

Spektrum

der Wissenschaft



Bitcoin und Blockchain

Die nächste Internet-Revolution

ANTHROPOLOGIE Die ersten Steinwerkzeuge

MEDIZIN Strategien gegen tödliche Biofilme

TEILCHENPHYSIK Erklären Neutrinos den Kosmos?

Forschung braucht Öffentlichkeit



unsplash / Anna Demianenko / CC0

Auf dem Videoportal von **Spektrum der Wissenschaft** erreichen Forschungseinrichtungen und Hochschulen, Stiftungen und Unternehmen ein breites und interessiertes Publikum. Spektrum.de spricht 1,62 Millionen Nutzer pro Monat an, immer mehr von ihnen suchen gezielt nach Videos. 42 Prozent der Seitenabrufe erfolgen über mobile Endgeräte (AGOF daily digital facts 2017-09).

Auf **SciViews** finden Sie Videokanäle von:

Alexander von Humboldt Stiftung
dasgehirn.info

Deutscher Zukunftspreis

Exzellenzcluster CellNetworks

Exzellenzcluster PRISMA

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster
Lindauer Nobelpreisträgertagungen

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung

Nature

Universität Innsbruck

und anderen

SciViews Hohe Sichtbarkeit für Wissenschaftsvideos in einem exzellenten Umfeld
auf Spektrum.de/SciViews



EDITORIAL TECHNIK MAL ZWEI

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

► »Spektrum« soll mehr über technologische Entwicklungen berichten und weniger über Grundlagenforschung! Mit dieser Forderung sehen wir uns immer häufiger konfrontiert. Tatsächlich waren wir bislang eher zögerlich – zu oft hatten sich Technikthemen in der Vergangenheit als Ladenhüter entpuppt. Doch in dieser und der folgenden Ausgabe holen wir gleich zu einem Doppelschlag aus. Und das kam so: Rund zehn Wochen vor Erscheinen eines jeden Hefts entwickeln Layout und Redaktion eine Reihe von alternativen Covern. Oft geht es dabei »nur« um unterschiedliche Bildmotive oder Schlagzeilen, in manchen Monaten jedoch feilen wir gleichzeitig an ganz verschiedenen Themen. Zur Entscheidungsfindung hole ich bisweilen den Rat von Kolleginnen und Kollegen aus dem Verlag Springer Nature ein, zu dem »Spektrum« seit zwei Jahren gehört. Im firmeninternen Netzwerk lade ich dann zwei oder drei miteinander konkurrierende Titelseiten hoch, verbunden mit der Frage, welche davon das größte Interesse weckt. Zwischen 100 und 200 Personen geben ein Votum ab. Das Ganze ist kein wissenschaftliches Verfahren, aber es schützt einen vor einsamen Fehlentscheidungen in der Chefredaktion.

Für Ausgabe 4.18 hatten wir schon lange geplant, endlich einmal wieder ein Technikthema auf das Cover zu heben. Die Alternativen lauteten Blockchain als nächste digitale Revolution sowie die Ökobilanz von Elektroautos. Beide rühren an breite öffentliche Debatten etwa im Zusammenhang mit der Kryptowährung Bitcoin beziehungsweise Fragen zu Klimaschutz und Mobilität. Noch während die Kollegen fleißig ihre Präferenz durch Klicks auf die Titelseiten kundtaten, erreichte mich folgende E-Mail: »Mit Ihrer Umfrage haben Sie einen kaum zu kittenden Riss durch die Rechtsabteilung ausgelöst. Es gibt nur eine Lösung, um den Frieden wiederherzustellen: Beide Hefte müssen erscheinen!« Dahinter zierte ein lächelnder Smiley die unverhoffte Nachricht. Es dauerte noch einige Tage, bis die Entscheidung fiel. Doch nun machen wir es genau so und bringen nacheinander beide Themen als Aufmacher. Das Cover des nächsten Monats finden Sie bereits in der Vorschau auf S. 98. Ich bin sehr gespannt, wie die Resonanz auf die »doppelte Technik« ausfällt!

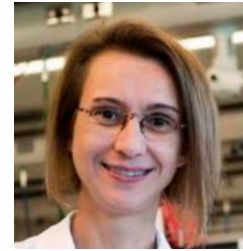
Herzliche Grüße,
Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser Spektrum Spezial Physik – Mathematik – Technik 1.18 erklärt, wie Astronomen mit neuen Techniken das Weltall genauer denn je erforschen.

AUTOREN DIESER AUSGABE



KARIN SAUER

Die deutsche Mikrobiologin ist Vizedirektorin des Binghamton Biofilm Research Center im US-Bundesstaat New York. Ab S. 48 berichtet sie vom Kampf der Mediziner gegen resistente, lebensbedrohende Biofilme.



ALCINO J. SILVA

Damit wir Erinnerungen miteinander verknüpfen, müssen Neurone in jeweils verschiedenen Zellensembles mitwirken. Wie das genau funktioniert, beschreibt der Neurowissenschaftler ab S. 54.



ALISON GOPNIK

Die Psychologin und Philosophin erforscht den kindlichen Wissenserwerb – und findet in ihrem fünfjährigen Enkel ein ergiebiges und immer wieder faszinierendes Studienobjekt (S. 74).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Galaxienhaufen aus dem Computer

Malereien der Neandertaler?

Superionisches Wasser

Schwarze Raucher als Brutkästen

Schnappschuss einer Supernova

Superfestes Holz

Höhenmessung mit Atomuhr

Überlebenstrick des Bombardierkäfers

30 FORSCHUNG AKTUELL

Tiefsee-Biodiversität

Satelliten verraten Bewohner am Grund der Antarktis.

Exotische Supraleiter

Überraschend findet sich ein altbekannter Mechanismus.

Schwarze Löcher

In der Milchstraße verbirgt sich ein Mittelgewicht.

Geißelschlag der Spermien

Eine überlagerte Schwingung gibt vor, wohin die Zellen schwimmen.

39 SPRINGERS EINWÜRFE

Urknall in Serie

Wie lässt sich der ungeheure Erfolg von »The Big Bang Theory« erklären?

61 FREISTETTERS FORMELWELT

Unfähigkeit zur Regellosigkeit

Mit Mathematik Zufall produzieren? Geht nicht!

72 SCHLICHTING!

Minivulkane am Strand

Die Flut presst Luft durch das Sandgefüge.

12 INFORMATIK **DIE WELT DES BITCOIN**

Die Währung ist immateriell, für jedermann verfügbar, unfälschbar und durch nichts gedeckt. Ein geniales Konzept mit ungewisser Zukunft.

Von John Pavlus

21 FINANZWIRTSCHAFT **AUSWEG AUS DEM BANKENMONOPOL**

Die Macht der Zentralbanken über das Geld könnte ins Wanken geraten.

Von Alexander Lipton und Alex »Sandy« Pentland

26 RESSOURCENVERBRAUCH **BITCOIN, DER ENERGIEFRESSER**

Der Strombedarf droht die Idee der Kryptowährung zu ruinieren.

Von Jean-Paul Delahaye

40 MENSCHENEVOLUTION **DIE ERSTEN STEINWERKZEUGE**

Lange vor den ersten Menschen stellten Homininen Steingeräte her. Doch anscheinend schufen sie noch keine Werkzeugtradition. Wieso nicht?

Von Kate Wong

48 MIKROBIOLOGIE **BIOFILME IM VISIER**

Biofilme sind oft antibiotikaresistent und verursachen tödliche Krankenhausinfektionen. Neue Behandlungsmethoden könnten davor schützen.

Von Karin Sauer

54 GEDÄCHTNIS **EIN NETZ VON ERINNERUNGEN**

Hirnforscher erkennen erst jetzt, wie die Neurone des Gedächtnisses Erinnerungen zu Gesamtbildern verknüpfen.

Von Alcino J. Silva

62 GROSSPROJEKT **DEN NEUTRINOS AUF DER SPUR**

Serie: Grenzfragen der Teilchenphysik (Teil 3) Physiker wollen mit einem riesigen Detektorkomplex die Massen der flüchtigen Partikel bestimmen.

Von Clara Moskowitz

70 NEUTRINOOSZILLATION **KOSMISCHE ANOMALIE IM WASSERTANK**

Messungen beleuchten die Rolle der Neutrinos beim Entstehen der Materie.

Von Katia Moskvitch

74 COMPUTER **LERNEN WIE DIE KINDER**

Neue Entwicklungen in der künstlichen Intelligenz folgen beim Wissenserwerb einem natürlichen Vorbild: den Ein- bis Fünfjährigen.

Von Alison Gopnik

80 GEOMETRIE **GERECHTES TORTENTEILEN**

Überraschungen aus einem abgegrast geglaubten Bereich der Geometrie.

Von Jean-Paul Delahaye

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



12

TITELTHEMA
BITCOIN UND BLOCKCHAIN

ANDREW HENNESEN



40

MENSCHENEVOLUTION
DIE ERSTEN
STEINWERKZEUGE

MARK ROSS STUDIO



62

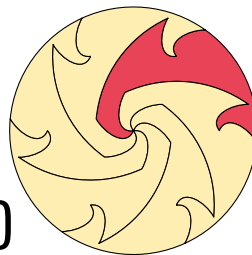
TEILCHENPHYSIK
DEN NEUTRINOS
AUF DER SPUR

MEINIVANDLIK / GETTY IMAGES / ISTOCK



74

COMPUTER
LERNEN WIE DIE KINDER



80

GEOMETRIE
GERECHTES
TORTENTEILEN

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, MACH: HADDLEY, JA, WORSLEY, S.; INFINITE FAMILIES OF MONOHEDRAL DISK TILINGS. IN: ARXIV 1517.03794, 2016

84 ZEITREISE

Von Hühnerläusen zum REM-Schlaf

86 REZENSIONEN

Beau Lotto: Anders sehen
Christian Köberl, Alwin Schönberger: Achtung Steinschlag
Harald Meller, Thomas Puttkammer (Hg.): Klimagewalten
Rüdiger Vaas: Einfach Einstein!
Felix Schröder, Nina Weber: Was das Herz begehrt

94 LESERBRIEFE

95 IMPRESSUM

96 FUTUR III

Das Versprechen
Ein Roboter mit ganz eigenen Bedürfnissen

98 VORSCHAU

Titelbild: Just_Super / 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





GALAXIENHAUFEN AUS DEM COMPUTER

► Deutsche und US-amerikanische Astrophysiker haben am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart die bisher aufwändigste Simulation unseres Universums durchgeführt. Mit Hilfe der dortigen Supercomputer haben die Wissenschaftler untersucht, wie sich der Kosmos seit dem Urknall in einem eine Milliarde Lichtjahre messenden Würfel entwickelt haben müsste. Um das dynamische Zusammenspiel von Galaxien, Gaswolken und Dunkler Materie zu simulieren, mussten mehr als 24 000 Prozessoren zwei Monate lang rechnen. Insgesamt fielen mehr als 500 Terabyte an Daten an.

Hier ist ein Ausschnitt rund um den zweitschwersten Galaxienhaufen der »Illustris-TNG«-Simulation (siehe **Spektrum** Januar 2015, S. 10) zu sehen. Die ungewöhnliche Farbgebung veranschaulicht, wie schnell sich das Gas in dem 32 Millionen Lichtjahre breiten und 320 000 Lichtjahre tiefen Volumen bewegt. In den hell gefärbten Regionen schleudert die Schwerkraft von supermassereichen Schwarzen Löchern Gas mit mehr als 1000 Kilometern in der Sekunde durchs All. An dunklen Stellen bewegt es sich hingegen fast gar nicht. Das ist insbesondere in den Filamenten zwischen den Galaxienhaufen der Fall, welche die großen Masseansammlungen im All wie feine Fäden verbinden.

MNRAS 475, 1, 2018



FERRO SQUINA

Die Striche und Linien an den Wänden der nordspanischen La-Pasiega-Höhle sind möglicherweise 65 000 Jahre alt. Als Urheber kommen somit vor allem die Neandertaler in Frage.

ARCHÄOLOGIE MALEREIEN DER NEANDERTALER?

Womöglich haben bereits die Neandertaler die Wände ihrer Höhlen bemalt. Darauf deuten zumindest in rotem Ocker aufgebraachte Formen und Figuren in drei spanischen Höhlen hin, die ein internationales Forscherteam um Dirk Hoffmann vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig nun erstmals genau datiert hat. Demnach sind die Malereien – Striche, Reihen von Punkten und Negativabdrücke von Händen – mindestens rund 65 000 Jahre alt. Der *Homo sapiens* traf nach gegenwärtigem Kenntnisstand jedoch erst vor etwa 45 000 Jahren in Europa ein.

Bekannt sind die eher unauffälligen Malereien in den Höhlen von La Pasiega, Maltravieso und Ardales (die in Nord-, West- beziehungsweise Südspanien liegen) schon länger.

Dass Hoffmann und Kollegen sie nun den Neandertalern zuordnen können, ist verbesserten Datierungsmöglichkeiten zu verdanken. Die Forscher machten sich zu Nutze, dass das Wasser, das über die Höhlenwände rinnt und auf den Malereien Kalkablagerungen bildet, winzige Spuren Uran enthält.

Aus dem Mengenverhältnis des heute noch vorhandenen Elements zu seinem Zerfallsprodukt Thorium lässt sich ablesen, wann die Kalkablagerungen entstanden. Liegen sie über oder unter dem Ockeranstrich, ergibt sich ein

Höchst- respektive Mindestalter.

Das Ergebnis reiht sich in eine wachsende Liste von Indizien ein, dass sich Neandertaler lange vor Eintreffen des modernen Menschen künstlerisch ausdrücken konnten. Dafür sprechen beispielsweise auch mit Ocker verzierte Muschelschalen, die vor einiger Zeit in der spanischen Cueva de los Aviones gefunden wurden und die so alt sind, dass sie eigentlich nur von unserer Schwesterart stammen können. Auch ein tief in der französischen Bruniquel-Höhle verstecktes Bauwerk aus Stalagmiten deutet in diese Richtung. Mit einem Alter von 176 000 Jahren ist es klar vor Ankunft des modernen Menschen entstanden.

Science 359, S. 912–195, 2018

CHEMIE SUPERIONISCHES WASSER

Chemiker unterscheiden mehr als ein Dutzend Phasen von Wasser, von denen die meisten allerdings nur unter extremen Temperaturen und Drücken auftreten. US-amerikanische Wissenschaftler haben nun für einige Sekundenbruchteile einen besonders exotischen Typ erzeugt, dessen Existenz Forscher bereits vor 30 Jahren prognostiziert hatten und der im Inneren der Planeten Neptun und Uranus eine wichtige Rolle spielen könnte.

Dieses »superionische« Wasser ist gewissermaßen ein Mix aus festen und flüssigen Bausteinen; in ihm schwimmen Wasserstoffionen um ein Kristallgitter aus Sauerstoffatomen. Das Team um Marius Millot vom Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien erzeugte den exotischen Zustand in zwei Schritten. Zuerst pressten die Forscher eine winzige Wasserprobe bei Raumtemperatur mit zwei Diamanten zusammen. Unter einem Druck von etwa 25 000 Atmosphären ordneten sich die Moleküle daraufhin in einem kubisches Kristallgitter an – Experten sprechen von Eis-VII.

Anschließend beschossen die Wissenschaftler diese Probe mit Laserpulsen. Die Strahlung traf dabei auf eine Schicht aus Gold und Kunststoff an der Oberfläche der Diamanten und übertrug den Elektronen in dem Material so viel Energie, dass sie sich von den Atomrümpfen lösten.

Dadurch entstand ein ionisiertes Gas, das rasant von der Oberfläche abströmte und eine Stoßwelle erzeugte, die das kubische Eis noch stärker zusammenpresste. Insgesamt wirkten so für einige Milliardstelsekunden Drücke von mehreren Millionen Atmosphären und Temperaturen von einigen tausend Grad Celsius auf das Wasser – Bedingungen, wie sie auch im Inneren der Planeten am Rand unseres Sonnensystems herrschen müssten.

Mit einem weiteren Laser ermittelten die Materialwissenschaftler den

Aggregatzustand der eingeschlossenen Probe. In gewöhnlichen Leitern transportieren freie Elektronen den Strom, wohingegen in superionischem Eis die Wasserstoffionen als Ladungsträger dienen. Bewegte Elektronen reflektieren Licht – aus diesem Grund glänzen Metalle. Die elektrisch leitende Wasserprobe erwies sich im Experiment jedoch als matt, was die These der Forscher stützt, dass die Ionen den Strom transportierten, was charakteristisch für superionisches Wasser ist.

Nat. Phys. 10.1038/s41567-017-0017-4, 2018

ASTRONOMIE SCHNAPPSCHUSS EINER SUPERNOVA

► Eigentlich wollte Víctor Buso am 20. September 2016 nur seine neue Astrokamera testen. Also richtete der argentinische Amateurastronom sein 40-Zentimeter-Teleskop auf die 80 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie NGC 613, die an diesem Tag nahe dem Zenit stand. Nach einigen Stunden tauchte am unteren Rand der Sternensichel plötzlich ein Punkt auf, der immer heller wurde. Buso meldete die

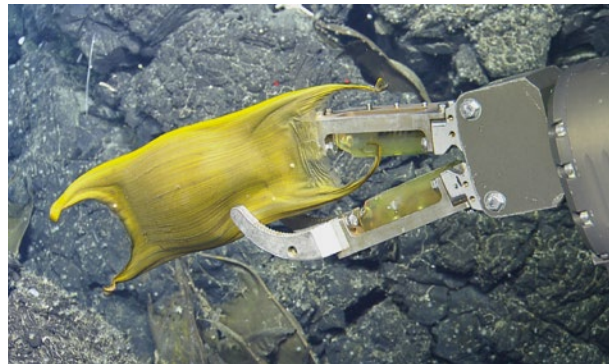
Entdeckung rasch professionellen Astronomen, die binnen eines Tages mehrere Großinstrumente auf die ferne Galaxie ausrichteten, darunter den Gammastrahlen-Satelliten Swift und die Zehn-Meter-Spiegelteleskope des Keck-Observatoriums auf Hawaii.

Nun haben die Astrophysiker eine Auswertung der mehrmonatigen Messkampagne veröffentlicht. Ihr zufolge wurde Buso auf dem Dach seines Hauses Zeuge einer seltenen Variante von Sternexplosion, einer Supernova vom Typ IIb. Bei ihr schleudert ein Riesenstern seine

MEERESÖKOLOGIE SCHWARZE RAUCHER ALS BRUTKÄSTEN

► Als Wissenschaftler 1977 im Pazifik erstmals Hydrothermalquellen entdeckten, waren sie verblüfft angesichts der Fülle an Organismen fernab des Sonnenlichts. Über vulkanartige Schlote strömen hier bis zu 400 Grad Celsius heiße Fluide aus dem Ozeanboden, die reich an Metallen und anderen reduzierten chemischen Verbindungen sind. Bakterien gewinnen daraus Energie und bilden die Lebensgrundlage für Muscheln, Krabben und Röhrenwürmer. Nun berichten Meeresbiologen um Pelayo Salinas-de-León von der Charles Darwin Research Station auf den Galapagosinseln, dass auch Tiefseerochen Teil dieses komplexen Ökosystems sind. Offenbar suchen sie zur Eiablage gezielt Schwarze Raucher auf, damit sich ihre Nachkommen in der warmen Umgebung schneller entwickeln.

Das internationale Forscherteam erkundete mit einem Tauchroboter Hydrothermalquellen in knapp 1700 Meter Tiefe nahe der Galapagosinsel Darwin. Rings um zwei aktive Schwarze Raucher zählten die Biologen mehr als 150 Rocheneier. Anhand von DNA-Proben konnten sie die zirka elf Zentimeter langen Kapseln mit dornartigen Fortsätzen dem Pazifischen Weißrochen *Bathyrāja spinosissima* zuordnen. Die Embryonalentwicklung dieser Art gehört zu den längsten im gesamten Tierreich: Erst nach etwa vier Jahren schlüpft der Nachwuchs. An den Fundorten lag die Temperatur einige Grad über dem Mittelwert des Meerwassers in



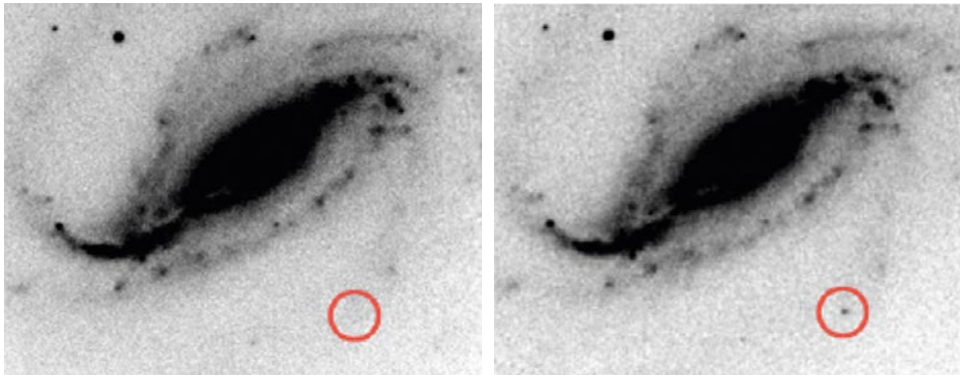
OCEAN EXPLORATION TRUST

Das Foto zeigt das Ei eines Tiefseerochens, das vom Greifarm eines Tauchroboters angehoben wird. Die Tiere laichen an Hydrothermalquellen vor den Galapagosinseln.

Bodennähe von 2,8 Grad Celsius. Die Forscher vermuten, dass die heißen Schlote als natürliche Brutkästen dienen und die Rochenbabys ihre Eikapseln hier deutlich früher verlassen.

Wie viele Tiefseebewohner wachsen Weißrochen extrem langsam und haben nur wenige Nachkommen. Entsprechend gefährdet sind sie durch Fischfang in immer größeren Tiefen sowie Bestrebungen, Gold, Kupfer und andere wertvolle Metalle am Grund der Ozeane zu schürfen. Für die warme Kinderstube der Rochen bei Darwin gibt es jedoch Entwarnung: 2016 hat Ecuador die Region zum Schutzgebiet erklärt, in dem jegliche Rohstoffgewinnung verboten ist.

Sci. Rep. 10.1038/s41598-018-20046-4, 2018



Von seinem Hausdach aus beobachtete der Argentinier Víctor Buso am 20. September 2016 die Entstehung einer Supernova: In den frühen Morgenstunden tauchte am unteren Rand der Galaxie NGC 613 ein Punkt auf (rechts), der eine Stunde zuvor noch nicht zu sehen war (links). In einer Galaxie kommt es nur etwa einmal pro Jahrhundert zu solch einem Ereignis.

obersten Schichten aus Wasserstoffgas bereits ins All, bevor er am Ende seines Brennzklus zu einem Schwarzen Loch kollabiert und so eine Supernova zündet.

Dank dem Zufallsfund des argentinischen Schlossers konnten die Experten um Melina Bersten vom Instituto de Astrofísica de la Plata den Startpunkt dieses Sterntodtyps nun erstmals auf einen knapp dreistündigen Zeitraum eingrenzen. Die Aufnahmen Busos (siehe Bilder) liefern außerdem die ersten Helligkeitswerte aus der so genannten »shock-breakout«-Phase: jenen ersten Minuten bis Stunden, in denen die vom Sternkollaps losgetretene Stoßwelle die abgestoßene Wasserstoffwolke durchpflügt und die Atome darin zum Leuchten anregt.

Die Aufnahmen Busos belegen, dass sich eine Supernova in dieser Phase nicht nur im Röntgen- und Gammalicht bemerkbar macht, sondern auch bei für Menschen sichtbaren Wellenlängen viel Strahlung abgibt. Davon waren Astro-

nomen schon länger ausgegangen, ein Nachweis stand aber noch aus. Insgesamt spricht die am Computer durchgeführte Rekonstruktion der Forscher dafür, dass die »Supernova 2016gkg« einen Stern zerfetzte, der 4,6-mal so schwer und 183-mal so groß wie unsere Sonne war.

Nature 554, S. 497–499, 2018

MATERIALWISSENSCHAFT SUPERFESTES HOLZ

► Eine spezielle Behandlung mit Chemikalien, Hitze und Druck macht Holz steifer und fester als viele Spezialstähle, berichtet ein Team um Jinwei Song von der University of Maryland. Bei dem Verfahren kochen die Forscher den Baustoff zunächst in einer Salzlauge, anschließend lassen sie unter Hitze und Druck dessen Poren kollabieren. Durch den Prozess wird das Holz dreimal so dicht wie das natürliche Material; seine Steifigkeit und spezifische Festigkeit steigen auf mehr als das Zehnfache. Weil

das so behandelte Holz immer noch leichter ist als Stahl und andere Legierungen, könnte es für manche Anwendungen besser geeignet sein.

Die Materialwissenschaftler setzten Holzblöcke in ihrem Labor zuerst einer heißen Lösung von Natriumhydroxid und Natriumsulfid aus – der Prozess ähnelt der Behandlung von Holzfasern bei der Papierherstellung. Die alkalische Lösung entfernt einen Teil des Lignins und der Hemicellulose aus dem Holz, und das scheint die Eigenschaften des Materials beim Heißpressen ganz erheblich zu verändern.

Frühere Versuche, Holz durch Druck und Hitze zu einem deutlich stärkeren Werkstoff zu verarbeiten, waren nur bedingt von Erfolg gekrönt gewesen. Die mechanische Festigkeit stieg nur etwa proportional zur Dichte. Nach Angaben der Arbeitsgruppe verhält sich das veränderte Holz anders, weil sich winzige Zellulosefasern in einer dichten Parallelstruktur zusammenlagern, was in unbehandeltem Holz das Lignin

verhindert. Zusätzlich soll der verdichtete Werkstoff beim Kontakt mit Wasser nicht so stark aufquellen. Unklar ist allerdings noch, ob das Holz durch die Entfernung des Lignins anfälliger für Pilzbefall wird, was aus Sicht von Experten denkbar ist.

Nature 554, S. 224–228, 2018

GEODÄSIE HÖHENMESSUNG MIT ATOMUHR

► Physiker um Christian Lisdat von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig haben mit einer mobilen Atomuhr ermittelt, wie viele Meter über dem Meeresspiegel ein Tunnel durch einen Berg in Südf frankreich führt. Die Messung basiert auf einem Phänomen, das Albert Einstein in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben hat: Für einen außen stehenden Betrachter geht eine Uhr etwas langsamer, wenn sie sich näher an einer großen Masse befindet, Experten sprechen von gravitativer Zeitdilatation.

Die Forscher nutzten für ihren Versuch eine optische Atomuhr, in der auf knapp über den absoluten Nullpunkt gekühlte Strontiumatome stecken. Das Hochpräzisionsgerät misst Zeit, indem es zählt, wie oft Elektronen in der Hülle der Atome von einem Energieniveau in ein anderes hüpfen, was stets mit einem charakteristischen Strahlungspuls einhergeht. In einem auf Höhe des Meeresspiegels gelegenen Labor passiert dies exakt

429 228 004 229 873-mal pro Sekunde.

Etwa 1000 Meter weiter oben – wo die Schwerkraft etwas geringer ist als näher am Erdmittelpunkt – vergeht die Zeit ein klein wenig schneller. Das Elektron hat dadurch in dem Zeitraum, in dem auf Meeresebene eine Sekunde

vergangen ist, 48 Sprünge mehr ausgeführt. Das berichten die Forscher nach Messungen im südfranzösischen Mont-Cenis-Tunnel und dem Vergleich mit einer Atomuhr im italienischen Flachland per Glasfaserkabel.

Damit haben die Wissenschaftler laut eigener Aus-

sage bewiesen, dass sich optische Atomuhren auch mobil einsetzen lassen. Bisher konnte man entsprechende Messungen nur in Laboren durchführen. Für ihr Feldexperiment brachte das Team eine Strontiumuhr nun erstmals in einem Lkw-Anhänger unter. Zwar liegt die Genauigkeit der

Messmethode noch deutlich unter der von Standardverfahren der Geodäsie. Aber künftig könnte man damit Höhenunterschiede von zehn Zentimetern messen und so andere Messungen ergänzen, hoffen die Forscher.

Nat. Phys. 10.1038/s41567-017-0042-3, 2018

BIOLOGIE ÜBERLEBENSTRICK DES BOMBARDIERKÄFERS

► Eine besondere Strategie, seinen Fressfeinden zu entkommen, hat der Bombardierkäfer *Pheropsophus jessoensis* entwickelt: Er wehrt sich sogar noch, nachdem er schon verspeist wurde, und das sogar recht erfolgreich, wie jetzt Shinji Sugiura und Takuya Sato von der japanischen Kobe University berichten. Gerade verschluckt, schießt der Käfer im Magen der Kröte nämlich einen Strahl heißes, ätzendes Sekret aus einer Hinterleibsdrüse – eine Strategie, die den Bombardierkäfern ihren Namen eingebracht hat. Normalerweise dient die Waffe zur Abschreckung. In diesem Fall jedoch ätzen sich die Käfer mit ihrer Hilfe quasi zurück in die Freiheit. Das Sekret bringt die Kröten zum Erbrechen; und der eigentlich schon verspeiste Käfer entkommt.

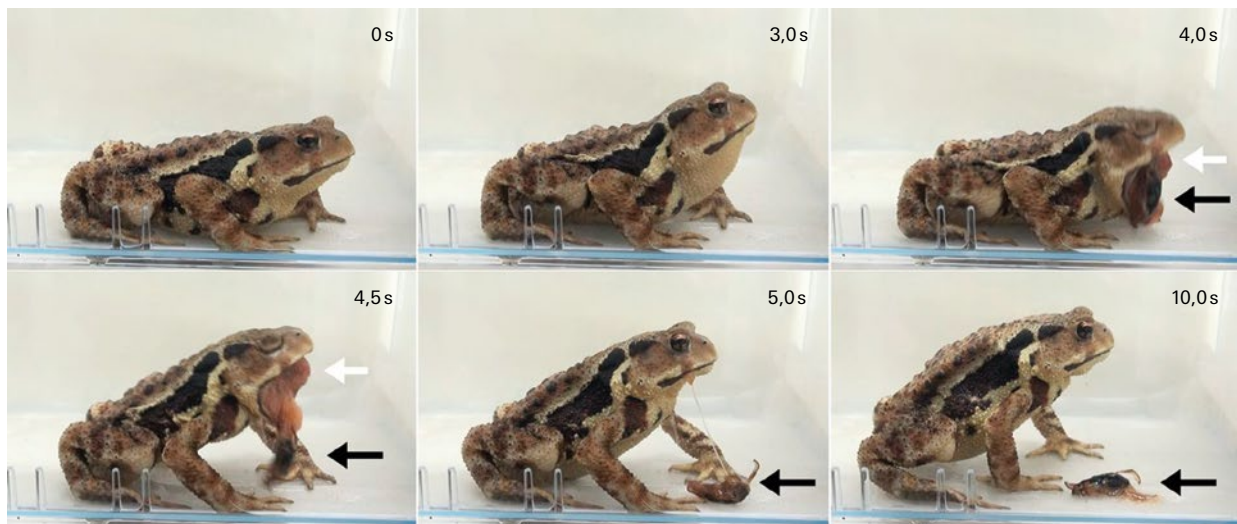
Bombardierkäfer mischen die Stoffe Wasserstoffperoxid und Hydrochinon und geben im richtigen Moment Enzyme dazu, welche die ohnehin heftige Reaktion stark beschleunigen. Dadurch spritzt das siedende Gemisch aus den Ausgangsstoffen und den

Reaktionsprodukten Sauerstoff und Benzochinon mit hoher Geschwindigkeit durch eine Drüse nach außen.

Die Forscher testeten, wie 46 beziehungsweise 28 Kröten der Arten *Bufo japonicus* und *Bufo torrenticola* auf diese Art der Verteidigung reagierten. Die Biologen piksten jeweils die Hälfte der Käfer vor dem Experiment an, so dass sie den Inhalt ihrer Drüse entleerten. Anschließend setzten sie die Krabber je einer Kröte zum Fraß vor. Dabei zeigte sich, dass fast alle Käfer, die ihr Sekret bereits verschossen hatten, verdaut wurden. Von den unbehandelten Käfern entkam jedoch etwa die Hälfte, wobei zwischen Aufessen und Ausspucken zwischen zwölf Minuten und eindreiviertel Stunden vergingen.

Bio. Lett. 10.1098/rsbl.2017.0647, 2018

Schwer verdaulich: Die Bildfolge zeigt die kurze Zeitspanne, in der eine Kröte der Art *Bufo japonicus* einen zuvor verspeisten Bombardierkäfer herauswürgt.



SUGIURA, S., SATO, T.: SUCCESSFUL ESCAPE OF BOMBARDIER BEETLES FROM PREDATOR DIGESTIVE SYSTEMS. IN: BIOLOGY LETTERS 14, 10.1098/rsbl.2017.0647, 2018. FIG. 1. ABRUCK GEMENBIT VON THE ROYAL SOCIETY / CC

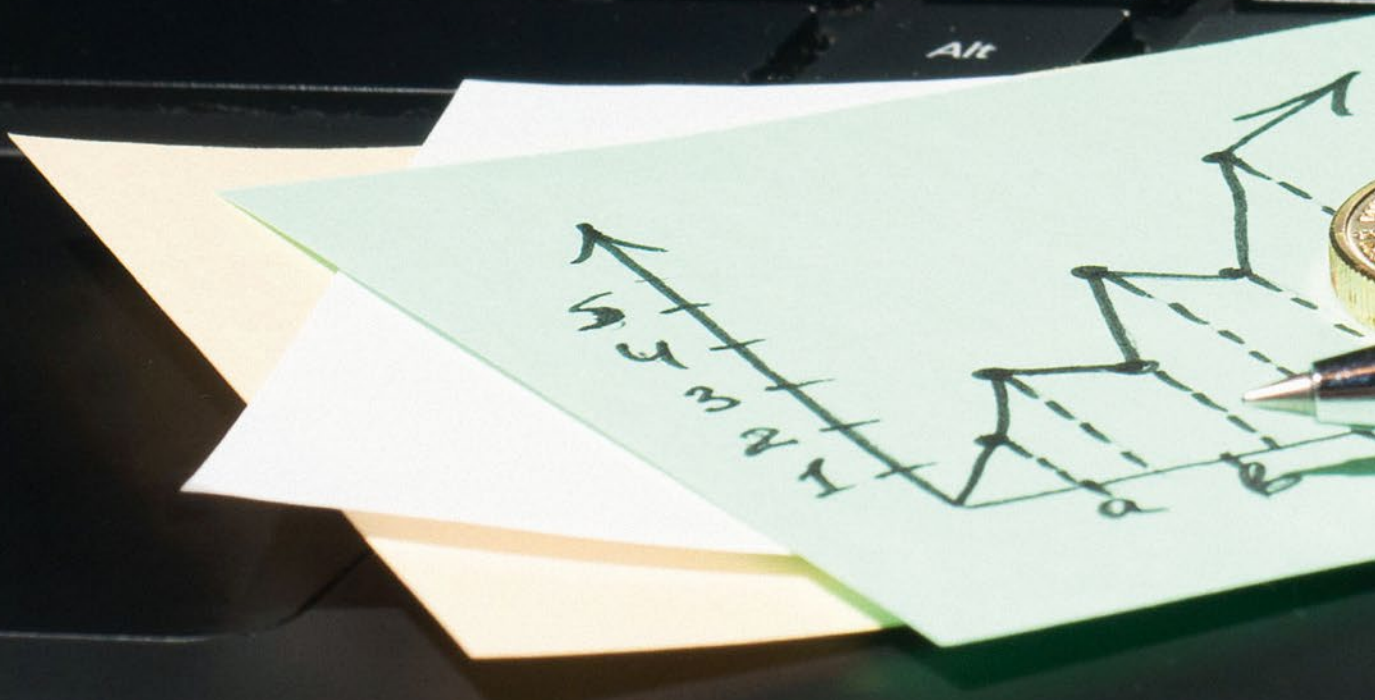
INFORMATIK DIE WELT DES BITCOIN

TITELTHEMA Die wichtigsten Fragen
zur ersten großen digitale Währung



John Pavlus ist Publizist und Filmemacher in Portland (Oregon). Er thematisiert vor allem Wissenschaft, Technologie und Design. Seine Arbeiten erschienen in zahlreichen Zeitschriften.

» spektrum.de/artikel/1547029





Nein, es gibt keine Goldmünzen mit aufgeprägtem B wie Bitcoin. Die Währung ist so abstrakt, dass man sie unter keinen Umständen anfassen kann. Sie ist unfälschbar, wie jedermann mit einem Computer nachprüfen kann; und sie ist nicht durch Sachwerte gedeckt. Ein geniales Konzept – jedoch mit ungewisser Zukunft.

Bitcoin, Kryptowährungen, intelligente Verträge: Die neuen Technologien sind in aller Munde. Hunderte von Zentralbanken und Konzernen beschäftigen sich damit, Risikokapitalgeber investieren bereits jetzt Milliarden. Die Öffentlichkeit ist sich nicht sicher, ob das Ganze überhaupt legal oder vielmehr ein Tummelplatz krimineller Elemente ist, und die Leute, die es wissen müssten, sind nicht wesentlich besser informiert: Als die Wirtschaftsprüfungsgesellschaft PricewaterhouseCoopers im Jahr 2017 unter global agierenden Finanzfachleuten eine Umfrage veranstaltete, erklärten sich nur 24 Prozent der Befragten als »extrem« oder »sehr« vertraut mit der Sache.

Glaubt man den Sprüchen einiger Evangelisten, so hat die Technologie die Macht, ganze Wirtschaftssysteme auf den Kopf zu stellen. Andere sind weit skeptischer. So erklärt Emin Gün Sirer, einer der Gründer der Initiative for Cryptocurrencies and Contracts an der Cornell University, dass der technische Kern zwar »faszinierend und revolutionär ist, aber da draußen auch eine Menge dummes Zeug verbreitet wird«. Was soll man davon halten – und was ist eigentlich eine Blockchain?

Alles begann mit Satoshi Nakamoto. Niemand weiß, wer sich hinter dem Pseudonym verbirgt; aber wenn es ein einzelner Mensch ist, zählt er inzwischen höchstwahrscheinlich zu den reichsten der Welt. Im Oktober 2008 veröffentlichte Nakamoto über eine obskure Internetmailingliste einen Artikel mit dem Entwurf für die erste Blockchain der Welt: eine öffentliche Datenbank, von der alle zehn Minuten Kopien an Tausende von Computern verteilt und von diesen abgeglichen werden, für jedermann zugänglich und von niemandem zu hacken. Ziel war es, eine dezentrale, absolut sichere Aufzeichnungsmöglichkeit für den Austausch einer neuen digitalen Währung bereitzustellen, die Nakamoto Bitcoin nannte.

Im Prinzip könnte man eine Münze oder Banknote durch ein hinreichend langes und daher nicht erratbares Datenstück ersetzen. Man zahlt, indem man dem Empfänger das Datenstück sendet. So funktionieren manche Gepäckschließfächer und online zu erwerbende Kinokarten: Die Kenntnis eines Codes ist Geld wert. Aber im

Zahlungsverkehr würde nichts den Besitzer des Codes daran hindern, dasselbe Geld mehrfach auszugeben. Die Blockchain-Technologie ändert das: Jede Übertragung von Bitcoins wird in ein »verteiltes Hauptbuch« (distributed ledger) eingetragen, eine Art digitales Protokoll, das nach den Gesetzen der Mathematik und der Kryptografie so unveränderlich ist, als wäre es in Stein gemeißelt. Der »Economist« nannte es »die Vertrauensmaschine«.

Inzwischen ist die Technologie über ihren ersten Anwendungsbereich rasch hinausgewachsen und hat eine Phase rasanter Innovationen ausgelöst. Stellen Sie sich eine Blockchain als einen Behälter für Daten aller Art vor, deren Herkunft zweifelsfrei feststehen muss: Kontostände, Besitztum, Identitätsnachweise. Dieses »worldwide ledger« – wie Don Tapscott, Mitautor von »Die Blockchain-Revolution«, es nennt – ist für sich genommen wertneutral. Allerdings kann die Technologie auch missbraucht werden. Es gibt einige mahnende Stimmen, welche die Euphorie zu bremsen versuchen.

Hier eine Orientierungshilfe für die digitale Landschaft, die Satoshi Nakamoto – wer immer er ist – uns hingeworfen hat.

Sind Bitcoin und Blockchain dasselbe?

Nein, aber die Begriffe sind leicht zu verwechseln. Sie erblickten das Licht der Öffentlichkeit 2008 mit dem Artikel, in dem Satoshi Nakamoto beide beschrieb. Bitcoin ist eine Art von Kryptowährung, Blockchain die Technologie, die Bitcoin ermöglicht: eine Infrastruktur, die für die Dokumentation vieler Arten von Transaktionen nutzbar ist. Es gibt Blockchain ohne Bitcoin, aber nicht umgekehrt.

Wer nutzt die Blockchain-Technologie?

Der Nutzerkreis beschränkt sich nicht auf die Finanzwelt und nicht auf die Verfechter der bürgerlichen Freiheiten im Internet, die an der neuen Technik die Anonymität und die Dezentralität preisen. Hier eine unvollständige Aufstellung:

► **Finanzinstitute:** Großbanken und Investmentfirmen betreiben, allein oder im Verbund, Forschungsprojekte zum Thema Blockchain. Seit 2012 gibt es »Ripple«, ein erfolgreiches System auf der Grundlage von Blockchain zur Abwicklung internationaler Transaktionen unter Banken. »Bloom« und andere Start-ups wollen Blockchains für Kreditauskunftsdienste einsetzen. Das würde Datendiebstähle wie den, bei dem bis zum September 2017 persönliche Daten von etwa 140 Millionen Menschen aus den Archiven der Auskunftsei Equifax gehackt wurden, unmöglich machen.

► **Regierungen:** Die US-Staaten Delaware und Illinois verwenden verteilte Hauptbücher für Geburtsurkunden. In Vermont ist nach einem neuen Gesetz die Blockchain-Technologie zur Überprüfung der Echtheit von juristischen Dokumenten zugelassen. Dubai will seinen Verwaltungsapparat komplett auf Blockchain umstellen. Für die Ausstellung eines Visums oder eines Führerscheins wäre nur noch der Inhalt der Blockchain maßgebend. Im Jahr 2016 begann Tunesien mit der Einführung einer Blockchain-gestützten digitalen Version seiner nationalen Währung, dem eDinar.

AUF EINEN BLICK DAS REVOLUTIONÄRE IST DIE BLOCKCHAIN

- 1 Bitcoin ist eine Art von Geld, die nur von dem Vertrauen der Beteiligten gedeckt wird.
- 2 Dieses Vertrauen wird gestützt durch eine Technologie, die jede Transaktion unlöschbar, unfälschbar und öffentlich einsehbar dokumentiert: Blockchain.
- 3 Diese Art der Dokumentation eignet sich auch für viele andere Zwecke, insbesondere für Personaldokumente, Zeugnisse und medizinische Daten.

Wie Blockchain funktioniert

Wie bewegt sich digitales Geld – oder irgendwelche anderen Daten – sicher und unverfälschbar in einem dezentralen Netz aus lauter Fremden, die nicht den geringsten Anlass haben, einander zu vertrauen? Durch das Erstellen eines permanenten Hauptbuchs, das alle Transaktionen enthält und von keinem einzelnen Mitglied des Netzes geändert werden kann!

2 Die Transaktion wird zur Überprüfung an das Peer-to-Peer-Netzwerk der Computer gesendet, welche die Blockchain betreiben. Jeder Knoten im Netz verfügt über ein Verfahren, um festzustellen, ob die Transaktion gültig ist oder nicht, ob also zum Beispiel bei einer Bitcoin-Transaktion der Zahler über ein ausreichendes Guthaben verfügt. Sowie das Netz einen Konsens über die Gültigkeit erzielt hat, wird die Transaktion zusammen mit ihresgleichen zu einem Block zusammengefasst.

