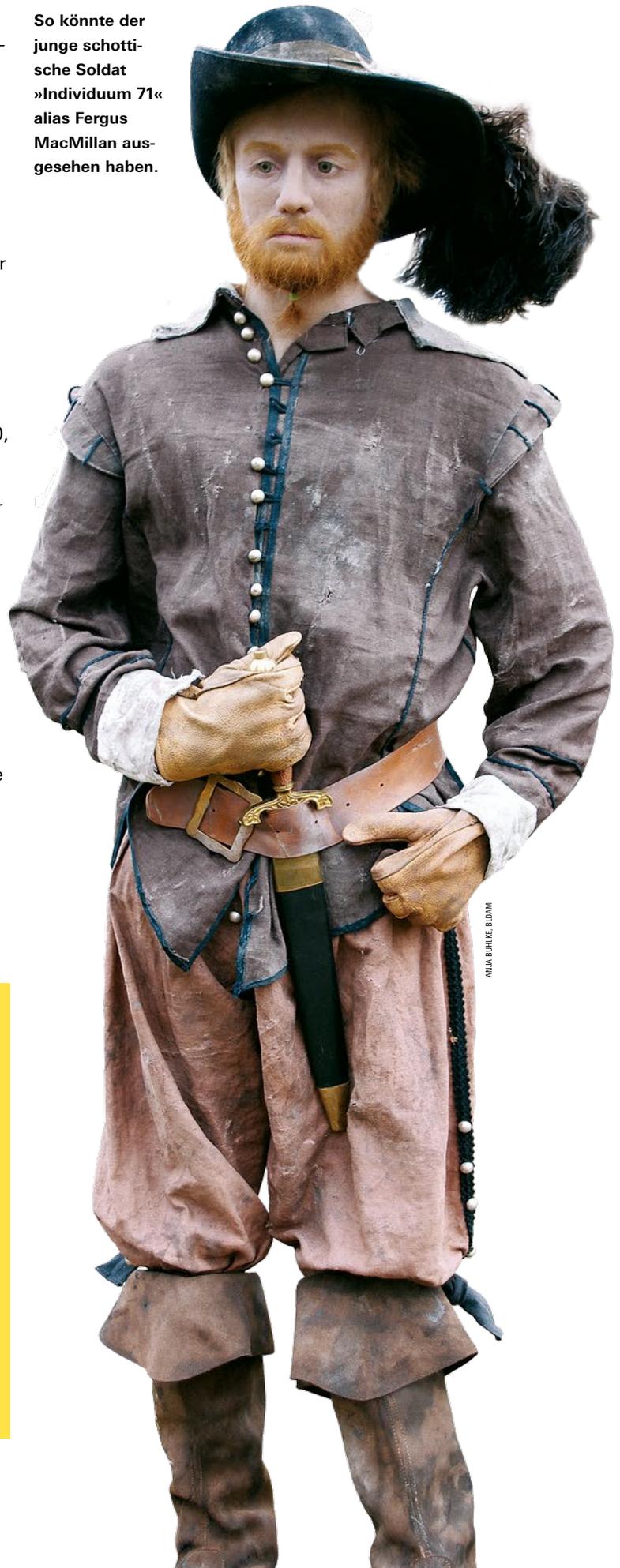
ANJA GROTHE, BOLOW

»Die letzten Monate waren hart. Im Spätsommer erhielten wir Schotten den Befehl, uns mit der schwedischen Hauptarmee zu vereinen. Das schnelle Marschtempo, die schwere Ausrüstung, die miserable Versorgung und wiederkehrende Angriffe haben uns heftig zugesetzt.« Fergus MacMillan, Musketier einer schottischen Brigade, kämpfte am 4. Oktober 1636 vor den Toren von Wittstock für die schwedische Seite gegen das vereinte Heer des Kaisers und des sächsischen Kurfürsten. Es war das Ende eines mehrwöchigen Katz-und-Maus-Spiels: Der schwedische Feldmarschall Johan Banér versuchte eine Entscheidungsschlacht zu erzwingen, der sich die Verbündeten immer wieder entzogen. Ende September gelang es ihm jedoch durch mehrtägige Märsche, den bei Wittstock lagernden kaiserlich-sächsischen Truppen die Rückzugswege abzuschneiden.

Als das 15 000 bis 22 000 Mann starke schwedische Heer die Ebene erreichte, hatte sich die mindestens 18 000, vielleicht 22 000 Mann zählende Armee des Gegners bereits in einem strategisch günstigen Areal südwestlich der Stadt verschanzt und erwartete den Angriff in sicherer Stellung. Doch Banér schickte seine Kavallerie über beide Flanken des Gegners in dessen Rücken. Dieser musste die Deckung verlassen, und es begann ein stundenlanges Gemetzel. Bei Einbruch der Dunkelheit endeten die Kämpfe ohne eindeutigen Sieger. Wer noch lebte, ließ sich ermattet auf dem Boden nieder. Offiziere holten Meldungen zu den Verlusten ein. Etwa drei Stunden später erkannten die Verbündeten ihre Niederlage und verließen das Schlachtfeld im Schutz der Nacht.

Die Kämpfe forderten laut zeitgenössischen Berichten etwa 5 000 Verwundete und 3 000 Tote, darunter auch jene 125, deren Skelette 2007 bei Bauarbeiten zu Tage kamen. Der Fund war eine Sensation, denn trotz der geschätzt 250 000 Gefallenen in den großen Auseinandersetzungen des Dreißigjährigen Kriegs war dies die erste Beisetzung, die auf einem Schlachtfeld entdeckt wurde. Sofern man bei einem Massengrab überhaupt von einer Beisetzung

So könnte der junge schottische Soldat »Individuum 71« alias Fergus MacMillan ausgesehen haben.

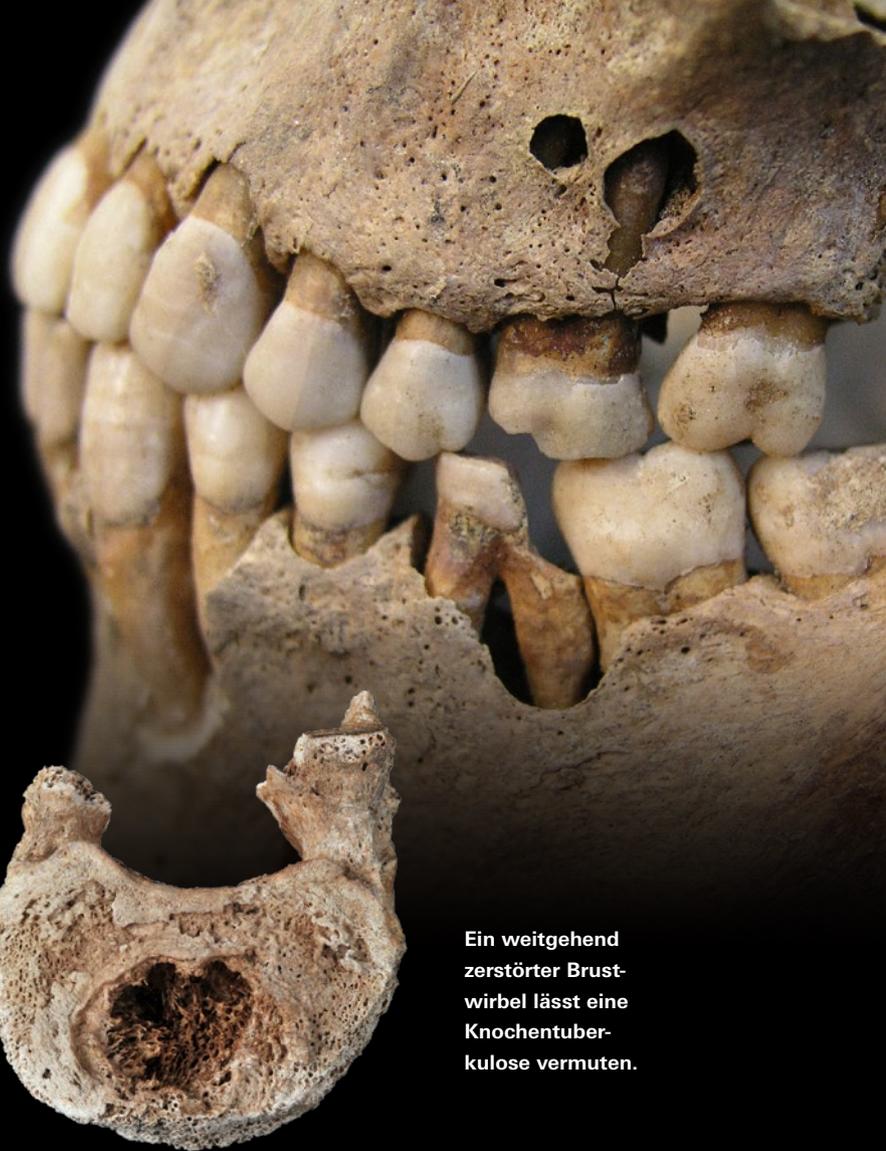


ANJA BUNKE BUDAM

AUF EINEN BLICK MUSKETIER NUMMER 71

- 1** 1636 trafen das schwedische und das kaiserlich-sächsische Heer vor Wittstock in Brandenburg aufeinander. Die Schlacht kostete Tausende das Leben.
- 2** 125 Söldner wurden in einem Massengrab beigesetzt. Ihre Knochen verraten viel über das harte Leben der Berufssoldaten, zu deren Alltag Verwundungen ebenso gehörten wie Arthrose.
- 3** Einen traurigen Rekord hielt das »Individuum 71«: Der Musketier wurde von einer Pistolenkugel, einer Hellebarde und einem Messer verletzt, sein Leichnam noch von einem Pferdehuf getroffen.

Rillen im Zahnschmelz, Zahnstein, starke Abnutzung, Karies mit drei sehr tiefen Löchern und jeweils zwei Fisteln im Ober- und Unterkiefer – die Zähne dieses etwa 30-Jährigen lassen auf Mangel, fehlende Hygiene und Schmerz schließen.



Ein weitgehend zerstörter Brustwirbel lässt eine Knochentuberkulose vermuten.



Diese Schienbeine (links) waren wohl infolge einer Rachitis während der Kindheit verbogen.

GEBIS: BETTINA JUNGCLAUS, BLDAM: SCHIENBEINE UND BRUSTWIRBEL: DETLEF SOMMER, BLDAM

sprechen kann: Meist splitternackt, ohne jede Beigabe und wohl auch ohne Bestattungsritus hatte man die Leichen unter die Erde gebracht. Für Archäologen und Anthropologen bergen ihre Überreste trotzdem wertvolle Informationen zu den Lebensbedingungen einfacher Soldaten in der Frühen Neuzeit, einer bis dahin kaum erforschten Gesellschaftsschicht. So entwickelten sich die inzwischen abgeschlossene, aber noch nicht publizierte Analyse des Massengrabs und begleitende Untersuchungen zu einem der größten deutschen Projekte der Schlachtfeldarchäologie.

Knochen erzählen vom Söldnerleben

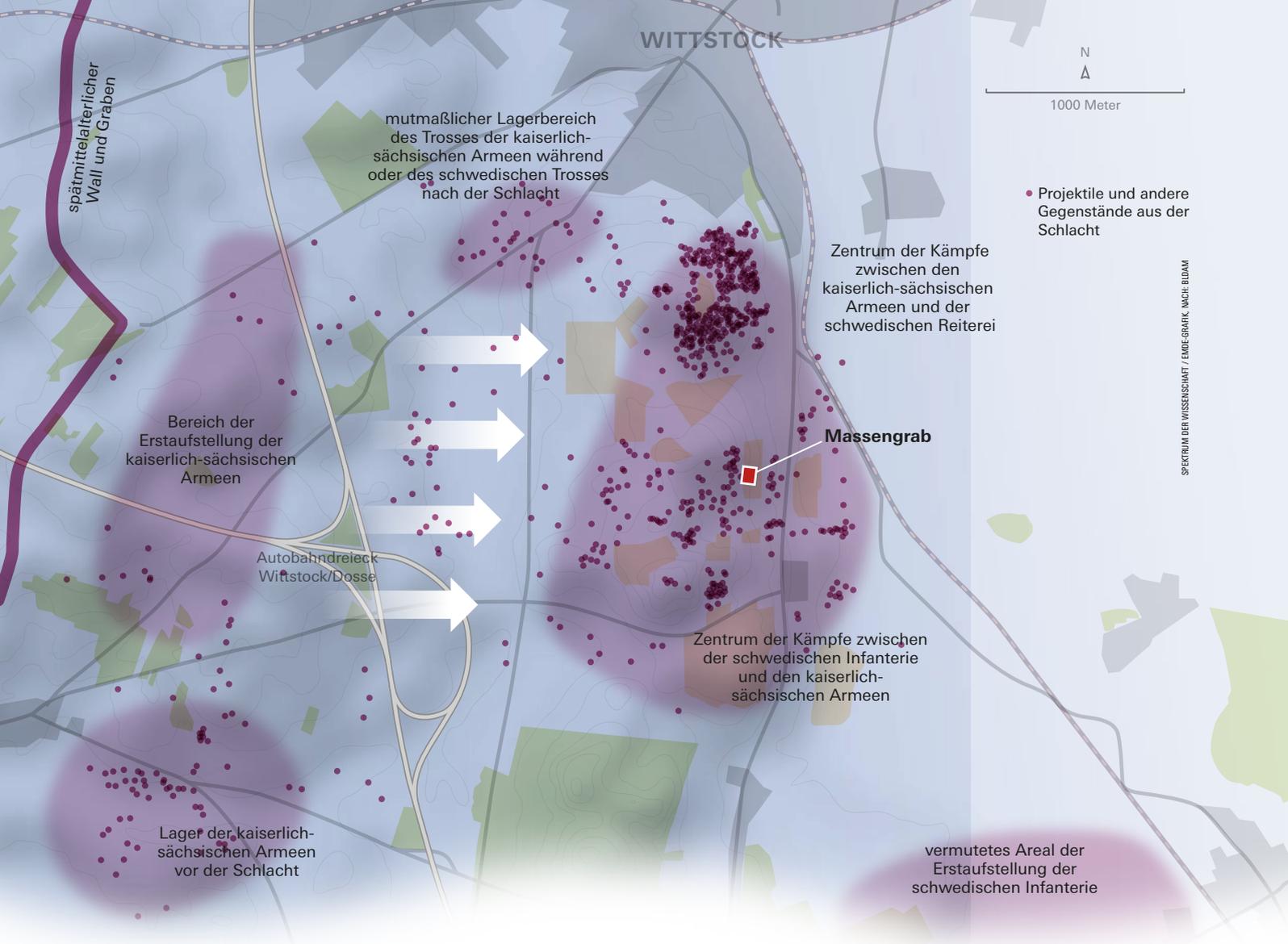
Zwar riss ein Bagger zahlreiche Skelette auseinander, doch 88 wurden unversehrt geborgen. Die Mehrzahl der Männer hatte das 21. bis 36. Lebensjahr erreicht, die beiden jüngsten waren gerade einmal 18, der älteste immerhin über 40. Im Durchschnitt waren die Männer 1,70 Meter groß gewesen und unterschieden sich damit nicht von der Normalbevölkerung. Zumindest in dieser fortgeschrittenen Phase des langen Kriegs gab es offenbar keine besonderen Anforderungen bei der Anwerbung.

Die zahlreichen Analysen an den Gebeinen erlaubten es, individuelle Aspekte zu erkennen und sogar mögliche

Biografien der Söldner zu entwerfen. Gemeinsam mit Anthropologen rekonstruierte eine Rechtsmedizinerin das Aussehen eines Mannes, der als fiktiver Soldat Fergus MacMillan das Leben jener jungen Männer greifbar machen soll, die vor Wittstock fielen.

MacMillan – katalogisiert als Skelett »Individuum 71« – starb im Alter von 22 Jahren, nachdem ihm eine Hellebarde den Schädel gespalten hatte. Es war das traurige Ende eines sicherlich entbehrungsreichen Lebens. Die Isotopenverteilung in seinem Zahnschmelz – sozusagen ein Fingerabdruck der geologischen Verhältnisse in seiner Umgebung während seiner frühen Kindheit – machen eine Herkunft aus Schottland wahrscheinlich. Ackerbau und Viehzucht konnten in diesem kargen und rauen Land nicht viele Mäuler ernähren. Hunger war ein häufiger Gast, wie feine Rillen in den Zähnen und leicht verbogene Schienbeine verraten: Unterernährung hatte die Zahnschmelzbildung gestört, Vitamin-D-Mangel die Knochen zeitweise weich werden lassen.

Schriftquellen berichten von mehreren Aushebungen in Schottland. Als einer von etwa 50 000, die bis 1648 im Namen Schwedens im Deutschen Reich kämpften, verließ der Junge sein Dorf, um sich als Soldat zu verdingen. Und



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRABIK (MCH; BIDAM)

wie ihm erging es vielen anderen, die in jenem Grab landeten: Mehr als drei Viertel der Skelette zeigten Spuren schlechter Ernährung in der Kindheit. Bei einigen waren sie gravierend, beispielsweise waren die Unterschenkel in Folge einer Rachitis verbogen (siehe Foto S. 81).

Isotopenmessungen von Stickstoff zur Analyse der Ernährung wiesen immerhin einen regelmäßigen Konsum von Milchprodukten, Eiern und Fleisch im Erwachsenenalter nach. Die Söldner hatten davon sogar mehr als die brandenburgische Zivilbevölkerung. Immerhin litt nur die Hälfte von ihnen unter Karies. Auch das ist ein Hinweis auf eine bessere Ernährung als üblich, belegt der Wert doch eine geringere Aufnahme von Brot und Brei, deren Kohlenhydrate durch den Speichel zu Karies fördernden Säuren werden.

Allerdings war die Zahnhygiene wie während der Frühen Neuzeit üblich im Heerlager alles andere als gut. Wo Karies ausbrach, zerstörte sie mitunter komplette Zähne; wo Bakterien in den Wurzelkanal gelangten, entstanden Entzündungen und Abszesse, die ein lebensbedrohliches Ausmaß annehmen konnten. Bei einem Soldaten war der schützende Zahnschmelz abgekaut, und die darunterliegende Hartschmelz lag frei – die Zähne reagierten nun empfindlicher beispielsweise auf heiße oder sehr kalte Nahrung. Vermutlich hatte der Mann in

einem unbekanntem Zeitraum beim Essen von Brot häufig den Abrieb der Mahlsteine aufgenommen.

Zwar mochte der Kriegsdienst den Bauch füllen, er verlangte aber offenkundig harte körperliche Arbeit. Bei fast 80 Prozent der Skelette waren einzelne Knochen durch ständige Belastungen in charakteristischer Weise verändert. Wer häufig und lang andauernd zu Pferd saß, dessen Hüftgelenke zeigten erweiterte Flächen, so genannte Reiterfacetten. Die Infanteristen hingegen entwickelten infolge langer Märsche mit schwerem Gepäck besonders kräftige Beinknochen. Dickere Schulterknochen waren vermutlich die Folge des regelmäßigen Drills mit Musketen, Piken und anderen schweren Waffen.

Klamme Zelte, rauchende Feuer

An die schlechten Lebensbedingungen im Heerlager konnte sich allerdings kein Körper anpassen. In der Luft hing Rauch von den vielen offenen Feuerstellen, in den Zelten war es klamm. Husten und Schnupfen gehörten sicher zum Soldatenalltag, an den Skeletten hinterließen gravierende Erkrankungen wie Mundfäule oder eitriges Nasenentzündungen poröse und neu gebildete Knochen. Etliche Schädel wiesen Spuren von Knochenhautentzündungen auf, vermutlich die Reaktion auf eine durch Läuse oder Ekzeme immer wieder entzündete Kopfhaut.



Anhand von Luftaufnahmen und Kleinfunden (oben: Projektilen für Musketen und andere Handfeuerwaffen, Kalibergrößen von 9,7 bis 19 Millimeter Durchmesser ansteigend) rekonstruierten die Forscher, wo die beiden Heere und ihr jeweiliger Tross vermutlich lagerten, aufmarschierten und miteinander kämpften (links). Artilleriestellungen wurden bislang nicht nachgewiesen.

Auch chronische Entzündungen der Knochenhaut an den Schienbeinen waren keine Seltenheit – als Ergebnis schlecht sitzender Stiefel. An der Wirbelsäule vieler Männer ließen sich zudem Knochenschäden und Bandscheibenvorfälle ablesen. Dazu kamen leichte bis mittelschwere Arthrosen sowie degenerative Veränderungen an Hand- und Ellenbogen-, Hüft-, Knie- und Sprunggelenken. Jeder vierte Soldat litt noch dazu an einem plötzlich entstandenen, akuten Gelenkdefekt, weil kleine Knorpelteile durch Überlastung abgesprengt worden waren. Starke Schmerzen, Entzündungen und Schwellungen waren die Folge. Im schlimmsten Fall ließ sich das betroffene Gelenk gar nicht mehr bewegen.

Etlche der Männer waren in früheren Gefechten schwer verwundet worden. Einem hatte man beispielsweise einen Dolch in den Rücken gestochen, einen anderen mit dem Kriegshammer auf den Kopf geschlagen; ein Dritter trug die Hiebspur eines Schwerts quer über dem Gesichtschädel. Einem 25 bis 29 Jahre alten Schotten war wohl schon mehrere Jahre zuvor, eventuell bei einem schweren Sturz, der rechte Oberarmkopf zertrümmert und die Gelenkpfanne des Schultergelenks völlig deformiert worden. Als Fußsoldat taugte er kaum noch. Möglicherweise handelte es sich um einen Offizier, dessen Erfahrung und Ausstrahlung trotz seiner stark eingeschränkten Beweglichkeit gefragt waren. Der britische Historiker Steve Murdoch von der St Andrews University weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Schotten meist bei ihren Regimentern blieben und nicht – wie sonst für Söldner üblich – zum besser Zahlenden wechselten.

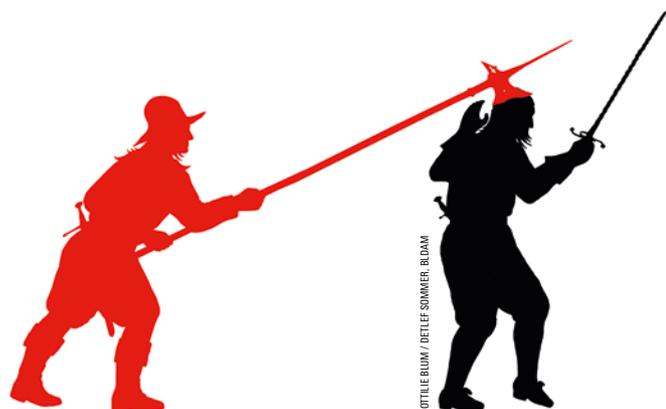
Um dieses Elend zumindest kurzzeitig vergessen zu machen, suchten die Männer Augenblicke des Genusses oder der Geselligkeit. Großer Beliebtheit erfreuten sich Würfelspiele. Oft setzten sie hohe Summen ein oder verzockten Lohn oder Beute in der Hoffnung auf Gewinn. Nicht nur der Nikotinkonsum in Form von blauem Dunst, Kau- und Schnupftabak war bei einfachen Soldaten wie Offizieren alltäglich, sondern auch das »viehische Vollsaufen«. Zwei Zapfhähne kleiner Schnapsfässer vom Wittstocker Schlachtfeld belegen, dass man sich vor den Gefechten Mut angetrunken hat. Prostitution, Ehebruch und Sodomie waren ebenfalls an der Tagesordnung. Zeitgenössische Berichte verraten, dass »Marketenderinnen« im Tross der Heere mitzogen, doch die Knochen von elf der Gefallenen demonstrieren, dass dieser Trost ein Risikobarg: Syphilis. Die Geschlechtskrankheit zeigte sich zunächst in grippeähnlichen Symptomen und Hautausschlag. Wenige Jahre nach der Infektion entstehen Verdickungen an verschiedenen Organen sowie an den Knochen. Wer als Söldner lange genug lebte, entwickelte Jahre später oft neurologische Störungen bis zur Demenz.