1 Eine Blockchain-Transaktion beginnt damit, dass eine Partei sich bereift, Daten an eine andere zu senden. Auf die Art der Daten kommt es im Prinzip nicht an. Da aber der Sinn einer Blockchain darin besteht, die Transaktion dauerhaft und nachprüfbar zu dokumentieren, besitzen die Daten normalerweise einen gewissen Wert. Standardbeispiele sind Einheiten einer Kryptowährung oder andere Finanzinstrumente wie zum Beispiel Call- oder Put-Optionen für Börsengeschäfte; Verträge, Urkunden oder Eigentumsnachweise; medizinische Informationen oder andere Identitätsdaten.

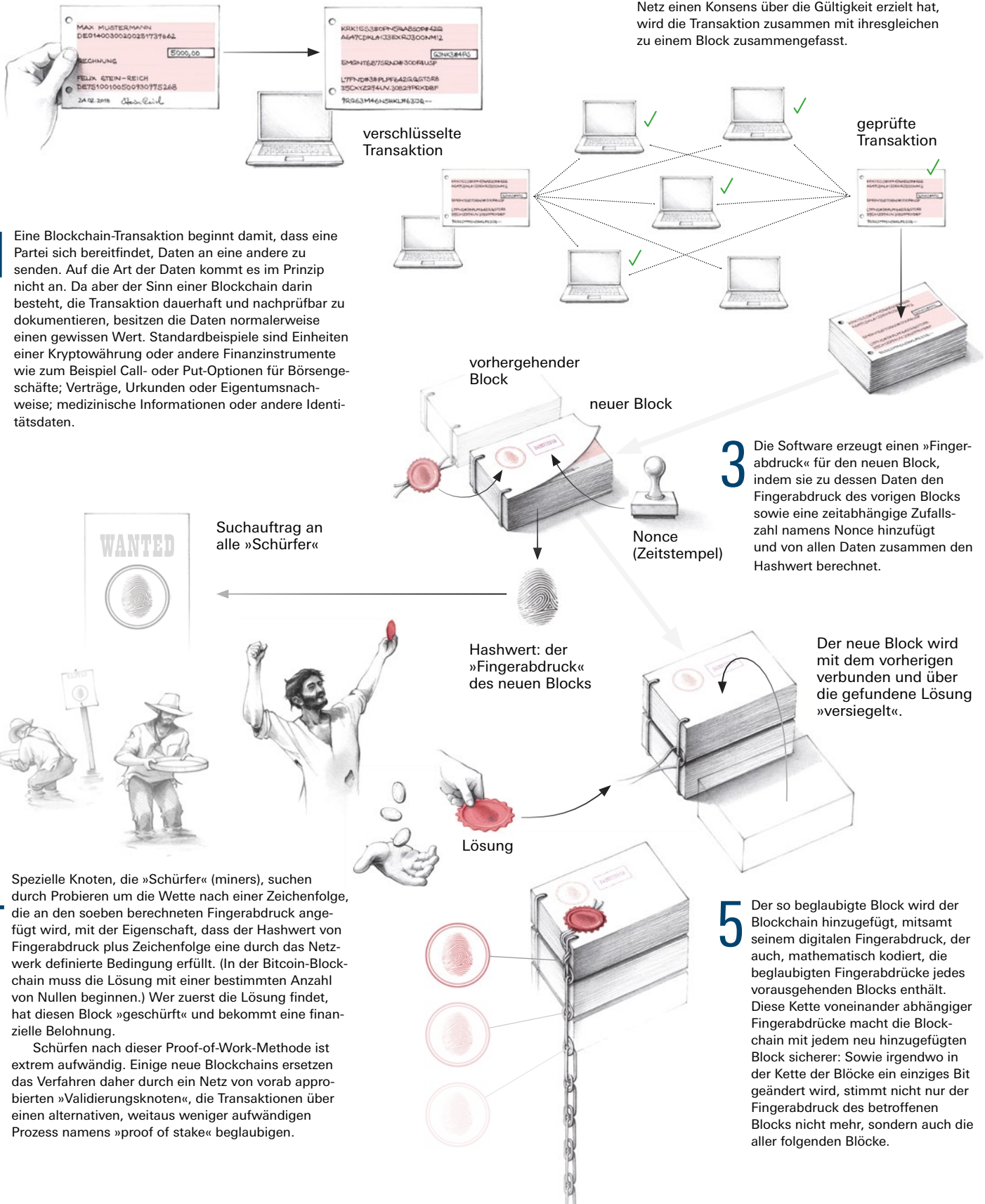
3 Die Software erzeugt einen »Fingerabdruck« für den neuen Block, indem sie zu dessen Daten den Fingerabdruck des vorigen Blocks sowie eine zeitabhängige Zufallszahl namens Nonce hinzufügt und von allen Daten zusammen den Hashwert berechnet.

Der neue Block wird mit dem vorherigen verbunden und über die gefundene Lösung »versiegelt«.

4 Spezielle Knoten, die »Schürfer« (miners), suchen durch Probieren um die Wette nach einer Zeichenfolge, die an den soeben berechneten Fingerabdruck angefügt wird, mit der Eigenschaft, dass der Hashwert von Fingerabdruck plus Zeichenfolge eine durch das Netzwerk definierte Bedingung erfüllt. (In der Bitcoin-Blockchain muss die Lösung mit einer bestimmten Anzahl von Nullen beginnen.) Wer zuerst die Lösung findet, hat diesen Block »geschürft« und bekommt eine finanzielle Belohnung.

Schürfen nach dieser Proof-of-Work-Methode ist extrem aufwändig. Einige neue Blockchains ersetzen das Verfahren daher durch ein Netz von vorab approbierten »Validierungsknoten«, die Transaktionen über einen alternativen, weitaus weniger aufwändigen Prozess namens »proof of stake« beglaubigen.

5 Der so beglaubigte Block wird der Blockchain hinzugefügt, mitsamt seinem digitalen Fingerabdruck, der auch, mathematisch kodiert, die beglaubigten Fingerabdrücke jedes vorausgehenden Blocks enthält. Diese Kette voneinander abhängiger Fingerabdrücke macht die Blockchain mit jedem neu hinzugefügten Block sicherer: Sowie irgendwo in der Kette der Blöcke ein einziges Bit geändert wird, stimmt nicht nur der Fingerabdruck des betroffenen Blocks nicht mehr, sondern auch die aller folgenden Blöcke.



Glossar

Kryptowährung (cryptocurrency): eine Form der digitalen Währung, deren Eigenschaften durch die Mathematik der Kryptografie garantiert werden. Insbesondere ist festgelegt, wie und wann Einheiten dieser Währung erschaffen werden und wie eine korrekte Verbuchung von Zahlungen gewährleistet wird.

Peer-to-Peer (P2P) Network: »ein Netz von Gleichen«. Die beteiligten Computer kommunizieren direkt miteinander ohne eine Zentrale oder eine kontrollierende Instanz. Ein populäres Beispiel war Napster, ein Netz zum Teilen von Musikdateien, das sich in den späten 1990er Jahren etablierte.

Knoten (node): jeder Computer, der an ein P2P-Netz angeschlossen ist. Das Bitcoinnetz enthält derzeit Tausende von Knoten über die ganze Welt verteilt.

Verteiltes Hauptbuch (distributed ledger): eine Liste von Transaktionen mit Zeitangabe, die auf vielen verschiedenen Computern in einem P2P-Netz verbreitet, synchronisiert und verifiziert wird. Jeder Knoten im Netz hat im Normalfall dieselbe Kopie des Ledgers; daher sind Abweichungen – durch Fehlübermittlung oder auch Fälschung – leicht zu erkennen. Im Konfliktfall wird die Version für gültig erklärt, die auf der Mehrheit der Knoten vorliegt.

Block: eine Zusammenfassung von Transaktionsdatensätzen. Im Bitcoinnetz wird durchschnittlich alle zehn Minuten ein Block gebildet und an die bereits vorhandene Kette aller Blöcke (die »Blockchain«) angefügt.

Hashing: eine mathematische Funktion, die eine beliebige Menge von Daten auf eine Zeichenfolge einer bestimmten festen Länge abbildet. Diese Folge heißt der Hashwert der ursprünglichen Daten. Er hat wesentliche Eigenschaften eines Fingerabdrucks: Er kennzeichnet sein Objekt praktisch eindeutig und unfälschbar. Wenn darin auch nur ein einziges Bit verändert wird, sieht der Hashwert völlig anders aus. Man kann also leicht erkennen, ob die ursprünglichen Daten manipuliert wurden, sie aber aus dem Hashwert nicht rekonstruieren. Insbesondere gibt es zu einem gegebenen Hashwert viele verschiedene Datensätze, die diesen Hashwert haben.

Schürfen (mining): der Prozess, mit dem ein Knoten im Netz in Konkurrenz zu anderen Knoten einen neuen Transaktionsblock zur Blockchain hinzufügt und damit alle Transaktionen dieses Blocks beglaubigt. Dafür wird er mit Einheiten der Kryptowährung belohnt. Es gibt also einen finanziellen Anreiz für den, der die Sicherheit zu gewährleisten hilft. Der schürfende Computer lädt sich zunächst die neuesten zu beglaubigenden Transaktionen der Blockchain herunter. Dann sucht er die Lösung eines aus diesen Daten konstruierten mathematischen Rätsels: Die Daten sind derart durch – eigentlich bedeutungslose – Zusatzdaten anzureichern, dass der Hashwert der angereicherten Daten unterhalb einer vom System festgesetzten Grenze liegt. Das Problem ist so gebaut, dass nur die Anwendung »roher Gewalt« (brute-force attack), sprich das zufallsgesteuerte Durchprobieren aller denkbaren Zusatzdaten, zum Erfolg führt. Der erste Knoten, der die richtige Lösung findet, hat sozusagen durch Verwerfen jeder Menge tauben Gesteins das eine Goldstück gefunden und darf es behalten. Der dadurch beglaubigte Block aus Transaktionen wird der Blockchain hinzugefügt. Die Computer beziehungsweise deren Besitzer rechnen zwar um die Wette, aber es gewinnt nicht der Beste, sondern am wahrscheinlichsten derjenige, der die größte Rechenleistung einsetzt. Das Prinzip wird auch als »proof of work« bezeichnet: Die Lösung des Problems ist an sich vollkommen uninteressant; sie beweist nur, dass die Schürfer einen gewissen Arbeitsaufwand erbracht haben. Die Fälschungssicherheit bezieht das Verfahren aus der Tatsache, dass ein Fälscher noch mehr Arbeit aufwenden müsste als ein ehrlicher Schürfer – und dass dieser Mehraufwand exponentiell zunimmt, je weiter der Block in der Vergangenheit liegt.

► **Technologie-Unternehmen:** Das Ethereum-Netz beschränkt sich nicht auf den Zahlungsverkehr, sondern stellt Blockchains für Anwendungen aller Art zur Verfügung. Hunderte von Projekten und Unternehmen nutzen dies inzwischen. Ein bemerkenswertes Beispiel: »We-Power« möchte es Haushalten ermöglichen, erneuerbare Energie (etwa von den Sonnenkollektoren auf dem Dach) direkt zu kaufen und verkaufen.

► **Urheber:** Die britische Musikerin Imogen Heap gründete das experimentelle Netz »Mycelia« im Rahmen von Ethereum. Die Idee ist, dass jede Nutzung der dort eingestellten Werke in einer Blockchain dokumentiert wird; Zahlungen für die Nutzung sollen über dasselbe Netz erfolgen, was Vermittler wie iTunes entbehrlich machen würde.

► **Gemeinnützige Unternehmen und Hilfswerke:** Die BitGive Foundation hat eine Blockchain eingerichtet, die gespendetes Geld nicht nur ohne Vermittlungskosten an den Empfänger weiterleitet, sondern auch dem Spender Gelegenheit gibt nachzuverfolgen, was mit seinem Geld geschieht. Das Welternährungsprogramm der Vereinten Nationen rechnet die Ausgabe von Lebensmittelgutscheinen an syrische Flüchtlinge in Jordanien über eine Blockchain nach dem Muster von Ethereum ab und spart damit hohe Transfergebühren.

► **Akademische Institutionen:** Das Projekt »Blockcerts« bietet eine Blockchain für Abschlusszeugnisse, Promotionsurkunden und Ähnliches an. Das erspart dem Bewerber die notarielle Beglaubigung und schützt den potenziellen Arbeitgeber vor gefälschten Zeugnissen.

► **Vermögensverwalter:** Die in London ansässige Firma Everledger führt ein Herkunftsregister für Edelsteine, das bereits eine Million Diamanten enthält. Andere Wertgegenstände wie erlesener Wein und Kunstwerke werden ebenfalls erfasst.

► **Journalisten:** Die Plattform »Civill« (<https://joincivil.com/>) bietet eine Gelegenheit, Nachrichten unlöschar und für jedermann zugänglich zu hinterlegen und damit möglicherweise sogar Geld zu verdienen.

► **Normale Menschen:** Für Wanderarbeiter, die Geld an ihre Familien zu Hause schicken, ist Bitcoin günstiger als der Standard-Bargeldtransferdienst Western Union. Geschätzte 20 Prozent der internationalen Überweisungen zwischen Südkorea und den Philippinen werden inzwischen über Bitcoin abgewickelt.

Warum sollten Sie eine Kryptowährung statt einer nationalen Währung verwenden?

Stellen Sie sich vor, Sie hätten einen Hunderteuroschein, mit dem Sie nur Waren im Wert von 50 Euro kaufen können. In Venezuela, wo die Inflation grassiert, ist das ein alltägliches Problem. Da bietet sich Bitcoin als geeignetere Wertaufbewahrungsmittel an.

Aber warum sollte eine schwer verständliche Kryptowährung, die nicht den Rang eines gesetzlichen Zahlungsmittels genießt, dafür besser geeignet sein als zum Beispiel Gold, das jeder kennt und das einen hohen Materialwert hat? Erstens ist es einfacher, für venezolanische Bolivar Bitcoin zu kaufen als Gold – ein Internetzugang

genügt. Zweitens muss man das digitale Gold nicht unter der Matratze oder im Bankschließfach aufbewahren. Der Wert des Bitcoin schwankt zwar heftig; aber während sich der Bolivar im Sinkflug befindet, ist der Bitcoin zumindest tendenziell stark gestiegen. Bei einer für 2018 zu erwartenden Inflation von 2300 Prozent für die Landeswährung, so die Prognose des Internationalen Währungsfonds, scheint das Kursrisiko des Bitcoin tragbar.

Die Einwohner von Simbabwe haben das umgekehrte Problem. Nachdem das Land seine eigene Währung zu Gunsten des US-Dollars aufgegeben hat, herrscht Mangel an Devisen und damit an Geld überhaupt. Bitcoin ist mittlerweile so üblich, dass es sogar von Autohändlern akzeptiert wird.

10 %

des Bruttoinlandsprodukts der Welt wird bis 2025 in Blockchain-Technologie verbucht werden, so eine Prognose des Weltwirtschaftsforums aus dem Jahr 2015.

Woher kommt der Wert einer Kryptowährung?

Nach Aussage einiger Experten aus ihrer Sicherheit und ihrer Knappheit: Die Bitcoin-Blockchain wurde noch nie gehackt, und die Gesamtmenge an Bitcoins ist aus mathematischen Gründen auf etwa 21 Millionen begrenzt. Andere glauben, Bitcoins hätten einen inneren Wert, weil in ihnen die Arbeit des Schürfens (mining) vergegenständlicht sei und diese auch einen Nutzen habe, indem sie das System sicherer mache. Aber was ist mit Kryptowährungen, die nicht geschürft werden? Laut Christian Catalini vom Massachusetts Institute of Technology »beruht der Wert auf dem Konsens. Wir sind uns alle einig, dass es einen Wert hat.« In diesem Sinn hat eine Kryptowährung mehr mit einem sozialen Netz als mit einer Zentralbank gemeinsam. »Geld ist ein Mittel für die Gesellschaft, Soll und Haben nachzuvollziehen«, sagt Catalini. »Wenn Kryptowährungen eine bessere Möglichkeit bieten, mit dieser Information umzugehen«, ist deren Wert gesichert – einerlei, ob sie für einen echten Vermögenswert stehen oder nicht.

Ist Bitcoin nun die Zukunft oder eine Eintagsfliege?

Bitcoin ist die weltweit meistgenutzte digitale Währung. Aber sie ist auch hoch spekulativ: Innerhalb eines Jahres, von Dezember 2016 bis Dezember 2017, ist ihr Wert von unter 1000 auf fast 20000 Dollar gestiegen, um binnen weniger Wochen wieder auf unter 7000 Dollar abzustürzen. Wer weiß, wo der Kurs gerade steht, wenn Sie diesen Artikel lesen. Für einige ist Bitcoin auf Grund seiner technischen Beschränkungen – lange Wartezeit bis zur Bestätigung und erdrückend hohe Schürfkosten – das finanzielle

Äquivalent einer Zeitbombe. »Wir setzen nicht auf Bitcoin«, sagt Charlie Morris, Chief Investment Officer bei Next-Block Global, einer Firma, die in Blockchain-Technologie investiert.

Bitcoin habe das Prinzip einer globalen Kryptowährung etabliert. Aber die Nummer 2, Ether, könne langfristig gegen Bitcoin gewinnen. Ether ist weniger eine bargeldähnliche Währung als vielmehr ein »Vermögenswert in Blockchain«, wie Morris es nennt. Es dient vornehmlich dazu, das Netz Ethereum zu betreiben und zu sichern. So wie die Nutzung von Rechenleistung in der »Cloud« Miete kostet, muss jeder Entwickler, der Anwendungen mit der Blockchain von Ethereum erstellen möchte, für den Zugriff mit Ether bezahlen. Je mehr sich Ethereum als Plattform für Blockchain-Anwendungen allgemein durchsetzt, desto stabiler und wertvoller wird der Ether. Sehr wahrscheinlich werden noch weitere neue Währungen und Plattformen entstehen; das Rennen um die Marktführerschaft hat gerade erst begonnen.

Ist das Ende des Bargelds in Sicht?

Bedrucktes Papier in Form von Zeitungen ist auf dem absteigenden Ast; droht den Banknoten das gleiche Schicksal? Nach Expertenmeinung noch lange nicht. »Dinge wie den internationalen Versand von Seecontainern bezahlen wir immer noch mit großen Papierstapeln«, sagt Vinay Gupta, Chef von Mattereum, einem Rechtsberatungsunternehmen für Smart Contracts. »Das System ist nicht so kaputt, dass die Leute bereit sind, es aufzugeben.« Bitcoin und Ether sind zwar als Rechnungseinheit und als Wertaufbewahrungsmittel gut geeignet; aber an vielen Orten kommen sie als Zahlungsmittel wegen zu geringer Akzeptanz nicht gegen Bargeld an. In Ländern wie Kenia, wo nur wenige Menschen traditionelle Bankkonten haben und »Mobile Money«-Dienste wie M-Pesa das Sparen und Verschicken von Geld per Telefon viel einfacher gemacht haben als das Übergeben von Bargeld, könnten Kryptowährungen als eine natürliche Lösung erscheinen. Aber die Rechenleistung fürs Schürfen ist nicht gerade reichlich verfügbar in Afrika, wo die Leute noch eher mit dem billigen Handy als mit dem Smartphone telefonieren und kaum jemand einen PC besitzt. Doch theoretisch wären die zur Sicherung von Blockchain-Transaktionen erforderlichen Berechnungen auch »auf einer alten Nokia-SIM-Karte« machbar, sagt Gupta.

Ist die Blockchain eine neue Form des Internets?

Nein. Eine Blockchain benötigt das Internet, um ihr Peer-to-Peer-Netz zu betreiben. Es gibt nicht nur eine Blockchain, auch wenn die meisten Leute unter »der« Blockchain das spezifische System verstehen, das Nakamoto für Bitcoin implementiert hat.

Die Bitcoin-Blockchain war das erste verteilte Hauptbuch ohne zentrale Organisation. Es ist immer noch eines der größten: Seit Februar 2018 enthält es mehr als 155 Gigabyte an Informationen und wächst mit jeder neuen Transaktion. Aber das ist immer noch viele Größenordnungen kleiner als die Menge an Daten im Internet, die in der Größenordnung Yottabyte (10^{24} Byte) geschätzt wird.

77 %

der globalen Finanzdienstleistungsbranche werden bis 2020 mit einer Blockchain-Technologie arbeiten, so eine Prognose der Wirtschaftsprüfungsgesellschaft PricewaterhouseCoopers.

Wie wird das digitale Geld hergestellt?

Nur weil Kryptowährungen keine physischen Eigenschaften haben, bedeutet das nicht, dass ihre Nutzung keine Kosten verursacht. Um einen neuen Block in der Blockchain zu beglaubigen, muss das Netz eine ungeheure Anzahl von Berechnungen durchführen. Dieses »Schürfen« ist mit Absicht so aufwändig gestaltet, um das Fälschen noch aufwändiger und damit uninteressant zu machen.

Versuchen Sie daher gar nicht erst, am heimischen PC mitzuschürfen. Das Geschäft wird inzwischen von gigantischen Pools dominiert, von denen die meisten in China stehen. Dass Ihr Rechner als Erster das »Goldkörnchen« findet, ist ungefähr so wahrscheinlich wie ein Sechser im Lotto: 1 zu 8 Millionen. Ein Einzelkämpfer würde auf lange Sicht viel mehr an Energiekosten ausgeben als an Gewinn einstreichen. Sie wollen Mining als Hobby betreiben? Treten Sie einem öffentlichen Mining-Pool bei.

Wie viel Energie verbraucht das Schürfen? Ende 2017 berechnete das Bitcoinnetz ungefähr 10^{19} Hashwerte pro Sekunde. Da verschiedene Computer pro Rechenoperation sehr unterschiedliche Energiemengen in Anspruch nehmen, ist aus dieser Zahl der Stromverbrauch des Bitcoinnetzes nur sehr grob zu bestimmen. Glaubwürdige Schätzungen kommen auf rund 27 Terawattstunden (TWh) pro Jahr – das entspricht dem Verbrauch von ganz Irland (siehe auch »Bitcoin, der Energiefresser«, S. 26). Für den Betrieb des Bitcoinnetzes müsste man pro Jahr 11 Millionen Tonnen Kohle verbrennen und dabei fast 29 Millionen Tonnen Kohlendioxid in die Luft blasen. Oder etwas mehr als die Hälfte der Solarstromkapazität der USA mit Beschlag belegen.

Vitalik Buterin, der 24-jährige Schöpfer von Ethereum, arbeitet derzeit daran, in seinem Netzwerk den Beglaubigungsprozess der Blockchain auf eine Methode namens »proof of stake« umzustellen, die gänzlich ohne Schürfen auskommt. Das größere, dezentrale Netz von Bitcoin wird einen solchen Schritt in absehbarer Zukunft wohl kaum unternehmen. Aber Vinay Gupta, der die Blockchain-Strategie für Dubai entwarf, glaubt, dass dieselbe Geldgier, die bisher die Schürfer veranlasst, Kilowatt in Kryptowährung umzuwandeln, sie auch motivieren wird, einen kreativen Ausweg aus der Energiefalle zu finden. Sobald Kryptowährungen mit dem Proof-of-Stake-Prinzip sich am Markt durchgesetzt haben, wird das Schürfen zu einer belanglosen Episode werden, glaubt Charlie Morris von »NextBlock Global«. »Die Leute werden sagen: Erinnerst du dich noch daran, als wir das alle gemacht haben ... War das nicht lächerlich?«

Sind Blockchains überhaupt legal?

Ja. Aber auf Grund ihrer dezentralen Natur und der Verbindung mit Bitcoins, die auch bei illegalen Transaktionen wie Drogen- und Waffengeschäften verwendet wurden, haben Blockchains einen zweifelhaften Ruf gewonnen, den sie nicht unbedingt verdienen. An sich sind sie wertneutral, ebenso wie Facebook, E-Mail oder jede andere Internet-Technologie.

Wie wird diese Technologie in der Zukunft angewandt?

Wer auf Blockchain-Technologie baut, ist per Definition ein Futurist. Was könnte alles realisiert werden, sobald die Technologie des verteilten Hauptbuchs den Kinderschuhen entwachsen ist?

► **Selbstfahrende Autos:** Während Sie arbeiten oder schlafen, transportiert Ihr Auto andere Leute, ohne die Vermittlung von Dienstleistern wie Uber. In einer Blockchain dokumentierte »intelligente Mietverträge« (smart contracts) würden die wesentlichen Funktionen erfüllen und absichern: Mieter und Vermieter zusammenzubringen und die Zahlung abzuwickeln.

► **Die digitale Krankenakte:** Was bei Bitcoin mit Geld funktioniert – geschäftlicher Austausch ohne gegenseitiges Vertrauen –, ist auch mit medizinischen Informationen machbar. Auf diese Weise hätte der Patient die Bestimmungsgewalt über seine eigenen Daten, sagt Brian Behlendorf, Geschäftsführer des Projekts »Hyperledger«, das von der Linux Foundation ins Leben gerufen wurde. Der Patient würde eine »Gesundheitsbriefertasche« erhalten, in der seine ganze Krankengeschichte enthalten ist. Jeder Zugriff eines Arztes auf einen dieser Befunde würde der Zustimmung des Patienten bedürfen. »Sie erhalten einen Nachweis darüber, mit wem Sie ihre Daten geteilt haben, und die Option, diese nach Abschluss der Behandlung zu löschen«, so Behlendorf.

► **Ein globaler Supercomputer:** Eine Anbindung an ein Peer-to-Peer-Netz und eine Blockchain – das ist alles, was ein Mensch braucht, um seinen Laptop und sein Smartphone in einen weltweiten, dezentralisierten Supercomputer einzubringen. Während Sie schlafen, mieten beispielsweise Wissenschaftler Ihre Geräte, um Modellrechnungen durchzuführen; die Nutzung wird vollautomatisch abgerechnet. In einem Projekt namens Golem wird bereits daran gearbeitet. »Alle leerlaufenden Laptops zusammen bieten weit mehr Rechenleistung als die großen Datenzentren«, argumentiert Gupta. »Künstliche Intelligenz, Klimamodellierung – all diese Dinge könnten tausendfach beschleunigt werden.«

71 %

der Bitcoins werden in China geschürft; es folgt Indien mit 4 Prozent.

Was sind die Grenzen und Gefahren von Blockchain?

»Was in der Blockchain abgelegt ist, kann hinterher praktisch nicht mehr verändert werden«, sagt Emin Gün Sirer von der Cornell University. »Aber das heißt nicht, dass jeder Inhalt einer Blockchain wahr oder wünschenswert ist. Wenn jemand in meinen Computer eindringt, meine Kryptomünzen stiehlt und sie ausgibt, würde ich diese Transaktion gern widerrufen – kann ich aber nicht. An diesem Punkt wird Unveränderlichkeit zu einer Belastung.«

Daten in einer Blockchain kann man zwar nicht fälschen, aber mühelos ausspähen. Öffentliche Blockchains wie Ethereum und Bitcoin verschlüsseln von sich aus gar nichts. Brian Behlendorf geht noch einen Schritt weiter: »Schreiben Sie niemals persönliche oder sensible Daten in ein Ledger, nicht einmal in verschlüsselter Form, denn was wir heute kodieren, werden wir in etwa 40 bis 50 Jahren mit großer Sicherheit entschlüsseln können.« Einige Befürworter sprechen von Blockchain als einem Allheilmittel für jedes soziale Problem, das mit Vertrauen zusammenhängt, aber das ist blinder Optimismus.

Wie sicher und vertrauenswürdig sind Kryptowährungen?

Weil sie letztlich nichts anderes als Software sind, beruht ihre Vertrauenswürdigkeit auf ihrem offengelegten Quellcode, sagt MIT-Forscher Catalini. Jeder kann eine Kryptomünze erschaffen, die ersten Blocks selbst schürfen und die so erworbenen Coins für gewöhnliches Geld feilbieten. Durch eine solche »initial coin offering« findet allerlei Geld seinen Weg – nach einem Bericht der Website »Market-Watch« im Jahr 2017 schon mehr als über die etablierten Risikokapitalplattformen. Es ist jedoch kein Zufall, dass die beiden größten Kryptowährungen, Bitcoin und Ether, von begabten Programmierern entwickelt wurden.

Aber auch große Programmierkunst schützt vor Schaden nicht. Die »decentralized autonomous organization« (DAO), eine Plattform für Risikokapitalgeber und -empfänger, die auf Ethereum läuft, hatte eine »Macke«, wie Catalini es freundlich formuliert, mit der Folge, dass 2016 Hacker Ether im Wert von damals 50 Millionen Dollar, ein Drittel des Gesamtkapitals, auf ihr Konto umlenken konnten. Daraufhin entschloss sich eine Mehrheit der an Ethereum Beteiligten, die Blockchain nicht mit dem aktuellen Block, sondern mit dem letzten Block vor dem Hack fortzusetzen mit der Folge, dass die Geschädigten ihr Geld wiederbekamen. Diese Aktion wurde als Verstoß gegen die Grundprinzipien der Blockchain heftig kritisiert.

Wie wird ein dezentralisiertes System geregelt?

Angesichts des Wildwestrufs der dezentralisierten digitalen Währungen könnte man vermuten, dass sie geschaffen wurden, um die Bankenaufsicht und andere Kontrollmechanismen zu unterlaufen. Aber das ist nicht ganz richtig. So steckt Bitcoin voller Vorschriften; aber es sind nicht Regierungen oder Zentralbanken, die sie aufstellen und durchsetzen, sondern der Quellcode zusammen mit der kollektiven Aktivität des Peer-to-Peer-Netzes. »Die ganze Innovation von Bitcoin besteht darin, die Regieraufsicht über die Protokollführung zu vermeiden«,

erklärt Patrick Murck, ein Anwalt, der am Berkman Klein Center for Internet and Society der Harvard University über Blockchain-Politik und -Regulierung forscht.

Der erklärte Zweck von Ethereum – eine Grundlage für autonome intelligente Verträge (smart contracts) zu bieten – ist im Wesentlichen regulierend. Eine Blockchain ist im Grunde nichts als ein durch Mathematik bewehrtes Regelwerk, das bestimmt, was man mit den Datensätzen in einer Datenbank tun kann und was nicht.

62 %

der Amerikaner glauben, Kryptowährungen würden für illegale Geschäfte verwendet, oder wissen gar nicht, wofür sie benutzt werden.

Umfrage des britischen Meinungsforschungsinstituts YouGov, 2017

59 %

der weltweit Befragten hatten noch nie von der Blockchain-Technologie gehört;

80 %

derer, die davon gehört haben, verstehen sie trotzdem nicht.

Umfrage der englischen Großbank Hongkong & Shanghai Banking Corporation Holdings PLC, 2017

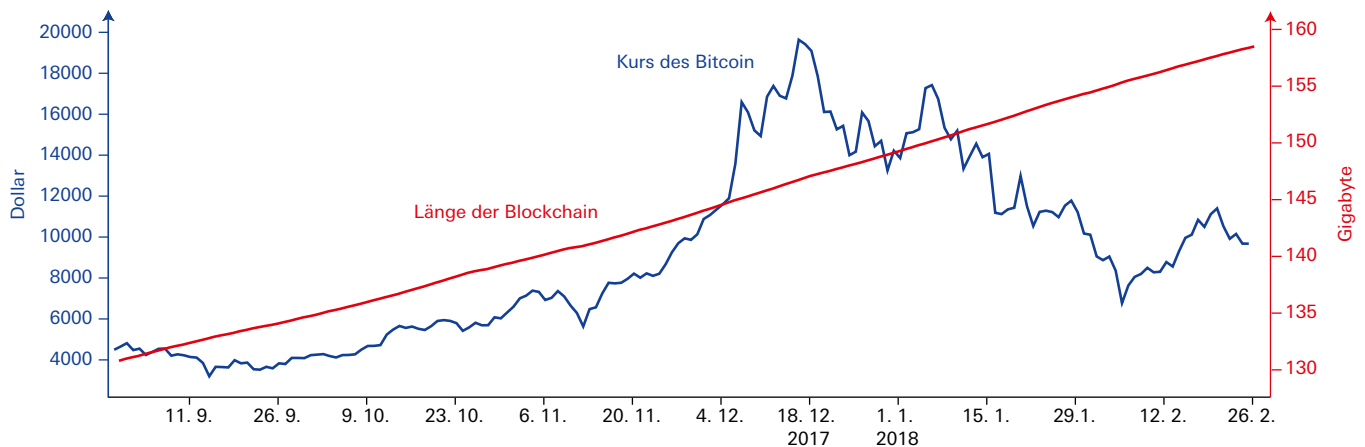
39 %

der leitenden Angestellten großer US-Unternehmen wissen nach eigenen Angaben wenig oder gar nichts über die Blockchain-Technologie.

Umfrage des Beratungsunternehmens Deloitte, 2017

Bei jeder Kontrolle des Finanzwesens, einerlei ob dezentral oder nicht, kommt es immer darauf an, wer kontrolliert und wie. »In einem dezentralen System gibt es keinen Angriffspunkt für eine Kontrolle, aber wo immer Dritte sich als neue Vermittlungsinstanz etablieren, folgt die Regulierung auf dem Fuß«, meint Murck. Im Jahr 2013 verbot China die Nutzung von Kryptowährungen innerhalb seines Bankensystems, und im September 2017 wurden alle Bitcoin-Handelsplätze des Landes geschlossen. Die USA und Japan überwachen inzwischen Kryptowährungsbörsen und »initial coin offerings« genauso intensiv wie den Aktienhandel und das Investmentbanking.

Eine der Anwendungen der Blockchain-Technologie ist die Sicherung von Identitätsdaten. Laut Charlie Morris



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH:
 BLOCKCHAIN.INFO/CHARTS/MARKET-PRICE-TIME-SINCE-BIDDING-UND-
 BLOCKCHAIN.INFO/CHARTS/BLOCK-SIZE-TIME-SINCE-BIDDING

Zwischen September 2017 und März 2018 schwankte der Wechselkurs des Bitcoin heftig; die Blockchain wurde derweil sehr gleichmäßig länger.

könnten neue Kryptowährungen entstehen, deren Konten an die Person des Inhabers gebunden sind. Sie würden nicht die Anonymität von Bitcoin bieten – Morris schätzt die Anzahl der Leute, die auf ihre Bitcoinerträge ehrlich Steuern zahlen, auf wenige hundert. Aber wenn digitales Geld üblich wird, könnte wegen der höheren wahrgenommenen Sicherheit und Stabilität eine Kontrolle erträglich werden – oder sogar wünschenswert. Murck führt aus: »Wenn ich Ihnen meinen Besitz anvertraue, damit Sie ihn für mich verwalten und mit ihm handeln, dann will ich, dass Sie kontrolliert werden, und zwar egal, ob es sich um Grundbesitz, Bitcoins oder Kuscheltiere handelt.«

Können Blockchains versagen?

Bis heute wurde die Bitcoin-Blockchain – die weltweit erste, größte und verbreitetste – noch nie kompromittiert oder gehackt. Aber eine Blockchain ist nicht per definitionem unverwundbar. »Es gibt keine perfekte Technologie«, sagt Gün Sirer von Cornell. Die folgenden drei Lücken in der Rüstung machen eine Blockchain angreifbar:

► **Ein 51-Prozent-Angriff:** Kryptowährungsnetze, die auf Blockchain basieren, verlassen sich zur Wahrung ihrer Sicherheit auf zwei scheinbar unbegrenzte Ressourcen: die Schnelligkeit und die Gier der Schürfer. Aber theoretisch ist es möglich, beide zu überwinden. Um den Konsensmechanismus der Blockchain zu unterlaufen, müssten Hacker die Kontrolle über die Mehrheit der Knoten im Netz erlangen. Dann könnten sie bestimmen, welche Blöcke der Kette hinzugefügt werden, und dadurch zum Beispiel Transaktionen rückgängig machen und dasselbe Geld zweimal ausgeben. Oder sie könnten verhindern, dass die Transaktionen anderer Personen bestätigt werden. Das Peer-to-Peer-Netz von Bitcoin mit Tausenden von Knoten weltweit wird wohl kaum einem solchen Angriff zum Opfer fallen. Aber kleinere Netze sind gefährdet: Die Alternativwährung Krypton wurde 2016 von einer Gruppe namens »51 Crew« auf diese Weise attackiert. Sogar Blockchains, die kein Mining verwenden, sind anfällig, weil sie immer noch auf der »Annahme beruhen, dass die Mehrheit der Knoten in ihrem Netzwerk gutartig ist«, warnt Gün Sirer.

► **Das gute alte menschliche Versagen:** Selbst wenn eine Energie, die Berge versetzen könnte, eine Blockchain nicht verfälschen kann, bleibt alles, was mit ihr verbunden ist, so verwundbar wie zuvor. Mt. Gox, ehemals einer der größten Online-Wechselstuben für Bitcoins, verlor infolge von Missmanagement und fehlerhaftem Code 850 000 Bitcoins im Wert von damals 620 Millionen Dollar und musste daraufhin Insolvenz anmelden.

Wenn Sie eine digitale Brieftasche voller Kryptowährung haben und das Passwort verlieren, ist dieses Geld mit ziemlicher Sicherheit verschwunden. Es liegt durchaus Ironie in der Tatsache, dass einige Nutzer von Kryptowährungen ihre Passwörter oder sogar das digitale Geld selbst, gespeichert auf einem USB-Laufwerk, in ihrem Bankschließfach deponieren oder an einem anderen gesicherten Ort, der keine Verbindung zum Internet hat – eine Praxis, für die sich die Bezeichnung »cold storage« etabliert hat.

► **Die übergewichtige Blockchain (Blockchain Bloat):** Dies ist weniger eine Schwachstelle als eine Folge des regelgerechten Funktionierens. Da jeder neue Block im Wesentlichen jeden seiner Vorgänger beglaubigt, muss jeder Knoten, der die Gültigkeit einer neuen Transaktion überprüft, eine Kopie der gesamten Kette besitzen. Mit einer Größe von knapp 160 Gigabyte (im Februar 2018) wird die Bitcoin-Blockchain bereits unhandlich (Bild oben). Die Blockchain von Ethereum ist noch wesentlich größer, weil jeder Eintrag wegen der zusätzlichen Möglichkeiten, die Ethereum bietet, umfangreicher ist.

Wenn jedermann Bitcoin nutzen würde, wären dann nur noch die größten Supercomputer in der Lage, die anwachsende Datenlast zu handhaben? Das wäre eine Ironie besonderer Art. Weil ein Netz so erfolgreich ist, verliert es seine Dezentralität und damit einen Grundpfeiler seiner Existenz. ◀

QUELLE

Tapscott, D., Tapscott, A.: Die Blockchain-Revolution. Wie die Technologie hinter Bitcoin nicht nur das Finanzsystem, sondern die ganze Welt verändert. Plassen, Kulmbach 2016

FINANZWIRTSCHAFT AUSWEG AUS DEM BANKENMONOPOL

TITELTHEMA Weltweiter Handel kann stattfinden, ohne dass Banken als Vermittler auftreten und dabei reich und gefährlich mächtig werden. Aber die neuen Alternativen bedürfen sorgfältiger Planung. Bitcoin ist dabei nur ein erster, unvollkommener Schritt.



Alexander Lipton (links) ist Gründer und Geschäftsführer des privaten Forschungsinstituts StrongHold Bank Labs sowie einer der Gründer der Forschungsinitiative »Connection Science« am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Er arbeitete in leitenden Positionen für die Bank of America und unterhielt Gastprofessuren an der University of Oxford und dem Imperial College London. Im Jahr 2000 war er erster Preisträger des Quant of the Year Award. **Alex »Sandy« Pentland** arbeitet als Professor am MIT, ist einer der meistzitierten Autoren im Fachgebiet Computerwissenschaft und Mitglied der U.S. National Academies.

» spektrum.de/artikel/1547031

► Irgendwann vor mehr als 5000 Jahren hatte ein ortsfremder Kaufmann in der mesopotamischen Stadt Ur seine Waren gegen eine erkleckliche Menge Silber eingetauscht. Dieses wollte er nicht mit nach Hause schleppen, denn gegen Ende der Erntesaison würde er wieder zurück in Ur sein, um Weizen zu kaufen. Also begab er sich zum örtlichen Tempel, wo regelmäßig Wertgegenstände gelagert wurden, und bat den Priester, das Silber für ihn aufzubewahren.

Kurz darauf bat der Neffe des Priesters diesen um ein Darlehen. Der junge Mann wollte Saatgut kaufen und später Getreide ernten, ein Anliegen, das sein Onkel von Herzen befürwortete. Der Priester vertraute ihm etwas von dem bei ihm gelagerten Silber an. Wenn sein Neffe das Geliehene nicht beizeiten zurückgeben könnte, würde er selbst die Schulden aus seinem persönlichen Vermögen bezahlen oder sich das Nötige von Freunden leihen.

Indem der Priester eine langfristige Vereinbarung mit dem Kaufmann für einen kurzlaufenden Kredit an seinen Neffen einsetzte, nutzte er dasselbe Geld zweimal. Dadurch verdoppelte der Priester die Zahl der Transaktionen und erfand damit das klassische Bankgeschäft. Archäologische Funde belegen, dass sich Derartiges in Mesopotamien abgespielt hat.

Die Handlungen des Priesters und seiner zahlreichen Nachfolger hatten einen enormen Einfluss auf das Wirtschaftsgeschehen. Erstens wuchs die Gesamtproduktivität, da der Neffe sich nun das Saatgut leisten und Werte schaffen konnte. Zweitens gehörte nun das Risiko zum System: Vielleicht würde der Neffe das Geld nicht fristgerecht zurückzahlen können.

Einige Jahrtausende später, im 17. Jahrhundert, kamen in Europa von der Obrigkeit gestützte Zentralbanken auf, und der Staat verknüpfte die erwähnte Geldvermehrung mit dem Steuersystem: Der König borgte sich das Geld für Kriege oder den Bau von Kanälen von Kaufleuten und bezahlte damit Waffenhersteller, Lieferanten und Truppen. Das Geld begann zu zirkulieren, löste wirtschaftliche

AUF EINEN BLICK NEUE WEGE FÜRS GELD

- 1 Das heutige Finanzsystem ist gefährlich komplex. Mehr Transparenz würde die Risiken vermindern; dazu müssten aber die Geldflüsse viel detaillierter erfasst werden, als es derzeit technisch machbar ist.
- 2 Die Technik des »verteilten Hauptbuchs«, die den Digitalwährungen zu Grunde liegt, ermöglicht eine solche Aufsicht unter Wahrung der Vertraulichkeit.
- 3 Sie eröffnet neue Möglichkeiten wie auch Gefahren. Um nicht einer extremen zentralen Kontrolle Tür und Tor zu öffnen, müssen digitale Finanznetze gut konzipiert sein und verantwortungsvoll genutzt werden.

Aktivitäten aller Art aus, die ihren Urhebern Gewinne einbrachten, und mit jeder Kreditvergabe verdoppelte sich die Geldmenge. Am Ende beglich der König die Kredite, indem er Steuern auf die Gewinne erhob.

Ungefähr so funktioniert im Wesentlichen auch unser heutiges Bankensystem. Im einfachsten Fall leihen sich Firmen Geld bei privaten Banken, um die Löhne der Arbeiter und andere Ausgaben zu bezahlen. An diesem Punkt wird Geld geschaffen. In der Folge erwerben die Konsumenten Güter von den Firmen oder zahlen Teile ihres Lohns auf Sparkonten ein. Im letzten Schritt zahlen die Firmen ihre Schulden bei den Banken mit dem eingenommenen Geld zurück, und der Kreislauf ist geschlossen. Das durch die Kreditvergabe geschaffene Geld ist mit dessen Rückzahlung verschwunden, aber die Zinsen – genauer: der durch die wirtschaftliche Aktivität geschaffene Mehrwert – verbleiben im System. So können Geschäftsbanken eine Wirtschaft ankurbeln, indem sie Geld aus dem Nichts machen. Das Ausmaß dieser Zauberei wird begrenzt durch die Zentralbanken, die vorschreiben, dass eine Bank nicht ihr ganzes – anvertrautes oder selbst geschaffenes – Geld verleihen darf, sondern einen gewissen Prozentsatz davon bei der Zentralbank hinterlegen muss.