Wo kämpften die Heere wirklich?

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden auch gut 6 der mehr als 15 Quadratkilometer des Kampfgebiets mittels Luft- und Laserscanaufnahmen sowie Metallsonden untersucht. Die ersten beiden Methoden lieferten Fotos und Höhenpläne der Oberfläche, in denen sich selbst Erhebungen von wenigen Zentimetern deutlich abzeichnen. Dagegen zeigten die Sonden Objekte an, die im dunklen Ackerboden mit bloßem Auge nur schlecht zu erkennen sind. Etwa 1100 durchweg kleine Fundstücke aus der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts brachten die Forscher ans Licht. Darunter waren gut 900 Bleiprojektilen von Musketen, Pistolen und anderen Feuerwaffen, außerdem zahlreiche Knöpfe, Schnallen, Verschlussaken und Münzen aus Buntmetall sowie – freilich selten – aus Silber. Etlche dieser Artefakte fielen während der Gefechte zu Boden. Solche von den kaiserlich-sächsischen Soldaten

gingen mitunter bereits im Heerlager verloren – und halfen nun zusammen mit den Luftaufnahmen, das Lager erstmals zu lokalisieren. Die verschiedenen Überlieferungen machen dazu keine Angaben. Doch die neuen Daten legen nahe: Offenbar hatte man es nicht weit vom Dorf Papenbruch und damit etwa vier Kilometer vor den Toren Wittstocks aufgeschlagen.

Viele zeitgenössische Schriftquellen erwähnen Schanzanlagen. Matthäus Merian der Ältere (1593–1650) stellte sie in einem Kupferstich zur Schlacht von Wittstock als große, von Gräben und einem Wall geschützte Stellungen



dar. Aus der Luft lassen sich bauliche Strukturen aus alter Zeit oft gut erkennen, weil sie die Wachstumsbedingungen für Pflanzen dauerhaft verändern. Unter diesem Aspekt suchten die Luftbildarchäologen nach Spuren der Schanzanlagen, doch sie entdeckten nichts. Dies lässt nun den Schluss zu, dass die Soldaten der verbündeten Regimenter nur einfache Plankenwände im Boden eingegraben hatten. Denkbar sind auch andere leichte, nicht in den Untergrund eingreifende Befestigungen, etwa mannshohe, mit Steinen und Erdrich gefüllte und in Reihe aufgestellte Flechtkörbe.

Fundverteilungen und Luftaufnahmen halfen zudem, weitere Überlieferungen beispielsweise durch den drei Jahre später angefertigten Kupferstich Matthäus Merians zu korrigieren. Südlich von Wittstock verläuft eine Hügelkette mit dem Scharfenberg als südlichster Erhebung (siehe Karte S. 82). Dieser in zeitgenössischen Quellen auch »Schreckensberg« genannte Anstieg in knapp vier Kilometer Entfernung soll das Zentrum der Kampfhandlungen gewesen sein. Doch die Fundverteilungen widersprechen dem: Nur an den nördlichen Hängen fanden Kämpfe statt, die sich auch auf die Infanterie beschränkten. Hauptsächlich aber konzentrierten sich die Auseinandersetzungen des Fußvolks auf dem nach seiner damaligen Nutzung benannten mittleren Weinberg. Objekte der Kavallerie

Eine Hellebarde verwundete »Individuum 71« schwer, aber das Opfer war vermutlich nicht gleich tot.



zeigen zudem an, dass Reiter auf dem als Bohnenkamp bezeichneten nördlichsten Hügel kämpften – nicht einmal einen Kilometer von Wittstock entfernt.

Deren Brutalität bezeugen wieder die Skelette aus dem Massengrab: Kaum eines ist ohne Hieb-, Stich- oder Schussverletzung, Trümmerbruch oder sonstige Fraktur, die wohl am Todestag zugefügt wurde, da Heilungsspuren nicht zu finden sind. Mitunter erlitt ein Soldat während der Schlacht gleich mehrere Verletzungen. Ob lebenswichtige Organe betroffen waren, lässt sich an den Knochen allerdings nicht ablesen. Manches Opfer gelangte wohl ins Massengrab, weil es schlicht verblutete.

Mit den Methoden moderner Forensik wurden an den 88 intakten Skeletten eine Stich- sowie 30 Hiebverletzungen entdeckt und eingehend untersucht. Da sie sich an den Schädeln häufen, war der Kopf offenbar das bevorzugte Angriffsziel für Degen oder Säbel, Hellebarde oder Reiteraxt, Keule oder Kriegshammer. Außerdem entdeckten die Anthropologen acht Ein- oder Austrittslöcher in den Schädelknochen. Allerdings zielten die Schützen meist auf die rechte Schulter oder den Unterbauch des Gegners – man wollte ihn kampfunfähig machen oder verbluten lassen. Das jedenfalls verraten die Positionen von 24 Bleikugeln, die bei der Ausgrabung zwischen den Knochen entdeckt wurden. Weitere Facetten eines Gemetzels liefern andere Spuren: Einem Soldaten war der rechte Arm so verdreht worden, dass Elle und Speiche zersplitterten; zwei andere gerieten unter schwere Lasten – vermutlich wurden sie von Pferdekarren überrollt und ihr Kopf dabei tödlich gequetscht.

Bekleidet nur mit dem letzten Hemd

Der Schotte MacMillan hält einen traurigen Rekord, wie sein fiktiver Bericht erzählt: »Als wir das Kampfgebiet am Weinberg erreichten, waren die Gefechte rundherum bereits entbrannt. Wir schossen Salve um Salve, um uns den Gegner vom Hals zu halten. Dabei erwischte mich die Pistolenkugel eines sächsischen Kürassiers im rechten Oberarm. Der Feind war so stark, dass sich unsere festen Aufstellungen auflösten und die Kameraden zu Degen und Dolch griffen. Ich versuchte mich mit der linken Hand zu verteidigen, so gut es ging – bis mich eine Hellebarde an der Schläfe traf.«

Vermutlich war er nicht sofort tot: Eine Schnittkerbe an einem Halswirbel zeigt, dass ihm wohl auch die Kehle durchtrennt wurde. Ein Pferdehuf zertrümmerte dem Leichnam schließlich noch den Unterkiefer.

Unmittelbar nach der Schlacht suchte man eigene und feindliche Offiziere, so berichtete Feldmarschall Banér seiner Regierung. Wer noch lebte, wurde gesund gepflegt und gegebenenfalls gegen einen Gefangenen der eigenen Seite ausgetauscht; die Toten überführte man in ihre Heimat oder setzte sie an der Wittstocker Kirche bei. Das Hauptinteresse galt freilich allem Verwertbaren: Luntten, Kanonenkugeln, Waffen. Dabei wurden einfache Soldaten, ob tot oder lebendig, geplündert, wie der archäologische Befund enthüllt. Aus der Erde des Massengrabs siebten die Archäologen ein paar Haken, Ösen und Knöpfe, die einst Unterhemden zusammenhielten, jedoch keinerlei

Überreste sonstiger Oberbekleidung, ebenso wenig von Schuhen, Taschen oder Waffen. Allenfalls mit dem sprichwörtlich letzten Hemd bekleidet wurden die Toten schließlich bestattet.

Das war allerdings mehr als damals üblich: In der Frühen Neuzeit blieben Leichen oftmals auf den Schlachtfeldern liegen, ein Fraß für Tiere. Hinweise in zeitgenössischen Berichten und in den Texten von Heimatforschern des 19. und 20. Jahrhunderts lassen aber bei Wittstock sogar mehrere Massengräber vermuten. Für die 125 Toten vom Weinberg hob man eine etwa 6 mal 3,5 Meter große rechteckige Grube aus und schichtete die Leichen darin dicht an dicht in vier Lagen übereinander. Dabei ignorierte man seit Jahrhunderten praktizierte christliche Bestattungsriten. So wurden die Toten nicht durchgehend mit Blickrichtung nach Osten, also Richtung Jerusalem, beigesetzt. Auch achtete niemand darauf, ob ihre Hände neben dem Körper oder auf dem Becken lagen.

Zudem unterschied man vermutlich nicht zwischen Freund und Feind. Strontiumisotope, die während der Kindheit mit dem Trinkwasser und der Nahrung aufgenommen und in den Zahnschmelz eingebaut werden, verraten, dass elf Männer in Schottland, zwei in Schweden, drei in Finnland und sechs im damals zu Schweden gehörenden Lettland aufgewachsen waren. Diese 22 standen wahrscheinlich im Dienst des nordischen Königreichs. Weitere 35 Männer mochten ebenfalls aus diesen Gebieten stammen, doch überschneiden sich die bei ihnen ermittelten Isotopenmuster zu sehr mit denen anderer Herkunftsgebiete – eine exakte Aussage ist nicht möglich. Die Analysewerte der 31 übrigen Skelette verweisen auf Mitteleuropa. Diese Männer waren nicht in Schottland oder Skandinavien, sondern vermutlich irgendwo im damaligen Deutschen Reich aufgewachsen und für die kaiserliche oder sächsische Partei in die Schlacht gezogen. Selbst in Italien oder Spanien angeworbene Söldner könnten unter den Toten sein.

Das Ergebnis belegt somit nicht zweifelsfrei, dass man alle Gefallenen vom Weinberg gemeinsam bestattete. Das Forscherteam vermutet jedoch, dass Gegner aus weit auseinanderliegenden Gegenden Europas gemeinsam im Grab ihre letzte Ruhe fanden. So dicht, wie sie in ihren engen Kampfformationen vor Beginn der Schlacht standen, so dicht wurden sie in Reih und Glied in die Grube gelegt. Die Wiederentdeckung des Massengrabs nach mehr als 370 Jahren gab die Gelegenheit zur sorgfältigen Untersuchung der bis dahin völlig unbekanntesten einfachen Soldaten. Damit erhalten Männer wie »Individuum 71« nicht nur eine Lebensgeschichte, sondern auch ein Gesicht. ◀

QUELLEN

Eickhoff, S., Schopper, F. (Hg.): 1636 – ihre letzte Schlacht. Leben im Dreißigjährigen Krieg. Ausstellungskatalog. Theiss, Stuttgart 2012

Eickhoff, S., Schopper, F. (Hg.): Schlachtfeld und Massengrab. Spektren interdisziplinärer Auswertung von Orten der Gewalt. Forschungen zur Archäologie im Land Brandenburg 15. Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum, Wünsdorf 2014