Wenn es doch nur so einfach wäre. Leider erzeugt der Kreislauf des Geldes einige fundamentale gesellschaftliche Probleme. Zum einen leistet er der Ungleichheit Vorschub. Unausweichlich landet ein Großteil des insgesamt vorhandenen Vermögens in den Händen einiger weniger Milliardenäre. Außerdem verstehen nur zu oft die Gelderschaffer die Risiken ihres Tuns nicht richtig oder ignorieren es sogar. Dann folgen Finanzkrisen wie jene im Jahr 2008: Banker und Politiker schürten eine unersättliche Nachfrage nach Hypothekenkrediten, wodurch die Geldmenge beträchtlich anwuchs – und noch beträchtlicher die Risiken.

Es bietet sich an, den Geldkreislauf an sich für diese Probleme verantwortlich zu machen; doch dies ist zu kurz gedacht. Geldschöpfung funktioniert durchaus, solange wir deren Risiken verstehen und beherrschen – und zugleich eine übermäßige Konzentration des Reichtums verhindern. Mittlerweile ist jedoch das Gesamtsystem durch eine Vielzahl von Faktoren, darunter Bevölkerungswachstum, Globalisierung und Computerhandel, so kompliziert und unübersichtlich geworden, dass es sich dem Verständnis entzieht, und einer gezielten Steuerung erst recht.

Schlimmer noch: Das bestehende Regelwerk zur Steuerung der Makroökonomie beruht auf veralteten Annahmen. So setzen die mathematischen Modelle, mit deren Hilfe die Zentralbanken die Geldschöpfung und das Zinsniveau regulieren, die Banken immer noch als einfache Zwischenhändler in die Gleichungen ein und ignorieren damit, dass diese inzwischen zu großen, mächtigen Akteuren geworden sind, die intensiv Eigeninteressen verfolgen. Allein das macht das ganze System in hohem Maß undurchschaubar. Kein Wunder, dass die Finanzkrise von 2008 die Experten überraschte.

Wenn wir den gegenwärtigen, extrem komplexen Geldkreislauf wirklich verstehen wollen, müssen wir ihn so detailliert modellieren wie nie zuvor. Dem standen bisher technische Grenzen entgegen, aber das ändert sich endlich

in Zeiten von Big Data und mit dem Aufkommen digitaler Währungen und Verträge. Um einzuschätzen, was in einer gegebenen wirtschaftlichen Situation geschehen wird, müssen wir nicht mehr vergleichbare Ereignisse aus der Vergangenheit heranziehen, die es vielleicht gar nicht gibt. Vielmehr werden wir in der Lage sein, sämtliche einzelnen Geschäfte und Transaktionen zusammen zu modellieren und ihre Auswirkungen zu analysieren. Bereits die Aussicht auf diese Möglichkeit droht die Finanzindustrie zu erschüttern: Sowohl ihre Funktionsweise als auch ihre Ideologie stehen auf dem Spiel.

Der Aufstieg der digitalen Währungen

Die neuen Technologien, die unser Finanzsystem umkrempeln könnten, sind erst in den letzten zehn Jahren explosionsartig herangewachsen. Bitcoin ist in aller Munde; aber viel wichtiger ist die Erfindung, die dahinter steht: das verteilte Hauptbuch (distributed ledger). Traditionell ist das Hauptbuch ein Verzeichnis, in dem eine Firma alle ihre Transaktionen dokumentiert. Ein verteiltes Hauptbuch ist nicht ein physisches Objekt, das der Aufsicht eines Chefbuchhalters untersteht, sondern eine Datenbank, auf die verschiedene Teilnehmer Zugriff haben – zum Lesen wie auch zum Schreiben.

Eine kurze Geschichte des Geldes

7. Jahrhundert v. Chr.: Lydier und Griechen führen Münzen mit festgelegtem Wert ein.

14. Jahrhundert: Kaufmannsfamilien wie die Medici engagieren sich in internationalen Finanzgeschäften, Handel und Produktion.

17. Jahrhundert: Indem Banken eingezahltes Geld verleihen, erhöhen sie die wirtschaftliche Produktivität. Gleichzeitig schaffen sie neue Risikoquellen, was regelmäßig zu lokalen oder sogar überregionalen Zusammenbrüchen des Wirtschaftslebens führt. Es entstehen staatliche Zentralbanken, die das Bank- mit dem Steuerwesen verbinden.

18. Jahrhundert: Aus früheren Verfahrensweisen, bei denen zirkulierendes Geld durch eine Reserve von Edelmetallen abgesichert wurde, entwickelt sich der Goldstandard. Damit sinkt das Risiko.

20. Jahrhundert: Der Goldstandard wird durch die Basler Vereinbarungen ersetzt, die besagen, dass das Halten leicht veräußerlicher Vermögenswerte dem Halten von Gold gleichwertig ist.

Kryptowährungen, das heißt digital verschlüsselte Währungen wie Bitcoin, werden durch diese Technik erst ermöglicht. Ihr verteiltes Hauptbuch ist eine Blockchain, eine Kette verschlüsselter Datensätze (»Blöcke«). Jeder Block hängt an seinem Vorgänger in der Kette. Damit das Hauptbuch vertrauenswürdig und sicher ist, muss jeder neue Block »beglaubigt« werden. Dafür gibt es eine Reihe von Mechanismen, an denen sowohl andere Menschen als auch Computer beteiligt sind.

Im Prinzip sind Blockchains nicht neu. Der Notar, der einen Grundstückskauf beurkundet, nimmt Bezug auf ein Dokument, das dem Verkäufer seinen bisherigen Besitz bescheinigt, und fügt der Kette derartiger Dokumente ein neues Glied hinzu. Dieses bezieht seine Gültigkeit aus der Verknüpfung mit dem Vorgängerdokument. Neu ist die Übertragung des Konzepts auf ein manipulationssicheres Computersystem. Das findet vielfältige praktische Anwendungen, darunter digitale Währungen, die ihren Zweck weitaus besser erfüllen als klassische Währungen wie der US-Dollar oder der Euro – und besser als selbst Bitcoin.

Quasi als Nebeneffekt hätten wir damit ein Mittel an der Hand, den Kreislauf des Geldes auf dem Niveau jeder einzelnen Zahlung zu beobachten und zu analysieren. Aus den Billionen von Transaktionen, die das Hauptbuch verzeichnet, könnten wir Frühwarnsignale herleiten und dementsprechend handeln, was der Stabilität und der Sicherheit des Systems aufhelfen würde. Davon würden nicht nur die großen Teilnehmer profitieren, sondern auch die kleinen, was bisher aus rein praktischen Gründen nicht möglich ist: Nach dem Zusammenbruch des amerikanischen Immobilienmarktes 2008 hätte es nicht entfernt genug Personal gegeben, um Millionen geschädigter Hausbesitzer aus der Klemme zu helfen. Infolgedessen konzentrierten sich die Aufsichtsbehörden darauf, die wenigen Großbanken zu retten, während die Einzelpersonen am meisten zu leiden hatten.

Bei der nach wie vor rasanten technischen Entwicklung und der wachsenden Anzahl neuer Anwendungen ist es schwer, den Überblick zu behalten. Bitcoin ist derzeit die bekannteste (manche sagen auch berüchtigtste) Form der digitalen Währung; daher lohnt es sich, ihre Ursprünge und Schwächen zu untersuchen und alternative Ansätze vorzustellen.

Bitcoin wurde als digitales Bezahlsystem unter Gleichen (peer to peer) konzipiert, das ohne eine zentrale Autorität auskommt. Jeder kann mitmachen – was sowohl Stärke als auch Schwäche ist. Geldbeträge wandern unmittelbar, ohne jeden Vermittler, vom Zahler zum Empfänger. Sie werden in einem öffentlich verteilten Blockchain-Hauptbuch aufgezeichnet, so dass (theoretisch) alle Teilnehmer sie sehen können. Seit der Einführung von Bitcoin im Jahr 2009 ist der Wechselkurs um mehrere Größenordnungen gestiegen – und ein Stück wieder gefallen –, was diese Währung zum Liebling der Spekulanten macht.

Die Versprechungen hinter Bitcoin sind groß. Die Befürworter sind überwiegend technisch versierte Idealisten und Verfechter der persönlichen Freiheit, aber es gibt auch Menschen mit kriminellen Motiven unter ihnen. Sie alle gehen davon aus, dass Bitcoin zu einem globalen Zah-

lungsmittel avancieren und langfristig die nationalen Währungen verdrängen wird, denen sie den Makel der Manipulierbarkeit zuschreiben. Viele Begeisterte sehen in der Kryptowährung sogar die digitale Version von Gold – und übersehen dabei, dass das Edelmetall seine Preisstabilität sowohl seinen physikalischen Eigenschaften als auch den Milliarden potenziell Interessierter verdankt. So haltbar sind digitale Technologien nicht; vielmehr werden sie regelmäßig von besseren verdrängt.

Eine innovative Idee mit schwer wiegenden Schwächen

Bitcoin ist nicht die erste digitale Währung und wird schwerlich die letzte sein; denn sie leidet unter schweren Einschränkungen. So kann das System weltweit nicht mehr als ungefähr sieben Zahlungen pro Sekunde verarbeiten; bei Visa etwa sind es durchschnittlich 2000. Außerdem verbraucht es Unmengen von elektrischer Energie für das »Schürfen« (mining), den Prozess, bei dem verschiedene Rechner neue Währungseinheiten erzeugen und zugleich der Blockchain ein neues Glied hinzufügen. In Ländern mit hohen Energiepreisen kostet allein der Strom fürs Rechnen mehr, als der damit geschürfte Bitcoin einbringt. Genaue Zahlen sind nicht bekannt, aber vermutlich verbraucht Bitcoin so viel Strom wie E-Bay, Facebook und Google zusammen (siehe »Bitcoin, der Energiefresser«, S. 26). Eigentlich sollte durch Verteilung auf viele unabhängige Schürfer die Macht dezentralisiert werden; nur haben sich inzwischen einige wenige Gruppen zu gigantischen Schürferkartellen zusammengetan. Zusammen sind sie bereits jetzt mächtig genug, um das System zu kontrollieren, was das Prinzip »peer to peer« ad absurdum führt.

Auch die Verwendungsmöglichkeiten der Kryptowährung sind begrenzt. Geld ist im modernen Verständnis dreierlei: Zahlungsmittel, Wertaufbewahrungsmittel und Rechnungseinheit. Die erste Verwendung leidet darunter, dass der Wechselkurs des Bitcoin gegenüber den klassischen gesetzlichen Zahlungsmitteln extrem instabil ist. Zweitens sind Bitcoin und Ether, eine andere wichtige digitale Währung, kein »echtes« Geld in dem Sinn, dass sie durch Vermögenswerte oder wenigstens staatliche Garantien gedeckt wären. Vielmehr sind sie rein spekulativ; und was keinen inneren Wert hat, kann jeden Preis haben. Einige Fürsprecher interpretieren diese »Wertfreiheit« als Tugend und behaupten, dass in Zukunft alles Geld nach dem Muster von Bitcoin gestrickt sein werde. Dies ist höchst unwahrscheinlich, aus technischen wie politischen Gründen.

Gleichwohl ist Bitcoin die erste erfolgreiche dezentralisierte digitale Währung, was einen beeindruckenden Durchbruch auf mehreren Ebenen darstellt: Die Philosophie eines unregulierten Peer-to-Peer-Finanzsystems ist absolut innovativ; darüber hinaus bietet Bitcoin praktikable Lösungen für einige wichtige Probleme. Noch revolutionärer ist die dahinter stehende Technologie, das verteilte Hauptbuch in Form einer Blockchain, für die Bitcoin nur eine von mehreren Anwendungen ist.

Hier sind Mittel und Zweck – was immer die Verfechter einer digitalen Währung sich von ihr versprechen – sorgsam auseinanderzuhalten. Bitcoin gibt neue Antworten auf

die Machtfrage, mit dem Potenzial, einige Probleme unseres Finanzsystems zu lösen – oder zu verschärfen.

Ein entscheidendes Element der Machtausübung ist die Kontrolle über das Geld, vorhandenes wie zukünftiges. Mit der Macht kommt die Versuchung zu deren Missbrauch und mit der Sicherheit der Anreiz, höhere Risiken einzugehen. Nehmen wir als Beispiel Zentralbanken wie die amerikanische Federal Reserve Bank oder auch die Europäische Zentralbank. Hartnäckig hält sich die Vorstellung »Je größer, desto unerschütterlicher« – so weit richtig – »und desto vertrauenswürdiger«. Letzteres haben die Institutionen selbst durch ihr Verhalten widerlegt. Nur zu häufig haben sie sich dafür entschieden, sich mittels Inflation die eigenen Lasten vom Hals zu schaffen, auf Kosten der kleinen Leute. Neuerdings versuchen sie negative Zinssätze durchzusetzen und denken über die Abschaffung des Bargelds nach.

Noch alarmierender: Einige Zentralbanken erwägen, den gesamten Geldverkehr digital zu machen. Damit würde jede Zahlung unmittelbar in einem gigantischen Hauptbuch erfasst, unter Umgehung der privaten Banken, und die Regierungen würden von allen Käufen Kenntnis erhalten, auch von denen, die wir heute mit Bedacht bar bezahlen.

Ein solches Vorhaben scheint allmählich machbar, und Länder wie China, Großbritannien, Singapur und Schweden haben Pläne angekündigt, entsprechende Strategien zu testen und möglicherweise umzusetzen. Wir haben es hier mit der paradoxen Situation zu tun, dass eine von der Anlage her dezentrale Technologie zu einer beispiellosen Zentralisierung der Macht genutzt wird.

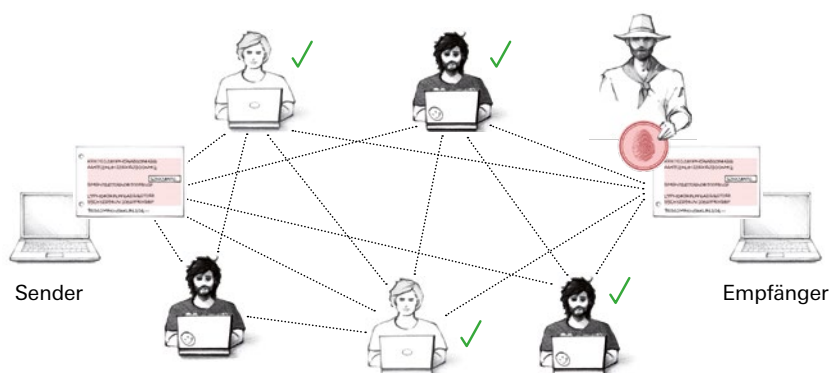
Auf dem Weg zu einem stabileren Finanzsystem

Die Erfindung von Blockchain und verteilten Hauptbüchern wird Probleme wie Finanzkrisen und galoppierende Inflation nicht beseitigen – zumindest nicht kurzfristig. Aber sie schafft seriöse Alternativen zu den mächtigen Finanzakteuren. Es ist nun möglich, spezialisierte globale Währungssysteme zu bilden, die bisher aus Mangel an Größe, Vertrauenswürdigkeit und politischer Stabilität niemals mit den etablierten Währungen hätten konkurrieren können. Deshalb ist es ein natürlicher nächster Schritt für die kleinen Mitspieler – wie Schwellenländer oder große Gruppen einzelner Menschen –, sich zusammenzuschließen, um Alternativen zu den Zentralbanken zu schaffen.

Zwei Kryptowährungen im Vergleich

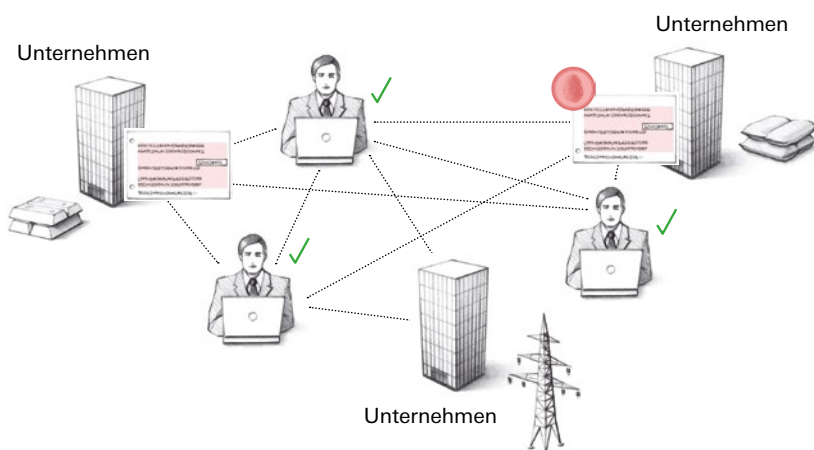
Bitcoin

Transaktionen finden unmittelbar zwischen den Beteiligten statt. Sie werden im gesamten Netzwerk veröffentlicht und in einer Blockchain aufgezeichnet. Durch zufällige Stichproben wird sichergestellt, dass alle vorhandenen Kopien einer Blockchain identisch sind. Bitcoin hat keinen realen Gegenwert, daher ist sein Preis inhärent instabil.



TradeCoin

Wie bei Bitcoin laufen Transaktionen direkt zwischen Benutzern ab und werden öffentlich in einer Blockchain aufgezeichnet. Aber der Konsens wird durch vorher festgelegte Validatoren aufrechterhalten. Der Wert von TradeCoin wird durch von Geldgebern bereitgestellte Sachwerte gestützt, so dass der Preis relativ stabil ist.



MARTIN MÜLLER

Mit diesen Ideen als Fernziel arbeitet unsere »Digital Currency Initiative« am MIT an der Schaffung einer digitalen Währung für den Zahlungsverkehr in großem Maßstab. Sie heißt »Tradecoin« in Anspielung an die »trade coins«, Handelsmünzen, die vor allem im 18. und 19. Jahrhundert weit über ihr eigentliches Ausgabegebiet hinaus im Umlauf waren. Das berühmteste Beispiel ist der österreichische Maria-Theresien-Taler, dessen Reputation auf seinem Goldgehalt beruhte. Wie Bitcoin wird auch Tradecoin in einer Blockchain abgelegt; anders als jener ist er zu jeder Zeit an einen Warenkorb aus Getreide, Energieträgern und anderen Rohstoffen gekoppelt, um den Preis zu stabilisieren und das Vertrauen der Öffentlichkeit zu gewinnen. Der Kerngedanke dahinter ist, dass eine allgemein nützliche Währung sowohl menschliches Vertrauen als auch effiziente Handelssysteme benötigt.

Der Goldtaler der Habsburger in neuem Gewand

Mit Hilfe eines digitalen Tradecoins könnten sich kleinere Nationen, Hersteller, Handelsunternehmen, Kreditgenossenschaften oder auch einfach Landwirte zusammenschließen. Damit kämen genügend Vermögenswerte zusammen, um eine große, liquide Währung auf die Beine zu stellen, die ebenso vertrauenswürdig und mindestens so effizient ist wie die Leitwährungen, mit denen die Weltbank und der Internationale Währungsfonds arbeiten. Die Mitglieder der Tradecoin-Allianz würden einen gewissen Schutz vor der selbstsüchtigen Politik großer Finanzakteure genießen. Die kryptografische Struktur macht internationale Handelsgeschäfte für sie viel einfacher, sicherer und billiger. Es ist sogar hilfreich, wenn die Mitglieder der Allianz geografisch, politisch und kulturell sehr verschieden sind; denn dann würde eine Katastrophe vermutlich nicht alle Mitglieder treffen, so dass die verbleibenden noch über ausreichende Werte verfügen. Genau so begann übrigens die Bank of England im Jahre 1694: als Bündnis von Kaufleuten.

Tradecoin ist in prinzipieller Hinsicht verschieden von Kryptowährungen wie Bitcoin oder Ether, die nicht durch reale Vermögenswerte gestützt und nicht an eine Mitgliedschaft gebunden sind. An Stelle des energieintensiven Mining sichert das System seine Geschäfte über ein Netzwerk vertrauenswürdiger Notare ab. Jeder Teilnehmer darf sich eine Teilmenge dieser »validators«, die er um Bestätigung seiner Transaktionen bittet, selbst auswählen – so bunt gemischt, dass es praktisch unmöglich ist, eine Mehrheit von ihnen zu bestechen. Das Ergebnis ist ein schnelles, zuverlässiges und umweltfreundliches Finanzinstrument, das obendrein ohne wesentliche Änderungen wachsen kann (Skalierbarkeit) – der Maria-Theresien-Taler in neuem Gewand.

Währungen wie Tradecoin können sogar sicherer sein als die klassischen, da sie im Prinzip eine detaillierte Aufsicht des Geldkreislaufs ermöglichen, und zwar durch echte Menschen nach dem Vorbild der klassischen Bankenaufsicht. Diese kann gegenwärtig gewisse Entwicklungen nicht sehen, da Transaktionen wie insbesondere Kreditverträge streng vertraulich sind. Das wären sie auch unter einem System wie Tradecoin; dieses hätte jedoch im

Vorfeld der Finanzkrise bemerken können, dass einige Akteure enorme Mengen an hypothekengedeckten Kreditausfallversicherungen (credit-default obligations, CDOs) in den Büchern hatten, und daraufhin die Folgen eines Verfalls der Immobilienpreise in einer Simulation durchspielen können. Dabei wären ohne Zweifel beizeiten rote Warnlampen aufgeleuchtet.

Transparenz unter Wahrung der Vertraulichkeit – diese Herausforderung gehen wir mit einer Software zum Aufbau von Vertrauensnetzen (trust networks) an. In einem Pilotprojekt nutzen Staaten der EU und US-amerikanische Finanzunternehmen unser System. Dieses zeichnet Transaktionen und Verträge zwischen verschiedenen Parteien auf und gibt sie wieder, ohne dabei vertrauliche Daten preiszugeben oder die Privatsphäre zu verletzen. Dieselbe Software liegt auch Tradecoin zu Grunde. Gegenwärtig planen wir zwei Allianzen, deren Mitglieder untereinander mit jeweils »hauseigenen« Versionen von Tradecoin handeln: eine für den internationalen Handel, die aus kleineren Nationen besteht, und eine andere, die von Landwirten abgedeckt wird und für den Einsatz auf Rohstoffmärkten gedacht ist. Für beide Allianzen nehmen wir zurzeit Mitglieder auf, um dann die Idee zu testen.

Zum ersten Mal in der Geschichte besteht die Gelegenheit, weltweite digitale Währungen einzuführen, die weitgehend immun sind gegen die egoistische Politik der Zentralbanken, die bisher einen Großteil des Geldes kontrollieren. Wahrscheinlich wird eine Flut neuer digitaler Währungen entstehen, und einige wenige werden es letztendlich mit den größten Reservewährungen aufnehmen können.

Mit der Einführung wirklich durchschaubarer Finanzsysteme hätten wir Instrumente zur Verfügung, mit denen wir Risiken minimieren, Finanzkrisen abwenden und individuelle Freiheiten gegen allzu mächtige Regierungen und Großunternehmen verteidigen können. Wenn diese digitalen Währungen auch noch mit einer Umtauschgarantie ausgestattet sind, die sie an traditionelle Vermögenswerte koppelt, haben sie wie Gold einen echten Wert, der sie gegen spekulative Angriffe und wirtschaftliche Fehlentwicklungen einzelner Staaten widerstandsfähig macht.

Insgesamt könnten Kryptowährungen der nächsten Generation wie Tradecoin die Reibungen im Welthandel dramatisch reduzieren, selbst im Chaos des aktuellen politischen und wirtschaftlichen Klimas. Infolgedessen würden Währungen wie der Dollar ihre Übermacht einbüßen – oder das US-Finanzsystem würde sich zu konstruktiverem Verhalten veranlassen sehen. Letztlich hoffen wir, dass die geschilderten Systeme mehr Transparenz, Verantwortlichkeit und Gerechtigkeit für die Welt bringen. ◀

QUELLEN

Barrdear, J., Kumhof, M.: The Macroeconomics of Central Bank Issued Digital Currencies. Working Paper No. 605, Bank of England, London 2016. www.bankofengland.co.uk/working-paper/2016/the-macroeconomics-of-central-bank-issued-digital-currencies

Lipton, A.: Modern Monetary Circuit Theory, Stability of Interconnected Banking Network, and Balance Sheet Optimization for Individual Banks. In: International Journal of Theoretical and Applied Finance 19, 1650034, 2016

RESSOURCENVERBRAUCH BITCOIN, DER ENERGIEFRESSER

TITELTHEMA Werden Kryptowährungen eines Tages den Dollar oder den Euro ablösen? Wohl kaum – der Stromverbrauch würde exorbitante Größenordnungen annehmen.



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

» spektrum.de/artikel/1547033

Am 1. Januar 2018 kostete ein Bitcoin 13800 Dollar, nachdem der Kurs zwei Wochen zuvor fast bis auf 20000 Dollar geklettert war. Mitte Februar ist er nach einem Abfall auf knapp 7000 Dollar wieder im Steigen begriffen, und niemand weiß, wie der Kurs stehen wird, wenn Sie dieses Heft in den Händen halten. Handelt es sich um eine Spekulationsblase, die nach kurzer Zeit gänzlich in sich zusammenfallen wird, oder wird das Publikum den einzigartigen Eigenschaften der Kryptowährungen – Anonymität, Irreversibilität, Verlässlichkeit, Unabhängigkeit von Zentralbanken, Zugänglichkeit für jedermann und reibungsloser Zahlungsverkehr weltweit – so viel Wert beimessen, dass sie zum Standardzahlungsmittel avancieren?

Das wird die Zukunft zeigen. Aber bereits jetzt gibt es Grund zur Beunruhigung. Das Netz, das den Zahlungsverkehr abwickelt und insbesondere alle Transaktionen praktisch unfälschbar beglaubigt, verzehrt eine gewaltige Menge an elektrischer Energie. Am 1. Januar 2018 schätzte die darauf spezialisierte Website »Digiconomist« den Jahresverbrauch auf 36 Terawattstunden (TWh, Milliarden Kilowattstunden): so viel, wie 3,4 Millionen amerikanische Haushalte verbrauchen, oder 0,16 Prozent der Weltproduktion.

Diese Menge wird noch anwachsen. Denn wie unten näher erläutert, ist der Stromverbrauch des Netzes im Wesentlichen proportional zum Kurs des Bitcoin, allerdings mit einigen Monaten Verzögerung; das Netz hat sozusagen eine gewisse Trägheit. Da der Kurs des Bitcoin sich binnen eines Jahres vervierzehnfacht hat, wird der Stromverbrauch in den nächsten Monaten noch aufholen und dabei mit großer Sicherheit um noch einen Faktor 2 bis 3 zulegen – sofern der Kurs des Bitcoin nicht zusammenbricht. Damit wäre man bei dem Verbrauch von ganz Belgien: 70 bis 100 TWh pro Jahr.

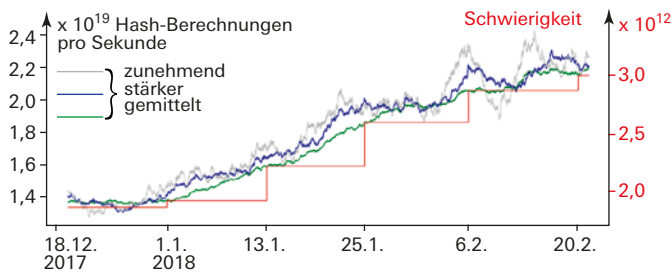
Diese Schätzungen sind mit großen Unsicherheiten behaftet, weil kaum zu ermitteln ist, welchen Aufwand die »Schürfer« der Bitcoins für ihre Rechenleistungen betreiben. Im Internet finden sich zwei Lager, die wortreich über die Details streiten. Der seriöseste Vertreter der Pessimisten ist die Website »Digiconomist«, die der Niederländer Alex de Vries gegründet hat; ihr entstammen die oben genannten Zahlen. Die Optimisten, am besten vertreten durch den Franzosen Marc Bevand, der in den USA lebt, liegen mit ihrer Schätzung, grob gesprochen, bei den halben Werten. Aber selbst sie beziffern den Stromverbrauch auf ungefähr fünf Prozent dessen, was ganz Frankreich konsumiert. Wenn das Interesse an Kryptowährungen anhält, wird auch diese Zahl entsprechend dem Wechselkurs ansteigen. Und bis jetzt sprechen wir nur über Bitcoin. Kommen dessen Verwandte hinzu, dann landet eine vorsichtige Schätzung bei zehn Prozent des französischen Stromverbrauchs – Tendenz steigend.

Der Lohn für sinnlose Arbeit: Kryptogeld

Schon beim Entwurf des Bitcoinsystems hat der geheimnisvolle Satoshi Nakamoto einen Anreiz geschaffen, um die Teilnehmer (die »Knoten«) des Netzes zur Aufrechterhaltung und Kontrolle des Betriebs zu motivieren. Wer als Erster eine neue Seite (einen »Block«) zum globalen Protokoll aller Transaktionen (zur »Blockchain«) hinzufügt und damit die dort verzeichneten Transaktionen plus alle ihre Vorgänger beglaubigt, wird mit zurzeit 12,5 Bitcoins belohnt. Zudem muss jeder Zahler der Transaktion eine Provision begeben, eine Art Überweisungsgebühr, die er umso höher wählt, je schneller er seine Zahlung bestätigt sehen will. Auch diese Provisionen kassiert derjenige, der das Wettrennen um die Beglaubigung (das »Schürfen« oder »mining«) gewinnt.

Ein hoffnungsloses Rennen

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: BITCOIN HASH RATE VS DIFFICULTY (2 MONTHS) HTTPS://BITCOINWISDOM.COM/BTC/DIFFICULTY



Je mehr Mühe sich die versammelten Schürfer geben, desto geringer wird der Ertrag, weil das System ungefähr alle drei Wochen die »Schwierigkeit« revidiert, das heißt den Goldgehalt des Sands an die Schürfintensität anpasst. Die Trefferchance ist der Kehrwert von $2^{32} \approx 4,3 \cdot 10^9$ mal der Schwierigkeit. Beispiel: Am 20. Februar 2018 war im Durchschnitt unter $1,3 \cdot 10^{22}$ Sandkörnern ein Goldkorn zu finden. So viele Körner von echtem Sand würden eine Kugel von ungefähr acht Kilometer Durchmesser füllen. Die Menge ist so bemessen, dass die Schürfer im Durchschnitt zehn Minuten bis zum ersten Treffer benötigen.

Der Wettbewerb selbst besteht in der Lösung eines mathematischen Problems, und zwar durch schlichtes Probieren. Ein Probierschritt ist die Auswertung einer Funktion namens SHA256, das heißt die Berechnung eines Hashwerts für eine Datei, die aus einem »Fingerabdruck« der gegebenen Transaktionen (mit etwas Zubehör, siehe »Die Welt des Bitcoin«, S. 12) plus einem vom Schürfer gewählten Datenstück besteht. Man hat also umso größere Gewinnchancen, je mehr solche Auswertungen der Funktion SHA256 man pro Sekunde durchführen kann.

Anfangs konnte man bei diesem Wettrechnen noch mit einem gewöhnlichen Großrechner oder sogar mit einem PC oder Laptop mithalten. Sehr bald bemerkten einige Teilnehmer, dass eine Grafikkarte diese Berechnungen schneller und mit geringerem Energieaufwand erledigen kann, und setzten diese speziellen Prozessoren in großen Mengen ein. Wenig später produzierten einige Leute ASICs (application-specific integrated circuits), die nichts anderes konnten als SHA256 auszuwerten, das aber nochmals effizienter. Heute hat man bei dem Wettbewerb keine Chance mehr ohne diese Bauteile, die millionenfach produziert und von Jahr zu Jahr verbessert werden. Das Schürfen von Bitcoins ist eine Industrie geworden, und die ist zu 70 Prozent in China ansässig.

Insgesamt bringt das Netz eine gigantische Rechenleistung auf. Jede Sekunde berechnet es ungefähr 14 Milliarden Milliarden ($1,4 \cdot 10^{19}$) Hashwerte. Entsprechend gewaltig sind die Stromkosten. Auf mittlere Sicht, das heißt mit einigen Monaten Verzug, werden sie sich auf einen gewissen Prozentsatz der Einnahmen aus dem Geschäft – Schürferlohn plus Provisionen – einpendeln.

Dafür gibt es eine einfache Begründung. Wenn die Kosten die Einnahmen übersteigen, werden die Schürfer

den Betrieb einstellen. Wenn sie geringer sind, dann lohnt es sich, neue Bitcoinschürfstätten zu eröffnen. Es ist dieselbe Logik wie bei der Förderung von Gold oder auch Erdöl: Wenn der Goldpreis sinkt, rentieren sich gewisse Goldminen nicht mehr und werden geschlossen. Wenn er steigt, werden neue Goldminen angelegt oder stillgelegte reaktiviert. Innerhalb weniger Monate stellt sich nach der gnadenlosen Logik des Gewinnstrebens ein neues Gleichgewicht zwischen Kosten und Gewinn ein.

Wenn neue Systeme in den Rechenwettbewerb eintreten, sinkt die Durchschnittszeit, bis eines von ihnen den nächsten Treffer landet. Es würde also nicht alle zehn Minuten ein neuer Block gebildet, sondern in deutlich kürzeren Abständen. Nur arbeitet das Bitcoinprotokoll dem entgegen, indem es ungefähr alle drei Wochen die Schwierigkeit des Problems der aktuellen Hashrate (derzeit die genannten $1,4 \cdot 10^{19}$ Hashwerte pro Sekunde) anpasst, so dass die durchschnittliche Zeit bis zum nächsten Block wieder bei zehn Minuten liegt. Das ist einfach: Man setzt die Trefferwahrscheinlichkeit herab. Wenn sich die Leistung aller schürfenden Rechner verdoppelt, müssen sie alle für denselben Ertrag doppelt so viel arbeiten, machen sich also gegenseitig das Leben schwerer.

Zu den Stromkosten hinzu kommt noch der Aufwand für die Anschaffung der Chips, für Gebäude, Personal und so weiter. Es ist vernünftig anzunehmen, dass die Schürfindustrie im Gleichgewichtszustand einen annähernd konstanten Anteil der Einnahmen an die Stromversorger weiterreicht. Aber welchen? An dieser schwer zu schätzenden Zahl scheiden sich die Geister. Die Optimisten setzen 30 Prozent oder weniger an, die Pessimisten 60 Prozent und manchmal mehr. Aber unabhängig von dem genauen Wert gilt der Schluss, dass der Stromverbrauch für das Schürfen proportional zu den erwarteten Einnahmen und damit zum Kurs des Bitcoin ist.

100 Kilogramm Kohle verbrennen für eine einzige Überweisung

Nun ist in der Software (dem »Protokoll«) der Kryptowährung seit 2008 festgelegt, dass der Schürflohn alle vier Jahre auf die Hälfte des bisherigen Werts sinkt. Nach dem Prinzip der geometrischen Reihe ist demnach die Anzahl aller Bitcoins, die je erzeugt werden, beschränkt; sie liegt bei 21 Millionen. Es kann also keine Inflation durch unbegrenzte Ausweitung der Geldmenge geben. Die letzte Senkung, von 25 auf 12,5 Bitcoins pro Block, fand 2016 statt. Ab 2020 bekommt der siegreiche Schürfer nur noch 6,25 Bitcoins für jeden Block. Demnach müsste mit jeder Lohnsenkung auch der Stromverbrauch auf die Hälfte abfallen. Gleichzeitig hat Satoshi Nakamoto jedoch auch das System der Provisionen eingeführt, um den Anreiz zum Beglaubigen und damit zum Betrieb des Netzes aufrechtzuerhalten, wenn die Einnahmequelle aus dem eigentlichen Schürfen versiegt. Die Provisionen schwanken in komplizierter Weise, pendeln sich aber im Durchschnitt bei einem gewissen Prozentsatz des Transaktionsbetrags ein. Auch sie steigen also proportional zum Wechselkurs. Wenn das System so funktioniert, wie Nakamoto sich das – mutmaßlich – vorgestellt hat, wird irgendwann der Schürfer

lohn vernachlässigbar gering, und die Schürfer müssen allein von den Provisionseinnahmen leben. Im Umkehrschluss heißt das: Bei der Halbierung des Schürflohns sinken nicht unbedingt die Stromkosten; vielmehr steigen die geforderten Provisionen.

Auf der Website »Digiconomist« ist auch nachzulesen, was sich ergibt, wenn man den geschätzten Stromverbrauch auf die damit bestätigten Transaktionen umlegt. Demnach verzehrt eine einzige Transaktion 749 Kilowattstunden, wofür reichlich 100 Kilogramm Kohle zu verbrennen wären. Zu deutschen Haushaltsstrompreisen würde eine einzige Überweisung etwas mehr als 200 Euro kosten.

Wer bezahlt am Ende diese unglaublichen Summen? Zurzeit noch niemand. Der ganze Betrieb wird aus dem Bitcoin-Geld finanziert, das aus diesem Anlass neu geschaffen wird. Es ist völlig unklar, was geschehen wird, wenn die Provisionen die einzige Einnahmequelle des Systems sind.

Kann der Bitcoin die herkömmlichen Währungen ablösen?

Was würde passieren, wenn der Gesamtwert aller Bitcoins den Gesamtwert aller Dollars (oder Euros) erreichen würde?

Am 1. Januar 2018 hatten alle vorhandenen Bitcoins zusammen einen Wert von ungefähr 230 Milliarden Dollar. (Das ist die Anzahl aller Bitcoins mal dem aktuellen Kurs. Natürlich würden deren Besitzer, wenn sie alle zugleich ihre Schätze in Dollar umtauschen wollen, niemals 230 Milliarden einstreichen.) Nach Angaben der amerikanischen Zentralbank (Federal Reserve) waren im Dezember 2016 ungefähr 1500 Milliarden Dollar Bargeld im Umlauf. Für den Euro liegen die Zahlen in ähnlicher Größenordnung. Es gab also sechsmal so viele echte Dollars (Banknoten und Münzen) wie virtuelle (Bitcoins). Wenn deren Geldmenge sich derjenigen der etablierten Währung angleichen wollte, müsste der Kurs des Bitcoin auf das Sechsfache steigen – oder immerhin auf das Fünffache, wenn man berücksichtigt, dass erst 80 Prozent der von Nakamoto vorgesehenen 21 Millionen Bitcoins auf dem Markt sind. Und da diese Anzahl beschränkt ist, gibt es keinen anderen Weg, auf dem der Gesamtwert in solche Höhen steigen könnte.

Nach der Kursentwicklung der letzten Monate scheint eine solche Wertsteigerung im Bereich des Möglichen. Damit würde sich auch der Stromverbrauch verfünffachen, auf 350 bis 500 TWh (Pessimisten) beziehungsweise 175 bis 250 TWh (Optimisten) pro Jahr. Zum Vergleich: Im Jahr 2015 hat ganz Deutschland 573 TWh verbraucht.

Nichts kann diesen Wahnsinn aufhalten außer einem drastischen Entschluss. Der müsste entweder von der Gemeinschaft der Beteiligten kommen, die zwar fähig wäre, einen solchen Beschluss herbeizuführen, aber als solche kein Interesse daran hat, oder von den Staaten, die diesen Prozess in seinen Auswirkungen deckeln oder gleich ganz verbieten müssten. Aber dass sich Staaten wie die USA und China zu einer solchen gemeinschaftlichen Aktion bereitfinden, ist schwer vorstellbar.

Bei allen Unsicherheiten in diesen Schätzungen ist deren Größenordnung sicherlich korrekt – und Schwindel erregend. Es ist schon wegen der Stromkosten kaum

denkbar, dass die Bitcoins oder allgemeiner nach diesem Muster gebaute Währungen irgendwann klassische Zahlungsmittel wie Dollar und Euro ablösen werden.

Die genannten 1500 Milliarden Dollar sind nur das von der Zentralbank ausgegebene Geld, das die Finanzfachleute Basisgeld oder Geldmenge M0 nennen. Legt man stattdessen die Geldmenge M1 zu Grunde, die auch das von den Geschäftsbanken durch Kreditvergabe geschaffene Geld umfasst (siehe »Ausweg aus dem Bankenmonopol«, S. 21) und ungefähr das Dreifache von M0 ausmacht, dann wären die Verbrauchszahlen mit 3 zu multiplizieren. Der Stromverbrauch für den Betrieb der Kryptowährungsnetze würde dann ein Achtel (Optimisten) bis ein Drittel (Pessimisten) desjenigen der USA erreichen.

Ist es möglich, die Funktionsweise dieser Währungen so zu ändern, dass uns ein solch irrsinniger Aufwand erspart bleibt?

Die exorbitanten Kosten erwachsen nicht aus dem Betrieb des Netzes selbst, also der Überprüfung der Gültigkeit von Transaktionen und der Führung des Hauptbuchs (der Blockchain). Vielmehr sind sie darauf zurückzuführen, dass der Anreiz, sich an der Sicherung des Systems zu beteiligen, in einem Wettrennen besteht. Man kann eine Blockchain auch ohne dieses kompetitive Element führen.

So kommen die zulassungsbeschränkten Netze (permissioned networks), die zum Beispiel für den Verkehr unter Banken eingerichtet sind, ohne diese Anreizstruktur aus, weil sie von vornherein nur Mitglieder zulassen, die an einer guten Funktion des Netzes interessiert sind. Das Wettbewerbsselekt wird dadurch erzwungen, dass das Netz anonym, dezentral und offen für jedermann sein soll.

Kann man den Wettbewerb ohne den unglaublichen Aufwand haben? Zu dieser – nicht neuen – Frage sind zahlreiche Ideen vorgebracht worden; leider konnte bisher keine wirklich überzeugen.

Satoshi Nakamoto hat das Schürfen mit Absicht schwer gemacht, damit das Fälschen umso schwerer ist. Wer der Gemeinschaft eine falsche Blockchain unterschieben wollte, müsste der Erste sein, der als aktuellen Block einen falschen vorlegt; wenn der zu fälschende Block auch nur einige Stunden in der Vergangenheit liegt, müsste er alle Blöcke bis zum derzeit aktuellen hinterherfälschen – ein Wettrennen unter verschärften Bedingungen, das praktisch nicht zu gewinnen ist. Sowie das Bestätigen eines Blocks leichter würde, wäre auch das Fälschen einfacher, und damit würde ein Grundpfeiler des Systems zusammenbrechen.

Es hilft nichts: Für eine praktikable internationale Währung wird man auf einige wesentliche unter den Eigenschaften verzichten müssen, die der geniale Satoshi Nakamoto seinem geistigen Kind mitgegeben hat. ◀

QUELLEN

Bevand, M.: Electricity Consumption of Bitcoin: a Market-Based and Technical Analysis.

<http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/>

Bitcoin Energy Consumption Index

<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

Die moderne Erfolgsgeschichte.

Die Philosophie des Stewart Butterfield im FOCUS.

WIRTSCHAFT

Slack und eine Milliarde Gründe, warum es sich doch lohnt, Philosophie zu studieren

Der Name: **Stewart Butterfield**. Die Waffe: eine Software namens Slack. Die Mission: nicht weniger als eine Revolution der Arbeitswelt. Und, läuft's? Slack war nach acht Monaten eine Milliarde wert

TEXT VON JÖRG HARLAN ROHLER



Cooler Socke

Butterfield, 44, ist ein Serientäter: Den ersten Dollar verdiente er mit selbst gemachter Limonade, reich wurde er mit dem Fotodienst Flickr

25 Jahre

Menschen im



MEERESÖKOLOGIE ARTENVIELFALT IN DER TIEFSEE – AUS DEM ALL BESTIMMT

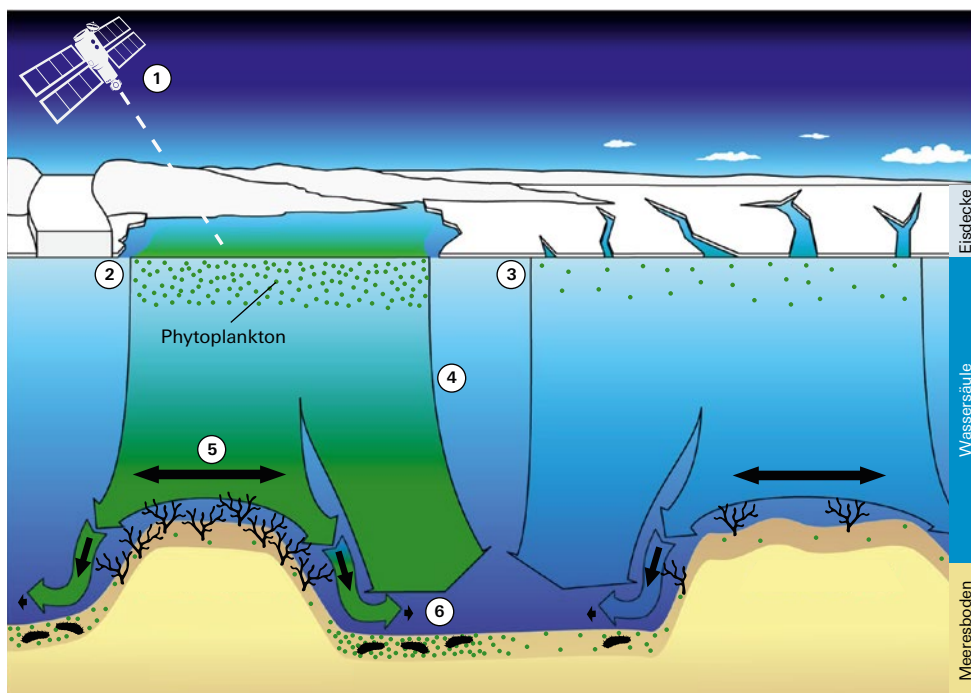
Die Anzahl und Vielfalt von Meerestieren hängt stark vom Nahrungsangebot im Ozean ab. Satellitenbilder der Algenverteilung und Computermodelle helfen, die Biodiversität selbst in schwer zugänglichen Meeresregionen zu ermitteln.

▶ Mit Satelliten kann man die Biosphäre unseres Planeten aus dem All vermessen, zum Beispiel die Verteilung von Phytoplankton (größtenteils mikroskopische Algen) im Ozean. Was sich unterhalb der Oberfläche abspielt, bleibt ihnen allerdings verborgen. Um das Leben in der lichtlosen Tiefsee zu studieren, müssen Wissenschaftler daher zu Schiffsexpeditionen aufbrechen. Diese können jedoch immer nur einen winzigen Teil der Weltmeere erfassen, zudem sind sie teuer und aufwändig, insbesondere bei Fahrten in die entfernten und unwirtlichen Polarregionen. Jetzt haben Forscherkollegen und ich einen Weg gefunden, die Artenvielfalt der Antarktis in mehreren hundert Metern Wassertiefe mit Hilfe von Satellitendaten und einem 3-D-Modell zu bestimmen.

Alle Lebewesen müssen hin und wieder Nahrung zu sich nehmen, um ihre Zellen mit Energie zu versorgen und um ihren Bedarf an Kohlenstoff, Stickstoff und anderen Elementen zu decken. Über das Nahrungsangebot am

Grund der Ozeane – und damit über die Verteilung der tierischen Meeresbewohner selbst – weiß man vielerorts nur sehr wenig. Vom Boden kaum besuchter Gewässer wie jenen rings um die Antarktis erhalten Forscher jährlich nur wenige Proben. Entsprechend lückenhaft ist unser Wissen über solche Gegenden, und oft lässt sich die Anzahl sowie die Biodiversität bodenlebender Organismen hier nur anhand verschiedener Umweltparameter äußerst grob abschätzen. Das erschwert es etwa, die Tiefseefischerei nachhaltiger zu gestalten und Schlüsselregionen zu identifizieren, die es zu schützen gilt. Also haben wir ein Computermodell entwickelt, das die Menge an organischen Partikeln aus abgestorbenen Algen, die zum Meeresgrund sinken, mit hoher Auflösung berechnet. Unsere Studie zeigt, dass diese Nahrungsquelle die Diversität der Bodenfauna am antarktischen Kontinentalhang maßgeblich beeinflusst.

Das Computermodell ist ein so genanntes food availability model und funktioniert wie folgt: Der NASA-Satellit Aqua kartiert alle 16 Tage den gesamten Ozean und berechnet aus dessen Grün- und Blaufärbung die Algenbiomasse in der oberen Wasserschicht. Wir fütterten das Modell mit dem langjährigen Mittel der Planktondichte und simulierten anhand von Richtung und Stärke der Strömungen, wo tote Algen bodennahe Wasserschichten erreichen. Die Strömungsdaten lieferte ein 3-D-Ozeanmodell. Im nächsten Schritt errechneten wir unter Einbeziehung von Größe und Dichte der Algen, wie viele organische Partikel sich wo am Grund absetzen. Anschließend verglichen wir unsere Ergebnisse mit Sedimentproben aus der Antarktis, in denen wir Kieselalgen – das dominierende Phytoplankton im südlichen Ozean – gezählt hat-



Wie Oberfläche und Tiefsee zusammenhängen

Satelliten können Mikroalgen im Ozean detektieren (1). Im späten Frühjahr vermehrt sich das Phytoplankton in eisfreien Gebieten der Antarktis massenhaft (2). Unter dem Meer eis herrscht hingegen Lichtmangel (3). Abgestorbene Algen sinken rasch in die Tiefe (4) und erreichen abhängig von Strömung (schwarze Pfeile) und Topografie den Meeresgrund (5). An Stellen mit geringer Strömung lagern sich viele Partikel ab und ernähren Seegurken (6). Dort, wo die untere Wasserschicht reich an nährhaften Schwebstoffen ist, findet man festsitzende Tiere wie Korallen, Schwämme oder Seelilien.

JANSEN, J. ET AL.: ABUNDANCE AND RICHNESS OF KEY ANTARCTIC SEAFLOOR FAUNA CORRELATES WITH MODELLED FOOD AVAILABILITY. IN: NATURE ECOLOGY AND EVOLUTION 2, S. 718-726, 2018. FIG. 1. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Trotz ewiger Kälte: Schwämme, Röhrenwürmer und andere Tiere bilden ein artenreiches Ökosystem am Grund des antarktischen Ozeans. Wenn sich das Meereis im Frühjahr zurückzieht, bieten Planktonblüten diesen sesshaften Organismen eine üppige Futterquelle. Auch Seegurken und Seesterne ernähren sich von toten Algen am Boden.

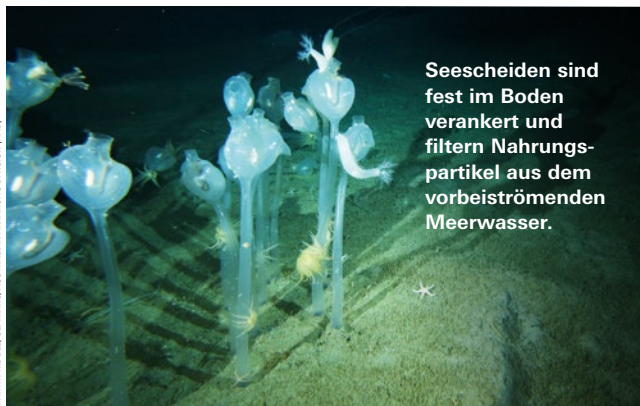
Biodiversität

Neben der Artenvielfalt, der so genannten taxonomischen Diversität, umfasst Biodiversität auch die Anzahl an Individuen pro Art, die genetische Vielfalt innerhalb einer Art sowie die unterschiedlichen Aufgaben, die Lebewesen im Ökosystem übernehmen (funktionelle Diversität).

Biodiversität ist eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen, an Land wie auch im Meer. Artenreiche Ökosysteme sind ertragreicher als Monokulturen und weniger anfällig gegenüber Krankheiten oder anderen Störfaktoren. Darüber hinaus übernehmen sie wichtige Dienstleistungen: als Wirkstofflieferant, CO₂-Speicher und Erholungsort.

ten. Wir wiederholten die Computersimulation mit unterschiedlichen Partikelgrößen und Sinkgeschwindigkeiten so lange, bis die prognostizierte Menge organischen Materials, das sich am Boden ablagert, möglichst gut mit den Werten aus den Schlammproben übereinstimmte.

Auf diese Weise haben wir für ein zirka 400 Kilometer breites Gebiet entlang der ostantarktischen Schelfkante mit einer Wassertiefe von 200 bis 1300 Metern mehrere Karten erstellt: Die erste veranschaulicht, wo Algen von der Oberfläche tiefere Wasserschichten erreichen. Karte Nummer zwei zeigt, wie sich die Nahrungspartikel entlang des Meeresgrunds verteilen, und die dritte schließlich



Seescheiden sind fest im Boden verankert und filtern Nahrungspartikel aus dem vorbeiströmenden Meerwasser.

illustriert, wo diese sich absetzen. Ein Abgleich mit Unterwasseraufnahmen offenbart: Sesshafte Korallen, Schwämme und Seelilien, die das Wasser nach Essbarem filtrieren, dominieren jene Bereiche, für die das Modell eine starke Strömung und viele organische Schwebstoffe vorhersagt. Wo weniger Strömung und somit ein großes Angebot sedimentierter Partikel herrscht, grasen hingegen überwiegend Seegurken den Boden ab. Tatsächlich ermöglichen satellitengestützte Berechnungen der Nahrungsverfügbarkeit also, die Vorkommen antarktischer Tiefseeorganismen zu bestimmen.

Die Erkenntnisse aus unserer Studie haben einen konkreten praktischen Nutzen: Sie können helfen, marine Biodiversitäts-Hotspots auffindig zu machen und bei der Ausweisung von Schutzgebieten entsprechend zu berücksichtigen. Zudem erlaubt das Modell, die Auswirkungen des Klimawandels und anderer menschlicher Einflüsse auf die empfindliche Fauna in nur schwer zugänglichen Regionen des Ozeans zu studieren. ◀

Jan Jansen ist Doktorand am Institute for Marine and Antarctic Studies der University of Tasmania.

QUELLEN

Jansen, J. et al.: Abundance and Richness of Key Antarctic Seafloor Fauna Correlates with Modelled Food Availability. In: *Nature Ecology & Evolution* 2, S. 71–80, 2018

Tilman, D. et al.: Biodiversity and Ecosystem Functioning. In: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 45, S. 471–493, 2014

FESTKÖRPERPHYSIK WIE FUNKTIONIEREN HOCHTEMPERATUR- SUPRALEITER?

Einige Materialien zeigen sogar bei vergleichsweise warmen Temperaturen keinerlei elektrischen Widerstand. Warum? Das ist möglicherweise einfacher zu erklären als lange gedacht.

Der völlige Verlust des elektrischen Widerstands scheint auch bei hohen Temperaturen nach einem bereits bekannten Prinzip zu funktionieren. Das legen verräterische Magnetwirbel in einem Cuprat nahe – einem keramischen supraleitenden Material auf Kupferbasis. Bisher haben die meisten Fachleute angenommen, solche Verbindungen, die bereits bei Temperaturen über 100 Kelvin supraleitend werden, ließen sich nicht mit dem »Bardeen-Cooper-Schrieffer-Mechanismus« (BCS) beschreiben. Die BCS-Theorie erklärt das Phänomen der Supraleiter, gilt ursprünglich jedoch nur für konventionelle Vertreter ihrer Art: Metalle bei extrem niedrigen Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt.

Dem widerspricht nun eine Arbeitsgruppe um Christoph Renner von der Universität Genf. Danach zeigen auch die Hochtemperatur-Supraleiter ein entscheidendes, von der BCS-Theorie gefordertes Merkmal: Bei der Wechselwirkung mit Magnetfeldern erzeugen die Feldlinien im Supraleiter eng umgrenzte, nicht supraleitende Bereiche mit einer speziellen elektronischen Struktur. In den Cupraten waren diese charakteristischen Zustände bisher nicht aufzuspüren. Das galt als deutliches Zeichen dafür, dass solche Stoffe ihre außergewöhnliche Leitfähigkeit auf anderem Weg erhalten. Welcher das sein sollte, blieb aber unklar.

Zumindest dieses Problem könnte sich nun in Luft auflösen. Renner und sein Team maßen die elektronischen Eigenschaften von »Abrikossow-Wirbeln« im Hochtemperatur-Supraleiter Yttrium-Barium-Kupferoxid ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$). Und die erweisen sich als konsistent mit den Vorhersagen der BCS-Theorie. Laut dieser entstehen solche Wirbel, wenn ein äußeres Magnetfeld in einen Typ-II-Supraleiter eindringt. Die Feldlinien durchziehen das Material in eng begrenzten, nicht supraleitenden Zonen, um die ein supraleitender Strom kreist.

In den 1960er Jahren sagten Forscher mit Hilfe der BCS-Theorie voraus, dass in den Kernen der Abrikossow-Wirbel Elektronen gefangen sein dürften, die nicht zur Supraleitung beitragen. Aus der Begrenzung auf einen engen Bereich sollten bestimmte Energiezustände hervorgehen. Sie sind mit jenen vergleichbar, die für die typischen Spektrallinien der verschiedenen Elemente verantwortlich sind. Vor allem aber sind diese so genannten Caroli-de-Gennes-Matricon-Zustände eng mit den

Eigenschaften der »Cooper-Paare« verknüpft – das sind durch Gitterschwingungen gebundene Elektronenpaare, auf denen Supraleitung nach dem BCS-Mechanismus basiert.

Die von der klassischen Theorie geforderten Wirbel haben sich bisher lediglich gut versteckt

Dank des Rastertunnelmikroskops bestätigte sich diese Prognose 25 Jahre später. Die von der BCS-Theorie geforderten Zustände ließen sich anhand der Leitfähigkeit im Wirbelzentrum experimentell nachweisen. Die große Ausnahme bildeten ausgerechnet die für praktische Anwendungen besonders interessanten Supraleiter, nämlich jene kupferhaltigen Materialien, die noch bei relativ hohen Temperaturen keinen elektrischen Widerstand aufweisen. Auch dort gibt es Strudel, jedoch gelang es nie, die an den Wirbelkern gebundenen Caroli-de-Gennes-Matricon-Zu-

stände bei ihnen zu messen. Die Supraleitung in diesen Stoffen, schlussfolgerten die meisten Physiker, ließe sich deswegen nicht mit dem bewährten BCS-Mechanismus erklären.

Die Daten, die das Team um Renner nun präsentiert, bieten einen Ausweg aus dem Problem. Demnach gibt es die Zustände sehr wohl, doch der Anteil der tatsächlich supraleitenden Elektronen im Material ist gering und deswegen kaum zu messen. »Unsere Experimente zeigen, dass die Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment auf einem anderen Beitrag zu den Messwerten beruht, der dominant ist und so die Signatur der Wirbel verbirgt«, so Renner.

Dazu maßen die Forscher die lokale Leitfähigkeit des Festkörpers abhängig von der Spannungsdifferenz mit einem Rastertunnelmikroskop. Im Zentrum der Wirbel misst man theoretisch eine maximale Leitfähigkeit abhän-

Ein Magnetfeld stößt in Supraleitern Ströme an, die dem Feld entgegenwirken. Das führt zu kuriosen Effekten – hier schwebt ein Magnet über einem mit flüssigem Stickstoff gekühlten Hochtemperatur-Supraleiter.



VIKTORCAF / GETTY IMAGES / ISTOCK

gig von der Messspannung. Und wenn man erst einmal die viel stärkeren Signale der nicht supraleitenden Elektronenzustände herausgefiltert hat, sollte das auch bei den Cupraten der Fall sein, mutmaßten die Forscher.

Der Schlüssel dazu ist die Annahme, dass sich die supraleitenden und nicht supraleitenden Beiträge einfach addieren und nicht gegenseitig beeinflussen. Dann nämlich kann man die Leitfähigkeit über einen Bereich des Festkörpers messen. Stößt man auf Inhomogenitäten, die auf Abrikosow-Wirbel hinweisen, zieht man schlicht die Messwerte innerhalb des Wirbels von jenen außerhalb ab. Der Einfluss der nicht an der Supraleitung teilnehmenden Elektronen sollte über diese nur wenige Nanometer messende Distanz nicht schwanken, und die übrig bleibende Differenz müsste allein von den Wirbeln und den Caroli-de-Gennes-Matricon-Zuständen im Vortekern herrühren. »Das Schöne an unserer Methode ist, dass wir nun eine perfekte Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment haben«, freut sich Renner, »und das ganz ohne aufwändige Datenanalyse.«

Auf diesem Weg identifizierten Renner und sein Team in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ auf einer Fläche von 90 mal 90 Nanometern insgesamt 19 Wirbelkerne. Deren Spektren gehorchen der BCS-Theorie, so dass die Arbeitsgruppe sie als die lange gesuchten Caroli-de-Gennes-Matricon-Zustände identifiziert. Ob das stimmt, sei aber noch nicht gesagt, warnen beispielsweise Can-Li Song und Qikun Xue von der Tsinghua-

Welche bemerkenswerten Eigenschaften sich unter dem Rauschen der nicht supraleitenden Elektronen verbergen, ist noch kaum erforscht

Universität in Peking: So müsse unter anderem noch geprüft werden, ob sich die Leitfähigkeit supraleitender und nicht supraleitender Zustände tatsächlich in der von Renner angenommenen Weise überlagert.

Aber auch wenn sich der Befund von Renner und seinem Team bewahrheitet, bleiben die Hochtemperatur-Supraleiter mysteriös. Was sich an bemerkenswerten Eigenschaften unter dem Rauschen der nicht supraleitenden Elektronen verbirgt, ist noch kaum erforscht. Und bisher gibt es sogar für das entscheidende Merkmal der Supraleitung keine echte Erklärung: Bei so hohen Temperaturen sollte die Kopplung zwischen Elektronen über Gitterschwingungen unterdrückt sein – warum sich trotzdem Cooper-Paare bilden, ist noch völlig rätselhaft. ◀

Lars Fischer ist Chemiker und Redakteur bei »Spektrum.de«.

QUELLE

Berthod, C. et al.: Observation of Caroli-de Gennes-Matricon Vortex States in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. In: Physical Review Letters 119, 237001, 2017

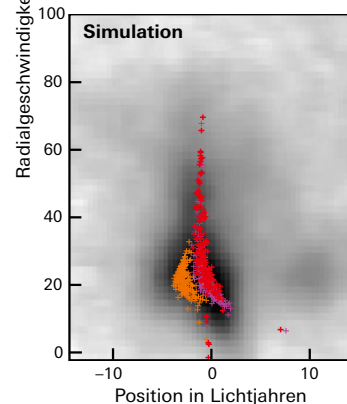
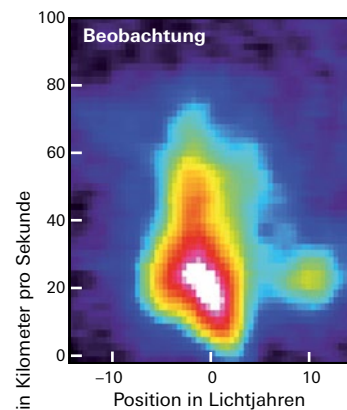
ASTRONOMIE SCHWARZES LOCH DER MITTELKLASSE

Japanische Forscher haben nahe des Zentrums der Milchstraße den bislang besten Kandidaten für ein mittelschweres Schwarzes Loch gefunden – eine lang vergeblich gesuchte Klasse der Massemonster.

► Laut theoretischer Studien gibt es allein in unserem Milchstraßensystem Millionen Schwarze Löcher. Gefunden haben Astronomen allerdings erst 60 von ihnen, und fast alle sind vom stellaren Typ: Sie entstanden beim Gravitationskollaps von Riesensternen und haben typischerweise zwischen drei und einigen Dutzend Son-

Wenn Gas am Schwarzen Loch streut

Die Gaswolke CO-0.40-0.22 ist auf ihrer Bahn einem Schwarzen Loch mittlerer Masse wohl sehr nahe gekommen. Das gemessene Positions-Geschwindigkeits-Diagramm (oben) stimmt gut mit Computersimulationen von Gasbewegungen (farbige Kreuze, unten) überein, bei denen ein Streuprozess an einer unsichtbaren Gravitationsquelle sehr verschiedene Geschwindigkeiten hervorgerufen hat. Die Beobachtung zeigt Licht der 87-Gigahertz-Strahlung mit dem japanischen 45-Meter-Radioteleskop Nobeyama. Die Simulation entspricht sehr genau den gemessenen Parametern. Sie stellt Form und Geschwindigkeit der Wolke nach 700 000 berechneten Jahren dar.



nenmassen. Darüber hinaus gibt es die extrem massereichen Schwarzen Löcher. Das nächstgelegene Exemplar dieser Schwergewichtsklasse befindet sich im Zentrum unserer Galaxis und enthält rund vier Millionen Sonnenmassen.

Astronomen vermuten im Kernbereich praktisch jeder großen Galaxie ein solches extrem massereiches Schwarzes Loch. Doch Exemplare dieser Größenordnung können kaum in einem Stück entstanden sein. Wahrscheinlicher ist, dass sich viele stellare Schwarze Löcher nach und nach zu immer größeren Gebilden vereinigt haben. Wenn dieses Szenario richtig wäre, müsste es auch Schwarze Löcher der Mittelmittelschwerkheitsklasse geben – mit zwischen einigen tausend und einigen hunderttausend Sonnenmassen.

Warum in die Ferne schweifen, wenn ein guter Kandidat so nah liegt?

Astronomen fahnden schon länger nach solchen mittelschweren Schwarzen Löchern. Weil sie genau wie ihre leichten und überschweren Verwandten kein eigenes Licht aussenden, lassen sie sich nicht direkt nachweisen. Wenn aber Objekte wie Sterne oder Gaswolken um das Loch kreisen oder sogar von ihm verschluckt werden, erhitzt sich ihre Materie stark und leuchtet in allen Wellenlängen. Tatsächlich haben Teleskope in den vergangenen Jahren in anderen Galaxien so genannte ultraleuchtkräftige Röntgenquellen aufgespürt, bei denen es sich um mittelschwere Löcher handeln könnte. Sicher sind sich die Astronomen dabei aber nicht. Vielleicht sind die Quellen auch nur besonders gefräßige stellare Löcher, die in kurzer Zeit mehr interstellares Gas verschlingen als andere.

Bestätigt sich die nun veröffentlichte Entdeckung von Tomoharu Oka von der Keiō-Universität im japanischen Yokohama und seinen Kollegen, dann gibt es ein mittelschweres Schwarzes Loch in gar nicht so großer Entfernung: im Zentralbereich unseres eigenen Milchstraßensystems. Bereits im Januar 2016 berichteten die Forscher von einer elliptischen Gaswolke mit der Bezeichnung CO-0.40-0.22, die sie mit dem 45-Meter-Radioteleskop Nobeyama in Japan in einem Abstand von rund 200 Lichtjahren vom galaktischen Zentrum entdeckt hatten. Im Namen der Gaswolke steht CO für das zum Nachweis genutzte Kohlenmonoxidmolekül, die Zahlen sind die Koordinaten des Objekts in galaktischer Länge und Breite.

Die Gasmassen in der rund 16 Lichtjahre großen Wolke bewegen sich mit stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Dafür, so vermuten die Forscher, muss ein sehr massereiches Objekt im Inneren der Wolke verantwortlich sein. Laut Computersimulationen hätte dieses Objekt rund 100 000 Sonnenmassen – damit fiel es genau in die Gewichtsklasse der mittelschweren Schwarzen Löcher (siehe »Gas am Schwarzen Loch gestreut«, links).

2017 haben dann Oka und seine Kollegen die Wolke CO-0.40-0.22 mit dem Teleskopnetzwerk ALMA in der chilenischen Atacamawüste eingehend untersucht. Die 66 mobilen Antennen auf einer Fläche mit bis zu 16 Kilo-

JAHRGANGS CD-ROM 2017



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Tel. 06221 9126-743
www.spektrum.de/sammeln
service@spektrum.de

Eine Gaswolke auf ihrer Bahn um ein Schwarzes Loch mittlerer Masse wird in dessen Gravitationsfeld zerstreut. Das Schwarze Loch befindet sich im Brennpunkt der Gaswolkenbahn und ist von einer Akkretions-scheibe umgeben (künstlerische Darstellung).



TOMOYUKI OKA, KEIO UNIVERSITY, IMCU

meter Durchmesser ermöglichen gemeinsam ein viel höheres räumliches Auflösungsvermögen als andere vergleichbare Radioteleskope.

Die Astronomen fanden damit einen besonders dichten, knapp ein Lichtjahr großen Gasklumpen nahe des Zentrums von CO-0.40-0.22. Auch hier zeigte sich eine extreme Geschwindigkeitsverteilung, was wiederum auf ein kompaktes massereiches Objekt hindeutet. Gleich daneben entdeckten die Astronomen eine schwache Radioquelle, deren Spektrum dem Objekt Sagittarius A* im Zentrum der Milchstraße ähnelt, das als extrem massereiches Schwarzes Loch gilt. Verglichen damit ist die Strahlung von CO-0.40-0.22* – der Stern im Namen bezeichnet jeweils die Radioquelle – um einen Faktor von rund 500 schwächer.

Da ALMA CO-0.40-0.22* räumlich nicht auflösen kann, muss die Radioquelle erheblich kleiner als 0,15 Lichtjahre sein. Ihre Massendichte liegt dabei um zwei Größenordnungen oberhalb derjenigen des Kernbereichs von Messier 15, einem der dichtesten bekannten Kugelsternhaufen. Wäre CO-0.40-0.22* ein besonders kompakter Sternhaufen, dann müsste er mehrere zehntausendmal so hell leuchten wie die Sonne. Das ist offensichtlich nicht der Fall. Daher verbleibt nur eine logische Erklärung: CO-0.40-0.22* ist ein Schwarzes Loch mit rund 100 000 Sonnenmassen. Es ist demnach das erste bekannte mittelschwere Schwarze Loch überhaupt und wegen seiner großen Masse nach Sagittarius A* die Nummer zwei in unserem Milchstraßensystem.

In ihrer Veröffentlichung bleiben Oka und seine Kollegen vorsichtig. Weitere Beobachtungen und Simulationen seien

nötig, um die Natur der kompakten Gaswolke wirklich zu verstehen. So könnten erst Langzeitbeobachtungen offenbaren, ob CO-0.40-0.22* so genannte quasiperiodische Oszillationen zeigt. Solche Schwankungen der ausgesandten Strahlung wären charakteristisch für ein Materie absorbierendes Schwarzes Loch. Die Forscher suchen zudem nach weiteren kompakten Gaswolken – denn wo ein mittelschweres Loch ist, sind womöglich noch andere.

Die Lage im Zentrum der Milchstraße ist ein Hinweis auf den galaktischen Kannibalismus unseres Sternsystems. Oka und sein Team glauben, dass CO-0.40-0.22* der ehemalige Kern einer Zwerggalaxie ist, die von unserem Milchstraßensystem einst verschluckt wurde und deren Sterne durch die Gezeitenwirkung abgestreift wurden.

In der Nähe unserer Milchstraße befinden sich rund 50 weitere bekannte Zwerggalaxien. Sie erwartet wahrscheinlich ein ähnliches Schicksal. CO-0.40-0.22* indes wird wegen seiner Nähe zu Sagittarius A* in ferner Zukunft wohl von diesem noch größeren Massemonster verschlungen. ◀

Jan Hattenbach ist Astronom und Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

QUELLEN

Oka, T. et al.: Signature of an Intermediate-Mass Black Hole in the Central Molecular Zone of Our Galaxy. In: The Astrophysical Journal Letters 816, L7, 2016

Oka, T. et al.: Millimetre-Wave Emission from an Intermediate-Mass Black Hole Candidate in the Milky Way. In: Nature Astronomy 1, S. 709–712, 2017

BIOPHYSIK SCHWIMMEN IM OKTAVKLANG

Spermien bewegen sich mit Hilfe einer Geißel vorwärts, die mit zwei Frequenzen gleichzeitig schwingt. Deren Phasenverschiebung bestimmt, wohin die Zelle schwimmt.

► Viele einzellige Lebewesen bewegen sich aktiv, um zu Licht- und Nahrungsquellen hinzuschwimmen oder Räubern zu entkommen. Bakterien nutzen lange Proteinfäden, um sich durch das umgebende Medium zu schrauben. Diese »Flagellen« sind in ihrer Form weitgehend unveränderlich; ein molekularer Motor treibt sie an der Basis an, so dass sie sich wie ein Propeller drehen. Bei den »Geißeln« der Eukaryoten hingegen handelt es sich um zelluläre Ausstülpungen, umhüllt von der Zellmembran. Ein solches Gebilde ist etwa 0,3 Mikrometer (millionstel Meter) dick und einige wenige bis mehr als 150 Mikrometer lang.

Im Innern der Geißel liegt ein Bündel von Proteinröhren (Mikrotubuli), die zum Zellskelett gehören. Zusammen er-

geben sie einen biegsamen Stab, dessen Form die Zelle unter Energieverbrauch verändert, was die Geißelbewegung hervorbringt. Die Mikrotubuli sind in einem charakteristischen Muster angeordnet, das bei allen eukaryotischen Geißeln gleich aussieht: Neun Doppelröhren bilden einen Kreis, der zwei zentrale Röhren umschließt. Untereinander sind sie durch Eiweißstränge verbunden, die Adenosintriphosphat (ATP) in Phosphat und Adenosindiphosphat spalten und die dabei frei werdende Energie nutzen, um die Doppelröhren gegeneinander zu verschieben – mit dem Ergebnis, dass sich die Geißel biegt. Läuft die Reaktion räumlich und zeitlich entsprechend koordiniert ab, entsteht der typische Peitschenschlag.

Mit Hilfe dieses Mechanismus schwimmen frei lebende Einzeller wie Wimpertierchen (*Ciliophora*) durch ihr Medium. Aber auch die männlichen Keimzellen (Spermatozoen) vieler Tiere bewegen sich damit fort, einschließlich jener des Menschen. Spermien haben jeweils eine einzelne, lange Geißel, auch als Spermischwanz bezeichnet. Ihr Peitschenschlag stößt die umgebende Flüssigkeit nach hinten und schiebt so das Spermium nach vorn.

Die Schlagbewegung entsteht dadurch, dass eine Welle von der Basis bis zur Spitze über die gesamte Geißel läuft. Geschieht das sowohl räumlich als auch zeitlich symmetrisch, bewegt sich die Zelle geradlinig vorwärts. Um eine

Spektrum PLUS⁺

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

NEU!

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

- Download des Monats im April: **Spektrum** SPEZIAL »Mensch-Maschine-Visionen«
- Redaktionsbesuche
- Leser-Exkursionen zum DESY am 6. April 2018 und zum Radioteleskop Effelsberg am 9. Juni 2018
- Ermäßigte Tickets für Symposium »Kortizes«
- Ermäßigter Reisepreis für die Kurzreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein«
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung!
Spektrum.de/plus

Eizelle anzusteuern, müssen Spermien aber auch auf gekrümmten Bahnen schwimmen können. Dies geht nur, wenn sie von einem symmetrischen zu einem asymmetrischen Geißelschlag wechseln. Erreichen lässt sich das etwa durch eine Brechung der räumlichen Symmetrie – ähnlich wie bei einem Schiffsruder. Wird dieses zu einer Seite bewegt, verändert sich die Schwimmrichtung des Wasserfahrzeugs. Geschieht das bei Spermien ähnlich, indem sie beispielsweise ihre Geißel auf einer Seite verkürzen, so dass sie sich krümmt?

Nein – Spermien gehen anders vor, wie Forscher um Jens Elgeti vom Helmholtz-Forschungszentrum Jülich herausgefunden haben. Ihre Daten belegen eine zeitliche Symmetriebrechung: Die Amplitude des Geißelschlags ändert sich temporal, der Spermischwanz schlägt zu einer Seite schneller und stärker aus als zur anderen.

Dies ermittelten die Wissenschaftler, indem sie menschliche Spermien mit dem Kopf auf einer Unterlage fixierten. Dadurch blieben die Zellen an Ort und Stelle, so dass sich ihre Bewegungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufzeichnen ließen. Ein unsymmetrischer Geißelschlag führt bei dieser Versuchsanordnung dazu, dass die Spermien um den Fixpunkt rotieren. Die Kameraaufnahmen erlaubten es den Forschern, ein beliebiges Segment des Spermischwanzes in Zeitlupe zu beobachten, um zu analysieren, wie es sich hin- und herbewegt. Sie hatten erwartet, eine Sinusschwingung zu sehen, wie sie sich einstellt, wenn die Geißel eine Wellenbewegung mit fester und gleich bleibender Frequenz ausführt. Die Daten zeigten aber eindeutig das Profil einer Sägezahn-schwingung. Diese entsteht, wenn der Spermischwanz nicht nur mit einer Frequenz schwingt, sondern mit mehreren gleichzeitig – genauer: mit einer Grundfrequenz und deren Vielfachen.

Überlagerung von erster und zweiter Harmonischer

Tatsächlich ließ sich der beobachtete Geißelschlag mit Hilfe einer Fourieranalyse hauptsächlich in zwei Frequenzanteile zerlegen, nämlich eine Grund- und ihre erste Oberschwingung mit doppelter Frequenz. Sie werden auch als erste und zweite Harmonische bezeichnet. Der Spermischwanz beschreibt also eine periodische Bewegung, in der sich zwei Frequenzen überlagern, die im selben Verhältnis zueinander stehen wie die Töne einer Oktave. Die Grundfrequenz beträgt dabei 20 Hertz und die der Oberschwingung 40 Hertz.

Dieses Prinzip ist auch aus der Akustik bekannt. Hier entspricht ein reiner Ton einer Sinuswelle mit bestimmter Frequenz (beispielsweise 440 Hertz beim Kammerton a¹). Ein Musikinstrument erzeugt aber keine reinen Töne, sondern einen Klang, der sich aus Schwingungen verschiedener Frequenzen zusammensetzt. Es handelt sich (idealisiert) um eine Überlagerung von Grundfrequenz und mehreren Oberschwingungen mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz.

Elgeti und sein Team fanden weiterhin heraus: Indem ein Spermium die Phasenverschiebung zwischen der

ersten und zweiten Harmonischen ändert, steuert es die Schwimmrichtung. Beträgt die Phasenverschiebung entweder 0 oder π , sind die beiden Teilschwingungen also gar nicht oder um eine halbe Schwingungsperiode gegeneinander verschoben, bewegt sich das Spermium geradeaus. Beträgt die Verschiebung plus beziehungsweise minus eine Viertelperiode, beschreibt es eine Rechts- respektive Linkskurve. Dies ermöglicht das Ansteuern eines Objekts wie der Eizelle. Dabei moduliert das Spermium die

Das Spermium steuert, indem es die Phasenverschiebung seiner Geißelschwingungen ändert

Phase und Auslenkung der Oberschwingung, während die Grundschwingung unverändert bleibt.

In Computersimulationen zeigten die Forscher, dass begeißelte Zellen tatsächlich auf diese Weise durch ihre Umgebung steuern können. Die Rechenmodelle boten auch einen Einblick in die Energetik der Schlagbewegung. So nehmen die Ausschläge der Geißel zwar zur Spitze hin zu, doch der Vortrieb ist am größten in ihrem mittleren Abschnitt.

Das Ziel des Spermiums ist die befruchtungsfähige Eizelle. Es registriert ihre Anwesenheit anhand ihres »Dufts«, vermittelt unter anderem vom weiblichen Geschlechtshormon Progesteron. Offensichtlich beeinflusst das Hormon die Oberschwingung der Spermigeißel: Gaben die Forscher es in das Medium, in dem sich die fixierten Spermien befanden, rotierten diese verstärkt um ihren Fixpunkt – die Asymmetrie ihres Geißelschlags nahm also zu. In einer wässrigen Umgebung wären die Spermien dadurch vermehrt Kurven geschwommen. Das erhöht die Chance, eine in der Nähe befindliche Eizelle zu treffen.

Welcher Mechanismus bringt die verschiedenen Schwingungsfrequenzen hervor? Möglicherweise ist das Protein Dynein hierfür verantwortlich, das die Verschiebungsbewegung der Mikrotubuli-Röhren innerhalb der Geißel antreibt. Verschiedene Varianten dieses Proteins verformen das Zellskelett unterschiedlich schnell und könnten so die beiden Schlagfrequenzen erzeugen. Ob das tatsächlich zutrifft, müssen allerdings künftige Untersuchungen zeigen. ◀

Larissa Tetsch ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Maisach bei München.

QUELLEN

Alvarez, L. et al.: The Computational Sperm Cell. In: Trends in Cell Biology 24, S. 198–207, 2014

Kaupp, U.B., Alvarez, L.: Sperm as Microswimmers – Navigation and Sensing at the Physical Limit. In: The European Physical Journal Special Topics 225, S. 2119–2139, 2016

Saggiorato, G. et al.: Human Sperm Steer with Second Harmonics of the Flagellar Beat. In: Nature Communications 8, 1415, 2017



SPRINGERS EINWÜRFE URKNALL IN SERIE

Wie kann eine US-Sitcom, in der Naturforscher fachsimpeln, derart erfolgreich sein? Die phänomenale Resonanz von »The Big Bang Theory« verlangt nach einer Erklärung.

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

► spektrum.de/artikel/1547065

Eine Fernsehserie muss möglichst viele Zuschauer für das Wohl und Wehe der Protagonisten interessieren. In der deutschen Seifenoper »Lindenstraße« schlagen sich Bürger wie du und ich mit Alltagsproblemen herum, und in Arztserien à la »Schwarzwaldklinik« geht es um ewige Menschheitsthemen: Gesundheit und Krankheit, Leben und Tod. Hingegen dürfte die Idee, ein paar junge Spezialwissenschaftler in den Mittelpunkt einer Sitcom zu stellen, den Machern des US-Senders CBS zunächst ziemlich verrückt vorgekommen sein. Erst nach einigen erfolglosen Probeläufen nahm die Serie ab 2008 Fahrt auf – und zählt heute zu den populärsten überhaupt.

Die enorme Breitenwirkung von »The Big Bang Theory« zeigt, dass die Arbeitswelt von Naturforschern längst kein exotisches Milieu mehr ist. Die Universitäten stoßen Massen von Absolventen aus, die in die staatlich finanzierte Grundlagenforschung und in die Entwick-

Forscher wirken nicht exotisch

lungslabors der Privatwirtschaft drängen. Die typischen Endprodukte dieser Ausbildungsfließbänder werden mit mehr oder weniger gutmütigem Spott als Geeks oder Nerds karikiert – gewissermaßen als angehende Exemplare des klassischen zerstreuten Professors.

Im Fall der mathematischen Physiker führt deren Massenproduktion zu einem Dilemma, das die »Big Bang«-Figur Sheldon Cooper personifiziert. Sheldon betrachtet sich quasi als Aristokrat der Wissenschaft. Er möchte in Augenhöhe mit Stephen Hawking über Quantengravitation kommunizieren und blickt verächtlich auf den Experimentalphysiker herab, mit dem er die Wohnung teilt. Für Technik, Biologie oder Geologie hat Sheldon nur tiefste Geringschätzung übrig.

Doch Sheldons Anspruch, ein Genie vom Kaliber Einsteins zu sein, das den Nobelpreis so gut wie in der Tasche hat, zerschellt an der Realität seiner Profession.

Zum einen gibt es heute einfach zu viele Jungforscher, als dass es sehr wahrscheinlich wäre, ausgerechnet Sheldon aus Texas sei zu Besonderem ausersehen. Zum anderen zeigen sich die »Big Bang«-Schreiber wohlinformiert über den aktuellen Stand der Forschung: Fast verzweifelt warten die Theoretiker auf Anzeichen einer neuen Physik jenseits des Standardmodells, und Sheldons Steckenpferd, die Stringtheorie, liefert Modelle weit jenseits empirischer Bestätigung. Also gerät der hochbegabte Held vorübergehend in eine Lebenskrise und muss mühsam überredet werden, weiter den erlernten Beruf auszuüben.

Für die sachkundige Beratung der Serie ist David Saltzberg zuständig, Professor für Physik und Astronomie an der University of California in Los Angeles (*Nature Physics* 14, S. 101, 2018). Er sorgt für die Richtigkeit der ausgetauschten Argumente sowie der Tafelbilder, vor denen die Nerds über physikalische Probleme grübeln.

Natürlich bezieht die »Big Bang Theory« ihre Anziehungskraft nicht bloß aus der Wirklichkeitsnähe des dargestellten Milieus, sondern vor allem aus dessen komischer Seite. Die Nerds sind versponnen in ihre Fachwelten. Sie pflegen eine exklusive Insidersprache voll subkultureller Anspielungen, die sie von normalen Leuten isolieren – insbesondere von den jungen Frauen, zu denen sie Kontakt suchen.

Auch in dieser Hinsicht ist Sheldon Cooper ein Extremfall. Die Sexualität ist ihm ein böhmisches Dorf, in das er lieber keinen Fuß setzen möchte. Seine emotionale Intelligenz ist derart unterentwickelt, dass er notorisch – und unfreiwillig komisch – daran scheitert, den Sarkasmus einer gegen ihn gerichteten Spitze zu bemerken.

Trotz solcher Übertreibungen können sich offenbar viele Zuschauer wie ich in den Figuren der »Big Bang Theory« wiedererkennen – als die paradoxen Produkte einer massenhaften Spezialisierung.

MENSCHENEVOLUTION

DIE ERSTEN

STEINWERKZEUGE

Lange bevor mit der Gattung *Homo* Menschen auftraten, scheinen Homininen schon Steine zum Schneiden zurechtgeschlagen zu haben. Wieso setzte sich das damals noch nicht durch?



Kate Wong ist Redakteurin bei »Scientific American«.

» [spektrum.de/artikel/1547035](https://www.spektrum.de/artikel/1547035)



Heute ist das Leben für Menschen an den nordwestlichen Ufern des Turkana-sees hart und entbehrungsreich. Das unwirtliche, karge Land im Norden Kenias bietet wenig Trinkwasser und kaum noch Wild. Die Turkana sind Hirtennomaden. Sie halten Ziegen, Schafe, Rinder, Esel, zuweilen auch ein Kamel. Vor einigen Millionen Jahren sah es hier jedoch völlig anders aus. Die Region war feuchter, grüner und voller Tiere – vermutlich eine ideale Umwelt für die Vorfahren der Menschen.

Den von ihnen anfertigten Steingeräten ist die französische Archäologin Sonia Harmand von der Stony Brook University (US-Bundesstaat New York) auf der Spur. An diesem frühen Julimorgen 2016 sitzt sie draußen an einem Klappstisch und zeigt mir ein Fragment, nicht größer

als ein Fingernagel. Niemals hätte ich diesen graubraunen Stein für etwas Besonderes gehalten.

Neben der Forscherin arbeiten 15 Leute mit kleinen Hämmern und Meißeln im »Backofen«, einer flachen Grube in einem leicht ansteigenden Hang. Sie kommen aus Kenia, Frankreich, den USA und England. Um kein vielleicht aufschlussreiches Steinstück zu übersehen, lockern sie das gelbbraune Sediment vorsichtig schichtweise. Noch hält eine schwache Brise die Wasserflaschen, die in einer Akazie hängen, einigermaßen kühl. Doch zum Nachmittag wird die Temperatur an dieser Ausgrabungsstätte, Lomekwi 3, 40 Grad Celsius erreichen.