REZENSIONEN



ÖKOLOGIE ERSATZ- PARADIESE SCHAFFEN

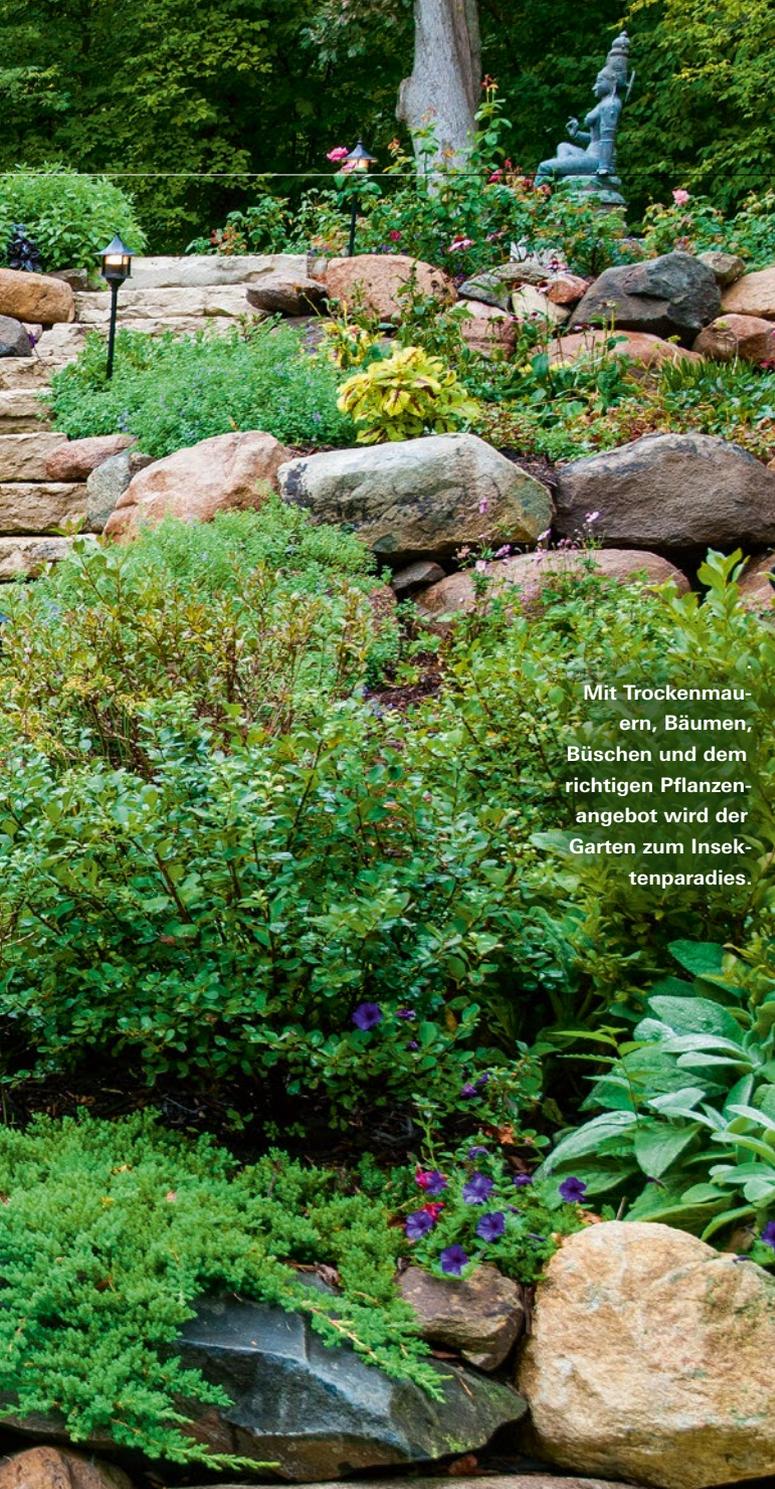
Die Kulturlandschaft ist ökologisch verwüstet, doch Gartenbesitzer können etwas dagegen tun, indem sie ihre Grünanlagen insektenfreundlich gestalten.

► Viele reden derzeit über das Insektensterben – zu Recht. Der seit Jahrzehnten anhaltende Rückgang an Sechsheinern betrifft nicht mehr nur seltene und spezialisierte Arten, sondern mittlerweile auch die häufigen und verbreiteten. Sowohl Insektenbiomasse als auch -vielfalt haben dramatisch abgenommen. Als Hauptursachen gelten die Intensiv-

ring der Landwirtschaft und der damit verbundene Einsatz von Herbiziden und Insektiziden, aber auch die Zerstückelung und Zerstörung von Lebensräumen und die Lichtverschmutzung. Das Buch des renommierten Sachbuchautors und Biologen Bruno P. Kremer widmet sich dieser alarmierenden Entwicklung.

Weil die Gesamtfläche aller mitteleuropäischen

Gärten eine relevante Größe darstellt – sie ist etwa dreimal größer als die Summe aller unter Naturschutz stehenden Gebiete –, können naturnah gestaltete Gärten den Verlust an insektenfreundlichem Lebensraum zu einem gewissen Grad kompensieren. Jeder Gartenbesitzer kann mit sinnvoller Pflanzenauswahl und strukturreicher Gestaltung der



Mit Trockenmauern, Bäumen, Büschen und dem richtigen Pflanzenangebot wird der Garten zum Insektenparadies.

TIMABRANOWITZ / GETTY IMAGES / ISTOCK

Grünanlage unmittelbar zum Artenerhalt beitragen.

Der farbenprächtige Band hat drei Teile. Im ersten gelingt es dem Autor, knapp und anschaulich das Problem des Artenrückgangs darzustellen, den Lebenszyklus der Schmetterlinge zu vermitteln und die Blütenbiologie in wesentlichen Aspekten zu umreißen. In bewährter Manier scheut er nicht

davor, auf einige Details näher einzugehen. So gibt es auch für bewanderte Naturliebhaber immer noch Neues zu entdecken.

Unverzichtbar sind Kremers Erläuterungen zur Schmetterlingsmetamorphose. Diese darf natürlich nicht unerwähnt bleiben, will man die Insekten wirklich unterstützen. Denn nur den Faltern nektarreiche Blütenpflanzen anzu-

bieten, reicht nicht aus – genauso wichtig ist das richtige Angebot an Raupennahrung. In dem Zusammenhang würdigt der Autor die Frankfurter Naturforscherin und Künstlerin Maria Sibylla Merian (1647–1717), die erst mit ihren künstlerisch wertvollen Prachtwerken in den Jahren 1679 und 1683 den Sachverhalt der Metamorphose allgemein bekannt gemacht und der modernen Insektenkunde den Weg bereitet hat.

Weiterhin unterscheidet Kremer Nektarien- und Blüentypen, stellt Inhaltsstoffe des Nektars vor und knüpft den Bezug zur Tierbestäubung durch leckende und/oder saugende Arten. Dass es sogar nichtsaugende Falter gibt, nämlich die Urmotte mit beißfähigen Mandibeln, die beispielsweise auf der Sumpfdotterblume nach Nahrung sucht, erfahren die Leser nebenher auch noch. Wunderbar sind die detaillierten Erläuterungen zur Funktionsweise des Saugrüssels mitsamt Großaufnahme eines Schmetterlingskopfs.

Den thematischen Übergang zur naturnahen Gestaltung des Gartens schafft Kremer, indem er mögliche Lebensräume in Grünanlagen beschreibt. Als da unter anderem sind: Bäume, Hecken und Gebüsche, sonnige Hochstaudenbeete, Schattenecken, Trockenmauern, Blumenwiesen und Blumenrasen oder grüne Dächer. Mittels einer Skizze schlägt der Autor vor, wie man den Garten arrangieren kann. Er hat jedoch nicht den Anspruch, dies erschöpfend abzuhandeln.

Im Mittelteil des Bands schließen sich Porträts von 40 Schmetterlingsarten an. Kremer beschreibt jede Art auf ein bis zwei Seiten hinsichtlich ihres Aussehens, Vorkommens und ihrer Besonderheiten. Hochwertige und aufschlussreiche Fotos aus zumeist allen Lebensstadien begleiten die Texte. Stichwortartige Informationen zu Spannweiten und Flugzeiten von Faltern, zum Raupenstadium und zur Überwinterungsform ergänzen das Ganze. Artspezifische Fördermöglichkeiten bietet der Autor in Textkästen dar.

Das Buch endet mit Steckbriefen von 80 Pflanzenarten, die nach Meinung des Autors geeignete Futterpflanzen für Falter und ihre Raupen darstellen. Der Fokus liegt auf heimischen Wildkräutern, aber natürlich dürfen die bei Mensch und Insekt gleichermaßen beliebten mediterranen Küchenkräuter nicht fehlen. Weil ihr Nektarwert hoch ist, emp-



Bruno P. Kremer
SCHMETTERLINGE IN MEINEM GARTEN
Falterfreundlich gärtnern mit den richtigen Pflanzen
Haupt, Bern 2018
208 S., € 29,90

fehlt der Autor diverse Gartenpflanzen wie Neubelgische Aster, Bienenkugeldistel, Saat-Luzerne und Weiße Schneebeere. Allerdings auch Arten wie Gewöhnliche Zaunwinde, Ackerkratzdistel, Wilde Karde und Vogel-Wicke, die man sich auf Grund ihres starken Ausbreitungspotenzials vielleicht nicht unbedingt aktiv in den Garten holen muss. Aber in größeren Grünanlagen kann man tatsächlich die eine oder andere Ecke verbrachen lassen und auch diesen Spezies Raum gewähren.

Eine lockere Seitengestaltung mit aussagekräftigen Bildern jeweils von Habitus und Blüte machen diese Pflanzenbeschreibungen sehr gut lesbar. Kurze artspezifische Informationen, unter anderem zu den ökologischen Bedürfnissen der Gewächse, ihrer Kultivierung und ihrem Ausbreitungspotenzial, runden die Steckbriefe ab.

Zwei Kalender auf den Innenseiten des Einbands zeigen die Blühzeiten und -farben der aufgeführten Pflanzenarten sowie die Flugzeiten der vorgestellten Falter. Damit ausgestattet, können die Leser nach der Lektüre ihre Pflanzenauswahl so vornehmen, dass nicht nur sie selbst sich das ganze Jahr hindurch an einem farbenprächtigen Garten erfreuen, sondern auch Schmetterlinge und viele andere Insekten dort Nahrung und Lebensraum finden.

Die Rezensentin Birgit Kanz ist promovierte Biologin. Sie arbeitet als botanische Gutachterin für Planungsbüros in Naturschutz und Landschaftspflege sowie als freie Mitarbeiterin beim Forschungsinstitut Senckenberg.

MEDIZIN KNOCHEN, MUSKELN UND GELENKE

Ein Orthopäde beschreibt die häufigsten Erkrankungen unseres Stütz- und Bewegungsapparats – und was wir tun können, um fit zu bleiben.

► Jede(r) weiß, dass ein Auto etwas Pflege benötigt, wenn es lange halten soll. Wer ständig den falschen Kraftstoff tankt, permanent die erlaubte Zuladung überschreitet, keine Reifen wechselt, den Ölstand nicht prüft und nie die Werkstatt aufsucht, darf sich nicht wundern, wenn das Fahrzeug irgendwann liegen bleibt. Ein so vernachlässigter Wagen wird sicher nicht 60 oder 70 Jahre lang störungsfrei funktionieren.

Seltsamerweise erwarten viele das aber von ihrem Körper. Sie ernähren sich unvernünftig, trinken und rauchen, tun nichts gegen Übergewicht, bewegen sich kaum, gehen bei Beschwerden viel zu spät zum Arzt – und vertrauen dennoch darauf, dass ihr Organismus bis ins hohe Alter durchhalten werde. Natürlich unterscheiden sich Mensch und Maschine; unser Körper kann sich, anders als das Auto, bis zu einem gewissen Grad regenerieren. Doch sein Erneuerungsvermögen ist begrenzt. Überschreiten die Gesundheitsschäden ein bestimmtes Maß, werden sie unumkehrbar.