Funde von hier machten 2015 Schlagzeilen, als Sonia Harmand und ihr Ehemann und Institutskollege, der Paläo-

An der Ausgrabungsstätte Lomekwi 3 in Nordwestkenia kamen seit 2011 3,3 Millionen Jahre alte behauene Steingeräte zu Tage.

anthropologe Jason Lewis, zusammen mit ihrem Forscherteam die Entdeckung von 3,3 Millionen Jahre alten Steinwerkzeugen bekannt gaben (siehe **Spektrum** Juli 2015, S. 14). Das wären bislang mit Abstand die frühesten bearbeiteten Steingeräte. Vor allem stellte der Befund die etablierte Vorstellung in Frage, nach der erst frühe Menschen, also Vertreter der Gattung *Homo*, dergleichen zu Wege gebracht hatten – die damals allerdings noch lange nicht existierten. Wer hatte die Objekte dann aber geschaffen?

In dieser Feldkampagne, die ich besuche, bemühen sich die Wissenschaftler zunächst um mehr Beweise für ihre These. Sie graben nach weiteren Überresten von uraltem Steingerät, vor allem, um damit die Altersbestimmung abzusichern. Auch das Stück in Harmands Hand ist ein neuer Fund. Im Grunde handelt es sich um Abfall: einen Splitter, der anfiel, als jemand zwei Steine gegeneinander schlug, um eine scharfe Kante zu erhalten. Das kleine Fragment scheint später nie im Wasser abgeschliffen worden zu sein. Alles spricht dafür, dass die Ablagerungsschicht, aus der es stammt, in all den Jahrtausenden unberührt blieb, was die zeitliche Zuordnung erleichtert. Nun, da die Ausgräber die Zone mit den Artefakten erreicht haben, heißt es äußerst sorgsam vorgehen. »Pole pole«, mahnt Harmond auf Suaheli – ganz langsam.

Bisher hielten Paläoanthropologen das Anfertigen von Steingeräten für eine Schlüsseleigenschaft, die zum evolutionären Erfolg des Menschen führte. Denn Gebrauch und sogar Herstellung von Werkzeug finden sich zwar auch im Tierreich. Doch allein der Mensch formt Gestein oder anderes sehr hartes Material für seine Zwecke. Überdies entwickelt nur er Innovationen weiter und steigert mit grundlegenden Neuerungen immer wieder die Komplexität seiner technischen Ausstattung. Der Primatologe und Archäologe Michael Haslam von der University of Oxford bringt das auf den Punkt: »Wir scheinen die einzige Entwicklungslinie darzustellen, die sich ganz und gar der Technologie verschrieben hat. Für uns ist sie nicht einfach ein Hilfsmittel. Vielmehr gehört sie zu uns wie ein Körperteil.«

Nach gängiger Auffassung fing unsere Technikabhängigkeit im Zeitraum vor zwei bis drei Millionen Jahren an,



Im Juli 2016 besuchte die Autorin Lomekwi 3 (rechts). Hier fanden die Forscher in unberührten Sedimenten die bisher ältesten Steinwerkzeuge von Homininen. Die Mitarbeiter prüfen jedes kleine Steinfragment auf mögliche handwerkliche Anzeichen (oben).

als während einer weltweiten Klimaveränderung afrikanische Waldgebiete zu Grassavannen wurden. Die alten Nahrungsquellen der damaligen Homininen schwanden. Nur wer sich umstellte und an die neue Umwelt anpassen konnte, überlebte. Zum einen entstanden damals die so genannten robusten Australopithecinen mit kräftigen Kiefern und großen Backenzähnen. Sie vermoderten harte und faserreiche Pflanzen gut zu kauen. Zum anderen, so das etablierte Bild, kam unsere eigene Gattung – *Homo* – auf. Diese ersten Menschen besaßen bereits ein größeres Gehirn und erfanden Steinwerkzeuge. Mit denen erschlossen sie sich ein recht breites Nahrungsspektrum. Ihnen wurde nun das Fleisch der zahlreichen Savannentiere zugänglich. Diese nahrhafte Kost kurbelte vermutlich die Hirnzunahme weiter an. Damit stieg auch ihre Intelligenz, so dass sie noch besseres Werkzeug schufen. Kurz, Hirnwachstum und Innovationen steigerten sich gegenseitig. Die robusten Australopithecinen waren vor etwa einer Million Jahren wieder verschwunden, während Angehörige unserer Gattung schon weit in der Welt herumgekommen waren.

Aber stimmt dieses Szenario? Oder muss die Menschheitsgeschichte völlig umgeschrieben werden? Nicht nur sind die Steinwerkzeuge von Lomekwi mit 3,3 Millionen Jahren viel zu alt, um von einer frühen Menschenart erschaffen worden zu sein. Auch dass erst ein Klimawandel unsere Vorfahren kreativ werden ließ, würde nicht mehr passen, denn der setzte später ein. Allerdings ist noch längst nicht sicher, ob diese frühen Steingeräte tatsächlich zur Fleischversorgung genutzt wurden. Denn bislang fehlen an der Fundstelle jegliche Hinweise darauf – etwa typische Schnittspuren an Tierknochen.

Vor allem bereitet den Forschern Kopfzerbrechen, dass die nächstältesten gefundenen Werkzeuge viele hundert-

AUF EINEN BLICK EINE THEORIE WANKT

- 1** Die frühesten angefertigten Steinwerkzeuge sollen 3,3 Millionen Jahren alt sein. Doch Menschen erschienen erst viel später auf der Bildfläche.
- 2** Das Szenario vor und zu Beginn der Menschenevolution dürfte komplexer ausgesehen haben als bisher geglaubt.
- 3** Womöglich haben Forscher bisher den Stellenwert der Gehirnvergrößerung und der menschlichen Hand für die Werkzeugherstellung überschätzt.



ANDREW RENNEISEN



tausend Jahre jünger sind. Daher lässt sich nicht einmal eine Verbindung zwischen den behauenen Steinen von Lomekwi und der späteren technologischen Entwicklung erkennen. Im Augenblick sieht es demnach nicht unbedingt so aus, als ob die Fähigkeit, Steinwerkzeuge herzustellen, überhaupt ein entscheidendes Moment in der Menschwerdung gewesen wäre.

Wieder einmal müssen die Paläoanthropologen und Archäologen ihre Lieblingsthese überdenken

Die Funde von Lomekwi werfen frische Fragen auf: Wann und wie erwarben Homininen wohl das geistige und physische Rüstzeug, um sich Steingeräte vorzustellen und sie fertigen zu können – sowie die Voraussetzungen dafür, solches Wissen weiterzugeben? Sollte dergleichen in mehreren ihrer Linien vorgekommen sein, erschiene die Menschenevolution in einem neuen Licht.

Das Camp der Forscher liegt eineinhalb Kilometer von Lomekwi 3 entfernt. Als die meisten Mitarbeiter in aller Frühe mit zwei Jeeps zur Grabungsstelle aufbrechen, bleibt Héléne Roche zusammen mit mir zurück. Die inzwischen emeritierte Paläoarchäologin war Direktorin am CNRS (Centre national de la recherche scientifique) in Paris. Über viele Jahre hat sie Ausgrabungen und Forschungen in verschiedenen insbesondere ostafrikanischen Ländern über früheste Steinwerkzeugtechnologien durchgeführt. 17 Jahre lang trug sie die Verantwortung für die Arbeiten am Turkanasee, bis sie 2011 die Leitung an Harmand und Lewis übergab. Gerade besucht sie beide für ein paar Wochen.

Sie blickt zurück: »In meiner ersten Zeit in der Archäologie mussten wir uns an den Gedanken gewöhnen, dass die Steingeräte von Olduvai in Tansania 1,8 Millionen Jahre alt sein sollten.« 1964 verkündete der Paläoanthropologe Louis Leakey (1903–1972), in Verbindung zu jenen bis da-

hin ältesten bekannten Steinartefakten habe man jetzt Fossilien von vermutlich sehr frühen Angehörigen der Menschengattung gefunden. Leakey glaubte, dass die Knochenversteinerungen von einer Menschenart stammten, die er *Homo habilis* nannte: geschickter Mensch. Es sah so aus, als ob die Erfindung von Steinwerkzeugen mit der Evolution unserer Gattung zusammenhing.

Doch bald tauchten erste Hinweise darauf auf, dass die so genannte Oldowan-Technologie um einiges älter war als die Menschengattung. In den 1970er Jahren entdeckte Héléne Roche als Doktorandin in Gona (Äthiopien) Artefakte, die ein Team um den Archäologen Sileshi Semaw später auf ein Alter von 2,6 Millionen Jahren datierte. Semaw stammt aus Äthiopien und arbeitet am spanischen Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana in Burgos. Leider fanden sich in dem Zusammenhang keine Fossilien von Homininen. Semaws Team hält es für möglich, dass *Australopithecus garhi* die Artefakte herstellte, denn in der Nähe gab es Überreste dieses Vormenschen. Die meisten Fachkollegen glaubten jedoch nicht daran. So große Fertigkeit trauten sie nur einem frühen Menschen zu – obwohl man bis dahin lediglich 2,4 Millionen Jahre alte menschliche Fossilien kannte. Immerhin kam 2013 in der Afar-Region in Äthiopien ein Unterkieferfragment zu Tage, das in manchem menschenähnlich erscheint und 2,8 Millionen Jahre alt sein könnte.

Die Artefakte von Gona wirken allerdings schon so professionell und der Produktionsprozess erscheint derma-



ßen raffiniert, dass sie kaum erste Versuche einer Werkzeugherstellung gewesen sein können. Gleiches gilt für andere neue Funde besonders hohen Alters. Einige davon stammen sogar aus der westlichen Turkanaegend. Zum Beispiel fand Hélène Roche in den 1990er Jahren acht Kilometer von Lomekwi entfernt (in Lokalalei 2c) 2,3 Millionen Jahre alte Oldowan-Steingeräte. Vielfach konnten die Forscher dort aus den Fragmenten den gesamten Ablauf der Arbeiten rekonstruieren: Der Steinkern und die zugehörigen Abschläge lassen sich dann wie ein dreidimensionales Puzzle zusammenfügen. Bis zu 70 Abschläge hatten die Urheber an einzelnen Geröllsteinen vorgenommen. Sie müssen genau gewusst haben, welche Form sie dem Stein geben wollten, welche Flächen plan und welche konkav sein sollten, damit die Abschläge am besten gelangen, und wie sie die günstige Grundform beim Weiterarbeiten bewahrten. Roche ist davon noch heute beeindruckt: »Man bekommt eine Gänsehaut, wenn man die Teile stückweise zusammenfügt und sich dabei vorstellt, was der urzeitliche Steinmetz gerade dachte.«

Kurzum, die ausgefeilte Technologie des Oldowan war bestimmt nicht einem einzigen genialen Hirn entsprungen. Es muss weniger perfekte Vorläufer gegeben haben und somit eine Tradition, durch die sich das nötige Können und Wissen mit der Zeit herauschälte.

Kratzer in fossilem Knochen wie von einer Schneide, aber diesmal fehlt der Werkzeugbeweis

Erste Hinweise hierfür lieferte der äthiopische Paläoanthropologe Zeresenay Alemseged, der heute an der University of Chicago arbeitet, mit seinem Team. 2010 berichteten die Forscher von zwei Tierknochen aus Dikika in Äthiopien, die 3,4 Millionen Jahre alt sind und mutmaßlich Schnittspuren von scharfen Steinkanten aufweisen. Ihres Erachtens könnten Angehörige von *Australopithecus afarensis* die Kerben verursacht haben, denn die Art lebte zur fraglichen Zeit in der Region. Zu ihr zählt die berühmte »Lucy«. Jene Vormenschen gingen zwar aufrecht, besaßen allerdings noch manche Merkmale von Menschenaffen, darunter eine Reihe von Anpassungen an das Klettern auf Bäumen. Und ihr Gehirn war kaum größer als das unserer nächsten Verwandten.

In diesem Fall fehlt bisher das Werkzeug zu den vermuteten Einschnitten. Deshalb blieb auch der Befund nicht unangefochten. Zu beweisen, dass die Spuren nicht etwa von Tierzähnen, Krallen oder scharfen Hufen stammen, ist recht schwierig. In einem der Kratzer fand sich aber sogar etwas Steinabrieb.

Während diese Diskussion entbrannte, planten Harmand und Lewis bereits, Vorläuferwerkzeuge der Oldowan-Kultur aufzuspüren. Dazu starteten sie im Sommer 2011 im Westen des Turkana-sees eine Expedition, auf der sie nach neuen archäologischen Fundstätten Ausschau halten wollten.

Für Paläoanthropologen ist das Turkana-becken eine wahre Fundgrube und, was die Datierung angeht, geradezu ein Traum. Nicht nur gibt es dort Fossilien und Artefakte zuhauf, sie liegen auch noch oft in Gesteinsschichten, deren Lage zueinander in der Erdgeschichte wenig verworfen wurde, so dass sich das Alter der einzelnen



ANDREW REINBERGER

Horizonte recht zuverlässig erschließen lässt. Vulkanische Ablagerungen und wechselnde Wasserstände des Sees haben die Sedimente aufgebaut wie eine Schichttorte. Zudem haben Wind und Wetter die Lagen vielerorts quer angeschnitten und dabei quasi wie bei einem Tortenstück frei gelegt. Tektonische Aktivität hat zwar mancherorts das Gestein etwas gehoben oder abgesenkt. Doch auch da bleibt eine Datierung oft möglich, weil die Schichtabfolge im Bereich der fraglichen Funde häufig erhalten blieb.

Das unwegsame Gelände pflegen die Forscher über die vielen ausgetrockneten Flussläufe zu befahren, die Lagas, die vom See nach Westen ziehen. Am 9. Juli 2011 wollten Harmand und Lewis mit ihrer Crew die Stelle aufsuchen, wo ein anderes Forscherteam 1999 die Bruchstücke eines 3,5 Millionen Jahre alten Schädels eines noch unbekanntenen, »flachgesichtigen« Vormenschen, *Kenyanthropus platyops*, gefunden hatte. Sie verfuhrten sich aber im Lomekwi-Tal und bestiegen zur Orientierung eine Anhöhe. Von dort sahen sie, dass sie sich mitten in einem viel versprechenden Gelände für ihr Unternehmen befanden: Rundum lagen Aufschlüsse – durch Erosion aufgedeckte Flächen – weicher Seesedimente, die hier oft Fossilien und Artefakte bereithalten. Die Forscher kannten auch frühere geologische Kartierungen dieses Lagas, denen zufolge sämtliche Sedimente an seinem Verlauf mindestens 2,7 Millionen Jahre alt sind.

Sie beschlossen, sich etwas umzusehen. Und schon nach ein paar Stunden entdeckte ein Teammitglied, der Turkana Sammy Lokorodi, mehrere Steine mit typischen Spuren für scharfe Abschläge: aneinandergrenzende löffelförmige Mulden mit entsprechenden Kanten. Allerdings hatten diese Steine frei an der Oberfläche gelegen, so dass sie genauso gut in jüngerer Zeit von einem modernen Menschen, etwa einem Hirtennomaden, stammen konnten. Nur wenn sich ähnliche Artefakte noch eingeschlossen in nachweislich mehrere Millionen Jahre alten Sedimenten finden würden, wäre erwiesen, dass Homininen Steinwerkzeuge bereits vor dem Auftritt der ersten Menschen anfertigten.

Die Mühe der neuen Grabungen lohnte. Als die Wissenschaftler ihre Ergebnisse 2015 veröffentlichten, hatten sie



ANDREW RENNEISEN

Es kann Wochen dauern, bis zur aufschlussreichen Sedimentschicht vorzudringen und die Artefakte darin frei zu legen (links). Zu den ersten Stücken der Grabungen zählten kleine, scharfe Steinsplitter, die als Abschläge entstanden waren (oben). Bei der Datierung des Fundhorizonts half eine Schicht aus Vulkanasche, der Toroto-Tuff (rechts).



ANDREW RENNEISEN

auf einer Fläche von nur 13 Quadratmetern 19 Steinwerkzeuge frei gelegt. Bei der Datierung konnten sie sich bei den entscheidenden Sedimenten und den anlagernden Schichtungen auf gesicherte Altersbestimmungen der verschiedenen geologischen Horizonte in dem Gebiet beziehen. Beispielsweise bildet in diesem Bereich der Toroto-Tuff, ein Eruptivgestein aus verdichteter Vulkanasche, eine 3,31 Millionen Jahre alte Lage. Und 3,33 Millionen Jahre alt ist eine Schicht, die entstand, als das Magnetfeld der Erde andersherum gepolt war als heute. Sogar die Herkunft des Rohmaterials für die Artefakte ließ sich bestimmen. Es stammte von einem Strand mit Steinen aus vulkanischem Basalt und Phonolit, war also zur Fundstelle gebracht worden. An den am gleichen Ort vorhandenen Fossilien von Fischen und Krokodilen lässt sich ermesen, wie viel höher als heute der Wasserspiegel damals stand. Alles spricht dafür, dass diese Geräte schon vor 3,3 Millionen Jahren hergestellt wurden.

Sind die beiden verschieden alten, ganz anderen Herstellungstechniken womöglich völlig unverbunden?

Mit den 700 000 Jahre jüngeren Oldowan-Werkzeugen von Gona haben sie wenig gemein. Vor allem sind sie weitaus wuchtiger. Einige der bearbeiteten Kernsteine messen im Durchmesser immer noch mehr als zehn Zentimeter. Schon manche Abschläge sind so groß wie eine Hand. Die Ausgangssteine dürften teils drei Kilogramm gewogen haben. Auch die Technik der Herstellung war in den beiden Kulturen unterschiedlich. Das zeigen Spuren an den Artefakten sowie Versuche von Forschern, solche Geräte anzufertigen. Die Fabrikanten der Oldowan-Artefakte, erklärt Harmand, arbeiteten meist freihändig ohne Unterlage. Dabei hielten sie den Hammerstein in einer Hand und den Kernstein in der anderen. Die Steinmetze von Lomekwi packten dagegen einen davon mit beiden Händen: Entweder schlugen sie so den Kernstein gegen einen größeren Ambossstein am Boden, oder sie legten den Kernstein auf einen Amboss und schlugen mit einem Hammerstein darauf. Sie müssen ein Verständnis für die bruchmechanischen Eigenschaften von Steinen gehabt haben. Trotzdem ist zu erkennen, wie viel weniger Geschick sie besaßen

und wie viel weniger genau sie ihr Handeln planten als später die Homininen von Gona und Lokalalei. Somit handelte es sich um eine eigene Steinwerkzeugtradition vor dem Oldowan, welche die Wissenschaftler als Lomekwan bezeichnen.

Allerdings nehmen nicht alle Experten dem Harmand-Team das hohe Alter der Artefakte von Lomekwi 3 ab. Sie bezweifeln, dass diese Objekte wirklich aus den besagten 3,3 Millionen Jahre alten Sedimenten stammen. Die Forscher wollen ihre Daten deshalb mit weiteren Grabungen untermauern.

Aber auch wer die Analysen für korrekt hält, fragt natürlich nach der Bedeutung und Tragweite dieser Entdeckungen. Vor allem interessiert, wer jene Werkzeuge herstellte. Bislang fanden sich an der Grabungsstelle, abgesehen von einem mysteriösen einzelnen Zahn, keine Fossilien von Homininen. Das postulierte Alter der Geräte sowie die Fundregion könnten für eine der folgenden drei Vormenschenarten sprechen: *Kenyanthropus platyops*, *Australopithecus afarensis* oder *Australopithecus deyiremeda*. Nur erstere Spezies kam nach bisherigen Fossilfunden damals in dem Gebiet westlich vom Turkana-See vor. *A. afarensis*, die Art »Lucys«, lebte zur passenden Zeit in Ostafrika und gilt als möglicher Urheber der Kerben in den Tierknochen von Dikika. *A. deyiremeda* wurde erst kürzlich anhand eines unvollständigen Unterkiefers aus Äthiopien als neue Art beschrieben. Über die Hirngröße weiß man daher nichts. Das Gehirn der anderen beiden Spezies war nur wenig umfangreicher als das von Schimpansen.

Von *A. afarensis* ist auch der Bau der Hand bekannt. Diese Homininen konnten zweibeinig ausschreiten, waren aber zugleich noch gute Kletterer mit dafür geeigneten Händen. Bisher galt: Erst als Nachfahren von Menschenaffen das Baumleben aufgaben, wodurch ihre Hände frei wurden und sich veränderten, vermochten sie damit Steingeräte anzufertigen. War der Wechsel vom Baum zum Bodenleben mitsamt den entsprechenden anatomischen Anpassungen etwa nicht so entscheidend für die neuen Fähigkeiten wie bisher angenommen?

Und was veranlasste jene Homininen überhaupt dazu, Steinwerkzeuge herzustellen? Wozu benutzten sie diese?

Die Landschaft bei Lomekwi war damals bewaldet. Nach herrschender Auffassung haben sich unsere Vorfahren aber in einer Savanne durch die Erfindung neuer Technologien zu behaupten gelernt.

Das größte Rätsel ist jedoch die riesige Zeitlücke zwischen dem Lomekwian und dem Oldowan. In dieser Hinsicht und auch in Bezug auf die Herstellungstechnik erscheinen die Geräte, die Harmand und Lewis fanden, völlig isoliert, ohne erkennbare Verbindung zu der späteren Kultur. Falls das Auftreten einer Steingeräteindustrie für die Menschenevolution wirklich einen Wendepunkt markierte, müsste man erklären, wieso sich dieser Prozess nicht schon damals hochschaukelte und zugleich eine Hirnvergrößerung mit sich brachte.

Einige Primatologen glauben, dass wir manche Unterschiede zwischen den kognitiven Fähigkeiten von Homininen und anderen Primaten überschätzen. Auch Menschenaffen vermögen offenbar einiges zu leisten, was man ihnen gewöhnlich nicht zutraut. David Braun von der George Washington University in Washington, D. C., und Susana Carvalho von der University of Oxford etwa berichten von aufschlussreichen Freilandexperimenten mit den Schimpansen von Bossou (Guinea). Dortige Gruppen pflegen große Nüsse mit Steinen aufzuschlagen. Die Forscher brachten ihnen ausgesuchte Steine aus Kenia, die anders waren als ihre gewohnten. Und die Schimpansen wählten aus dem Angebot tatsächlich die am besten geeigneten, als hätten sie ein Gespür dafür, welche Exemplare für ihre Zwecke am günstigsten sind.

Nicholas Toth vom Stone Age Institute in Bloomington (Indiana) und seine Kollegen lehrten in Gefangenschaft lebende Bonobos, von Steinen scharfe Abschläge zu machen und damit Seile zu durchtrennen. Der Forscher glaubt, dass Bonobos auch lernen würden, Artefakte wie die von Lomekwi herzustellen, wenn man ihnen die passenden Steine dafür gäbe.

Vielleicht war bei der Erfindung der ersten Steinwerkzeuge nicht einmal besondere Genialität im Spiel. 2016 beschrieben Tomos Proffitt von der University of Oxford und seine Mitarbeiter, dass sie Kapuzineraffen im brasilianischen Nationalpark Serra da Capivara dabei beobachtet hatten, wie sie am steinigen Untergrund Brocken aus leicht zerbröckelndem Quarzit zerschlugen, die es dort zuhauf gibt. Jene Affen machen das oft. Dabei entstehen scharfe Kanten, die ganz ähnlich aussehen wie bei den Oldowan-Geräten und sogar löffelförmige Einwölbungen wie von gezielten Abschlägen aufweisen. Doch das kümmert die Affen nicht. Sie lecken zwischendurch aber immer wieder das pulverisierte Material auf, das dabei auftritt. Wer weiß, vielleicht brachten die Homininen ihre ersten Steinwerkzeuge ebenfalls zufällig zu Stande. Oder sie fanden in ihrer Umwelt scharfkantige Steine, und erst als sie gemerkt hatten, dass man damit schneiden kann, fingen sie an, derartige Objekte gezielt herzustellen.

Was nun die Hände von »Lucy« und Konsorten betrifft, könnten wir auch deren Geschicklichkeit unterschätzen. Wenn man nur einmal sieht, was die Menschenaffen und sogar die recht klugen Kapuzineraffen mit Hilfe ihrer Hände alles anstellen, kann man sich vorstellen, dass die Vormen-

schen mit ihren noch einiges mehr zu Wege brachten – obwohl sie damit zugleich gewandt in Bäumen kletterten.

Anthropologen haben die Handknochen von drei klein-hirnigen Homininen aus Südafrika genauer analysiert: von *Australopithecus africanus* sowie den dort kürzlich entdeckten Arten *Australopithecus sediba* und *Homo naledi*. Alle drei Spezies besaßen gekrümmte Finger, ein Anzeichen für Klettern im Geäst. Trotzdem wirken diese Hände zugleich in manchen Merkmalen wie solche von Werkzeugmachern. Als sich Tracy Kivell und Matthew Skinner von der University of Kent die Innenstruktur einiger Handknochen dieser Arten anschauten, um festzustellen, welche Kräfte und Belastungen darauf im Alltag eingewirkt hatten, kam heraus, dass die Muster nicht denen bei Schimpansen glichen. Vielmehr erinnert die Knochenstruktur an solche Homininen, die bekanntermaßen Werkzeuge herstellten und benutzten.

Laut Kivell müssen sich ein gutes Klettervermögen und handwerkliches Geschick nicht ausschließen. Nach ihren Daten können Hände, die sich zum Werkzeugmachen eignen, recht verschieden aussehen. Unsere Hand wurde dann aber wesentlich optimiert: Mit unseren kurzen, geraden Fingern und dem vergleichsweise langen, opponierbaren Daumen ist sie geradezu dafür gemacht, kraftvoll und zugleich präzise zuzugreifen sowie geschickte, genaue Bewegungen auszuführen – gleichgültig, ob wir nun einen Hammer schwingen, einen Schlüssel umdrehen, eine Mail versenden oder Geige spielen.

Härtetest für den Lagerkoch: Mit primitiven Steinmessern einen Tierkadaver zerlegen

Am Freitagabend gibt es im Camp ein afrikanisches Festessen. Dazu soll eine Ziege gegrillt werden, die ein Hirte am Morgen brachte. Der Brite Nicholas Taylor von der Stony Brook University überredet den Küchenchef Alfred Koki, das geschlachtete Tier mit Steinwerkzeugen nach Art des Lomekwian zu zerlegen. Zwar ist der versierte Fleischer skeptisch, ob das funktioniert. Doch spaßeshalber nimmt er einen fünf Zentimeter langen scharfen Abschlag und fängt damit an zu schneiden. Wird ein »Messer« zu stumpf, greift er zum nächsten. Er schafft es auf die Weise tatsächlich, die Ziege größtenteils zu enthäuten und sogar einige Fleischstücke abzuschneiden. Dennoch fordert er für den Rest lieber sein Edelmessers.

Derweil registriert Taylor alles genauestens: wie der Mann jedes Steinmesser hält und ansetzt und wie schnell ein Werkzeug zu stumpf wird. Alle verwendeten Instrumente werden sorgsam aufbewahrt, um später die abgenutzten Kanten mit möglichen Gebrauchsspuren an den echten alten Steinwerkzeugen zu vergleichen. Auch einige Knochen der Ziege wird Taylor wegen der Schnittspuren aufheben. In ähnlicher Weise will er die Eignung der vorzeitlichen Steinmesser zum Zerkleinern von Pflanzenmaterial erproben, vor allem an Holz und harten Wurzelknollen. Vielleicht gelingt es ja sogar, an den Schneiden winzige Reste von den einst bearbeiteten Objekten zu identifizieren.

Merkwürdigerweise setzte sich die Lomekwian-Tradition anscheinend nicht fort. Denn 700 000 Jahre trennen diese Artefakte von den zweitältesten, denen von Gona – die so



ANDREW RENNEISEN

Sonia Harmand und ihr Ehemann Jason Lewis leiten das West Turkana Archaeological Project, bei dem sie Lomekwi 3 entdeckten.

völlig anders erscheinen, dass deren Machart vermutlich nicht aus der von den frühesten bekannten Geräten hervorging. Falls es doch eine Brücke zwischen den beiden Kulturen gab, so kennen wir davon zumindest noch keine Zeugnisse. Es könnte aber auch sein, dass das Lomekwian tatsächlich isoliert stand – als wäre die Neuerung, sich Steine zurechtzuschlagen, kurz aufgeflackert und wieder verloschen, ohne dass die Technologie weitergegeben wurde. Aber auch beim Oldowan ist wenig Kontinuität zu erkennen. Die Zeugnisse hiervon sind recht lückenhaft und uneinheitlich. Die Stile variieren zwischen den Fundorten und Zeithorizonten. Deswegen spricht Héléne Roche lieber von Oldowan-Kulturen im Plural.

Viele Archäologen haben mittlerweile den Verdacht, dass bei den Homininen, vielleicht sogar bei anderen Primaten, etliche Populationen mit der Herstellung von Steinwerkzeugen oder auch nur mit dem Bearbeiten von Steinen herumprobierten. Jede Gruppe tat das getrennt, ohne Austausch zu anderen, und Erfahrungen gab man späteren Generationen nicht weiter, so dass Erfindungen wieder untergingen. Der Anthropologe Dietrich Stout von der Emory University in Atlanta (Georgia), der die Herstellung von Faustkeilen und die Auswirkungen auf das Gehirn untersucht, meint: »Früher glaubten wir, die Erfindung von Werkzeugen ließ den Menschen evolutionär durchstarten. Womöglich spielte Technologie aber zunächst gar keine große Rolle für die Umweltpassung. Technische Errungenschaften konnten ohne Schaden wieder verschwinden« (siehe auch **Spektrum** November 2016, S. 30).

Das änderte sich allerdings drastisch vor ungefähr zwei Millionen Jahren. Jetzt plötzlich sahen die Steinwerkzeuge aus, als wären sie nach einheitlichen Vorgaben fabriziert. Vor etwa 1,7 Millionen Jahren trat dann mit dem Acheuléen eine wesentlich verfeinerte Technologie auf. Sein Markenzeichen ist der Faustkeil, sozusagen das Schweizer Messer der Altsteinzeit. Diese Tradition verbreitete sich in Afrika sowie in der übrigen Alten Welt.

Der Schimpansenforscher David Braun vermutet einen Zusammenhang mit einer verbesserten Weitergabe von Informationen, den Sprung von geringerer zu hoher Genauigkeit, von »low-« zu »high-fidelity«, wie er es nennt.

Schimpanzen gesteht er lediglich zu, dass sie voneinander rein durch Beobachtung lernen, wenn sie Nüsse mit Hilfe von Steinen öffnen – ein durchaus hilfreiches Verhalten bei einfachen Anforderungen. Nach sechs Wochen ging die ganze Affengruppe von Bossou mit den Steinen aus Kenia auf gleiche Weise um, hatte also offensichtlich erfasst und voneinander abgeschaut, welche Art Steine sich am besten eigneten. Meistens hatten jüngere Tiere zunächst älteren zugesehen und dann versucht, die Tricks nachzuahmen.

Wir, der moderne Mensch, hingegen bringen anderen komplexe Handlungsabläufe und Zusammenhänge aktiv bei. Wir lehren sie regelrecht, wie man einen Kuchen backt oder ein Flugzeug steuert. Braun spekuliert, die primitiven Werkzeuge von Lomekwi sowie auch die des frühen Oldowan könnten von einer wenig ausgereiften Informationsübermittlung zeugen. Erst die standardisierten Artefakte des späten Oldowan und noch mehr dann die ausgefeilten Stücke des Acheuléen sprechen seiner Ansicht nach dafür, dass die Hersteller Wissen nun viel besser weiterzugeben und auszutauschen verstanden. Als diese Stufe erreicht war, konnten Menschen ihr technologisches Knowhow und die Komplexität ihrer Artefakte hochtreiben.

Trotz des fast unglaublichen Alters der Objekte von Lomekwi 3 hält es das Team um Harmand für möglich, dass noch frühere behauene Steine der Entdeckung harren. An einem der Grabungstage begeben sich Lewis, Sammy Lokorodi und der Geologe Xavier Boës vom Inrap (dem französischen Institut national de recherches archéologiques préventives) danach auf die Suche. Die Männer wollen das 2011 verfehlt Gebiet erkunden, weil dort noch ältere Schichten zu Tage treten. Sie schwärmen im Gelände aus, den Blick fest auf dem Boden, um inmitten der vielen in der Sonne rot gebrannten Steine womöglich welche mit Schlagspuren zu erkennen.

Wieder ist es Lokorodi, der als Erster etwas Interessantes erspäht, nämlich Geröllsteine mit löffelartigen, künstlich wirkenden Eintiefungen. Auf die Forscher warten nun auch an diesem Ort mühsame Grabungen, Gesteinsstudien und Sedimentanalysen, bevor sie sagen können, ob hier wirklich Objekte lagern, die von Homininen vor mehr als 3,5 Millionen Jahren geformt wurden. Und sie haben weitere Pläne: Knapp fünf Kilometer von Lomekwi 3 entfernt kennen sie eine Stelle, wo mehr als vier Millionen Jahre alte Sedimente zum Vorschein kommen. ◀

QUELLEN

Harmand, S. et al.: 3.3-Million-Year-Old Stone Tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya. In: *Nature* 521, S. 310–315, 2015

Proffitt, T. et al.: Wild Monkeys Flake Stone Tools. In: *Nature* 539, S. 85–88, 2016

LITERATURTIPPS

Stout, D.: Wie man einen Faustkeil macht, In: *Spektrum der Wissenschaft* 11/2016, S. 30–37

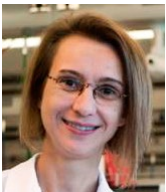
Der Forscher erprobt, wie die Fertigung von Steingeräten das Gehirn verändert.

Die Ursprünge der Menschheit. Im Labyrinth unserer Evolution. *Spektrum Spezial* 4/2015, Biologie, Medizin, Hirnforschung
Artikel zu neuen anthropologischen, archäologischen und genetischen Befunden der Menschenevolution

MIKROBIOLOGIE

BIOFILME IM VISIER

Biofilme sind Mikroorganismen, die von einer Schleimschicht umgeben sind. Sie könnten Schätzungen zufolge ähnlich viele Menschen töten wie Krebserkrankungen. Da Antibiotika gegen diese Keime oft wirkungslos sind, wollen Forscher sie nun mit ihren eigenen Waffen besiegen.



Karin Sauer ist Biologieprofessorin an der Binghamton University, State University of New York, und stellvertretende Direktorin des Binghamton Biofilm Research Center. Sie erforscht die Entstehung, Verbreitung und Resistenz von Biofilmen.

» spektrum.de/artikel/1547037

Der Yellowstone-Nationalpark ist ein Ort, an den ich immer wieder gern zurückkehre. Vor allem die Regenbogenfarben der zahlreichen heißen Quellen, Geysire und Fumarolen des Parks faszinieren mich. Die Farbenvielfalt resultiert aus Abermillionen dicht gedrängter Bakterien, die von einer schleimigen Matrix umgeben sind. Zwar sind einzelne Zellen mit dem bloßen Auge nicht erkennbar, doch in der Schleimhülle bilden sie deutlich sichtbare Gemeinschaften: mikrobielle Matten beziehungsweise Biofilme. Durch ein Mikroskop betrachtet weisen solche Filme bemerkenswerte dreidimensionale Strukturen auf. Mikroben kleben aneinander und bilden komplexe Fäden, verschlungene Pfade und Gebilde, die winzigen Türmen ähneln. Für mich sehen sie aus wie pulsierende Metropo-

len – mit Häuserblöcken, Wolkenkratzern und Straßen geschäftiger als jene in Tokio oder New York.

Jeder hat schon mal einen Biofilm gesehen – ob als dicke, schmierige Ansammlung im Abfluss oder als hartnäckigen Rand in der Badewanne. Doch während sie daheim höchstens lästig und in der Natur oft sogar hübsch anzuschauen sind, können Biofilme im medizinischen Bereich zur ernsthaften Bedrohung für unsere Gesundheit werden. Keime, die im menschlichen Körper Filme bilden, sind immun gegen Antibiotika und können chronische Infektionen von Operationswunden, Lungen und Harnwegen verursachen. Keimfilme kolonisieren Medizingeräte und Implantate wie Katheter, künstliche Gelenke und Herzklappen. Sie verursachen 65 Prozent aller Krankenhausinfektionen; allein in den USA trifft es jährlich 1,7 Millionen Menschen – etwa jeden 17. darunter tödlich. Schätzungen zufolge fordern Biofilme ebenso viele Opfer wie Krebs.

Das Problem resultiert vor allem aus einer falschen Strategie: Behandlungen bakterieller Infektionen richten sich gegen Einzelzellen, nicht gegen filmbildende Zellverbände. Letztere sind jedoch nicht nur in der Lage, unserer Immunabwehr auszuweichen, so dass Impfstoffe wirkungslos sind, häufig können ihnen auch Antibiotika nichts anhaben. Die hohe Widerstandsfähigkeit hat nichts mit tatsächlicher Wirkstoffresistenz zu tun oder gar mit der Entwicklung multiresistenter Erreger. Es ist die dreidimensionale bakterielle Matrix, die Biofilme so zäh macht. Darin eingebettet tauschen Bakterien Informationen aus, koordinieren die Organisation von Strukturelementen und unterstützen sich gegenseitig durch die Synthese von Proteinen und anderen überlebenswichtigen Molekülen (siehe **Spektrum** Juli 2015, S. 34).

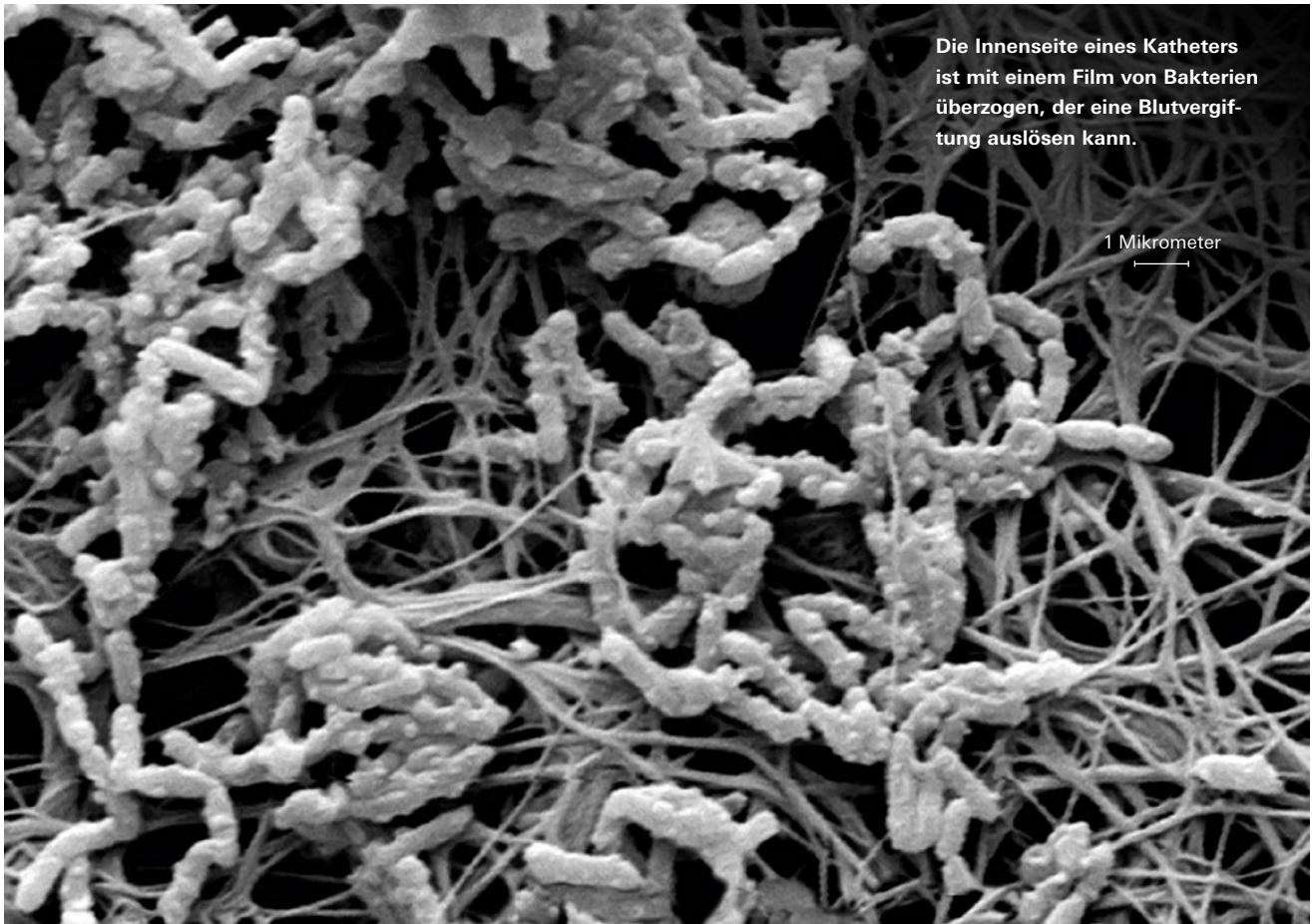
Meinen Kollegen und mir ist es nun gelungen, in diese Matrix einzubrechen und den bakteriellen Nachrichtenver-

AUF EINEN BLICK RESISTENTE MIKROBENSTÄDTE

- 1** Biofilme entstehen, wenn sich Bakterienkolonien mit einer schleimigen Matrix umgeben, die Antibiotika und andere Wirkstoffe abwehrt. Derartige Keime verursachen eine hohe Zahl tödlicher Krankenhausinfektionen.
- 2** Forscher haben Signalmoleküle identifiziert, die Mikroben produzieren, wenn sie einen Film wieder auflösen. Als freie Einzeller sind Bakterien deutlich verwundbarer.
- 3** Weitere Strategien im Kampf gegen Biofilme ziehen Nutzen aus wirkstoffhaltigen Oberflächen oder solchen mit Antihafteffekt, Bakterien infizierenden Viren und Enzymen, die die schützende Matrix angreifen.



Unter dem Mikroskop deutlich erkennbar ist die schleimige Matrix, mit der sich die stäbchenförmigen Bakterien der Gattung *Bacillus* schützen.



Die Innenseite eines Katheters ist mit einem Film von Bakterien überzogen, der eine Blutvergiftung auslösen kann.

1 Mikrometer

CDC / JAMICE HANNEY/CORBIS

kehr abzuheben. Zudem können wir einzelne Botschaften abfangen und sie gegen die Erreger verwenden, so als würden wir uns in das Computersystem einer Stadt hacken: Wir schalten eine Ampel auf Rot oder leiten den Verkehr um. Damit sind wir allmählich in der Lage, dem Zellverbund zu signalisieren, die schützende Matrix zu verlassen. Unsere Forschung basiert auf frühen Hinweisen, dass sich Bakterienfilme von einzelnen Zellen deutlich unterscheiden. Im Jahr 1998 zeigten die Mikrobiologen George A. O'Toole und Roberto Kolter, dass Bodenbakterien der Art *Pseudomonas fluorescens* bei der Biofilmsynthese 24 Gene aktivieren und spezielle Proteine bilden. Die Funktion der meisten dieser Gene war unbekannt, doch einige kodierten Haftproteine (Adhesine) – molekularen Klebstoff. Die Verwandlung der Zellen erforderte offenbar eine neue Physiologie. Im Jahr 2002 entdeckten wir, dass sich Mikroorganismen nicht einfach beim Kontakt mit einer Oberfläche verändern, sondern in der Folge mehrere Stadien durchlaufen und sich dabei immer wieder anpassen. Auf jeder Entwicklungsstufe produzieren Bakterien bestimmte Proteine, die das nächste Biofilm-Level einleiten.

Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass Biofilme – wie Städte – von Grund auf erbaut werden und ihre Entstehung einem Masterplan mit verschiedenen Bauphasen folgt. Im Labor können wir durch Zugabe von Chemikalien, die Proteine hemmen oder ihre Wirksamkeit verstärken,

einen Baustopp verhängen oder Umbaumaßnahmen einleiten, so dass der Zellverbund in ein früheres Stadium zurückfällt. Solche chemischen Angriffe können andere Maßnahmen wie etwa nanostrukturierte Antihafbeschichtungen im Kampf gegen Keimfilme ergänzen.

Oberflächen so glatt wie Schmierseife – abgekupfert bei Haien, Muscheln und Blutzellen

Denn es ist schon mal ein guter Ansatz, Erreger daran zu hindern, sich überhaupt irgendwo anzuheften. Im Kampf gegen Biofilme haben Forscher bislang vor allem Oberflächen und medizinische Komponenten mit antibakteriellen Substanzen versetzt. Eine Vielzahl solcher Materialien verwenden Ärzte bereits in Kliniken, darunter antibiotische Fäden und Knochenzement mit Antibiotikaperlen sowie Katheter, Verbände und Beatmungsschläuche, die mit kolloidalem Silber oder Nanosilberpartikeln beschichtet sind. Mikroorganismen sterben bei Kontakt mit den Silberionen. Der genaue Mechanismus dahinter ist noch nicht bekannt; man weiß aber, dass die Ionen oxidativen Stress verursachen und essenzielle Biomoleküle beschädigen, was schließlich zum Tod der Zelle führt. Neben Silber werden auch diverse Metalloxide und Metallsalze, die Eisen, Quecksilber, Tellur, Zink oder Titan enthalten, für klinische Zwecke getestet.

Beschichtungen und imprägnierte Medizinprodukte haben jedoch eine Achillesferse: Ihre antibakterielle Wir-

kung lässt mit der Zeit nach. Darüber hinaus kann eine übermäßige Wirkstoffexposition dazu führen, dass Erreger Resistenzen ausbilden, zum Beispiel gegen Silber. Daher arbeiten Wissenschaftler nun an Materialien, die es Bakterien mechanisch erschweren sich anzuheften – nach dem Vorbild der Natur. Sie imitieren die Mikrostruktur von Haihaut, den Selbstreinigungseffekt von Lotusblättern und

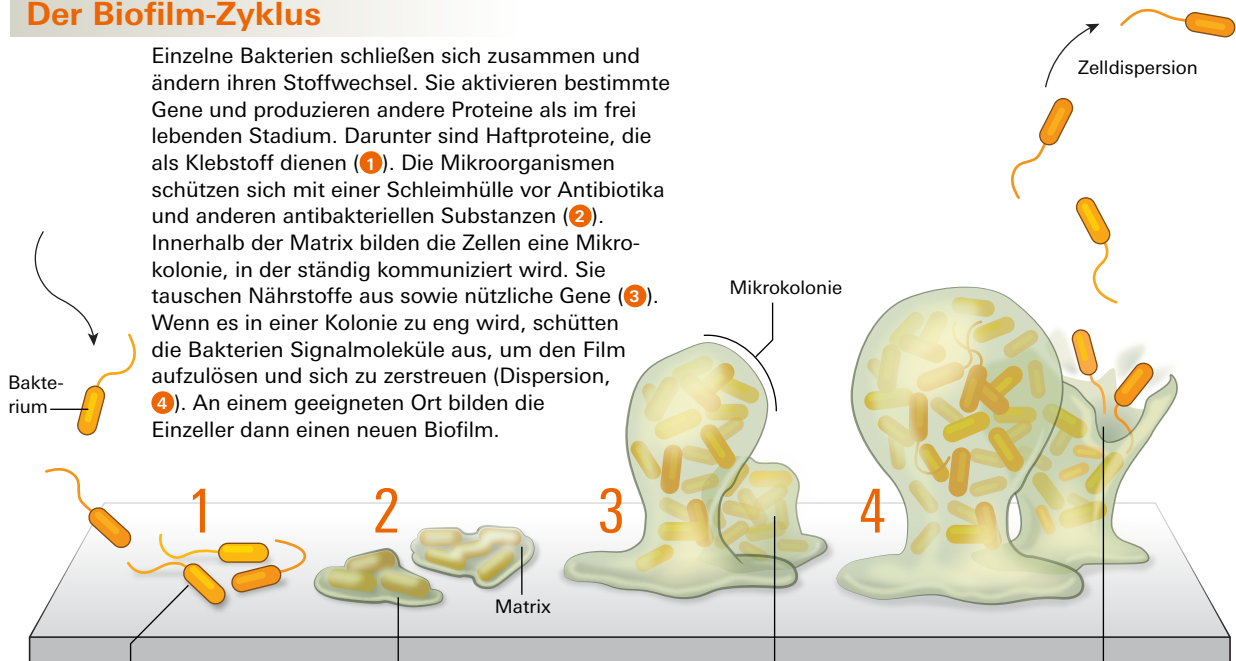
Aufwuchshemmer von Muscheln. Die Oberflächen beeinflussen Proteine, die Bakterien als Anker nutzen; sie vermindern den Halt der Zelle durch mikroskopische Veränderungen der Textur. Dazu werden Nanostrukturen wie Pinsel, Kristalle und Röhren aus hydrophilen Polymeren aufgetragen sowie Polymere mit positiv wie negativ geladenen Atomgruppen (Zwitterionen) – inspiriert von der

Wie Biofilme entstehen – und wie man sie bekämpfen kann

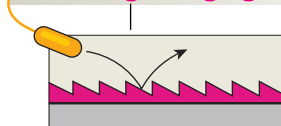
Bakterien sind keine Einzelgänger. Die meisten gedeihen am besten in großen Gruppen – komplexen Gemeinschaften, die sich gegenseitig unterstützen. Solche Biofilme sind schwer zu eliminieren: Die Mikroben kommunizieren, teilen Ressourcen und verstecken sich in einer dicken, schützenden Schleimmatrix. Forscher haben die Entwicklung bakterieller Filme nun teilweise entschlüsselt und können ihr Wachstum hemmen oder ihre schleimige Schutzschicht aufbrechen.

Der Biofilm-Zyklus

Einzelne Bakterien schließen sich zusammen und ändern ihren Stoffwechsel. Sie aktivieren bestimmte Gene und produzieren andere Proteine als im frei lebenden Stadium. Darunter sind Haftproteine, die als Klebstoff dienen (1). Die Mikroorganismen schützen sich mit einer Schleimhülle vor Antibiotika und anderen antibakteriellen Substanzen (2). Innerhalb der Matrix bilden die Zellen eine Mikrokolonie, in der ständig kommuniziert wird. Sie tauschen Nährstoffe aus sowie nützliche Gene (3). Wenn es in einer Kolonie zu eng wird, schütten die Bakterien Signalmoleküle aus, um den Film aufzulösen und sich zu zerstreuen (Dispersion, 4). An einem geeigneten Ort bilden die Einzeller dann einen neuen Biofilm.



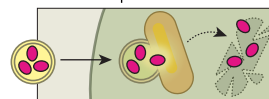
Strategien gegen Keimfilme



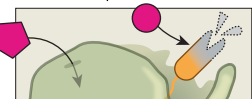
a Neuartige Materialien erschweren es bakteriellen Erregern, sich an Oberflächen anzuheften. Sie weisen Nanostrukturen auf, die Haftproteinen keinen Halt bieten.



b Ohne ihre strukturgebende Matrix kollabieren Biofilme. Die Schleimhülle enthält DNA-Moleküle, die mit dem Enzym DNase I zerschnitten werden können.



c Lipid-Shuttle (Liposomen) gelangen durch die Matrix in die Zellmembran und entlassen dort Wirkstoffe. Ebenso können Bakterien infizierende Viren (Bakteriophagen) in die Matrix eindringen.



d Wird ein Biofilm aufgelöst, produzieren Mikroben eine bestimmte Fettsäure. Außerhalb der Hülle sind sie verwundbar, so dass Forscher Dispersion mit diesem Signalmolekül künstlich einleiten. Stickstoffmonoxid hat eine ähnliche Wirkung.

JEN CHRISTENSEN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2017



URBANOW / GETTY IMAGES / ISTOCK

Ein Strom aus Bakterien: Am Rand der Grand-Prismatic-Thermalquelle im Yellowstone-Nationalpark haben sich Bakterien und Algen vereint und bilden einen gigantischen, orangefarbenen Biofilm.

Zellmembran roter Blutkörperchen. Die Abstände der aufgebracht Moleküle können variieren, je nach erwünschtem Antihafteffekt.

Einige dieser Beschichtungen sind in Kliniken inzwischen weit verbreitet; andere stecken noch in der Testphase, da ihre Herstellung aufwändig ist oder sie unerwünschte Nebenwirkungen haben. Weitere Studien werden klären müssen, welche dieser Materialien für klinische Anwendungen in Frage kommen.

Ungeachtet der Erfolge mit antimikrobiellen Oberflächen bedarf es alternativer Strategien für die Bekämpfung von Erregerfilmen, insbesondere solcher, die sich trotz Antihafbeschichtung auf Implantaten bilden und daher besonders gefährlich und schwer zu behandeln sind. Ein geeignetes Angriffsziel bietet die schleimige Matrix bakterieller Filme aus Polysacchariden (langkettigen Zuckermolekülen), Proteinen und Nukleinsäuren (DNA), die zum einen als Schutzschild dient: Sie verhindert, dass Antibiotika oder Antikörper des Immunsystems zu den Keimen durchdringen. Darüber hinaus verleiht die Matrix dem Biofilm Struktur, hält den Zellverbund zusammen und sorgt für sicheren Halt. Ohne dieses Gerüst wird der Film instabil und zerbricht in kleinere Zellaggregate oder gar einzelne Zellen, die anfällig für Antibiotika und unsere Immunabwehr sind.

In der Gemeinschaft sind die Bakterien sicher, als Einzelne jedoch leicht verwundbar

Im Waffenarsenal der Forschung befinden sich etwa Enzyme, die Proteine und Zucker in der Matrix spalten und so die schützende Hülle zersetzen. Allerdings unterscheidet sich deren Zusammensetzung bei jedem Bakterium. Therapien auf Basis dieser Enzyme sind daher immer keimspezifisch. Ein womöglich besseres Ziel stellt die DNA der Matrix dar, die offenbar universell ist und durch ein einziges Enzym abgebaut wird: die Nuklease DNase I.

Mehrere klinische Studien untersuchen derzeit, ob DNase I kombiniert mit Antibiotika chronische Mittelohrentzündungen und andere Keimfilminfektionen heilen kann. Erfolgreich behandelt werden so bereits Patienten, die an der Erbkrankheit Mukoviszidose (zystische Fibrose) leiden und sich in einem frühen Stadium einer Lungenerkrankung befinden. Hier scheint die verbesserte Lungenfunktion jedoch in erster Linie nicht im Kollaps des Biofilms begründet. Stattdessen sorgt die DNase I für weniger klebriges Atemwegssekret und erhöht so die Wirksamkeit der Antibiotika.

Eine ganz andere Strategie haben Forscher aus Beobachtungen während der Entwicklung bakterieller Gemeinschaften abgeleitet. Wenn Bakterien einen Film gebildet haben, können sie ihren Zellverbund durch so genannte Dispersion (zu Deutsch: Streuung) wieder auflösen. Verschiedene Ursachen können diesen Prozess in Gang setzen: ein Mangel an Ressourcen (Nährstoffen etwa), Überbevölkerung oder eine instabile Wachstums Umgebung. Dispersion sichert das Überleben von einzelnen Zellen der Gemeinschaft, die dann anderenorts neue Kolonien gründen können.

Außerhalb der Matrix sind die Einzeller schutzlos und lassen sich mit Medikamenten gut bekämpfen. Wie also bringt man filmbildende Erreger dazu, ihre Lebensweise zu ändern und die sichere Gemeinschaft zu verlassen? Wissenschaftler haben verschiedene Trigger identifiziert, die dieses Verhalten auslösen können. So scheinen Mikroorganismen auf besondere Weise zu kommunizieren, wenn es Zeit ist, auszuschwärmen. Versuche mit dem Bakterium *Pseudomonas aeruginosa* – Ursache vieler Krankenhausinfektionen und chronischer Erkrankungen – haben gezeigt,

Manche Erreger produzieren ein leicht modifiziertes Signalmolekül und rufen sich damit wie in einem Dialekt zu: Schwärmt aus!

dass cis-2-Decensäure (eine Fettsäure) als Aufbruchsignal dient. Auch andere Keimfilme lassen sich damit zur Aufgabe bewegen. Bei wenigstens fünf weiteren Bakterienarten sowie Hefe induziert cis-2-Decensäure Dispersion. Es gibt zudem Hinweise, dass manche Erreger leicht modifizierte Versionen dieser Fettsäure produzieren und sich damit gewissermaßen in ihrem Dialekt zurufen: Schwärmt aus! Zwar steckt man hier noch in der experimentellen Laborphase, aber derartige Botenstoffe könnten die Grundlage neuer Behandlungsmethoden bilden.

Schlechte Umweltbedingungen, etwa Sauerstoffarmut oder hohe Konzentrationen an Schwermetallen, können auf andere Weise ebenfalls zur Auflösung von Biofilmen führen. Auf den ersten Blick wirken die Auslöser recht unterschiedlich, haben aber eines gemein: Sie alle triggern Dispersion, indem sie die Menge an zyklischem di-Guanosinmonophosphat (c-di-GMP), einem intrazellulären Signalmolekül,

regulieren. Der c-di-GMP-Pegel bestimmt, wie stark Bakterien an Oberflächen haften; viel c-di-GMP steht für hohe Klebefähigkeit und Matrixproduktion, wenig für mobile Einzeller. Studien belegen, dass Bakterienfilme durch Umweltfaktoren, die das c-di-GMP-Level beeinflussen, bis zu 80 Prozent ihrer Masse verlieren. Doch nicht alle Trigger kommen für medizinische Zwecke in Frage.

Ein möglicher Kandidat ist Stickstoffmonoxid (NO), ein farb- und geruchloses Gas. Unser Immunsystem setzt es zur Abwehr eindringender Keime ein. Zudem wird das Gas verwendet, um die Sauerstoffzufuhr von Menschen zu verbessern, die an pulmonaler Hypertonie (Lungengefäßhochdruck) leiden. Versuche an Biofilmen haben gezeigt, dass Stickstoffmonoxid bei verschiedenen Bakterienarten Dispersion auslöst und zu einem Rückgang der Biomasse um durchschnittlich 63 Prozent führt. In Kombination mit dem Antibiotikum Colistin können bakterielle Filme im Labor sogar nahezu vollständig entfernt werden.

Trotz viel versprechender Ergebnisse bietet Stickstoffmonoxid einige Herausforderungen im Hinblick auf klinische Anwendungen. Es kann toxisch wirken, wenn es in andere Bereiche des Körpers gelangt. Daher muss eine Behandlung von Infektionen mit Stickstoffmonoxid immer lokal begrenzt erfolgen – nicht leicht bei einem gasförmigen Wirkstoff. Forscher entwickeln verschiedene Lösungen hierfür, etwa den Wirkstoff Cephalosporin-3'-diazoniumdiolat. Dieser kombiniert ein Antibiotikum (Cephalosporin) mit einer chemischen Verbindung, die Stickstoffmonoxid abspaltet, sobald es mit dem Enzym β -Lactamase in Kontakt kommt. Keime mit Resistenzen gegen Penicillin oder Ampicillin, die wie Cephalosporin zur Klasse der β -Lactam-Antibiotika gehören, produzieren dieses Enzym typischerweise.

Mangels Antibiotika: Bakterielle Viren gegen Biofilme im ehemaligen Ostblock

Ein weiterer Ansatz im Kampf gegen Biofilme besteht darin, die Erreger ihrerseits zu infizieren. Genau wie Menschen sind Mikroorganismen anfällig für Viren, in diesem Fall so genannte Bakteriophagen. Während solche Viren für uns völlig harmlos sind, infizieren sie Bakterien und töten diese dann oft. Seit Mitte der 1990er Jahre untersuchen Forscher, wie Phagen und Biofilme interagieren und welche Phagen Keime zerstören. Darüber hinaus können nicht letale Viren als Shuttle dienen und Antibiotika oder Enzyme in den Zellverbund einschleusen, die Bausteine der bakteriellen Matrix zersetzen (wie die DNase I). Da es an breiten klinischen Studien mangelt, werden Phagentherapien in den meisten westlichen Ländern (noch) nicht durchgeführt. In einigen Nachfolgestaaten der UdSSR, wo Antibiotika früher knapp waren, behandeln Ärzte Mukoviszidosepatienten jedoch schon seit Langem erfolgreich mit Bakteriophagen (siehe **Spektrum** Oktober 2017, S. 42).

Allerdings ist auch diese Therapie keine Allzweckwaffe. Jeder Phage infiziert und tötet nur einen bestimmten Typ Bakterien. Zudem können Keime gegen die Angriffe der Viren ebenfalls resistent werden.

Um mögliche Resistenzen zu vermeiden, haben Wissenschaftler daher künstliche Shuttles kreiert: Liposomen,

winzige Bläschen mit einer Lipidhülle. Diese Nanotrojaner dringen in Biofilme sowie einzelne Erreger ein und entlassen dort ihre tödliche Fracht, seien es Antibiotika, Matrix zersetzende Enzyme oder andere antibakterielle Substanzen. Als Tarnung dienen den Liposomen Lipide, die auch in der Zellmembran von Bakterien vorkommen. So gelangen sie ungehindert und unerkannt in die Matrix des Keimfilms. Die Methode ist deshalb so elegant, weil die Shuttles mit der Zellmembran verschmelzen und Wirkstoffe direkt in den Erreger injizieren – anstatt den gesamten Körper einer hohen Chemikaliendosis auszusetzen. Liposo-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FOTOLIA / DR. KATERYNA

men werden inzwischen vielfach genutzt, um Infektionen präzise zu bekämpfen.

Neben den beschriebenen Strategien, Biofilme einzudämmen und zu verhindern, gibt es weitere Behandlungsansätze, die Forscher in Laboren rund um den Globus verfolgen. Manche Verfahren befinden sich noch in einem sehr frühen Stadium, andere bereits in der klinischen Phase. Die weltweiten Bemühungen verdeutlichen, wie wichtig der Kampf gegen filmbildende Erreger ist – und gleichzeitig schwierig; insbesondere da sich die Filme oft unterscheiden. Jeder Keim formt Gemeinschaften auf seine Weise, bildet eine bestimmte Version der Matrix oder produziert modifizierte Signalmoleküle und Proteine. Aber wir katalogisieren inzwischen alle bakteriellen Eigenarten und nähern uns so schrittweise dem Ziel, die Mortalitätsrate bei Biofilminfektionen deutlich zu senken. Letztlich wird wohl eine Kombination verschiedener Therapien den Durchbruch im Kampf gegen lebensbedrohliche Keimstädte bringen. ◀

QUELLEN

Barraud, N. et al.: Cephalosporin-3'-Diazoniumdiolates: Targeted NO-Donor Prodrugs for Dispersing Bacterial Biofilms. In: *Angewandte Chemie International Edition* 51, S. 9057–9060, 2012

Koo, H. et al.: Targeting Microbial Biofilms: Current and Prospective Therapeutic Strategies. In: *Nature Reviews Microbiology* 15, S. 740–755, 2017

Lemire, J.A. et al.: Antimicrobial Activity of Metals: Mechanisms, Molecular Targets and Applications. In: *Nature Reviews Microbiology* 11, S. 371–384, 2013

Petrova, O.E., Sauer, K.: Escaping the Biofilm in More than One Way: Desorption, Detachment or Dispersion. In: *Current Opinion in Microbiology* 30, S. 67–78, 2016

Stoodley, P. et al.: Biofilms as Complex Differentiated Communities. In: *Annual Review of Microbiology* 56, S. 187–209, 2002

GEDÄCHTNIS EIN NETZ VON ERINNERUNGEN

Bereits vor mehr als 100 Jahren vermuteten Forscher, dass jedes neue Erlebnis eine physische Gedächtnisspur im Gehirn hinterlässt. Doch erst jetzt fanden sie heraus, wie Neurone Erinnerungen zu einem Gesamtbild verknüpfen.



Alcino J. Silva ist Direktor des Integrative Center for Learning and Memory an der University of California in Los Angeles. Er untersucht mit seiner Arbeitsgruppe die molekularen Mechanismen von Gedächtnisprozessen, die Ursachen von Gedächtnisstörungen sowie entsprechende Therapiemöglichkeiten.

► spektrum.de/artikel/1547041

Manche Menschen haben ein phänomenales Gedächtnis: Sie erinnern sich etwa an ein bestimmtes Gesicht, an einen einzelnen Vogel oder an die Details einer Landschaft, die sie vor Jahren einmal gesehen haben. Isolierte Erinnerungen sind im Alltag aber nicht besonders nützlich – wir müssen sie stets in den richtigen Kontext setzen. So reicht es beispielsweise nicht allein zu wissen, wie ein Löwe oder eine Schlange aussieht. Wir müssen zudem berücksichtigen, dass wir ihnen in der afrikanischen Savanne besser aus dem Weg gehen sollten, während wir uns im Zoo in aller Ruhe ihre Machtkämpfe ansehen können.

Auch den weniger exotischen Gefahren des Alltags können wir nur entgehen, wenn wir Erinnerungen dauerhaft verknüpfen können. Wollen wir zum Beispiel beurteilen, ob es sinnvoll ist, eine Eigentumswohnung zu kaufen, müssen wir uns daran erinnern können, wie viel Geld wir zur Verfügung haben. Daher speichert das Gehirn die Gedächtnisinhalte nie getrennt ab; es fasst sie stets zu einem zusammenhängenden Bild zusammen.

Erst allmählich beginnen Neurowissenschaftler zu verstehen, wie das im Detail abläuft. Bisher ergründeten sie vor allem, wie das Gehirn Erinnerungen abspeichert, wieder aufruft und verändert. Doch das geschieht nie isoliert: Wenn uns eine vergangene Szene in den Sinn kommt, ruft dies Gedanken an eine andere hervor und so weiter. So entstehen komplexe Sequenzen von Erinnerungen, die uns helfen, Zusammenhänge zu erfassen und kommende Ereignisse vorzusehen.

Als ich mit meinem Team an der University of California in Los Angeles Ende der 1990er Jahre begann, die Facet-

ten des menschlichen Gedächtnisses zu erforschen, gab es weder geeignete Methoden noch hatten wir das nötige Grundwissen dafür. Dennoch puzzelten wir uns gemeinsam mit Kollegen nach und nach immer mehr Erkenntnisse zu einem Gesamtbild zusammen.

Ein erster wichtiger Schritt war die Entdeckung der Allokation (Zuweisung) von Gedächtnisinhalten: Das Gehirn weist erlernte Informationen bestimmten Neuroengruppen zu, und zwar nach festgelegten Regeln. Dieses wichtige Prinzip der Gedächtnisbildung entdeckten wir eher zufällig, nachdem ich mich 1998 mit Mike Davis von der Yale University in New Haven (Connecticut) unterhalten hatte. Der heute in Atlanta an der Emory University forschende Neurowissenschaftler berichtete mir von einer Studie an gentechnisch manipulierten Ratten, die in einem kleinen Abschnitt der Amygdala – eines wichtigen Zentrums des emotionalen Gedächtnisses – verstärkt ein Protein namens CREB bildeten. Zu meiner Überraschung verbesserte dieser Kniff das Erinnerungsvermögen der Nager an emotionale Ereignisse deutlich.

Wie wir von vorangegangenen Experimenten bereits wussten, ist das CREB-Protein für die stabile Speicherung von Erinnerungen unabdingbar, da es die Aktivität wichtiger »Gedächtnis-Gene« reguliert. Das Prinzip dahinter: Während des Lernens werden Synapsen strukturell verstärkt. Das CREB-Protein dient dabei als eine Art molekularer Architekt. Ohne seine Hilfe würden die meisten Erfahrungen rasch wieder vergessen.

In den Monaten nach meinem Besuch in Yale fragte ich mich immer wieder, ob die Erinnerung womöglich in ebenjenen Neuronen gespeichert wurde, die besonders



KOPF: GETTY IMAGES / DIGITAL VISION / ANDREAS KUEHN,
NETZWERK: DEMIO / GETTY IMAGES / ISTOCK,
COMPOSING: SCIENTIFIC AMERICAN

viel CREB-Protein enthielten. Schließlich hatten Davis und sein Team die Menge des Moleküls lediglich in einem winzigen Bereich der Amygdala erhöht. Wäre es möglich, dass CREB nicht nur Erinnerungen stabilisiert, sondern dass die das Protein vermehrt bildenden Neurone bevorzugt an der Gedächtnisbildung mitwirken?

Wir gingen daher der Funktion des Proteins weiter auf den Grund – und zwar in zwei bekannten Gedächtnisarealen des Gehirns: in der Amygdala, die vor allem beteiligt ist, wenn wir uns an emotionale Erlebnisse erinnern, sowie im Hippocampus, der unter anderem eine mentale Karte unserer Umwelt speichert.

Meine damalige Mitarbeiterin Yu Zhou veränderte eine kleine Gruppe von Neuronen in der Amygdala von Mäusen so, dass sie sowohl mehr CREB produzierten als auch zusätzlich ein Protein, das es uns erlaubte, die CREB-Neurone zu einem beliebigen Zeitpunkt »stillzulegen«. Als wir allein die Nervenzellen mit viel CREB ausschalteten, funktionierte das emotionale Gedächtnis der Mäuse nicht mehr richtig. Das bewies: Um emotionale Ereignisse im Gedächtnis zu speichern, sind insbesondere Nervenzellen mit viel CREB vonnöten. Offenbar entscheidet seine Konzentration darüber, welche Zellen eine bestimmte Information speichern. Damals wussten wir allerdings noch nicht, welcher physiologische Mechanismus dem zu Grunde liegt.

Ein molekularer Lotse für Gedächtnisinhalte: Das CREB-Protein

Um das herauszufinden, veränderte Zhou zunächst wiederum Amygdalaneurone gentechnisch so, dass sie mehr CREB produzierten. Mit Hilfe von Mikroelektroden prüfte sie dann deren Erregbarkeit. Und tatsächlich waren die modifizierten Zellen leichter aktivierbar als unveränderte.

Anschließend untersuchte Zhou die Synapsen der Neurone. Wie schon lange bekannt, werden synaptische Verbindungen verstärkt, wenn wir Erinnerungen abspeichern. Die Neurowissenschaftlerin erzeugte bei Mäusen angstbesetzte Erinnerungen und verglich dann die Stärke

der Synapsen von Amygdalazellen mit erhöhter CREB-Expression mit solchen, die eine normale Menge des Proteins enthielten. Dazu stimulierte sie die Synapsen mit einem schwachen elektrischen Stromimpuls und zeichnete deren Reaktion mit Mikroelektroden auf. Tatsächlich verfügten die CREB-Neurone über stärkere Synapsen als die Vergleichszellen. Ganz offensichtlich haben die manipulierten Zellen die emotionale Erinnerung gespeichert.

Sheena A. Josselyn, heute an der University of Toronto, und ihrem Team gelang es später sogar, den Speicherort für angstbesetzte Erinnerungen in der Amygdala künstlich vorzugeben. Die Forscher veränderten die Zellen so, dass sie einen bestimmten Typ von Ionenkanal enthielten, der die Neurone leichter erregbar machte. Diese Zellen speicherten dann die Erinnerungen.

An entsprechenden Orten des Parcours feuerten die manipulierten Neurone eher

Ähnliches zeigte der Neurowissenschaftler Albert Lee vom Howard Hughes Medical Institute in Ashburn (Virginia). Er steigerte vorübergehend die Erregbarkeit einiger Hippocampusneurone von Versuchstieren, während diese sich an bestimmten Orten an einem Pfad aufhielten. Liefen die Tiere später erneut durch den Parcours, feuerten an den entsprechenden Orten die manipulierten Zellen mit größerer Wahrscheinlichkeit.

Einen weiteren Beweis dafür, dass Erinnerungen in Nervenzellen mit hohem CREB-Gehalt gespeichert werden, lieferte ein Experiment mit einer innovativen Technik namens Optogenetik. Sie erlaubt es Forschern, Nervenzellen mit Licht einer bestimmten Wellenlänge spezifisch anzuregen oder zu hemmen. Nachdem wir wieder einige Amygdalaneurone von Mäusen so verändert hatten, dass sie mehr CREB bildeten, versahen wir die Zellen zusätzlich mit dem Gen für den Ionenkanal Channelrhodopsin 2, der sich durch blaues Licht aktivieren lässt.

Strahlten wir nun solches Licht auf die Nervenzellen mit hoher CREB-Konzentration, löste das typische Angstreaktionen aus – die Tiere schienen sich an ein vorangegangenes beängstigendes Ereignis zu erinnern. Setzten wir dagegen Neurone mit Channelrhodopsin 2, aber geringerer CREB-Konzentration blauem Licht aus, reagierten die Tiere nicht. Offenbar war die Furcht auslösende Erinnerung nur in den Zellen mit großen Mengen des Proteins gespeichert.

Doch wie verknüpft das Gehirn verschiedene Gedächtnisinhalte über die Zeit hinweg? Offenbar bestimmt CREB, welche Zellen eine Erinnerung speichern. Deshalb nahmen wir an, dass dieses Prinzip auch beteiligt ist, wenn Gedächtnisinhalte verknüpft werden. Wir nannten die Idee Allocate-to-Link-Hypothese (Verknüpfung durch Zuweisung): Neue Erinnerungen werden jeweils einer Gruppe von Nervenzellen zugewiesen, die besonders viel CREB enthalten. Weil diese leichter erregbar sind, beteiligen sie sich auch eher am Speichern einer weiteren Erfahrung.

AUF EINEN BLICK FEINMECHANIK DES ERINNERNS

- 1** Das Gehirn verteilt Gedächtnisinhalte von Erlebnissen nicht zufällig auf verschiedene Nervenzellen. Vielmehr bestimmt die Konzentration des Proteins CREB, welche Neurone die Information speichern.
- 2** Kurz aufeinander folgende Erlebnisse werden miteinander verknüpft. Die Erinnerung an eines davon ruft meist auch eine an das andere hervor. Das Gehirn speichert beides in teils identischen Neuronengruppen.
- 3** Im Alter lässt diese Fähigkeit nach. Aber es ist Forschern gelungen, sie künstlich wieder zu stimulieren, indem sie die Erregbarkeit von beteiligten Nervenzellen mit einem technischen Kniff steigerten.

Kommt uns später die eine Erinnerung wieder in den Sinn, aktiviert das oft zugleich die andere.

Der Hintergrund unserer Hypothese: Zwei Erlebnisse, die das Gehirn kurz nacheinander abspeichert, werden mit höherer Wahrscheinlichkeit im Gedächtnis miteinander verknüpft als solche, die zeitlich weit auseinanderliegen. Ist das Zeitintervall zwischen den Erlebnissen zu lang, profitiert die zweite Erinnerung nicht mehr von der gesteigerten Erregbarkeit der mit der ersten Erinnerung befassten Nervenzellen. Daher wird sie in einer anderen Gruppe von Neuronen abgelegt. Dieses Prinzip ist durchaus sinnvoll. Denn zwei Ereignisse, die innerhalb eines Tages stattfinden, haben in der Regel mehr miteinander zu tun als solche mit einer Woche Abstand.

Déjà-vu im Tierlabor: Wann ein Stromschlag rückwirkend Angst macht

Wie lässt sich unsere Associate-to-Link-Hypothese überprüfen? Die Neurowissenschaftlerin Denise Cai, damals gerade neu in unserem Team, hatte eine raffinierte Idee. Sie setzte Mäuse erst in einen bestimmten Käfig und fünf Stunden später in einen anderen. Im zweiten Käfig gab sie den Tieren einen leichten Stromschlag, der sie erstarren ließ – ein typisches Zeichen für Angst. Wie erwartet, zeigten die Mäuse später dieses Verhalten immer dann, wenn sie in die mit dem Stromschlag assoziierte Kammer gesetzt wurden. Überraschenderweise reagierten die Tiere ähnlich, wenn sie wieder in den ersten Käfig kamen, in dem sie keinerlei Stromstöße erhalten hatten. Offenbar war die Erinnerung daran mit derjenigen an den zweiten Käfig verknüpft worden. Lagen allerdings statt nur fünf Stunden sieben Tage zwischen dem Besuch des ersten und des zweiten Käfigs, verbanden sie die Erlebnisse nicht miteinander. Sie verhielten sich bei einem erneuten Besuch im neutralen Käfig völlig normal.

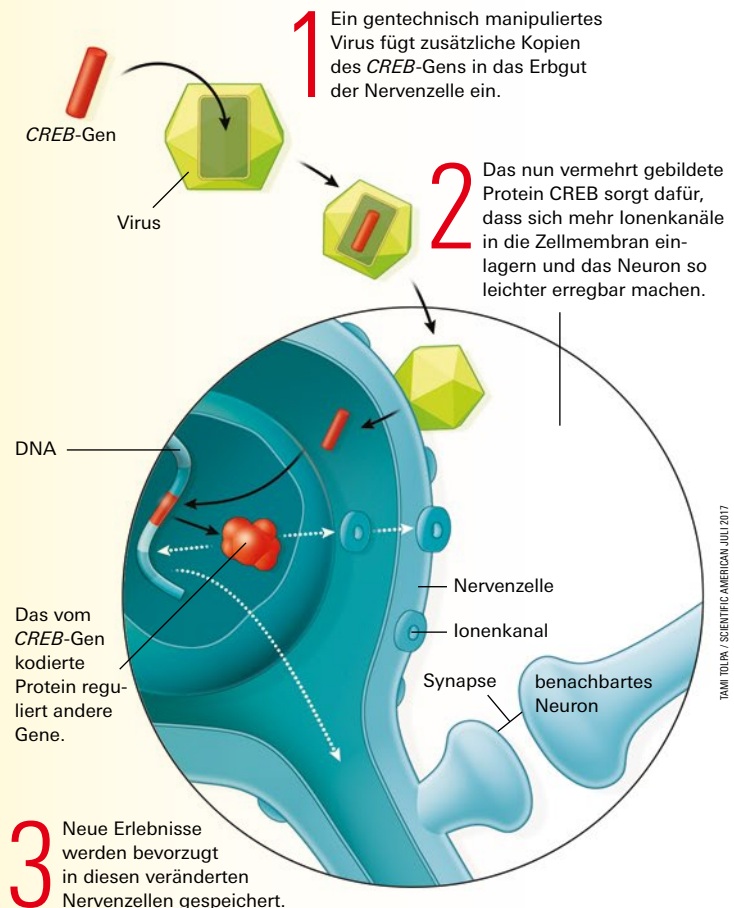
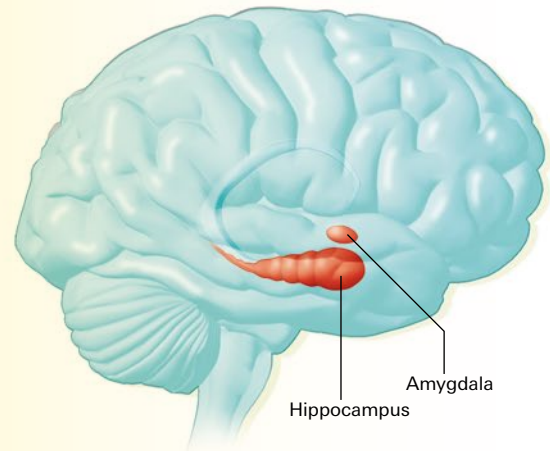
Diese Beobachtung war zwar hochinteressant, klärte aber noch nicht, ob die kurz aufeinander folgenden Erlebnisse in Gruppen von teilweise denselben Neuronen gespeichert wurden. Um das zu testen, hätten wir die Nervenzellen direkt beobachten müssen. Doch das war mit den damals verfügbaren Methoden noch nicht möglich. Für einen Blick ins Gehirn hätten wir den Kopf der Tiere auf einem feststehenden, großen Mikroskop fixieren müssen – ein Verfahren, das sich natürlich nicht für Verhaltensstudien eignet.

Glücklicherweise hörte ich zu dem Zeitpunkt einen Vortrag von Mark Schnitzer von der Stanford University (Kalifornien) über ein miniaturisiertes Mikroskop, das er mit seinem Team entwickelt hatte, um die Aktivität von Neuronen in frei umherlaufenden Mäusen zu beobachten. Das nur rund drei Gramm schwere Gerät ließ sich wie ein Hut auf dem Kopf der Tiere befestigen (Foto S. 59). Es war genau das, was wir brauchten.

Wir waren so begeistert von dieser Idee, dass wir eine abgewandelte Version davon konstruierten. Ähnlich wie das »Miniskop« des Schnitzer-Teams verfügt auch unser Gerät über eine winzige Linse, die sich sehr nahe an den Hirnzellen implantieren lässt. Es wird auf eine kleine Trägerplatte gesteckt, die am Schädel des Tieres befestigt ist.

Wie Erinnerungen entstehen

An der Gedächtnisbildung sind ganz verschiedene Hirnareale beteiligt. Die Amygdala etwa verarbeitet und speichert vor allem emotionale Inhalte, während der Hippocampus unter anderem Ortsinformationen kodiert. Die Konzentration des Proteins CREB in den Zellen bestimmt, welche Neurone daran mitwirken. Forschern gelang es, den Speicherort für Erinnerungen künstlich vorzugeben, indem sie die CREB-Menge in bestimmten Zellen erhöhten.



Mit dieser winzigen Apparatur beobachteten wir die neuronale Aktivität im Gehirn gentechnisch manipulierter Mäuse, die ein Gen für einen so genannten Kalziumindikator trugen. Ihre Nervenzellen begannen zu fluoreszieren, sobald deren Aktivität und damit auch der Kalziumspiegel anstieg. Wir konzentrierten uns dabei auf die Region CA1 im Hippocampus, da sie eine besondere Bedeutung für das Ortsgedächtnis hat, das wir in unseren Verhaltensstudien untersuchten.

Wir setzten die Versuchstiere nacheinander in die beiden Käfige – zuerst in den »neutralen« und anschließend in

den Käfig, in dem sie einen Stromschlag erhielten. Mit Hilfe der kleinen Mikroskope überprüften wir, ob das zeitliche Intervall zwischen den beiden Erfahrungen einen Einfluss darauf hatte, welche Neurone jeweils aktiviert wurden.

Die Ergebnisse übertrafen unsere Erwartungen. Wenn die Mäuse ihre Erinnerungen an die beiden Kammern verknüpften, wurden viele der CA1-Neurone, die beim Besuch der ersten Kammer aktiv waren, erneut erregt, wenn die Tiere die zweite Kammer erkundeten. Bei einem Intervall von bis zu fünf Stunden bildete sich die Erinnerung an beide Käfige in überlappenden Neuronengruppen.

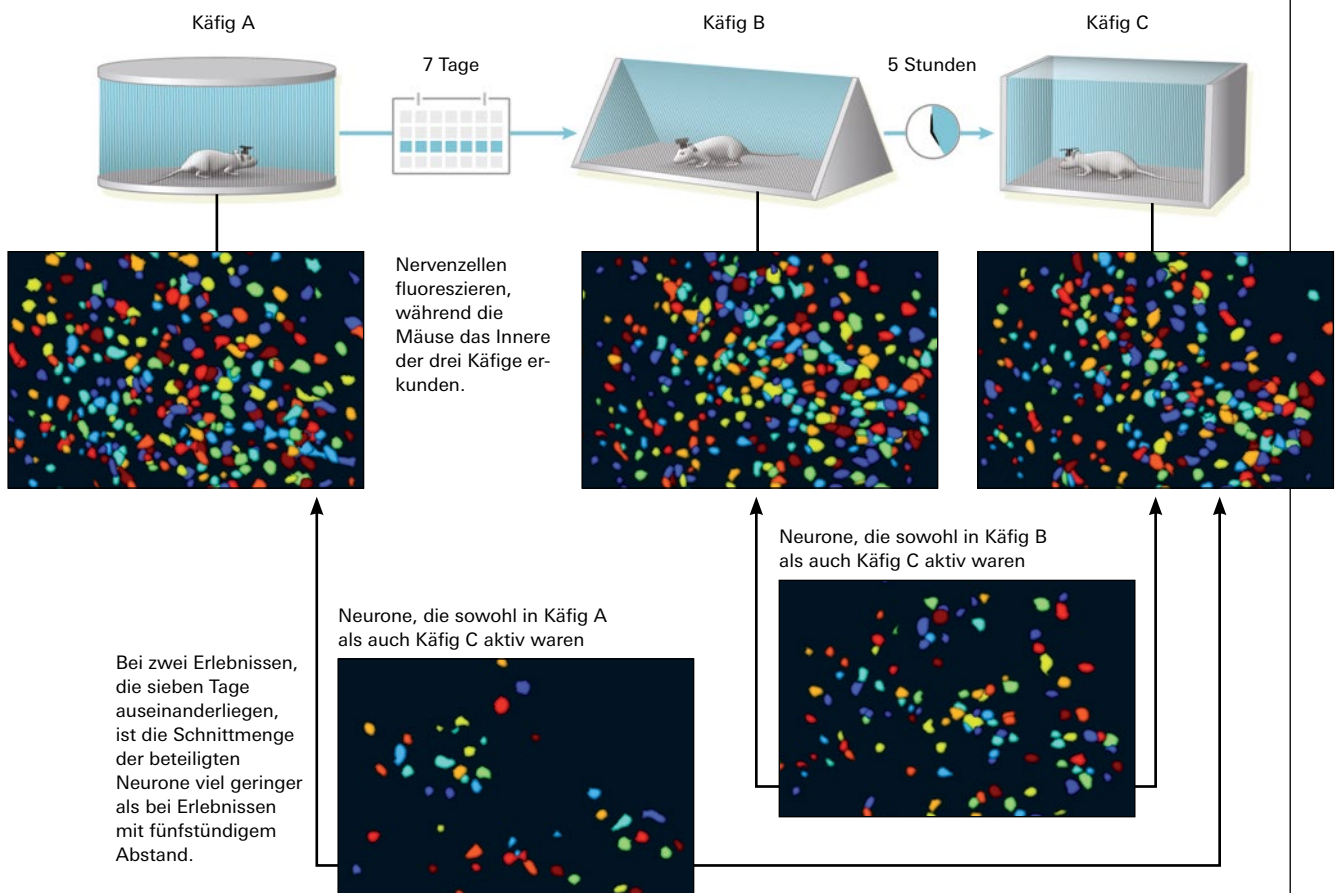
Wenn sich Erinnerungen verbinden

Wie Experimente zeigten, verknüpfen Mäuse, die nacheinander zwei Käfige erkunden, beide Orte in ihrem Gedächtnis. Dies passiert allerdings nur, wenn der Zeitabstand zwischen den Besuchen maximal fünf Stunden beträgt (Käfig B und C im Bild unten). Liegen sieben Tage dazwischen

(A und B sowie A und C), verbinden die Tiere die Erinnerungen nicht.

Forscher beobachteten mit Hilfe eines auf dem Kopf der Mäuse befestigten miniaturisierten Mikroskops die Aktivität der beteiligten Nervenzellen. Die Tiere trugen ein künstlich eingebrachtes Gen für

einen Kalziumindikator, der die Neurone zum Fluoreszieren brachte, sobald deren Aktivität und damit auch der Kalziumspiegel anstieg. So sahen die Forscher, dass die »gedanklich« verknüpften Erlebnisse teilweise in denselben Neuronengruppen abgespeichert wurden.



Betrug der zeitliche Abstand dagegen sieben Tage, war die Schnittmenge zwischen den beteiligten Nervenzellen deutlich kleiner (siehe »Wenn sich Erinnerungen verbinden«, links).

Doppelt hält besser: Erinnerungen werden sowohl übereinander als auch mehrfach gespeichert

Damit war unsere Hypothese bestätigt: Gedächtnisinhalte werden miteinander verknüpft, indem sie in teilweise identischen Neuronengruppen gespeichert werden. Wird später eines der beiden Zellensembles reaktiviert, so stimuliert dieses auch das andere und ruft damit die zugehörige Erinnerung hervor.