Das gilt insbesondere für den Bewegungsapparat,

wie der Mediziner Hanno Steckel in diesem Buch aufzeigt. Steckel ist Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie und führt als Kniespezialist jährlich mehr als 500 Operationen durch. In seinem Werk beschreibt er das Zusammenwirken unserer rund 100 Gelenke, 200 Knochen und 600 Muskeln. Vor allem aber schildert er, wann dieses Wechselspiel nicht mehr so rund läuft wie gewohnt. Er geht auf die häufigsten Erkrankungen des Stütz- und Bewegungssystems ein und legt dar, wie sie medizinisch behandelt werden.



Hanno Steckel
GENIAL BEWEGLICH!
Alles über Rücken, Schulter,
Hüfte, Knie – und was hilft,
wenn's zwick't
Droemer, München 2018
312 S., € 16,99

Der Autor weiß Überraschendes zu berichten. Wussten Sie, dass Gicht keineswegs nur bei älteren Menschen vorkommt, sondern auch agile Unter-30-Jährige trifft? Die Kombination von Sport, Alkohol und Fleischkonsum kann den Harnsäurespiegel im Blut so weit nach oben treiben, dass selbst Jüngere

einen Gichtanfall erleiden. Und der dicke Brustmuskel, des Bodybuilders größter Stolz, bereitet massive Probleme, wenn er auf Grund falschen Trainings den Oberarmkopf zu weit nach vorn und oben zieht. Dann werden beim Abspreizen des Arms die Sehnen eingeklemmt, was äußerst schmerzhaft ist.

Von Patienten, die unvernünftig trainiert haben und jetzt ein Fall für den Orthopäden sind, erzählt Steckel mehrfach. Da war beispielsweise der 35-Jährige, der extremen Kraftsport praktizierte und sich dabei den Knorpel des Oberarmkopfs und der Schulterpfanne komplett abscheuerte.

»Knorpelglätze« nennen die Mediziner das, und es bedeutet, dass im Gelenk nun Knochen auf Knochen reibt. In solchen Fällen helfe nur noch ein künstliches Gelenk, schreibt der Autor, denn Knorpel wachse nicht nach.

Das andere Extrem, nämlich gar keinen Sport zu treiben, ist freilich auch nicht gesund. Es führt dazu, dass Muskeln schwinden und sich verkürzen, und es schwächt die Sehnen und Knochen. Der erschlaffte Stütz- und Bewegungsapparat stabilisiert den Leib nicht mehr so gut, das Körpergewicht drückt stärker auf Wirbel, Bandscheiben und Gelenke. Dadurch kommt es zu Fehlhaltungen, einseitigem und übermäßigem Gelenkverschleiß, Bandscheibenvorfällen und Nervenproblemen. Besonders fatal ist die Kombination aus Bewegungsmangel und Übergewicht.

Steckel beschreibt ein breites Spektrum orthopä-

discher Probleme, von Arthrose über Rheuma bis Tennisarm, von Achillessehnenriss über Fersensporn bis Senkfuß, von AC-Gelenksprengung über Kalkschulter bis Osteoporose. Die jeweiligen Behandlungsmethoden stellt er immer mit vor. Auch auf die Symptome des »Aging Male«, Hormonersatztherapien für Männer, Gehirnerschütterungen und Sex mit künstlichen Gelenken geht der Mediziner ein. Obwohl er das knapp, verständlich und anhand von Patientengeschichten tut, erschlägt die große Themenfülle ein wenig. Über weite Strecken ähnelt das Buch einem Nachschlagewerk.

Immer wieder betont der Orthopäde, wie wichtig es ist, mit gesundheitlichen Problemen rechtzeitig zum Arzt zu gehen und nicht erst, wenn es zu spät ist. Und noch ein Fazit gibt er seinen Leser(inne)n mit: Vorbeugen ist die moderne Medizin. Dazu gehören sowohl angemessener Sport als auch eine gesundheitsfördernde Ernährung. Steckel empfiehlt ein Training mit drei Komponenten: Herz-Kreislauf, Kraft und Beweglichkeit. Hierfür schlägt er verschiedene Übungen vor, die man zu Hause, ohne Geräte und mit überschaubarem Zeitaufwand machen kann. Zudem verweist er auf die Klassiker Laufen, Radfahren, Schwimmen, Rudern, Schilanglauf und Nordic Walking. Ein detaillierter Fitnessratgeber kann und will das Buch aber nicht sein. Auch Steckels Ernährungstipps sind eher allgemein gehalten. Für

jene, die sich näher interessieren, hat der Mediziner einige Weblinks, Literatur- und Filmverweise zusammengestellt.

»Genial beweglich!« schafft ein Bewusstsein dafür, wie großartig unser Bewegungsapparat ist, und regt dazu an, ihn bis ins hohe Alter zu erhalten. Das Buch erfordert kein besonderes medizinisches Vorwissen und eignet sich daher auch für Laien. Die Zeichnungen der Illustratorin Katrin Fiederling tragen zur Verständlichkeit bei und lockern den Text auf, wenn gleich das Werk noch deutlich gewinnen würde, enthielte es hier und da eine aufschlussreiche Infografik. Was dem Band wirklich fehlt, ist ein Stichwortverzeichnis, denn ohne dieses fällt es mitunter schwer, Textabschnitte wiederzufinden.

Der Rezensent Frank Schubert ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

MATHEMATIK DREIECKE ZU RECHTECKEN ZU QUADRATEN

Über die Kunst des Flächenzerlegens.

► Zu den zentralen Ergebnissen der klassischen euklidischen Geometrie zählt, dass man jede von geraden Linien begrenzte Figur in ein flächengleiches Quadrat verwandeln kann. Man zerlege das Polygon zunächst durch geeignete Diagonalen in Dreiecke; mache aus jedem Dreieck ein Parallelogramm, indem man es entlang einer

MYTHOLOGIE WENN DIE WALKÜREN REITEN

Mittelalterforscherin Carolyne Larrington dröselte die Welt von Thor, Freya und Odin auf.

► Niedergeschrieben wurden sie erst vor einigen Jahrhunderten, mündlich weitergegeben aber schon viel länger: die nordischen Mythen. So alt sie sind, so beeindruckend ist es, wie viele dieser Geschichten sich bis heute erhalten haben, wenn auch verändert und maskiert. Angesichts des enorm umfangreichen und komplexen Stoffs versucht die Mediävistin Carolyne Larrington, einen Einblick in die nordische Götterwelt

zu geben. Herausgekommen ist ein lesenswertes Werk, in dem die Oxford-Professorin die verstrickte Götterwelt in sechs Kapiteln sortiert und etwa in »Verfeindete Mächte« oder »Helden der Wikingerzeit« gliedert. So gelingt ihr eine gute Gesamtanschau, wozu die interessanten Einschübe beitragen, die etwa über Protagonisten des nordischen Götterreichs handeln oder über die Herkunft der Zwergennamen in Tolkiens »Herr der Ringe«.

Die Leser(innen) lernen unter anderem, welche mythischen Helden die Gebrüder Grimm in ihre Bücher aufnahmen, welche sich in den Opern Richard Wagners wiederfinden oder auch in den TV-Serien »Vikings« und »Game of Thrones«. Leider fehlt dem Buch eine gelungene Einleitung. Larrington eröffnet mit einer eher drögen methodischen Darstellung, was vielleicht ihrem wissenschaftlichen Hintergrund geschuldet ist. Nach der Lektüre ist man dennoch mit den nordischen Göttern und Helden besser vertraut. Und das bezieht sich nicht nur auf die in der Schlacht gefallenen Kämpfer in Walhalla, wie der etwas unglückliche Titel der deutschen Ausgabe suggeriert (Original: »The Norse Myths«). Bernadett Fischer



Carolyne Larrington
FIT FÜR WALHALLA
Nordische Mythen für Einsteiger
Aus dem Englischen
von Jörg Fündling
Theiss, Darmstadt 2018
232 S., € 22,95

Mittelparallele entzweischneidet und das kleine Dreieck um 180 Grad gedreht dem größeren Trapez anfügt; mache ferner aus dem Parallelogramm ein Rechteck, indem man zum Beispiel links ein kleines Dreieck abschneidet und rechts anfügt; und schließlich aus dem Rechteck ein Quadrat, indem man der längeren Seite einen wohl bemessenen Streifen abschneidet und um 90 Grad gedreht an die kürzere Seite ansetzt. Vielleicht muss man vor dem letzten Schritt ein sehr langgestrecktes

Rechteck durch Zerschneiden in gleiche Teile und Aufeinanderstapeln quadratähnlicher machen.

Das alles funktioniert nach den gestrengen Regeln des klassischen griechischen Reinheitsgebots: Man findet alle Schnittlinien allein mit Zirkel und Lineal. Theoretisch ein schönes Ergebnis; aber wer diese Quadratur mit echtem Sperrholz praktizieren will, hat viel zu sägen und muss sein Quadrat am Ende aus einem ziemlich unansehnlichen Haufen Kleinholz

zusammenstückeln. Da erwacht der Ehrgeiz, es eleganter und vor allem mit weniger Teilen zu machen. Ein gleichseitiges Dreieck in ein Quadrat verwandeln? Geht mit vier Teilen, die allerdings raffiniert zugeschnitten sein wollen.

Noch schöner sind Zerlegungen in Teile, die man nur durch Parallelverschiebung – ohne Drehung – in die eine wie die andere Form bringt (translational dissections); oder solche, bei denen man die Teile an den Ecken zu

einer gelenkigen Kette verbindet, die so herum zusammengefaltet sich zu der einen Figur und andersherum zu der anderen fügt (hingeable dissections).

Was es für diese »schönen« Zerlegungen nicht gibt, ist ein Verfahren wie das oben genannte, das garantiert immer funktioniert. Es existiert eine Sammlung von Rezepten; aber herauszufinden, ob und wie eines von ihnen im Einzelfall anzuwenden ist, erfordert gelegentlich beträchtliche Fantasie und den Einsatz längst vergessener Sätze aus der Schulgeometrie.

Nachdem der britisch-australische Amateurmathematiker Harry Lindgren (1912–1992) mit seinem Buch »Geometric Dissections« (1964) das Thema erstmals mit einer gewissen Vollständigkeit abgehandelt hatte, dauerte es mehr als 30 Jahre, bis sich Greg N. Frederickson, inzwischen emeritierter Professor für Computer Science an der Purdue University, mit »Dissections: Plane and Fancy« (1997) als Platzhirsch der Szene etablierte. Ausgerechnet Frederickson ist es jetzt gelungen, mit Geduld und einer guten Portion Glück das verloren geglaubte Werk eines dritten Großmeisters ausfindig zu machen, eines gewissen Ernest Irving Freese.

Dass Freese (1886–1957) der Welt eine Fülle neuer Zerlegungen schenken würde, hätte zu seinen aktiven Zeiten sicherlich niemand vermutet. Ja, er war technischer Zeichner, und ganz offensicht-

METEOROLOGIE SCHNEE UNTER DER WÜSTENSONNE

Meteorologe Frank Böttcher und sein Sohn präsentieren beeindruckende Wettererscheinungen.

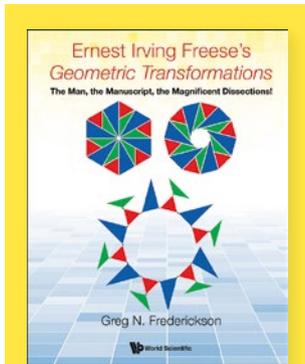
► Feuertornados und Eis-Tsunamis, versteinerte Blitze und Schnee in der Wüste: Das Wettergeschehen kann enorm beeindruckende Phänomene hervorbringen. Etliche davon stellen der Meteorologe Frank Böttcher und sein Sohn Jonathan in diesem Buch vor.