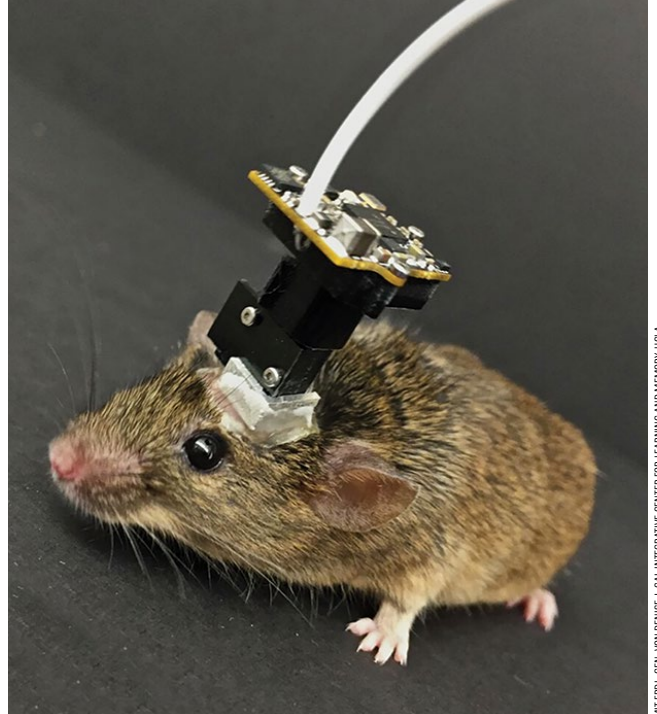
Die Arbeitsgruppe von Sheena Josselyn ging noch einen Schritt weiter. Wenn die Reaktivierung der ersten Erinnerung die der zweiten anstößt, müssten sich die beiden Erinnerungen folglich gemeinsam verstärken lassen. Genau das testeten die Forscher. Statt jedoch Mäuse in verschiedene Käfige zu setzen, brachten sie den Tieren bei, auf zwei verschiedene Töne zu reagieren. Und tatsächlich stärkte das Training mit dem ersten Ton die Erinnerung an den zweiten, wenn die Übungsstunden im Abstand von eineinhalb bis sechs Stunden stattfanden. Lagen 18 bis 24 Stunden dazwischen, trat der Effekt nicht ein.

Zuletzt interessierte uns, ob die Fähigkeit, verschiedene Erinnerungen miteinander zu verknüpfen, mit dem Alter nachlässt. Denn im Lauf der Zeit bilden die Nervenzellen immer weniger CREB, wodurch unter anderem die Region

Betagte Mäuse vermochten ihre Erlebnisse in verschiedenen Käfigen nicht mehr zu verknüpfen

CA1 des Hippocampus zunehmend schwerer erregbar wird. Denise Cai wiederholte also ihre Experimente mit älteren Mäusen. Ich weiß noch genau, wie sie atemlos in mein Büro stürzte, um mir von den Ergebnissen zu erzählen. Die betagten Tiere erinnerten sich zwar an jeden einzelnen der besuchten Käfige, es gelang ihnen aber kaum noch, die Erinnerungen miteinander zu verbinden, selbst wenn nur fünf Stunden dazwischenlagen – eine Zeitspanne, die jüngeren Mäusen keinerlei Probleme bereitete. Auch zeigten die Bilder des Mikroskops, dass sich die beteiligten Neuronengruppen im Gehirn deutlich weniger überlappten.

Das ermutigte uns, weiter nachzuforschen. Könnten wir vielleicht die Erregbarkeit von CA1-Neuronen älterer Mäuse künstlich erhöhen und so die Erinnerungen an die beiden Käfige doch zusammenbringen? Um das herauszufinden, nutzten wir eine Technik namens DREADD (designer receptors exclusively activated by designer drugs), die es erlaubt, mit Hilfe gentechnisch modifizierter Oberflächenrezeptoren die Zellfunktion zu verändern. Während die Mäuse die beiden Käfige erkundeten, aktivierten wir die DREADD-Rezeptoren in jeweils derselben Gruppe von Neuronen in der CA1-Region. Das machte die Nervenzellen



MIT FRODO, GEN. VON DENISE J. CAI, INTEGRATIVE CENTER FOR LEARNING AND MEMORY, UCLA

Diese Maus trägt auf ihrem Kopf ein miniaturisiertes Mikroskop. Mit ihm können Forscher in Echtzeit beobachten, wie Hirnzellen Gedächtnisinhalte speichern.

leichter erregbar, wodurch sich die Erinnerungen an die beiden Erfahrungen verknüpfen sollten.

Ich muss gestehen, dass ich anfangs eher skeptisch war, schließlich gab es eine ganze Reihe von Gründen, die den Erfolg des Experiments unwahrscheinlich machten: An Ortserinnerungen sind nicht nur CA1-Neurone beteiligt, sondern viele Millionen Zellen, die in mehreren miteinander verbundenen Hirnregionen verteilt liegen. So könnten gleich mehrere oder sogar alle beteiligten Regionen vom Alterungsprozess betroffen sein. Und selbst wenn wir die Erregbarkeit in einem Teil der CA1-Neurone erfolgreich erhöhen würden, wären es vielleicht nicht die richtigen.

Aber wir hatten Glück. Tatsächlich gelang es uns, die Erinnerungen an die beiden Käfige künstlich überlappenden Neuronengruppen zuzuweisen und somit zu verknüpfen. So gaben wir den gealterten Tieren eine wichtige Gedächtnisfunktion zurück. Mit einem wachsenden Arsenal experimenteller Techniken zum Messen und Steuern neuronaler Aktivität gelingt es uns und anderen Arbeitsgruppen allmählich, die Mechanismen aufzuklären, mit denen unser Gehirn Informationen speichert. Wie wir in den letzten Jahren gemerkt haben, ist bei der modernen Gedächtnisforschung neben geeigneten Techniken vor allem eines gefordert: eine gute Vorstellungskraft. ◀

QUELLEN

Cai, D. J. et al.: A Shared Neural Ensemble Links Distinct Contextual Memories Encoded Close in Time. In: *Nature* 534, S. 115–118, 2016

Josselyn, S. A. et al.: Finding the Engram. In: *Nature Reviews Neuroscience* 16, S. 521–534, 2015

Rashid, A. J. et al.: Competition between Engrams Influences Fear Memory Formation and Recall. In: *Science* 353, S. 383–387, 2016

Rogerson, T. et al.: Synaptic Tagging during Memory Allocation. In: *Nature Reviews Neuroscience* 15, S. 157–169, 2014

Spektrum
der Wissenschaft

DIE WOCHE

DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

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)



www.spektrum.de/abonnieren



FREISTETTERS FORMELWELT UNFÄHIG ZUR REGELLOSIGKEIT

Die Mathematik kann zwar mit dem Zufall rechnen, aber produzieren kann sie ihn nicht.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1547043](http://spektrum.de/artikel/1547043)

Die Mathematik hat sich als einmaliges Werkzeug zur Beschreibung der Natur erwiesen. Wenn wir die Welt um uns herum verstehen wollen, müssen wir sie mathematisch betrachten. Dieser abstrakte Blick offenbart uns Zusammenhänge, die wir sonst nicht sehen könnten. Aber eine Aufgabe kann die Mathematik aus prinzipiellen Gründen nicht lösen. Die folgende Formel zeigt einen respektablen Versuch, der letztlich scheitern muss:

$$\begin{aligned} s_0 &= s^2 \bmod n \\ s_{i+1} &= s_i^2 \bmod n \end{aligned}$$

Es handelt sich dabei um den so genannten Blum-Blum-Shub-Generator zur Erzeugung zufälliger Zahlen. Man beginnt mit einem Startwert s und berechnet daraus mit der Formel der ersten Zeile den Wert s_0 . Der Ausdruck »mod n « steht für den Rest, der bei einer Division durch n übrig bleibt. Die beiden Parameter s und n dürfen keinen gemeinsamen Teiler haben, und n muss das Produkt zweier Primzahlen sein, die sich beide in der Form $4k+3$ darstellen lassen.

Mit dem erhaltenen Wert für s_0 berechnet man nach dem Rezept in der zweiten Zeile beliebig viele weitere Zahlen. Wenn s und n ausreichend groß sind, springen die Werte wild hin und her, wie zufällig. Aber echt zufällig können sie nicht sein. Denn ein mathematischer Algorithmus wie der obige läuft zwangsläufig immer gleich ab und kann daher ebenso zwangsläufig keine wirklich zufälligen Zahlenreihen erzeugen. Deswegen heißen solche mathematischen Methoden korrekterweise Pseudozufallszahlengeneratoren.

Nützlich sind sie trotzdem. Wählt man den Modul n (und die Primzahlen, deren Produkt er ist) groß genug, dann ist es enorm schwer (und in der Praxis unmöglich), aus der Reihe an Pseudozufallszahlen auf die Parameter zu schließen, die zu ihrer Erzeugung geführt haben. Ohne das Wissen über n und s kann man die

Zahlenreihe nicht reproduzieren, woraus sich vielfältige Anwendungen in der Kryptologie ergeben.

Für verschiedene Anwendungen haben Mathematiker und Informatiker eine ganze Reihe an solchen Generatoren entwickelt, die Namen wie »Mersenne-Twister«, »inverser Kongruenzgenerator« oder »Xorshift« tragen. Alle diese Algorithmen – und alle, die Mathematiker sich noch ausdenken mögen – erzeugen aber stets nur Pseudozufallszahlen, denn sie sind deterministisch: Sie liefern bei gleichen Parametern und Ausgangsbedingungen immer wieder das exakt gleiche Ergebnis. Ein echter, nichtdeterministischer Zufallszahlengenerator erzeugt dagegen auch bei gleichen Anfangszuständen unterschiedliche Ergebnisse.

So etwas kann nur in der Natur stattfinden. Wer daher echte Zufallszahlen haben will – etwa für besondere statistische Auswertungen oder Glücksspiele –, muss auf physikalische Generatoren zurückgreifen. Dazu kann man zum Beispiel das atmosphärische Rauschen benutzen, also die vielen natürlichen Störungen, die beim Empfang von Radiowellen auftreten, und diese in Zahlen umrechnen. Oder die Signale eines Geigerzählers: Nach der Quantenmechanik ist der konkrete Zeitpunkt des Zerfalls radioaktiver Atome prinzipiell nicht vorhersagbar. Die Strahlung einer radioaktiven Quelle kann daher ebenfalls Ausgangspunkt echter Zufallszahlen sein.

Bei der Ziehung der Lottozahlen benutzt man ein mechanisches System, um sicherzustellen, dass sich die Gewinnzahlen nicht vorhersagen oder reproduzieren lassen. All diese Methoden sind zwar aufwändig und langsam verglichen mit den eleganten und schnellen Algorithmen der Mathematik. Aber wenn man echten Zufall haben will, dann kann man sich in diesem speziellen Fall ausnahmsweise nicht auf die Mathematik verlassen. Sie kann viel leisten – aber das per Definition absolut Unregelmäßige in eine deterministische Formel zu fassen, ist schlicht unmöglich.

SERIE

Grenzfragen der Teilchenphysik

Teil 1: Februar 2018

Schöne neue Teilchenwelt

Guy Wilkinson

Teil 2: März 2018

Teilchen, Antiteilchen und der kleine Unterschied

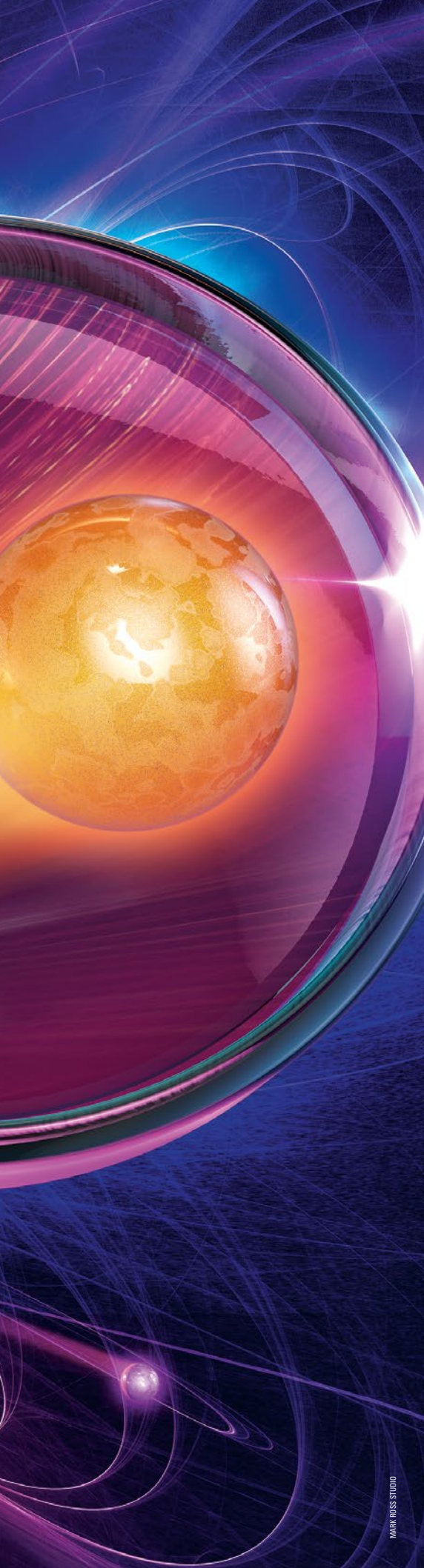
Ulrich Uwer und Johannes Albrecht

Teil 3: April 2018

Den Neutrinos auf der Spur

Clara Moskowitz





GROSSPROJEKT DEN NEUTRINOS AUF DER SPUR

SERIE: TEILCHENPHYSIK Eine Teilchenschleuder soll die flüchtigen Partikel erzeugen und quer durch die USA zu einem riesigen Detektor schießen. Physiker erhoffen sich davon präzise Messungen der Massen der drei Neutrino-typen. Letztlich könnten sie damit sogar bei der Lösung grundlegender Rätsel helfen, etwa der Frage, warum nach dem Urknall mehr Materie als Antimaterie entstand.



Clara Moskowitz ist als leitende Redakteurin bei »Scientific American« zuständig für das Ressort Weltraum und Physik. Sie studierte Astronomie und Physik an der Wesleyan University in Middletown (Connecticut) sowie Wissenschaftsjournalismus an der University of California in Santa Cruz.

► [spektrum.de/artikel/1547067](https://www.spektrum.de/artikel/1547067)

Während ich in einer riesigen Höhle stehe und über eine Balustrade auf eine Fülle technischer Geräte hinunterblicke, jagen durch jeden Zentimeter meines Körpers sekundlich Billionen nahezu lichtschnelle Neutrinos. Allerdings spüre ich davon nichts – die fast masselosen Teilchen durchqueren den leeren Raum zwischen meinen Atomen, ohne eine Spur zu hinterlassen. Selbst in der busgroßen Metallkiste inmitten der Höhle kollidiert nur einige Male pro Tag ein Neutrino mit einem Atom und setzt geladene Teilchen frei, von denen sich die Physiker neue Erkenntnisse erhoffen.

Der Apparat gehört zum Experiment NOvA (NuMI Off-Axis Electron Neutrino Appearance) am Fermi National Accelerator Laboratory, kurz Fermilab, in Batavia (Illinois). Ein ähnlicher, aber noch größerer Detektor befindet sich 800 Kilometer entfernt in Minnesota unter der Erde; er fängt Neutrinos auf, die das erste Gerät und die unterirdische Wegstrecke zwischen beiden Detektoren passiert haben. NOvA hält seit seiner Inbetriebnahme 2014 den Langstreckenrekord für Neutrinoexperimente, ist aber die Grundlage für etwas noch viel Gewaltigeres: DUNE, das Deep Underground Neutrino Experiment. DUNEs Ausgangspunkt ist das Fermilab-Projekt NuMI (kurz für Neutrinos at the Main Injector). Ein Beschleuniger liefert energiereiche Protonen, die beim Auftreffen auf ein Graphitstück einen intensiven Strahl von Neutrinos erzeugen. Dieser soll dann unterirdisch 1300 Kilometer von Illinois bis nach South Dakota zurücklegen. Von der um 500 Kilometer längeren Strecke erhoffen sich die Forscher deutlichere Effekte als bei NOvA.

DUNE ist das ehrgeizigste Teilchenexperiment auf amerikanischem Boden, seit der Bau des SSC (Superconducting Super Collider) in den 1990er Jahren eingestellt wurde. DUNE soll nach 2020 anlaufen, 1,5 Milliarden Dollar kosten, mindestens 20 Jahre dauern und mehr als tausend Forscher aus 30 Ländern einbeziehen. Zum ersten Mal wird sich das Kernforschungslabor CERN an einem Projekt außerhalb Europas beteiligen. »Wir wollen für

Neutrinos erreichen, was dem Large Hadron Collider LHC beim CERN mit der Entdeckung des Higgs-Teilchens gelungen ist«, meint der Brite Mark Thomson von der University of Cambridge, der zum Führungsstab von DUNE gehört. »Wir glauben, wir stehen kurz vor einer Umwälzung der Teilchenphysik.«

Neutrinos wecken so kühne Erwartungen, weil sie nicht ganz in das ansonsten ungemein erfolgreiche Standardmodell der Teilchenphysik passen. Diesem zufolge müssten Neutrinos masselos sein, doch um die Jahrtausendende ergaben Experimente in Kanada und Japan, dass sie eine winzige Masse tragen – und dafür liefert das Standardmodell keine Erklärung.

Seit einigen Jahren richten sich immer größere Hoffnungen auf Neutrinos als Brücke zu einer neuen Physik, denn bisher haben Forscher mit dem LHC keine Teilchen jenseits des Standardmodells entdeckt; auch alle Versuche, exotische Partikel zur Erklärung der im Kosmos dominanten Dunklen Materie zu finden, blieben ergebnislos. »Wir wissen, dass das Standardmodell unvollständig ist«, sagt Fermilab-Neutrino-Physiker Stephen Parke. »Manche verwetten ihre Karriere auf den LHC. Wir setzen auf die Neutrinos.«

Neutrinos haben für eine Überraschung nach der anderen gesorgt – und werden das weiter tun

Einen Tag nach meinem Besuch der NOvA-Höhle spreche ich im Fermilab-Hauptgebäude mit Stephen Parke und dem Theoretiker André de Gouvêa von der Northwestern University in Evanston (Illinois). Wir sitzen im leeren Büro des früheren Fermilab-Direktors Leon Lederman. Er schuf die Grundlage für DUNE, indem er eine Methode entwickelte, mit einem Teilchenbeschleuniger einen Neutrinostrahl zu erzeugen. Damit gelang 1962 der Nachweis, dass es mehr als eine Sorte solcher Teilchen gibt, was Lederman später einen Nobelpreis bescherte. Wie Parke und de Gouvêa einräumen, hat sich das Gebiet zwar seither enorm entwickelt, gibt aber weiter Rätsel auf. »Mit Neutrinos ist das so eine Sache«, meint Parke. »Je mehr man versteht, desto mehr Fragen tauchen auf.«

Parke, ein gebürtiger Neuseeländer, geriet in den Bann der Neutrinos, als er Anfang der 1970er Jahre ein Aufbaustudium in den USA begann. In den folgenden Jahrzehnten verloren die Teilchen ihr Image als eintönige Gebilde ohne Masse. »Es gab eine Revolution nach der anderen«, schwärmt Parke. »Die Frage ist: Wird das so weitergehen?« Er und de Gouvêa sind davon felsenfest überzeugt. »Wir haben erst angefangen, die Eigenschaften der Teilchen genauer zu messen«, betont de Gouvêa. »Wir kennen ihre Massen nicht; es könnte neue Neutrinentypen geben, die vielleicht ausschließlich mit unbekanntem Teilchen wechselwirken.«

DUNE wird sich auf die so genannte Oszillation konzentrieren – auf die bizarre Neigung der Neutrinos, ihre Identität zu wechseln. Sie kommen in drei Varianten oder Flavours vor: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Diese erzeugen bei der Wechselwirkung mit den Atomen eines Detektors jeweils unterschiedliche Endprodukte: entweder Elektronen oder Myonen oder Tau-Teilchen; die beiden

AUF EINEN BLICK FALLE FÜR FLÜCHTIGE SONDERLINGE

- 1 Neutrinos sind rätselhafte Elementarteilchen. Sie interagieren kaum mit anderer Materie und galten lange als masselos. Tatsächlich besitzen sie eine winzige Masse, deren Existenzgrund jedoch unbekannt ist.
- 2 In den USA entsteht ein ehrgeiziges Großprojekt, das Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE). Es soll die Teilchen 1300 Kilometer entfernt von ihrem Entstehungsort einfangen.
- 3 Unterwegs wird sich der Neutrinentyp, genannt Flavour, verändern. Von der exakten Messung dieser Oszillation erwarten die Forscher unter anderem Aufschluss über den Ursprung der Neutrinomasse.

letzteren sind schwerere Verwandte des Elektrons. Seltsamerweise sind die drei Flavours nicht festgelegt. Die Teilchen können das Fermilab etwa als Myon-Neutrinos verlassen und in South Dakota als Elektron- oder Tau-Neutrinos ankommen.

Als die Physiker das Phänomen entdeckten, lösten sie damit ein hartnäckiges Rätsel. Seit den 1960er Jahren hatten Forscher die von der Sonne ausgehenden Neutrinos untersucht, aber stets nur ein Drittel der theoretisch erwarteten Menge gemessen. Erst die Oszillation erklärte, warum: Die fehlenden zwei Drittel verwandelten sich unterwegs in Myon- und Tau-Neutrinos, aber die Detektoren waren nur auf Elektron-Neutrinos eingestellt. Diese Entdeckung beseitigte zwar das Problem der fehlenden Sonnenneutrinos, schuf aber zugleich ein neues. Der Quantenmechanik zufolge können die Teilchen nur oszillieren, wenn sie Masse besitzen – und das sieht das Standardmodell nicht vor.

Damit die Neutrinos ihre Flavours wechseln können, muss jeder davon eine quantenmechanische Überlagerung aus verschiedenen Massezuständen sein. Das heißt, die Masse aller Neutrinoarten ist nicht eindeutig festgelegt, sondern existiert als Mischung aus drei möglichen Zuständen. Während die Partikel nun fast lichtschnell durch den Raum flitzen, bewegen sich ihre Massezustände mit etwas unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort. Das ist eine Folge von Einsteins spezieller Relativitätstheorie. In der Nähe der Lichtgeschwindigkeit beeinflusst die jeweilige Masse das Teilchentempo merklich. Mit der Zeit verändert der Geschwindigkeitsunterschied die Mischung der Massezustände im einzelnen Partikel, und so kann ein Teilchen, das beispielsweise auf Grund seiner Zustandsmischung als Myon-Neutrino gestartet ist, im Zieldetektor als Elektron- oder Tau-Neutrino ankommen.

Die präzisen Neutrinomassen sind noch unbekannt. DUNE soll zählen, wie viele Neutrinos auf ihrem Weg von Illinois nach South Dakota oszillieren, und damit die relativen Masseverhältnisse bestimmen. Theoretisch können zwei Neutrinos sehr leicht und das dritte schwerer sein, oder zwei schwer und eines leichter. Die erste Möglichkeit wird normale Hierarchie genannt, während die andere inverse Hierarchie heißt. DUNE sollte im Stande sein, beide Alternativen zu unterscheiden, da die Materie des Erdinneren die Oszillationen vermutlich beeinflusst. Je nachdem, welche Hierarchie zutrifft, hoffen die Forscher, ein unterschiedliches Verhältnis der drei Flavours zu beobachten. »Je weiter man die Neutrinos durch Materie schießt, desto deutlicher wird der Unterschied«, erklärt Thomson. »Und den wird DUNE ganz sicher in wenigen Jahren herausfinden.«

Wenn die Forscher einmal die Hierarchie bestimmt haben, können sie die prinzipielle Frage anpacken, woher die Neutrinos überhaupt ihre Masse beziehen. Die meisten Teilchen wie die Quarks, aus denen die Protonen und Neutronen des Atomkerns bestehen, erwerben ihre Masse durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld, das zu dem am LHC entdeckten Higgs-Boson gehört. Doch dieser Mechanismus wirkt nur bei Teilchen, die sowohl rechts- als auch linkshändig vorkommen – das heißt,

deren Spin sowohl parallel als auch antiparallel zur Bewegungsrichtung orientiert sein kann. Bisher hat man nur linkshändige Neutrinos gefunden. Stammt ihre Masse vom Higgs-Feld, müsste es auch rechtshändige Neutrinos geben.

Da solche Teilchen noch nie beobachtet wurden, dürfen sie, falls vorhanden, mit keinerlei anderen Teilchen und Feldern wechselwirken – und das erscheint vielen Physikern sehr unwahrscheinlich. Außerdem: Würden die Neutrinomassen vom Higgs-Mechanismus verursacht, dann sollten sie der Theorie zufolge mit anderen Teilchen-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



MICHAEL HOCH UND MAXIMILIEN BRICE, CERN

massen vergleichbar sein. Doch Neutrinos sind ungeheuer leicht; selbst das winzige Elektron hat gewiss mehr als 100 000-mal mehr Masse. »Kaum jemand glaubt, dass der Higgs-Mechanismus den Neutrinos Masse verleiht«, meint Fermilab-Direktor Nigel Lockyer. »Wahrscheinlich liegt es an einem völlig anderen Effekt, an dem neue Mitspieler beteiligt sind.«

Unbekannte, extrem schwere Neutrinos könnten ein Ausgleich für die bekannten Leichtgewichte sein

Möglicherweise sind die Neutrinos so genannte Majorana-Teilchen, also ihre eigenen Antiteilchen. Das ist denkbar, weil Neutrinos keine elektrische Ladung tragen, die bei Antiteilchen den entgegengesetzten Wert annimmt. Vielleicht erwerben sie Masse durch Wechselwirkung mit einem noch unentdeckten Feld?

Entsprechende Theorien erfordern die Existenz zusätzlicher, extrem schwerer Neutrinos; die Masse dieser hypothetischen Partikel läge billionenmal höher als die der schwersten bekannten Teilchen und würde gewissermaßen ein Gegengewicht zu den extrem leichten Neutrinos bilden. Für Teilchenphysiker ist die Aussicht auf den Vorstoß in einen anderen Massenbereich faszinierend, betont de Gouvêa. Und wenn ein neues Feld den Neutrinos Masse verleiht, beeinflusst es vielleicht auch weitere Teilchen, spekuliert Lockyer: »Theoretiker fragen sich schon: Könnte die Dunkle Materie eine Majorana-Masse sein?«

DUNE vermag zwar nicht direkt zu beantworten, ob Neutrinos Majorana-Teilchen sind, aber durch die Bestimmung der Massehierarchie wird es entsprechenden Experimenten zuarbeiten, die derzeit in Japan, Europa, den USA und anderswo laufen. Außerdem wird DUNEs detaillierte Untersuchung der Neutrinooszillation zur Antwort auf die Frage beitragen, woher die Neutrinomasse stammt. »Wir möchten das bestmögliche Oszillationsexpe-

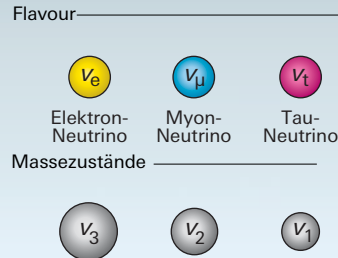
Drei Arten von Neutrinos

Neutrinos sind Elementarteilchen, die Materie praktisch ungehindert durchqueren – fast so schnell wie Licht. Sie kommen in drei Typen oder Flavours vor. Rätselhafterweise können sie unterwegs den Flavour wechseln. Dieses Neutrinooszillation genannte Phänomen soll am gigantischen Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) erforscht werden, das nach 2020 den Betrieb aufnehmen soll. Das Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) in Illinois wird einen intensiven Neutrinostrahl auf die Sanford Underground Research Facility in South Dakota richten, wo die Flavourozillationen gemessen werden.

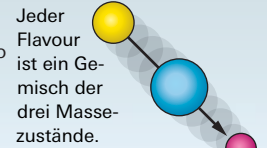
Die Neutrino Flavours

Die drei Teilchensorten heißen Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino nach den Teilchen, mit denen sie wechselwirken: Elektron, Myon beziehungsweise Tau. Ein Flavour besitzt keine eindeutig definierte Masse, sondern ist eine quantenmechanische Mischung von drei unterschiedlichen Massezuständen, deren präzise Werte noch unbekannt sind.

Eigenschaften



Neutrinos können Flavour und Masse wechseln.



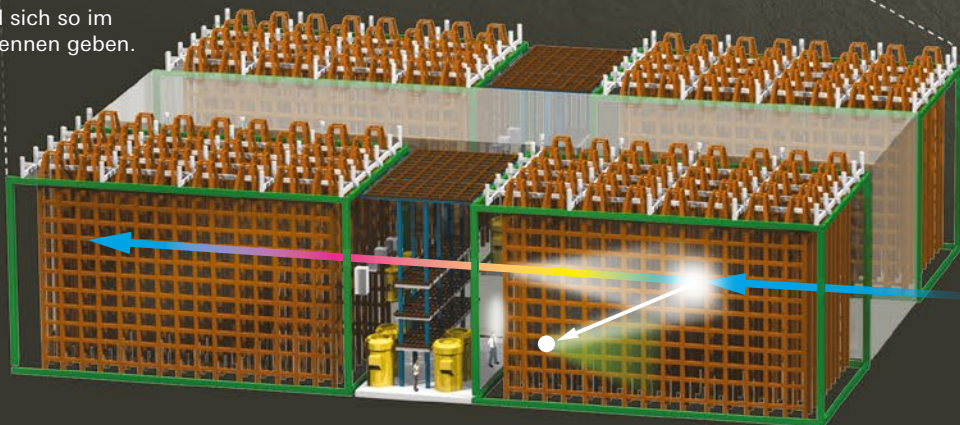
Sanford Underground Research Facility (South Dakota)



1300 Kilometer

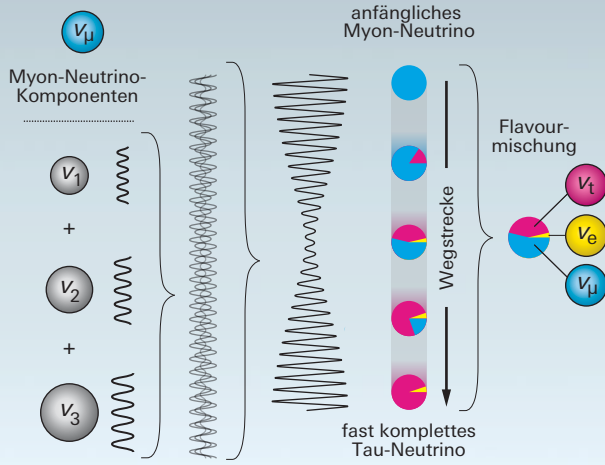
Zieldetektor

Die vier Module des Detektors sollen je 17 000 Tonnen flüssiges Argon enthalten. Vermutlich werden 10 bis 20 Neutrinos pro Tag mit Argonatomen zusammenstoßen und sich so im Detektor zu erkennen geben.

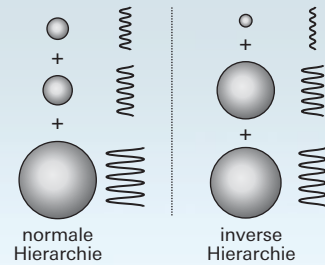


Oszillationen und Neutrinomassen

Die Massezustände, aus denen ein Neutrino besteht, pflanzen sich mit etwas unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort. Dadurch verändert sich mit der Zeit die Zustandsmischung und somit der Flavour. So kann sich ein Myon-Neutrino in ein Tau- oder Elektron-Neutrino verwandeln.

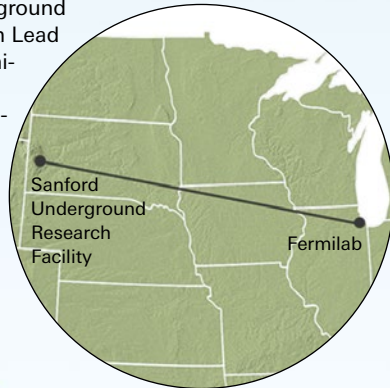


Der exakte Wert der drei Massezustände ist zwar noch unbekannt, aber der Theorie zufolge sind entweder zwei von ihnen leicht und einer schwerer (so genannte normale Hierarchie) oder einer leicht und die beiden anderen schwerer (inverse Hierarchie). DUNE soll klären, welche Hierarchie zutrifft.



Ein weiter Weg

DUNE wird Neutrinos auf eine 1300 Kilometer lange Reise vom Fermilab in Batavia (Illinois) zur Sanford Underground Research Facility in Lead (South Dakota) schicken. Das ist die bisher längste Strecke für ein irdisches Neutrinoexperiment.

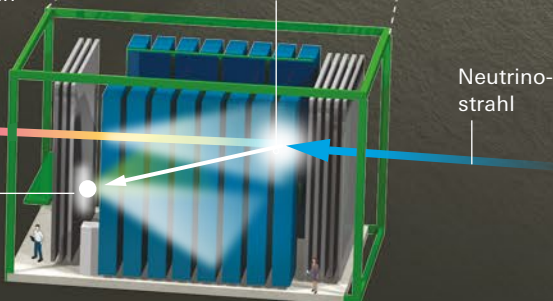


Startdetektor

Diese kleinere Version des Zieldetektors soll einen Vergleich der Messungen beider Geräte ermöglichen. Damit lässt sich abschätzen, wie viele Flavour-oszillationen unterwegs stattfinden.

Wenn ein Neutrino ein Argonatom trifft, erzeugt es verräterische Elektronen und Photonen.

geladenes Teilchen



Der Teilchenbeschleuniger erzeugt einen Neutrinostrahl.

Fermilab (Illinois)



FERMI NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY, FERMILAB

Am Fermilab liefert ein unterirdischer Beschleunigerring namens Main Injector zunächst energie-reiche Protonen. Sie erzeugen beim Auftreffen auf ein Graphitstück einen intensiven Strahl von Neutrinos für DUNE.

riment durchführen«, betont de Gouvêa, »denn nur dadurch erfahren wir etwas über die Neutrinomassen.«

Die Neutrinophysik könnte außerdem zur Lösung eines kosmologischen Rätsels beitragen: Warum besteht das Universum aus Materie und nicht aus Antimaterie? Theoretisch müssten unmittelbar nach dem Urknall gleiche Mengen von Materie und Antimaterie existiert haben, die einander sofort restlos vernichtet und in pure Energie verwandelt hätten. Doch augenscheinlich gab es einen kleinen Überschuss von Materie, aus dem die heutigen Galaxien, Sterne und Planeten hervorgegangen sind.

Um diese Asymmetrie zu erklären, halten Forscher nach Teilchen Ausschau, die sich anders verhalten als ihre Antiteilchen (siehe »Teilchen, Antiteilchen und der kleine Unterschied«, **Spektrum** 3/2018, S. 12). Auf Grund verschiedener experimenteller Hinweise richtet sich der Verdacht auch auf die Neutrinos. DUNE wird nach Anzeichen für die so genannte CP-Verletzung suchen, bei der die Symmetrie von Teilchen-Antiteilchen-Vertauschung C (von englisch charge conjugation) und gleichzeitiger Raumspiegelung P (Parität) gebrochen ist. Bei CP-Verletzung würden Neutrinos und Antineutrinos in unterschiedlichem Maß zwischen den Flavours oszillieren.

Angenommen, DUNE beobachtet, dass sich Myon-Antineutrinos halb so schnell oder doppelt so schnell in Elektron-Neutrinos verwandeln wie Myon-Neutrinos – dann könnte dieser Unterschied erklären, warum im heutigen Universum die Materie dominiert. Paradoxerweise könnte er sogar dann auftreten, wenn sich herausstellen sollte,

dass Neutrinos Majorana-Teilchen und somit ihre eigenen Antiteilchen sind. Dann würde die Händigkeit dennoch einen Unterschied machen: Die stets linkshändigen Neutrinos könnten sich anders verhalten als die rechtshändigen Antimaterie-Neutrinos.

DUNE wird auch feststellen können, ob es tatsächlich nur drei Flavours gibt. Manche Theorien postulieren zusätzlich so genannte sterile Neutrinos, die mit normaler Materie überhaupt nicht wechselwirken. Frühere Experimente wie der Liquid Scintillator Neutrino Detector am Los Alamos National Laboratory in New Mexico und das Mini Booster Neutrino Experiment am Fermilab fanden schwache Hinweise auf einen zusätzlichen Neutrinotyp, der die Oszillationen beeinflusst und schwerer sein müsste als die drei bekannten Sorten. Wie Thomson hofft, wird DUNE die Existenz von sterilen Neutrinos eindeutig bestätigen oder ausschließen.

Vier große Schwimmbecken, gefüllt mit Unmengen flüssigem Edelgas

Um all diese Ziele zu erreichen, soll DUNE viel zahlreichere und präzisere Daten sammeln als jedes bisherige Neutrinoexperiment. Dazu ist ein doppelt so intensiver Strahl vorgesehen wie bei heutigen Quellen, der am Zielort auf einen gegenüber vergleichbaren Anlagen 100-mal größeren Detektor trifft.

Das Experiment steht und fällt mit diesem Zieldetektor, der an der Sanford Underground Research Facility in Lead (South Dakota) entstehen soll. Er wird vier 50 Meter lange

und 12 Meter tiefe Becken umfassen, die mit jeweils 17000 Tonnen flüssigem Argon gefüllt werden. Ein Neutrino, das im Start- oder Zieldetektor den Kern eines Argonatoms trifft, verwandelt sich je nach seinem Flavour in ein Elektron, ein Myon oder ein Tau. Myonen beschreiben im flüssigen Argon gerade Bahnen, befreien unterwegs Elektronen aus den Argonatomen und hinterlassen so eine vom Detektor nachweisbare Spur geladener Teilchen. Wenn das Neutrino hingegen ein Elektron erzeugt, bildet sich eine ganze Teilchenkaskade aus Photonen und Elektronen. Ein Tau-Neutrino wiederum vermag zwar im Prinzip ein Tau-Teilchen zu erzeugen – aber nur, wenn das Neutrino ausreichend viel Energie besitzt, um das besonders massereiche Tau zu erschaffen. Demnächst werden CERN-Forscher Miniaturversionen des DUNE-Zieldetektors testen. »Mit dem Detektor ist es wie mit einer Raumfahrtmission«, meint Fermilab-Vizedirektor Joseph Lykken. »Man kann ihn nicht unterwegs reparieren. Wenn die 17000 Tonnen flüssiges Argon einmal drin sind, gibt es kein Zurück mehr.«

Vor allem aber muss DUNE die politischen und finanziellen Hürden überwinden, die schon manchem physikalischen Großprojekt zum Verhängnis geworden sind. Im Juli 2017 feierten Forscher und Politiker in der Sanford-Anlage den ersten Spatenstich einer großen Aushebung, die mindestens drei Jahre beanspruchen wird. Das Ausmaß gemahnt an die Tunnelbauten für den SSC, der größer als der LHC werden und das Higgs-Boson entdecken sollte,

aber 1993 an Kostenüberschreitungen und politischen Widerständen scheiterte. »Der Rückblick auf den Super-collider bietet ein abschreckendes Beispiel«, räumt Lockyer ein. »Der internationale Charakter von DUNE ist dagegen ein enormer Schritt vorwärts.« Die Beteiligung mehrerer Länder wird hoffentlich verhindern, dass DUNE vom Schicksal des SSC ereilt wird. ◀

QUELLEN

DUNE Collaboration: Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 1: The LBNF and DUNE Projects. Preprint vom 20.01.2016, <https://arxiv.org/abs/1601.05471>

DUNE Collaboration: Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 2: The Physics Program for DUNE at LBNF. Preprint vom 22.01.2016, <https://arxiv.org/abs/1512.06148>

WEBLINK

www.dunescience.org

Informationen über Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)

LITERATURTIPP

Hirsch, M. et al.: Neue Physik mit Neutrinos. In: Spektrum der Wissenschaft 5/2014, S. 50–57

Beschreibt Neutrinoexperimente, die auf eine Physik jenseits des Standardmodells hinweisen

Unsere Neuerscheinungen!

Ausgewählte
Sonderhefte
auch im
PDF-Format



Sonnensystem: Abschiedsgrüße von Saturn • Plutos Enthüllung • Raumfahrt: Aufbruch nach Alpha Centauri • Gravitationswellen: Das Raumzeitbeben von NCC 4993 • Kosmologie: Die Schwarzen Löcher des Urknalls • € 8,90



Parallelwelten: Ein Universum oder viele? • Kosmologie: Verliert das Universum Energie? • Schwarze Löcher: Schattenrisse der Schwarzkraftmonster • Sternphysik: Superhelle Supernovae • € 8,90



Propaganda: Mit Druckerpressen gegen Andersgläubige • Wallenstein: Krieg als Big Business • Söldner: In Schottland geboren, in Deutschland begraben • Militärs-technik: Wie Handfeuerwaffen die Kriegsführung veränderten • € 8,90: ab 26.3. 2018

Hier bestellen:

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

www.spektrum.de/neuerscheinungen

NEUTRINOOSZILLATION KOSMISCHE ANOMALIE IM WASSERTANK

Spieren Neutrinos eine zentrale Rolle beim Verständnis der Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie? Neue Ergebnisse eines Experiments in Japan erhärten den Verdacht.



Katia Moskvitch ist Ingenieurin und Journalistin in London. Sie schreibt über technologische Entwicklungen, Physik und Astronomie unter anderem für »Nature«, »Scientific American« und das »Quanta Magazine«.

» spektrum.de/artikel/1547069

Der Japan Proton Accelerator Research Complex, kurz J-PARC, ist eine abgelegene Forschungseinrichtung in Tokai, etwa eine Zugstunde nördlich von Tokio. Hier entstehen an einem T2K genannten Experiment (für Tokai-to-Kamioka) Strahlen aus Neutrinos. Sie durchqueren 295 Kilometer Gestein bis zum Detektor »Super-Kamiokande« (kurz Super-K), einem gigantischen unterirdischen Hohlraum, der mit 50 000 Tonnen hochreinem Wasser gefüllt ist.

Während ihrer Reise verwandeln sich einige der Neutrinos, und diesem Prozess spüren die T2K-Wissenschaftler nach. 2016 haben sie bereits erste Ergebnisse veröffentlicht. Als ich die Anlage 2017 besuchte, berichteten mir die Physiker, inzwischen hätten sie die Messdaten eines weiteren Jahres analysiert und die Ergebnisse würden sie zuversichtlich stimmen. Die Forscher wollen damit der Lösung eines fundamentalen kosmischen Rätsels näherkommen: Warum gibt es im Universum mehr Materie als Antimaterie?

Laut dem Standardmodell der Teilchenphysik besitzt jedes Teilchen ein Gegenstück mit umgekehrter Ladung. Beide vernichten sich in einem Strahlungsblitz. Da mit dem Urknall ebenso viel Materie wie Antimaterie entstanden sein sollte, müssten sich beide seither immer wieder ausgelöscht haben.

Doch ein kleiner Bruchteil der Materie überlebte als Baustoff unseres Alls. Wissenschaftler haben dafür keine Erklärung. »Einige subatomare Prozesse müssen für Teilchen anders ablaufen als für Antiteilchen«, fasst der Physiker Morgan Wascko vom Imperial College London die Lage zusammen. Antimaterie und Materie könnten beispielsweise verschieden zerfallen. Das würde die so genannte CP-Symmetrie verletzen. Sie beschreibt den Umstand, dass die physikalischen Gesetze unabhängig davon sein sollten, ob man ein Materieteilchen durch sein Antiteilchen ersetzt, während man den Vorgang in einem Spiegel betrachtet.