Das Werk ist unterhaltsam und vor allem optisch sehr ansprechend. Es setzt sich mit verschiedensten meteorologischen Erscheinungen auseinander, erklärt diese eingängig und bringt sie den Lesern auf spielerisch-multimediale Weise näher, indem es mit QR-Codes auf einschlägige Youtube-Clips verweist. Das kann eine seriöse NASA-Dokumentation sein oder auch ein lustiges Video über Menschen, die einen so genannten Staubteufel mit Sand »füttern«. Eingestreut sind Informationen über spektakuläre Wetterrekorde, seien es der am längsten anhaltende Nebel, der in Deutschland bisher beobachtet wurde (ganze zehn Tage im Mai 1996 in Thüringen), der längste bis dato gemessene Blitz (321 Kilometer) oder die größte jemals an einem Tag gefallene Menge Neuschnee (1,93 Meter im Jahr 1921 in Colorado).

Die Texte sind gekonnt geschrieben und erklären die Wettererscheinungen gut verständlich. Etwas gewöhnungsbedürftig erscheint allerdings die gewählte Darstellungsform: Ein Dialog zwischen Vater und junglichem Sohn. Auch die direkte Ansprache der Leser mit »Du« dürfte nicht allen zusagen. Der Band wirkt dadurch ein wenig wie ein Jugendbuch, obgleich er auch für Erwachsene lesenswert ist. Tim Haarmann



Frank Böttcher,
Jonathan Böttcher
**REISE DURCH DAS EXTREM-
WETTER DER ERDE**
Koehler, Hamburg 2018
224 S., € 24,95



Greg N. Frederickson
**ERNEST IRVING FREESE'S
 GEOMETRIC TRANSFORMATIONS**
 The Man, the Manuscript, the
 Magnificent Dissections!
 World Scientific, Singapur 2018
 432 S., € 38,70

lich einer der besten, sonst hätte ihn gewiss keiner der Arbeitgeber, die er Hals über Kopf im Stich gelassen hatte, später mit offenen Armen wieder aufgenommen. Aber der Sinn stand ihm vorrangig nach Abenteuern. Mehrfach reiste er um die Welt, während er sich zwischendurch immer wieder einmal als Zeichner verdingte. Erst auf seine alten Tage wendete er sich der geometrischen Zerlegerei zu. Kurz vor seinem Tod vollendete er 200 ganzseitige Zeichnungen, die von großer Fantasie, sorgfältiger systematischer Arbeit und ungeheurer Geduld zeugen.

Freese fand bedauerlicherweise keinen Verleger dafür, seine Witwe leider auch nicht. Erst als sich 60 Jahre später sein Sohn zum Sterben ins Hospiz begab, räumte dessen Kusine zu Hause auf, fand einen jahrzehntealten Brief, in dem Frederickson nach dem Verbleib der Zeichnungen gefragt

hatte, und schließlich auch den verstaubten Schatz selbst. In diesem Buch reproduziert Frederickson die 200 Zeichnungen und versieht sie mit umfangreichen Kommentaren nebst einer angedeuteten Systematik für das Gebiet, das sich sozusagen von Natur aus gegen eine Systematisierung sperrt. Damit gewinnt der Leser über Freeses Werk hinaus einen hervorragenden Überblick über die Flächenzerlegung – und lernt in diesem Zusammenhang interessante und unkonventionelle Anwendungen der euklidischen Geometrie kennen.

Ein bisschen komisch wirkt es, wenn Frederickson einerseits an zahlreichen Stellen die Priorität Freeses neidlos anerkennt und andererseits an nicht minder zahlreichen Stellen demonstriert, dass Freese für diese oder jene Zerlegung mit weniger Teilen ausgekommen wäre, hätte er nur Fredericksons Techniken genutzt. Aber man soll ja bekanntlich das eigene Licht nicht unter den Scheffel stellen.

Das Gebiet kann auch nach Freese und Frederickson noch längst nicht als abgeschlossen gelten. Ein Brite namens Gavin Theobald ließ im vergleichsweise zarten Alter von 57 Jahren seine Fantasie spielen und brachte Frederickson in – offen eingestandene – Verlegenheit, indem er kurz vor Drucklegung dieses Buchs noch Verbesserungen fand, die der Autor nicht ignorieren konnte.

Der Rezensent Christoph Pöppe ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

PHILOSOPHIE **VIER DENKER DURCHEINANDER**

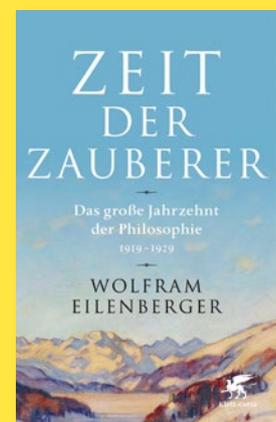
Zwischen den Weltkriegen ging es geistig ungemein rege zu. Damit verglichen ist die Gegenwart eine intellektuelle Wüste.

Warum nicht eine populäre Musikgeschichte schreiben über die Beatles, die Rolling Stones, Bob Dylan und Elvis Presley in den 1960er Jahren? Da entstünde ein buntes Potpourri aus Pop, Folk und Rock 'n' Roll während eines bewegten Jahrzehnts. Analog geht Philosophiepublizist Eilenberger vor. Er wählt vier deutschsprachige Denker und erzählt, wie sie in den 1920er Jahren gewirkt haben. Das Resultat ist eine poppige Geschichte über eine besonders lebhaft Phase der modernen Philosophie.

Wen haben wir da? Ludwig Wittgenstein (1889–1951) publizierte 1921 mit seinem »Tractatus logico-philosophicus« ein Gründungsdokument des logischen Positivismus. Martin Heidegger (1889–1976) veröffentlichte 1927 »Sein und Zeit«, einen Basistext der Existenzphilosophie, die um Begriffe wie Angst, Tod und Sorge kreist. Ernst Cassirer (1874–1945) schrieb in den 1920er Jahren an seiner »Philosophie der symbolischen Formen«, einer umfassenden Kulturtheorie. Und schließlich der vielseitige Publizist Walter Benjamin (1892–1940), dessen Schriften erst postum ihre ganze Wirkung entfalten konnten,

weil der deutsch-jüdische Philosoph, von den Nazis ins Exil getrieben, auf der Flucht vor ihnen Selbstmord beging.

Wahrlich eine wilde Mischung! Über jeden dieser höchst unterschiedlichen Denker gibt es bereits Biografien und umfangreiche Sekundärliteratur, und Eilenberger verwendet einen (allzu) großen Teil seiner Darstellung darauf, zu begründen, warum er die vier in ein einziges Buch zwingt. Die Zusammenschau hat den Nachteil, dass der Autor fortwährend Gemeinsamkeiten behauptet, statt die tatsächlichen Unterschiede herauszuarbeiten.



Wolfram Eilenberger
ZEIT DER ZAUBERER
 Das große Jahrzehnt der
 Philosophie 1919–1929
 Klett-Cotta, Stuttgart 2018
 431 S., € 25,-

So wird Wittgenstein unter der Hand zum existenzphilosophischen Bruder Heideggers, obwohl die beiden völlig konträre Auffassungen zur naturwissenschaftlich-technisch geprägten Moderne hatten. Heidegger konstatierte eine verbreitete Seinsvergessenheit und Uneigentlichkeit,

aus denen angeblich nur die Rückbesinnung auf die Vorsokratiker befreien könne. Dieses Ursprungsdenken verführte den Philosophen in den 1930er Jahren sogar dazu, Adolf Hitler als geistigen Führer anzuhimmeln. Wittgenstein hingegen fand die größte Resonanz in England und Amerika, wo sich die aus Österreich und Deutschland vertriebene analytische Philosophie den Grundlagenproblemen von moderner Mathematik und Naturwissenschaft widmen konnte.

Auch Benjamin und Cassirer haben miteinander und den beiden anderen nur gemein, dass sie zur selben Zeit lebten. Cassirer berief sich als Philosophieprofessor der alten Schule auf Kant und Goethe, während sich Benjamin als notgedrungen freier Schriftsteller dem revolutionären Marxismus zuwandte. Eilenberger versäumt es, Cassirers durchaus originelle Betonung von Form und Struktur herauszuarbeiten, die ihn als Vorläufer der französischen Strukturalisten und des in der heutigen Wissenschaftstheorie prominenten Strukturalismus auszeichnen könnte.

Hier nur ein Beispiel für die Satzungeheuer, die das Zusammenzwingen unterschiedlicher Denker gebiert. Bei Eilenberger ist gerade von Heidegger die Rede: »Ähnlich der freudschen Psychoanalyse oder auch der wittgensteinschen Philosophie des ›Tractatus‹ geht das Ziel einer möglichst präzisen und strukturfreilegenden Beschreibung der jeweils eigenen Situation (im weitesten Sinne) mit dem Ziel einer grundlegenden, selbstbe-

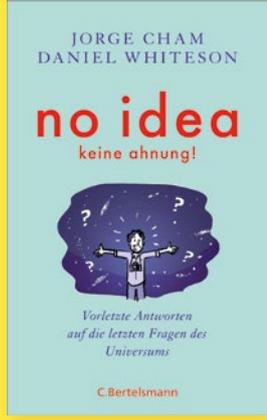
PHYSIK KOSMOS MIT COMEDY

Ein Physiker und ein Comiczeichner versuchen sich daran, das Universum zu erklären. Heraus kommt ein höchst unterhaltsames Buch.

▶ Der Physikprofessor Daniel Whiteson und der Comiczeichner Jorge Cham leuchten äußerst unterhaltsam die Rätsel des Universums aus. Allerdings stellen sie eines vorweg: Eigentlich haben sogar Physik-Cracks von all dem kaum einen Schimmer. Denn wir kennen vom Universum gerade mal 5 Prozent, nämlich die »baryonische Materie«; die restlichen 95 Prozent entfallen auf Dunkle Materie und Dunkle Energie. Dies und noch viel mehr versuchen die Autoren in 17 Kapiteln zu vermitteln. Dabei gehen sie unter anderem auf Zeit, Raum, Stringtheorie und Weltformel ein, und das alles amüsant, kurzweilig und komplett ohne Formeln. Natürlich geht das nur um den Preis einer groben Vereinfachung.

Whiteson und Cham fachen die Lesefreude immer wieder geschickt an. Auf jeder Seite regt ein kleiner witziger oder erklärender Cartoon zum Schmunzeln an. Auch der comedy-ähnliche Schreibstil mit zahlreichen Wortspielen erheitert. So erläutern sie Zeit am Beispiel eines Frettchens, das seinem Besitzer eine Wasserbombe auf den Kopf werfen will, wobei klar wird, warum die Zeit nicht rückwärtsgeht. So konstruiert diese Beispiele auch sein mögen, sie sind lustig und verführen zum Weiterlesen.

Wenn die Autoren eine Theorie erklären, tun sie das meist anhand alltäglicher Dinge oder Tätigkeiten. Im Kapitel über das Wesen des Raums fragen sie sich, ob er ein Ding sei, das uns umschwappt wie das Wasser in einer Badewanne. Ein riesiger Klumpen Glibber dient ihnen zur Veranschaulichung moderner Konzepte, nach denen die Raumzeit sich krümmen, verzerren und Gravitationswellen leiten kann. Natürlich bleibt die Relativitätstheorie trotz Comedy und flotten Sprüchen schwierig. Dennoch macht die Lektüre viel Spaß – vor allem Laien, die gerne einmal mitreden wollen und vielleicht doch anschließend das ein oder andere kosmische Phänomen besser verstehen. *Katja Engel*



Jorge Cham, Daniel Whiteson
NO IDEA
keine ahnung!
Vorletzte Antworten auf die letzten Fragen des Universums
Aus dem Englischen von Hainer Kober
C. Bertelsmann, München 2018
462 S., € 15,-

stimmten Transformation des eigenen Lebensvollzugs einher.« Alles klar?

Das Buch gipfelt in einem bemühten Finale furioso. Wie ein atemloser Sportreporter beschreibt Eilenberger das historische Treffen von Heidegger und Cassirer bei einer Philosophentagung in Davos 1929 als heftigen Schlagabtausch. Dabei geben die zitierten Argumente wenig Konfliktstoff her. Es geht um das »Unendliche« bei

Kant und das »Endliche« bei Heidegger, und der vermeintliche Boxkampf gleicht einem Streicheln mit Samthandschuhen. Eher trat damals ein philosophischer Generationenkonflikt zu Tage: der Newcomer Heidegger gegen den bestallten Professor Cassirer. So gesehen ähnelte das Philosophentreffen von Davos dem aufmüpfigen Auftritt des Literatur-Beatles Peter Handke bei der Tagung der

Gruppe 47 in Princeton im Jahr 1966.

Eilenberger zeigt jedenfalls, wie ungemein rege es in den 1920er Jahren geistig zugeht. Dagegen gleicht die Gegenwart einer intellektuellen Wüste. Falls das Buch seine Leser dazu anregt, sich mit einem oder mehreren der vier Denker näher zu beschäftigen, hat es seinen Zweck erfüllt.

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

Jetzt abonnieren!

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



AUSGABE 2/18 JETZT
IM HANDEL ERHÄLTlich!

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.

Verpassen Sie kein Heft und lesen Sie 6 Ausgaben im Jahresabonnement mit einem Preisvorteil von fast 12 % gegenüber dem Einzelkauf!

Informationen und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum-psychologie.de

Telefon: 06221 9126-743 · Mail: service@spektrum.de

LESERBRIEFE

POPULÄRWISSENSCHAFT AUF HOHEM NIVEAU

Wie würden zwei techniklastige Titelgeschichten in aufeinander folgenden Heften bei den Lesern ankommen? Chefredakteur Carsten Könneker zeigte sich in seinem Editorial gespannt. (»Technik mal zwei«, *Spektrum* April 2018, S. 3)

Luitwin Hoffmann, per E-Mail: *Spektrum* sollte keinesfalls »mehr über technologische Entwicklungen berichten und weniger über Grundlagenforschung«. Nicht umsonst heißt das Magazin »Spektrum der Wissenschaft« und nicht »Spektrum der Technik«. Die Zeitschrift sollte zwischen den für den Laien in der Regel unverständlichen Fachpublikationen und populären Magazinen stehen, das heißt Populärwissenschaft auf hohem Niveau bieten. Bisher hat *Spektrum* das ziemlich gut hingekommen. Es steht meiner Meinung nach konkurrenzlos da. Über technische Themen kann ich mich anderswo informieren.

DIE VERANTWORTUNG DER DAMPFMASCHINEN

Die Klimaforscherin Kate Marvel schrieb über die Rolle der Wolken bei der Erderwärmung. (»Das Wolkenparadox«, *Spektrum* Mai 2018, S. 50)

Joachim Falken, per E-Mail: In dem Artikel heißt es: »Dann wird der Verbrennungsmotor erfunden. In den folgenden 150 Jahren steigt der CO₂-Gehalt in der Luft dramatisch an.« Nun gibt es zwar schon seit 150 Jahren Verbrennungsmotoren, doch der größere Teil der Luftverschmutzung entfällt auf Dampfmaschinen. Das galt besonders stark in der Anfangszeit bis vor etwa 100 Jahren, ist aber bis heute so. Auch Gasturbinen inklusive Flugzeugantrieben gehören nach üblicher Lesart nicht zu den Verbrennungsmotoren.

Wolken gibt es in unterschiedlichsten Formen und Schattierungen. Manche lassen mehr Wärmestrahlung passieren, andere weniger.



EREM / GETTY IMAGES / ISTOCK

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 KEINE ENDLOSE SUCHE?

Kolumnist Florian Freistetter beschäftigte sich mit der manchmal schwierigen Suche nach kleinen Zahlen. (»Die kleinste Sierpiński-Zahl«, *Spektrum* Mai 2018, S. 59)

Ralf Medow, per E-Mail: Einerseits schreiben Sie, dass man nur beweisen kann, wenn eine Zahl k keine Sierpiński-Zahl ist, nämlich indem man ein passendes n findet, zu dem $k \cdot 2^n + 1$ prim ist. Wenn k eine Sierpiński-Zahl ist, kann man unendlich lange nach einem solchen n suchen, wird also nie fertig.

Andererseits behaupten Sie einfach so, dass 78557 eine Sierpiński-Zahl sei. Wie können Sie sich da schon nach endlicher Zeit so sicher sein?

Antwort von Redakteur Christoph Pöppe:

Der Beweis, dass 78557 eine Sierpiński-Zahl ist, ist in der Tat nicht ganz einfach (und hätte ohne Zweifel den Rahmen der Rubrik gesprengt). Es stimmt, man kann nicht alle unendlich vielen Exponenten n durchprobieren. John Selfridge hat in seinem Beweis von 1962 die Sache mit einer Fallunterscheidung erledigt. Beispiel: Für gerade Exponenten n beweist Selfridge, dass $78557 \cdot 2^n + 1$ stets durch 3 teilbar ist. Für die ungeraden n unterscheidet er weitere Fälle mit dem Endergebnis, dass er für jedes n der Form $36n + j$, $j = 0, 1, \dots, 35$ einen Teiler findet. Das reicht! Näheres steht auf der Website www.mersennewiki.org/index.php/Sierpinski_problem.

ERRATA

»Brückenbau für Einzelgänger«, *Spektrum* Mai 2018, S. 70

Im Kasten »Gruppentheorie für Einsteiger« sind als Gruppenaxiome nur die Abgeschlossenheit, die Existenz des Neutralen und der Inversen erwähnt. Es fehlt die Assoziativität der Verknüpfung.

»Die Ökobilanz der E-Mobilität«, *Spektrum* Mai 2018, S. 12

Im Diagramm zur Stromerzeugung in Deutschland 2017 auf S. 14 steht ein Wert von 9,3 Prozent für »andere Energieträger«. Richtig muss es 0,7 Prozent heißen.

1918



DURCH DIE HINTERTÜR

Das »Wasserschlänglein« verlässt den Wirt.

»Man hat diese Würmer, die wie Violinsaiten aussehen und auch Saitenwürmer heißen, auch als »Wasserschlänglein« bezeichnet. Aus den winzig kleinen Eierchen kriechen ganz merkwürdig gestaltete Embryonen, die mittels eines hornigen Rüssels sich in die Larven von Büschelmücken, Zuckmücken, in Eintagsfliegenlarven u. a. einbohren. Der Embryo kann sich nur dann weiterentwickeln, wenn sein Wirtstier von einem Raubkäfer, einem Fisch gefressen wird. Im Darm reift [er] allmählich heran. Jetzt drängt es [ihn] wieder in sein eigentliches Element, das Wasser, zu kommen [und er verlässt] die gastliche Wirtsstube durch die Hintertür.« *Kosmos 7, S. 176*

KOSMISCHE KATASTROPHE

»Ein neuer Stern wurde am 9. Juni 1918 von Courvoisier auf der Sternwarte Babelsberg entdeckt. Das gibt von einer Weltkatastrophe Kunde, man nimmt an, daß ein Stern in eine Wolke kosmischen Staubes gerät und durch die Umsetzung der kinetischen Energie in Wärme auf eine unvorstellbar hohe Temperatur gebracht wird. Derartige Vorgänge finden häufiger statt, als im allgemeinen angenommen wird, sind aber mit unbewaffnetem Auge äußerst selten [zu beobachten].« *Prometheus 1499, S. 379*

DIE NETZHAUT ALS ENTDECKER DES MÖRDERS

»Die Sehfähigkeit beruht darauf, daß auf der Netzhaut Bilder der Objekte entworfen werden, wie sie in der photographischen Kamera entstehen. Nehmen wir an, daß bei einer ermordeten Person nicht augenblicklich der Tod erfolgte. Das Auge hat in diesem Fall gewisse Vorfälle noch aufgenommen und es hat der Sehvorgang den letzten auf der Netzhaut registriert. Mein Vorschlag geht also dahin, im Falle eines Mordes die Netzhaut sofort zu photographieren und die Photographie entsprechend zu vergrößern.« (Die Umschau-Redaktion merkte an: »Es ist uns nicht bekannt, welche Veränderungen das Netzhautbild im Tode erfährt. Dies wäre zu klären.«)

Die Umschau 29, S. 353–354

1968

AUS DEM GEHIRN IN DEN COMPUTER

»[Einen] ersten »Blick« in die Tiefen des Gehirns geben stereotaktische Gehirnoperationen. Sie werden bei Störungen des Zentralnervensystems angewendet. Der Neurochirurg dringt durch ein winziges Bohrloch ein und operiert an einer vorher exakt berechneten Stelle. Ehe [er] mit der Elektrodenspitze den [verantwortlichen] Gehirnteil ausschaltet, muß er noch einmal die elektrophysiologischen Reize überprüfen, die die Spitze verursacht. Das Wiener Team wertet diese Kontrolluntersuchung erstmals aus. Die Elektrode wird an einen Computer angeschlossen, der alle Daten aufzeichnet. Auf diese Weise wurde bereits ein Streit beendet. Elektrophysiologische Untersuchungen ohne Datenverarbeitung hatten ergeben, daß ein Reiz den Weg vom Thalamus zur Großhirnrinde in 15 Millisekunden zurücklegt. Anatomische Berechnungen ergaben zwei bis vier Millisekunden. Letztgenannte Zeit konnte jetzt nachgewiesen werden.« *Kosmos 7, S. 250*

KARTHAGOS ORIENTALISCHE WURZELN

»Unmittelbar neben dem alten Handelshafen sind Reste eines Heiligtums der Göttin Tanit entdeckt worden. Deutlich lassen sich zwei Schichten unterscheiden: eine untere mit massiven Grabpfeilern und eine jüngere mit Stelen aus Kalkstein. Die untere erbrachte eine Fülle von Tongefäßen mit den Ascheresten von Kindern. Es handelt sich um eine Stätte, auf der die Karthager ihren Göttern Kinder und besonders die Söhne des Adels opferten. Aus der gleichen Zeit stammen Sandstein-Grabpfeiler mit einer meist figürlichen Götterdarstellung oder göttlichen Symbolen. Manche wirken wie Miniaturtempel einer ägyptischen Architektur. Auf [den] jüngeren Kalkstein-Stelen findet sich häufig eine

Darstellung oder ein Symbol der Göttin Tanit. Ursprünglich war sie wohl nur eine weibliche Form des Fruchtbarkeitsgottes Baal, von der Mitte des 1. Jahrtausends v. Chr. ab wurde sie die Schutzgöttin der Stadt Karthago. [Das] Tanit-Symbol ist uralte mittelmeerisch-ägäisch und auch von Kreta bekannt.«

Kosmos 7, S. 297–299



Viele Grabpfeiler erinnern an ägyptische Tempel.

futur III

Der algorithmische Präsident

Diesmal sind Sie dran.

Eine Kurzgeschichte von S. R. Algernon

Offizielle Aufforderung

Lieber Mitbürger,

gemäß der POPULär-Integrativen Simulations-Matrix (POPULISM) werden Sie hiermit davon in Kenntnis gesetzt, dass Sie auserwählt wurden, als Beitrag dieses Bezirks zur kollektiven Führung der nationalen Exekutive zu dienen. Ihre Dienstzeit soll 14 Tage innerhalb der drei Monate von August bis Oktober 2048 umfassen.

Gemeinsam mit 99 weiteren registrierten Wählern werden Sie über eine sichere Neuralverbindung vorredigierte Briefings zu innen- und außenpolitischen Maßnahmen empfangen. Ihre kognitiven und affektiven Reaktionen auf globale Ereignisse werden dann in die Entscheidungsalgorithmen der Simulationsmatrix eingespeist. Während der Empfangsphase können alle Gedanken, Vorstellungen oder unausgesprochenen Sätze von der Neuralverbindung aufgegriffen werden und in Regierungshandeln, an ausländische Mächte gerichtete Kommunikés und Ansprachen an die Nation einfließen. Die Menschen und deren Repräsentanten vertrauen auf Ihre Anleitung und Führerschaft.

Falls bei Ihnen noch keine Neuralverbindungshardware installiert wurde, melden Sie sich bitte bis spätestens 15. Juli 2048 bei einem autorisierten Implantationszentrum. Um einen Aufschub zu beantragen oder sich ganz vom Dienst befreien zu lassen, müssen Sie eine der folgenden Bedingungen erfüllen:

- 1) Sie haben bereits zweimal an POPULISM teilgenommen.
- 2) Ihr derzeitiger Wohnort liegt fünf oder mehr Lichtminuten von der Erde entfernt.
- 3) Sie leiden an einer Krankheit, welche die Installation einer Neuralverbindung verbietet.
- 4) Sie sind jünger als 35 Jahre, und ihr mentales Alter wurde nicht durch Kognitionsverstärker angehoben.
- 5) Sie sind älter als 70 Jahre und nehmen keine Medikamente gegen Alterung ein.
- 6) Sie stehen gegenwärtig unter dem Einfluss gerichtlicher oder polizeilicher Simulationen.

Während Sie sich auf den Beginn Ihrer Dienstzeit vorbereiten, beachten Sie bitte folgende Punkte:

- ▶ Sie wissen nicht genau, an welchen 14 Tagen Sie zum POPULISM-Netzwerk beitragen werden. Erfahrungsgemäß entstehen dadurch bei den POPULISM-Teilnehmern natürlichere Entscheidungsprozesse und weniger Ängste.
- ▶ Vor allem in den ersten Tagen nach Implantation müssen Sie mit störenden Fremdgedanken aus dem POPULISM-Netz rechnen. Erschrecken Sie nicht. Die meisten Menschen lernen schnell, ihre eigenen Gedanken von denen anderer zu unterscheiden.

▶ Wir erwarten, dass Sie sich während Ihrer Dienstzeit eines übertrieben aktiven Sexuallebens enthalten. Wir geben uns größte Mühe, alles Diesbezügliche herauszufiltern, sind aber auf Ihre Mitwirkung angewiesen, damit POPULISM nicht in einem vielleicht entscheidenden Moment abgelenkt oder gestört wird.

▶ Beachten Sie, dass POPULISM zu jedem Zeitpunkt die neuronalen Muster von 100 Bürgern umfasst. Damit sind nicht Sie allein für die nationale Außen- und Innenpolitik verantwortlich.

▶ Das Wahlgremium empfiehlt, dass Sie bis zum Ende Ihrer Dienstzeit möglichst wenigen Leuten von Ihrer Berufung erzählen, damit Sie nicht unerwünschten Einflüssen unterliegen.

▶ Achten Sie diesbezüglich bitte besonders auf Interessenkonflikte sowie auf Geschenkangebote seitens ausländischer Mächte.

▶ Wahrscheinlich werden Sie während Ihrer Dienstzeit neues historisches Wissen empfangen, das Weltgeschehen besser verstehen und ein gewisses Gespür für Wirtschaft und Welthandel entwickeln. Das ist ein normaler Effekt der Neuralverbindung und kein Grund zur Sorge.

▶ Eine plötzliche Vorliebe für Dreispitze, Zylinderhüte und andere exotische Kopfbedeckungen kann auftreten, hat aber nichts mit der Neuralverbindung zu tun. Wir haben dafür keine Erklärung.

»Die alten Zeiten, als wir die Führung einem einzigen fehlerhaften menschlichen Wesen anvertrauten, sind ein für alle Mal vorbei«

► Im Einzelfall werden Sie vielleicht finden, dass die abschließende Entscheidung nicht Ihrer Ansicht entspricht oder dass Ihre Meinung nicht ausreichend berücksichtigt wurde. Seien Sie versichert: POPULISM nutzt die allerneuesten Algorithmen. Alle vagen Gerüchte von Wahlbeeinflussung oder Datenhacking sind haltlose Spekulation.

► Im Lauf Ihrer Dienstzeit wird Sie die Last Ihrer Aufgabe vielleicht überwältigen. Aber bedenken Sie: Die Bürde ruht nicht ausschließlich auf Ihren Schultern. Sie und Ihre 99 Kollegen werden voneinander abhängen. Die alten Zeiten, als wir die Führung der Exekutive einem einzigen fehlerhaften menschlichen Wesen anvertrauten, sind ein für alle Mal vorbei.

► Am Ende Ihrer Dienstzeit werden Sie sich vielleicht abgehängt vorkommen oder meinen, Ihr Leben sei nicht mehr so sinnvoll und bedeutsam wie früher. Bedenken Sie, dass das Leben nach der Präsidentschaft weitergeht. Bitte konsultieren Sie die Weblinks im Anhang dieses Dokuments für Ratschläge zum Verfassen Ihrer politischen Memoiren und für Kontakte zu mehreren E-Book-Verlagen, mit deren Hilfe Sie Ihre höchstpersönliche Präsidentenbibliothek erstellen können.

► In seltenen Fällen berichten POPULISM-Teilnehmer, sie fühlten sich nachher im falschen Körper oder sie seien bei der Abtrennung vom POPULISM-Netz vertauscht worden. Leider können wir nur psychologische Hilfe anbieten, um Ihnen die Anpassung an das Leben danach zu erleichtern. Wie Sie vielleicht wissen, ist der Oberste Gerichtshof in dieser Frage gespalten. Vorläufig können wir Sie rechtmäßig nur anhand Ihrer körperlichen Gestalt identifizieren.

► Es steht Ihnen frei, während Ihrer Dienstzeit alle Ihnen zugänglichen digitalen Medien zu nutzen. Allerdings hat nur das POPULISM-Kollektiv Zugang zu den offiziellen Präsidentschaftsmedien. Ihre individuellen E-Mails, Blogposts und Tweets gelten nicht als historisch wichtige Mitteilungen der Regierung.

Wie jeden Träger dieses hohen Amtes fordern wir auch Sie auf, die Sache ernst zu nehmen und Ihre Privatinteressen dem Wohl des Landes unterzuordnen. Sie wurden auf Grundlage eines Profils auserwählt, das auf Millionen von Befragungen beruht. Sie repräsentieren den kollektiven Volkswillen. Das kann keine Person allein bewerkstelligen; doch gemeinsam können wir Größe erreichen – mit Vorausschau, Weisheit, Teamwork und Einfühlungsvermögen.

DER AUTOR

S. R. Algernon studierte unter anderem kreatives Schreiben und Biologie an der University of North Carolina in Chapel Hill. Derzeit lebt er in Singapur.

nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 556, S. 268, 12. 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 (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heintzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Lt.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Lt.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Assistent des Chefredakteurs: Lena Baunack

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 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: Bernhard Gerl, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Ursula Loos, Elke Reinecke, 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 nachste-

henden 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

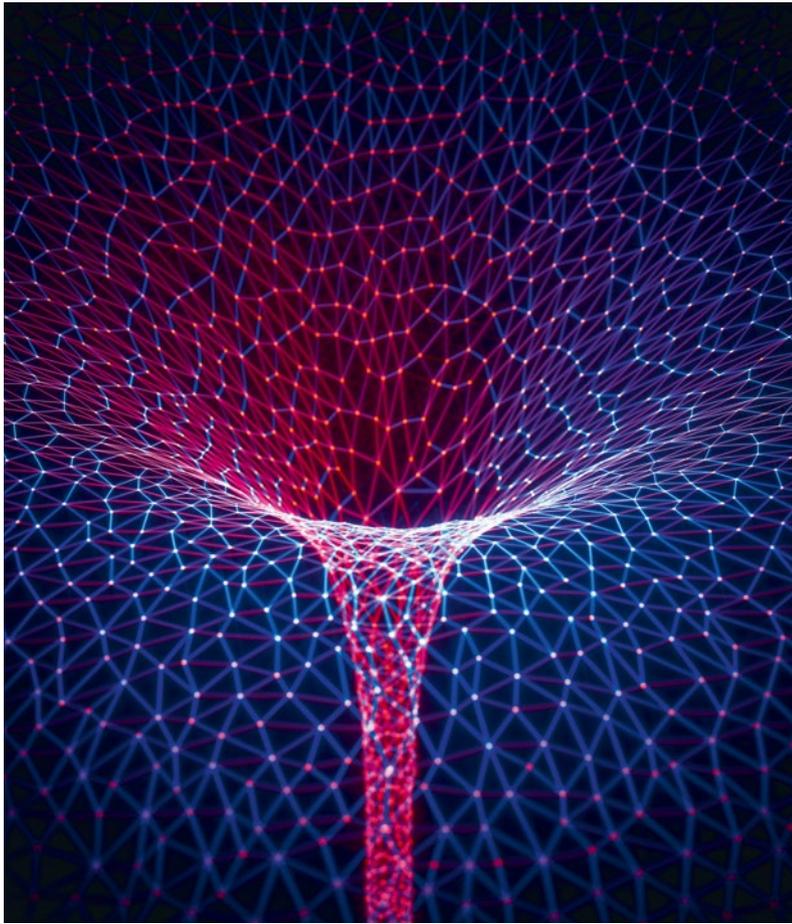
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562, Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU



KISIMAGE / GETTY IMAGES / ISTOCK

EINBLICKE IN DIE QUANTENGRAVITATION

Seit Jahrzehnten rätseln Physiker, wie die Schwerkraft auf subatomarer Ebene wirkt. Allerdings erschien es aussichtslos, die Quantisierung der schwächsten aller Kräfte jemals im Labor zu beobachten – die Effekte wären viel zu klein. Trickreiche Experimente sollen nun eine Brücke zwischen klassischer und mikroskopischer Welt schlagen. In ihnen könnte sich der Quantencharakter der Gravitation offenbaren.

JIGANUNOV / GETTY IMAGES / ISTOCK



STREIT UM ALTE DNA

Wenn sich Kulturen neu in Regionen etablieren, stellt sich die Frage nach dem Grund: Migration oder Ideentransfer? »Ancient DNA« aus sterblichen Überresten von Vertretern dieser Kulturen kann helfen, deren Herkunft aufzuklären. Doch vielen Archäologen gehen die Deutungen der Genetiker zu weit.



NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER CONCEPTUAL IMAGE LAB

NEUE SERIE DIE FRÜHE ERDE

Für eine halbe Milliarde Jahre nach der Entstehung unseres Planeten herrschten auf seiner Oberfläche höllische Bedingungen – so die gängige Theorie. Aktuelle Erkenntnisse legen hingegen nahe, dass die Erde deutlich früher alle Voraussetzungen für die Entwicklung von Leben bot.



OLELO / GETTY IMAGES / ISTOCK

EXTREMWETTER

Seltene Wetterkapriolen wie Hitzewellen, Überschwemmungen und Stürme lassen sich nur schwer direkt auf den Klimawandel zurückführen. Aber die Modelle der Klimaforscher werden immer präziser. Ein Interview mit der Meteorologin Daniela Jacob.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Verpassen Sie keine Ausgabe!



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:

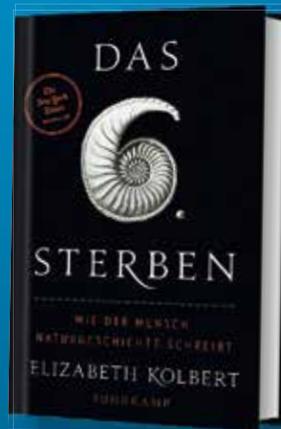
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

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

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