Für die meisten Teilchen gilt das – aber nicht für alle. Subatomare Quarks etwa verletzen die CP-Symmetrie, doch die dort bisher gemessenen Unterschiede reichen nicht, um das Ungleichgewicht im All vollständig zu erklären (siehe »Teilchen, Antiteilchen und der kleine Unterschied«, **Spektrum** März 2018, S. 12). Viele Physiker setzen darüber hinaus auf einen Bruch der CP-Symmetrie durch Neutrinos (siehe »Fenster ins asymmetrische All«, unten). 2016 präsentierten die T2K-Forscher erste Hinweise darauf. Bei ihren Untersuchungen halten die Wissenschaftler Ausschau nach denjenigen der schwer fassbaren Teilchen, die sich auf ihrem Weg zum Super-K-Detektor in einen anderen Typ Neutrino verwandelt haben. Bis zum Zeit-

Fenster ins asymmetrische All

Neutrinos und ihre Antiteilchen wechseln zwischen ihren »Flavours« Myon, Elektron und Tau hin und her. Sollten Neutrinos und Antineutrinos auf unterschiedliche Weise oszillieren, könnte das Hinweise darauf geben, warum sich die Materie im Universum seit dem Urknall über die Antimaterie behauptet hat.



Im Gleichgewicht:

Neutrinos und Antineutrinos wechseln ihre Flavours gleich schnell.

Neutrino-Oszillationen $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e \rightarrow \nu_{\tau} \rightarrow \nu_{\mu} \rightarrow \nu_e \rightarrow \nu_{\tau} \rightarrow \nu_{\mu}$

Antineutrino-Oszillationen $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_{\tau} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_{\tau} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$



Asymmetrie:

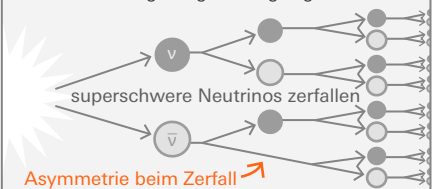
Neutrinos und Antineutrinos wechseln ihre Flavours unterschiedlich schnell.

Neutrino-Oszillationen $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e \rightarrow \nu_{\tau} \rightarrow \nu_{\mu} \rightarrow \nu_e \rightarrow \nu_{\tau} \rightarrow \nu_{\mu}$

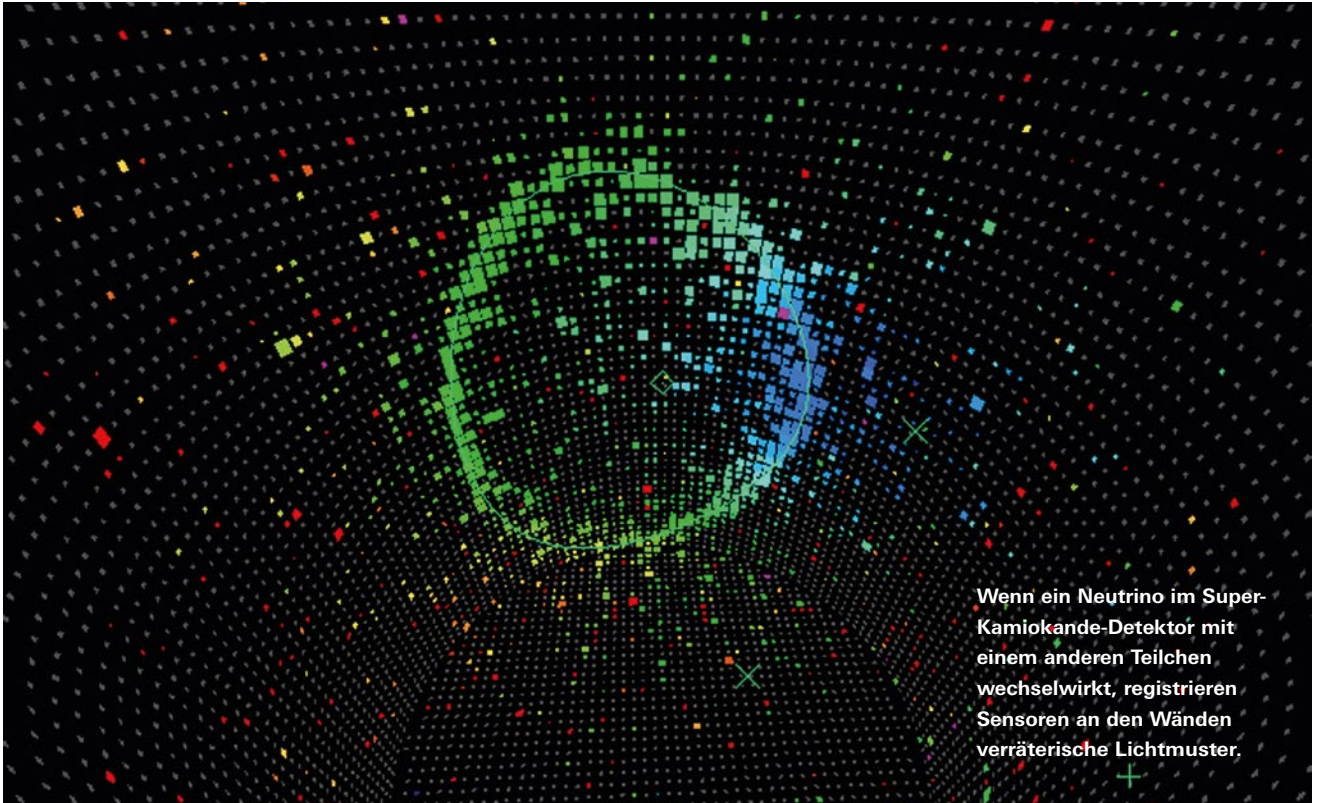
Antineutrino-Oszillationen $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_{\tau} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$

Das frühe Universum

Neutrinos und Antineutrinos besitzen möglicherweise superschwere Gegenstücke, deren jeweilige Eigenschaften mit den leichten Teilchen eng verbunden sind (»Seesaw-Mechanismus«, nach dem englischen Begriff für Wippe). Sollten die massereichen Partner unterschiedlich zerfallen, könnte das im jungen All den Keim für das heute beobachtete Ungleichgewicht gelegt haben.



LUCY REISLING/IKANADA FÜR QUANTA MAGAZINE



TKX COLLABORATION, KAMIOKA OBSERVATORY, INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH, KEK, UNIVERSITY OF TOKYO

Wenn ein Neutrino im Super-Kamiokande-Detektor mit einem anderen Teilchen wechselwirkt, registrieren Sensoren an den Wänden verräterische Lichtmuster.

punkt jener Veröffentlichung hatten die Physiker 32 Elektron-Neutrinos aufgespürt, die aus jeweils einem Myon-Neutrino hervorgegangen waren. Aus vier Elektron-Antineutrinos wurden vier Myon-Antineutrinos. Bei perfekter CP-Symmetrie wären (berücksichtigt man die Unterschiede bei der Erzeugung und dem Nachweis von Neutrinos und Antineutrinos) etwa 23 Elektron-Neutrinos und sieben Elektron-Antineutrinos zu erwarten gewesen. Mehr Neutrinos und weniger Antineutrinos – genau das sagten Theoretiker bei einer CP-Verletzung voraus. Darum sorgte das Ergebnis für einige Aufregung. Allerdings wurde sofort der Einwand laut, die Differenz könne angesichts der kleinen Stichprobengröße durchaus auf Zufall beruhen. Die Chance dafür betrug immerhin zehn Prozent.

Im Folgejahr verdoppelten die Forscher die Datenmenge dann noch einmal und verbesserten die Methoden zur Auswertung: Insgesamt fanden sie 89 Elektron-Neutrinos, deutlich mehr als die 67, die ohne CP-Verletzung zu vermuten gewesen wären. Bei der Suche nach Elektron-Antineutrinos tauchten nur sieben auf, zwei weniger als erwartet. Allerdings reichen die Datenpunkte noch immer nicht aus, um eine Entdeckung zu verkünden. Der Physiker Phillip Litchfield vom Imperial College London betont, die Chance auf einen statistischen Ausreißer stünden damit bei 1 zu 20, während eine Quote von 3 zu 1000 nötig wäre, um sicher zu sein, dass der Effekt signifikant ist. Bis Mitte der 2020er Jahre wollen die japanischen Wissenschaftler genug Daten gesammelt haben, damit der Wert in Reichweite gelangt.

Physiker hoffen unterdessen auf Ergebnisse vom rund 800 Kilometer langen NOvA-Experiment am Fermi Natio-

nal Accelerator Laboratory bei Chicago (siehe »Den Neutrinos auf der Spur«, S. 62). 2016 gab es erste Messwerte zu Neutrinos, demnächst sollen Daten zu Antineutrinos hinzukommen. Auch sie werden zunächst keine eindeutige Aussage zulassen, doch sollten sie in die gleiche Richtung weisen wie die von T2K, zöge das sicher die Aufmerksamkeit vieler Physiker auf sich.

Im Sommer 2018 wird Super-K aufgerüstet: Die Wissenschaftler füllen den Tank dann zum ersten Mal seit mehr als einem Jahrzehnt neu. Dabei geben sie das Salz Gadoliniumsulfat hinzu, mit dem das Instrument Antineutrinos gegenüber empfindlicher werden sollte.

Während der theoretische Physiker André de Gouvêa von der Northwestern University in Illinois, USA, mahnt, die Suche bei Neutrinos könne sich trotz aller berechtigter Hoffnungen durchaus noch als vergebens herausstellen, zeigt sich Wascko optimistisch: »T2K hat 2017 zwar noch nicht für ein besseres Verständnis der CP-Verletzung gesorgt, aber das Zwischenergebnis stimmt zuversichtlich für die Zukunft. Und diese scheint gar nicht mehr so weit weg, wie wir noch ein Jahr zuvor gedacht hatten.«

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Neutrinos Suggest Solution to Mystery of Universe's Existence« 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.



SCHLICHTING! MINIVULKANE AM STRAND



Steigendes Meerwasser verdrängt Luft aus dem Kapillarsystem des Untergrunds und wölbt am Strand Sandkegel auf. Der Tidenwechsel glättet sie wieder und hinterlässt manchmal rätselhafte Flecken.

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/1547071

► An manchen Stränden geht man im höher gelegenen und bei Ebbe relativ weit vom Wasser entfernten Bereich zuweilen wie auf Watte und sinkt ungewöhnlich tief in den Sand ein. Obwohl oft noch die Spuren der Überspülung von der letzten Flut zu sehen sind, hat sich hier anders als am Saum des Meeres kein trittfester Boden ausgebildet.

Auf dem weichen Teil des Strands erkennt man zahlreiche kleine Löcher und regelrechte Pusteln. Löst man vorsichtig eine Hand voll Sand aus dem Boden, ohne ihn zu zerdrücken, hält man eine Art Sandschaum; das Gefüge ist mit großen und kleinen Hohlräumen durchsetzt.

Beobachtet man das Geschehen über mehrere Tage, wird klar, dass die Gezeiten für die Durchlüftung verantwortlich sind. Bei Hochwasser wird ein wesentlich größerer Bereich eines sanft ansteigenden Strands von Wasser überspült als bei Niedrigwasser.

Sand besteht aus unregelmäßig geformten Körnern, die sich nur an einigen Stellen berühren. Dazwischen

Im Sande des Meeres, den noch kein Linné nach seinen Gestalten geordnet hat

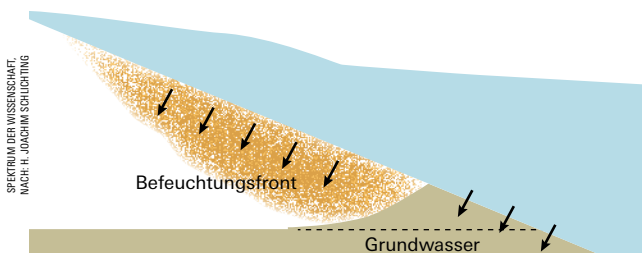
Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

bilden sie ein zusammenhängendes Kapillarsystem. Dringt von oben Wasser ein, verdrängt es mit seinem Gewicht die enthaltene Luft. Sie kann nicht nach unten ausweichen, weil dort der Grundwasserspiegel bereits die Leerräume gefüllt hat. Also treibt die steigende Flut die Luft keilförmig aufwärts (siehe Illustration unten links).

Dadurch gerät das Gas unter Druck, weil die engen Kapillaren der Strömung einen Widerstand entgegensetzen. Dieser ähnelt dem, den man bei einer Einwegspritze spürt, wenn man Wasser herausdrückt, während sich eine Luftblase darin befindet. Sie wird durch den Kolben erheblich zusammengepresst. Einem derartigen Druck ausgesetzt, fließen die feinen Luftströme im Sand zusammen, sobald sie miteinander in Kontakt kommen. Schließlich entladen sie sich an der Oberfläche. Sie treten einerseits als Löcher im Boden in Erscheinung, andererseits wölben sich kleine Kegel auf, sofern die obere Lage luftdichte Bereiche enthält. Beide Strukturen prägen das Bild der Sandschaumschicht und werden bei Niedrigwasser weiträumig frei gelegt (siehe Foto rechts oben). Wenn man dann die Kegel vorsichtig mit einem Messer aufschneidet, kann man sich davon überzeugen, dass sich unter den Pusteln wirklich Hohlräume befinden.

Bei steigendem Meeresspiegel sieht man manchmal noch, wie die rhythmisch auf- und ablaufenden Wellen die Löcher überfluten und wieder frei geben. Dabei kann man verfolgen, wie direkt hinter der Front des auflaufenden Wassers, wo es nur wenige Zentimeter tief ist, aus den überschwemmten Löchern Blasen austreten.

Die Ebbe entwässert das zwischenzeitlich gefüllte Kapillarsystem und größere Hohlräume wieder, und durch den damit verbundenen Unterdruck wird Luft eingesogen. Manchmal entstehen währenddessen auch neue Löcher.



Das bei Flut steigende Wasser dringt unter dem Druck der eigenen Schwere in die luftgefüllten Kapillaren zwischen den Sandkörnern ein (hellbraun). Dabei schiebt es eine Front von feinen Luftströmen vor sich her. Sie können nur nach oben ausweichen, denn nach unten ist das Grundwasser im Weg (oliv).

Im butterweichen, mit Luftblasen durchsetzten Sand sinkt man beim Laufen tief ein (links unten).

Wenn sich bei Ebbe das Wasser zurückzieht, bleiben durchlöchernde und durch kleine Sandkegel geprägte Gebiete zurück (rechts).

Oft ebnet das Wasser den Boden aber auch und hinterlässt auffällige dunkle Fleckenmuster (rechts unten).



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

Diese Vorgänge liefern die Erklärung für ein weiteres Phänomen, das man an Stränden im Bereich des auf- und ablaufenden Wassers gelegentlich beobachtet: chaotisch verteilte dunkle Flecken auf dem hellen Sand oder sogar relativ geordnete Muster. Aus der Nähe betrachtet wird klar, dass hinter den Maserungen die Entmischung heller und dunkler Sandkörner steckt. Deren Färbung ist nur das sichtbare Zeichen eines wesentlicheren physikalischen Unterschieds, den man bereits durch Wägen in den Händen feststellen kann, sofern man mit etwas Geduld ungefähr die gleiche Menge an hellem und dunklem Material einsammelt. An dem Strand, auf den ich mich hier beziehe, weist der dunkle Sand eine größere Dichte auf als der helle. Der Wind entmischt beide häufig und lässt dünne Schichten entstehen.

Da die Kegel im Allgemeinen nicht erneut zur Entlüftung dienen, wenn sie bei der nächsten Flut wieder in den Einflussbereich des auflaufenden Wassers geraten, werden sie überspült und teilweise eingeebnet.

Dabei trägt das Wasser zunächst die obere, meist helle Sandschicht der ehemals luftgefüllten Sandpusteln ab, und die darunterliegende dunkle Lage wird sichtbar. Wenn auch diese teilweise vom Meer mitgerissen wird, kommt manchmal die nächste darunterliegende helle Sandschicht zum Vorschein. Dadurch ergeben sich ringartige Strukturen.

Wenn die Gezeiten außerdem einen Teil dieser Sandkörner in Richtung des ablaufenden Wassers mit sich ziehen, hinterlassen sie oft strahlenartige Spuren. Über deren Ursprung kann der Strandwanderer vor allem dann ins Rätseln geraten, wenn er sie bei Niedrigwasser antrifft und nicht ahnt, dass einige Stunden vorher hier noch auf- und ablaufende Wellen gestalterisch am Werk waren.

QUELLE

Steenhauer, K. et al.: Subsurface Processes Generated by Bore-Driven Swash on Coarse-Grained Beaches. In: Journal of Geophysical Research 116, C04013, 2011

COMPUTER LERNEN WIE DIE KINDER

Neue Entwicklungen in der künstlichen Intelligenz folgen beim Wissenserwerb einem natürlichen Vorbild – und zwar dem der Ein- bis Fünfjährigen.



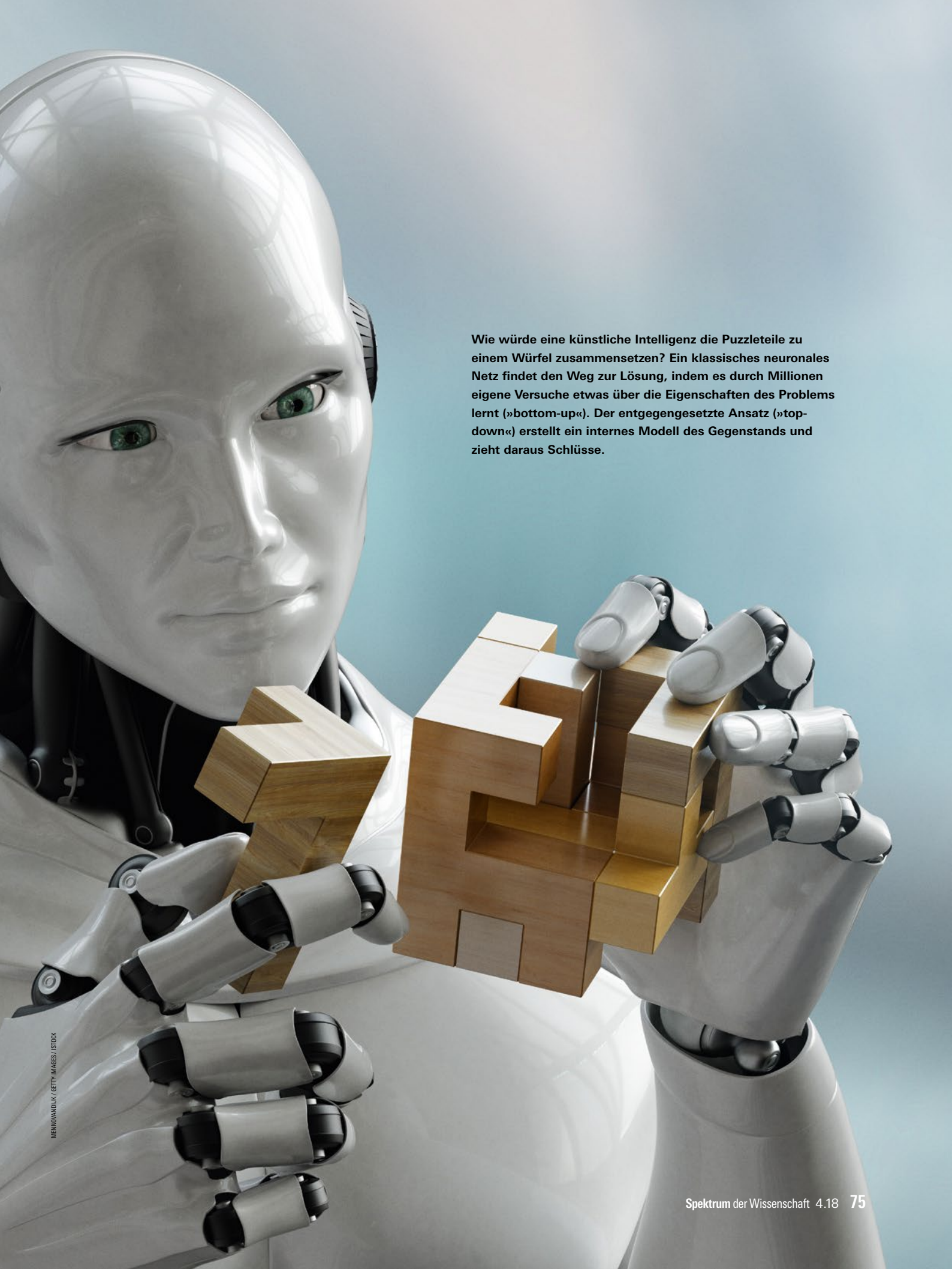
Alison Gopnik ist Professorin für Psychologie und Philosophie an der University of California in Berkeley. In ihrer Forschung konzentriert sie sich darauf, wie Kinder Wissen über ihre Umwelt erwerben.

► spektrum.de/artikel/1547073

► Wie schaffen es kleine Kinder, in so kurzer Zeit so viel zu lernen? Seit Platons Zeiten zerbrechen sich Philosophen den Kopf darüber und finden keine befriedigende Antwort. Mein fünfjähriger Enkel Augie weiß jede Menge über Pflanzen, Tiere und Uhren, von Dinosauriern und Raumschiffen ganz zu schweigen. Außerdem ist ihm klar, was andere Menschen von ihm erwarten, wie sie denken und fühlen. Er nutzt dieses Wissen zur Einordnung dessen, was er mit seinen Sinnen aufnimmt, und zieht daraus neue Schlüsse. So erklärte er mir vor Kurzem, die im American Museum of Natural History in New York ausgestellte neu entdeckte Art von Titanosauriern zähle ebenfalls zu den Pflanzenfressern – sei also eher als harmlos anzusehen.

Dabei ist die Information, die Augie von seiner Umwelt aufnimmt, sehr abstrakt und transportiert von sich aus keine Bedeutung: Es sind nichts weiter als Photonen, die auf die Netzhaut seiner Augen treffen, und Schwingungen der Luft, die seine Trommelfelle in Bewegung versetzen. Gleichwohl schafft es der neuronale Computer, der sich hinter Augies blauen Augen verbirgt, von diesen begrenzten Sinneswahrnehmungen ausgehend Aussagen über Pflanzen fressende Titanosaurier zu treffen. Da stellt sich die Frage: Können elektronische Rechner das auch?

Seit etwa 15 Jahren versuchen Computerwissenschaftler und Psychologen, darauf eine Antwort zu finden. Kinder erlangen einen Großteil ihres Wissens mit relativ geringem Input durch Lehrer oder Eltern. Und trotz der enormen Fortschritte in der künstlichen Intelligenz (KI) kommen auch die leistungsfähigsten Computer nicht an das Lernvermögen Fünfjähriger heran.



Wie würde eine künstliche Intelligenz die Puzzleteile zu einem Würfel zusammensetzen? Ein klassisches neuronales Netz findet den Weg zur Lösung, indem es durch Millionen eigene Versuche etwas über die Eigenschaften des Problems lernt (»bottom-up«). Der entgegengesetzte Ansatz (»top-down«) erstellt ein internes Modell des Gegenstands und zieht daraus Schlüsse.

Wie das kindliche Gehirn tatsächlich funktioniert: An dieser Frage – und an einer digitalen Nachbildung – werden die Computerwissenschaftler noch Jahrzehnte zu beißen haben. In der Zwischenzeit entwickeln sie erste Ansätze einer künstlichen Intelligenz, die zumindest einiges von dem realisiert, was wir über das menschliche Lernen wissen.

Die künstliche Intelligenz ist aus dem Dornröschenschlaf erwacht

Nach einer euphorischen Anfangsphase während der 1950er und 1960er Jahre dümpelte die KI-Forschung jahrzehntelang vor sich hin. Erst in den letzten Jahren kam es zu bahnbrechenden Fortschritten, vor allem auf dem Gebiet des maschinellen Lernens (**Spektrum** Januar 2018, S. 12). Inzwischen ist die KI eine der heißesten technischen Entwicklungen überhaupt. Der atemberaubende Fortschritt hat allerlei Propheten auf den Plan gerufen, und deren Zukunftsvisionen reichen von der Unsterblichkeit bis zum Untergang der Menschheit.

Meiner Meinung nach weckt die KI solch starke Gefühle, weil sie bei den meisten Menschen eine tief sitzende Angst erregt. Die Idee von Zwitterwesen, die den Unterschied zwischen Mensch und Maschine verwischen, wirkt früher wie heute äußerst verstörend, vom mittelalterlichen Golem über Frankensteins Monster bis zu Ava, der verführerischen »Robotrix fatale« aus dem Film »Ex Machina«.

Aber lernen Computer wirklich so gut wie Menschen? Wie ein Computer eine Katze, ein gesprochenes Wort oder ein japanisches Schriftzeichen zu erkennen lernt, mag in den Einzelheiten schwer nachvollziehbar sein. Aber auf den zweiten Blick sind die Grundideen nicht übermäßig kompliziert.

Der Photonenstrom und die Luftschwingungen, die Augie – wie jeder von uns – mit seinen Sinnesorganen empfängt, erreichen einen Computer als Pixel eines digitalen Bildes beziehungsweise als einzelne Schalldruckwerte einer Tonaufnahme. Aus diesen digitalen Daten gewinnt der Rechner Folgen von Mustern, die er in einem weiteren Schritt Objekten der Umgebung zuordnen kann. Das

lernende System legt sich seine Weltkenntnis von unten nach oben zu (»bottom-up«): Aus den Rohdaten bildet es Muster und aus diesen schließlich Begriffe. Dieser Ansatz geht zurück auf Ideen vieler bedeutender Wissenschaftler, darunter die Philosophen David Hume (1711–1776) und John Stuart Mill (1806–1873) sowie die Psychologen Iwan Pawlow (1849–1936) und Burrhus F. Skinner (1904–1990).

In den 1980er Jahren fanden Forscher eine geniale Methode, um das Bottom-up-Konzept auf Computer zu übertragen: »konnektionistische Systeme« oder mit dem heute gebräuchlichen Namen »neuronale Netze«. In der Tat nahmen sich die Pioniere zum Vorbild, wie Nervenzellen die auf unsere Augen treffenden Lichtmuster in eine Repräsentation unserer Umwelt verwandeln. Die eingehenden Reize (beim Computer die Pixel) werden über mehrere Schichten aus zahlreichen Schaltelementen – Nervenzellen beziehungsweise deren künstliche Gegenstücke – hinweg verarbeitet und dadurch in zunehmend abstraktere Repräsentationen übersetzt, die etwa für eine Nase oder ein ganzes Gesicht stehen.

Auch diese Idee verfiel nach einigen Anfangserfolgen in jahrzehntelange Stagnation, bis sie in jüngerer Zeit aus ihrem Dornröschenschlaf erwachte. Neu war diesmal nicht eine revolutionäre Idee, sondern einfach Masse. Die nach dem Mooreschen Gesetz (»alle anderthalb Jahre verdoppelt sich die Leistungsfähigkeit«) inzwischen ins Gigantische angewachsene Rechenleistung der Computer erlaubt es, mehr Schichten aufeinander zu stapeln; und solche vielschichtigen (»tiefen«) Netze sind zu qualitativ neuen Leistungen fähig, was Technologiegiganten wie Google und Facebook bereits erfolgreich kommerziell nutzen. Außerdem stehen inzwischen riesige Datenmengen zur Verfügung. Mit mehr Daten, die besser verarbeitet werden können, lernen konnektionistische Systeme bei Weitem besser, als wir uns das früher vorstellen konnten.

Jahrelang schwankte die KI-Gemeinde zwischen eben diesen Bottom-up-Lösungen für das maschinelle Lernen und dem umgekehrten Prinzip: von oben nach unten (»top-down«). Gemeint ist, dass ein System bereits vorhandenes Wissen nutzt, um neue Dinge zu lernen. Demzufolge müsste der Mensch bereits mit einem gewissen elementaren Vorwissen auf die Welt kommen – sonst wäre er zum Lernen nicht fähig. Sowohl Platon als auch die so genannten rationalistischen Philosophen wie René Descartes (1596–1650) haben eine solche Vorstellung vertreten. Immanuel Kant (1724–1804) hat dieses Vorwissen als die »drei Apriori« präzisiert. Der Linguist Noam Chomsky erklärt die Tatsache, dass Kinder ihre Muttersprache sehr rasch und mit äußerst knappem Material erlernen, durch die Existenz einer angeborenen Grammatik, womit er allerdings in jüngerer Zeit auf heftigen Widerspruch stieß (**Spektrum** März 2017, S. 12). In der Frühzeit der KI spielte der Top-down-Ansatz eine große Rolle; und auch er erlebte in den 2000er Jahren eine Wiedererweckung, und zwar in Gestalt der Wahrscheinlichkeitstheoretischen oder bayesischen Modellierung.

Top-down entspricht einem geringfügig überzeichneten Bild vom theoretischen Physiker: Zunächst stellt er abstrakte und weit reichende Hypothesen über die Welt auf;

AUF EINEN BLICK VON DEN KINDERN LERNEN LERNEN

- 1** Die Frage, wie Kleinkinder ihr Weltwissen erwerben, beschäftigt Philosophen und Psychologen schon lange – und nun auch Computerwissenschaftler.
- 2** KI-Experten untersuchen die Denk- und Argumentationsfähigkeit von Vorschulkindern, um sie auf Computer zu übertragen und diesen so ein Verständnis der Welt beizubringen.
- 3** Aktuelle Entwicklungen der KI werden durch zwei konkurrierende Ansätze bestimmt. Beide versuchen das natürliche Denken von Kindern nachzubilden.

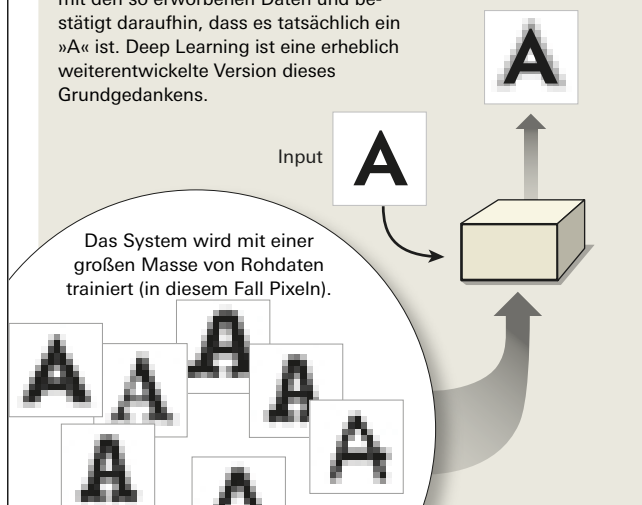
Zwei Wege in der aktuellen KI-Forschung

Wie verschafft sich eine Maschine ein Bild von dem Buchstaben A, so dass sie ihn später in diversen Texten – handgeschrieben, in ungewöhnlicher Form oder verblasst – wiedererkennen kann? An diesem Beispiel werden die beiden aktuellen Ansätze der KI vorgestellt.

Bottom-up (Deep Learning)

Aus verschiedenen Beispielen des Buchstaben »A« lernt der Computer unterschiedliche Anordnungen aus hellen und dunklen Pixeln als Versionen des gleichen Zeichens zu erkennen. Das System vergleicht ein neu vorgelegtes Zeichen mit den so erworbenen Daten und bestätigt daraufhin, dass es tatsächlich ein »A« ist. Deep Learning ist eine erheblich weiterentwickelte Version dieses Grundgedankens.

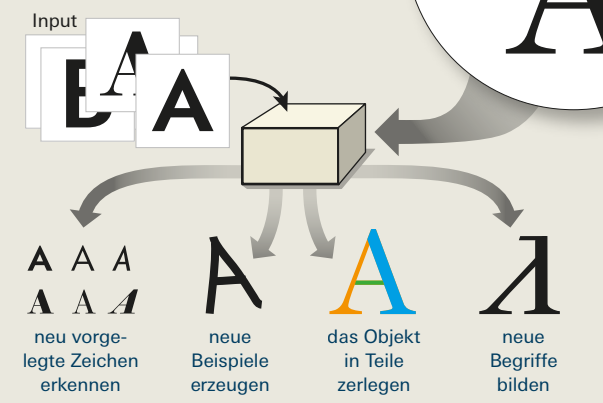
Im Vergleich Pixel für Pixel passt dieses Zeichen zu den gelernten Trainingsdaten. Also ist es ein A.



Top-down (bayessches Schlussfolgern)

Auf die Vorlage eines Beispiels (hier des Buchstaben »A«) hin erzeugt die Maschine ein Modell des Objekts aus ihrem internen Vorrat an elementaren Bauteilen; in diesem Fall sind es zwei Striche, die sich oben in einem spitzen Winkel treffen, plus ein Querstrich. Mit Hilfe dieses Modells kann sie krumme und schiefe Versionen zuverlässig erkennen oder auch selbst erzeugen und den so erworbenen Begriff auf verschiedene Weise abwandeln.

Das System lernt einen neuen Begriff an einem einzigen Beispiel; das genügt, um eine Reihe von Aufgaben zu bewältigen.



JEN CHRISTIANSEN; TOP-DOWN-METHODE NACH LAKE, B.M. ET AL.: HUMAN-LEVEL CONCEPT LEARNING THROUGH PROBABILISTIC PROGRAM INDUCTION. IN: SCIENCE 350, S. 1332-1338, 2015 / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2017

dann ermittelt er, wie die Daten aussehen müssten, wenn seine Hypothesen korrekt sind. Schließlich misst er diese Daten in der echten Welt und revidiert daraufhin seine Hypothesen.

Bottom-up ...

Unsereins arbeitet im täglichen Leben sowohl bottom-up als auch top-down. Stellen Sie sich als Beispiel für Ersteres vor, Ihr Computer solle in Ihrer E-Mail das Relevante vom Unbrauchbaren trennen. Letzteres, der »Spam«, zeichnet sich häufig durch bestimmte Eigenschaften aus: eine lange Empfängerliste, ein Absender aus Nigeria oder Bulgarien, die Nachricht, man habe viel Geld gewonnen oder es gebe Viagra günstig zu kaufen. Aber jedes dieser Kriterien kann auch auf andere Mails zutreffen. Und Sie wollen auf keinen Fall ein attraktives Stellenangebot verpassen oder die Nachricht, dass Sie einen akademischen Preis erhalten haben.

Wenn Sie hinreichend viele Spammails mit anderen Nachrichten vergleichen, bemerken Sie vielleicht, dass nur im Spam bestimmte verräterische Kombinationen von Kriterien auftauchen: Wenn ein Absender aus Nigeria eine Million verspricht, verheißt das nichts Gutes. Darüber hinaus gibt es eher unauffällige Muster, die nicht durch

schlichtes Wörtervergleichen abfragbar sind, zum Beispiel Schreibfehler oder bestimmte IP-Adressen. Wenn Sie derartige Kriterien entdecken und anwenden, bekommen Sie einen sehr trennscharfen Spamfilter. Was der verwirft, können Sie unbesehen löschen, und die Nachricht, dass das von Ihnen tatsächlich bestellte Viagra soeben an Sie versandt wurde, entgeht Ihnen trotzdem nicht.

Bottom-up entspricht dem Lernen, wie es neuronale Netze praktizieren, insbesondere dem »Lernen ohne Lehrer«, das üblicherweise als »unüberwachtes Lernen« (unsupervised learning) bezeichnet wird. Ein solches Netz ist in der Lage, Muster etwa in Bildern zu erkennen, obgleich niemand ihm eine Auskunft darüber gibt, was auf dem jeweiligen Bild zu sehen ist. Es lernt einfach durch Erfahrung, dass gewisse Merkmalskombinationen häufig vorkommen, wie eine Nase und Augen in der richtigen Stellung zueinander. So entdeckt es, dass es Gesichter gibt und dass sie sich von den Bäumen und Bergen im Hintergrund unterscheiden.

Mittlerweile sind diese Bottom-up-Methoden ungeheuer erfolgreich. In einem Artikel in »Nature« aus dem Februar 2015 erklären Wissenschaftler der zu Google gehörenden Firma DeepMind, wie ihr Computer ein Sortiment klassischer Videospiele für den Atari 2600 lernte. Aus dem

Anfangszustand kompletter Ahnungslosigkeit machte der Computer zunächst zufällige Züge, während er kontinuierlich Rückkopplung über seine Erfolge erhielt (»bestärkendes Lernen«, reinforcement learning). Dabei verschaffte er sich mit Hilfe des Deep Learning ein Bild von den Spielfiguren und anderen Elementen des Spiels. In mehreren Spielen erreichte er die Fähigkeiten eines professionellen Spieletesters oder übertraf sie sogar um Größenordnungen. Allerdings versagte er auch völlig bei anderen Spielen, die einem Menschen ebenso einfach erscheinen.

Da die KI aus großen Datenmengen wie Millionen von Instagram-Bildern, E-Mails oder Sprachaufnahmen lernen kann, löst sie inzwischen Probleme, die noch vor wenigen Jahren unüberwindlich schienen, namentlich in der Bild- und Spracherkennung. Aber vergessen Sie nicht: Mein Enkel schafft das mit weitaus weniger Daten und Training, und obendrein kann er Fragen zum Thema beantworten. Was ein Fünfjähriger mit links erledigt, fällt auch heute noch einem Computer schwerer, als den Schachweltmeister zu schlagen.

Um ein Gesicht mit Fell und Schnurrhaaren richtig einzuordnen, braucht ein neuronales Netz oft Millionen von Beispielen, während wir mit einigen wenigen auskommen. Nach fleißigem Üben mag ein Computer in der Lage sein, eine Katze, die er noch nie gesehen hat, als solche zu erkennen. Aber er kommt zu dieser Erkenntnis auf einem völlig anderen Weg als ein Mensch – und macht auch andere Fehler. So klassifiziert er manche Bilder als Katzen, die für einen Menschen nichts Katzenartiges an sich haben, und umgekehrt (**Spektrum** Januar 2018, S. 22, dort Bild S. 24).

... und Top-down

Zu dem entgegengesetzten Konzept »Top-down« kann ich ein selbst erlebtes Beispiel aus der »Spamwelt« beisteuern. Ich erhielt eine Mail von dem Herausgeber einer Zeitschrift, deren Namen ich nicht kannte. Der Absender bezog sich auf einen meiner Artikel und schlug mir vor, eine Veröffentlichung für sein Journal zu schreiben – kein Nigeria, kein Viagra und keine Millionenversprechen. Die üblichen Merkmale für Spam lagen sämtlich nicht vor. Trotzdem konnte ich zu dem Schluss kommen, dass diese Nachricht verdächtig war, und zwar, indem ich unter Nutzung meines Vorwissens abstrakt darüber nachdachte, wie Spam produziert wird.

Erstens wusste ich, dass Spammer häufig versuchen, an das Geld ihrer Opfer zu kommen, indem sie deren Gier ansprechen – und für einen Akademiker mag eine Veröf-

fentlichung in einem Journal ähnlich attraktiv sein wie für irgendeinen Menschen ein großer Geldbetrag oder die Steigerung der sexuellen Leistungsfähigkeit. Außerdem wusste ich, dass frei zugängliche (»open access«) Zeitschriften inzwischen dazu übergehen, statt der Leser die Autoren zur Kasse zu bitten. Drittens hatte meine Arbeit absolut nichts mit dem Titel des Journals zu tun. All das zusammen ergab die plausible Hypothese, dass diese Mail Akademikern für die Veröffentlichung in einer Zeitschrift, die niemand liest, Geld aus der Tasche ziehen sollte. Ein einziges Beispiel, die merkwürdige E-Mail, genügte mir, um die Hypothese aufzustellen. Deren Nachprüfung – im Internet nachsehen, welchen Ruf der Herausgeber genießt – war dann der logische nächste Schritt.

Ein Computerwissenschaftler würde meinen Gedankengang als »generatives Modell« bezeichnen. Das ist ein System, das abstrakte Begriffe wie Gier und Betrug bilden kann und auch den Prozess der Hypothesenerstellung erfasst, also die Gedankenkette, die mich veranlasst hat, die Mail als Spam zu verdächtigen. Das generative Modell in meinem Kopf – oder ersatzweise in Gestalt eines Computerprogramms – liefert nicht nur eine plausible Erklärung, wie der Absender des Spams es angestellt hat, eine so große Zahl an Mails zu versenden, dass er hinreichend viele gutgläubige Opfer findet; ich kann mir auch andere Arten von Spam ausdenken, darunter solche, von denen ich noch nie gehört habe.

Generative Modelle spielten eine Hauptrolle in der ersten Welle der KI und der Kognitionswissenschaft in den 1950er und 1960er Jahren; schon damals zeigten sich jedoch auch ihre Grenzen. Erstens gibt es im Allgemeinen verschiedene Hypothesen, die dieselben Daten erklären können. Die merkwürdige Mail des Zeitschriftenherausgebers hätte ernst gemeint sein können, auch wenn das unwahrscheinlich war. Also müssen generative Modelle ihre Hypothesen mit einer vermuteten Wahrscheinlichkeit versehen. Wie das zu bewerkstelligen wäre, ist heute eines der wichtigsten Forschungsgebiete. Zweitens ist es häufig unklar, wo die grundlegenden Begriffe herkommen, aus denen die generativen Modelle ihre Begriffswelt aufbauen. Denker wie Descartes und Chomsky glaubten, wir seien von Anfang an mit ihnen geboren. Aber kommen wir wirklich mit einem Begriff von Neid oder Betrug zur Welt?

Beide Problemfelder geht ein Ansatz an, der unter den neueren Top-down-Ideen den ersten Rang einnimmt: bayessche Modelle. Benannt nach dem Statistiker und Philosophen Thomas Bayes (1701–1761; siehe auch **Spektrum** Oktober 2011, S. 70), kombinieren sie generative Modelle mit Wahrscheinlichkeitstheorie. Mittels »bayesscher Schlussfolgerung« (Bayesian inference) wird ausgerechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmtes Muster auftritt unter der Voraussetzung, dass eine bestimmte Hypothese zutrifft. Wenn eine Mail Spam ist, dann zielt sie mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf die Gier oder Eitelkeit des Empfängers ab. Aber natürlich kann es auch sein, dass der Absender einer gewöhnlichen Nachricht solche Gefühle hervorrufen möchte. Ein bayessches Modell setzt das Vorwissen über bedingte Wahrscheinlichkeiten dieser Art mit den vorliegenden Daten in Beziehung



Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

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

ISTOCK / ADVENTR

und bestimmt daraus ziemlich genau die Wahrscheinlichkeit dafür, dass soeben eine Spammail eingegangen ist – oder eben doch eine ganz normale Nachricht.

Zu unserem Wissen darüber, wie Kinder lernen, passt Top-down besser als Bottom-up. Aus diesem Grund haben meine Kollegen und ich uns in den letzten 15 Jahren bei unserer Arbeit über Kindesentwicklung auf bayessche Ansätze konzentriert. Mit Hilfe dieser Techniken haben wir und andere erforscht, wie Kinder Kausalzusammenhänge erlernen. Dabei versuchen wir vorherzusagen, wann und wie sie sich neue Vorstellungen über die Welt zulegen und bereits vorhandene revidieren.

Was ist viel gefährlicher als künstliche Intelligenz? Natürliche Dummheit

Bayessche Methoden sind ein hervorragendes Konzept, um Maschinen wie Menschen lernen zu lassen. Im Jahr 2015 veröffentlichte Joshua Tenenbaum vom Massachusetts Institute of Technology, mit dem ich auch schon zusammengearbeitet habe, gemeinsam mit Brenden M. Lake von der New York University und seinen Kollegen eine Studie zu diesem Thema in der Zeitschrift »Science«. Die Autoren entwickelten eine künstliche Intelligenz, die unbekannte, handgeschriebene Buchstaben erkennt – eine Aufgabe, die Menschen leicht fällt und Maschinen große Schwierigkeiten bereitet.

Denken Sie an Ihre eigenen Fähigkeiten: Auch wenn Sie zum ersten Mal in Ihrem Leben ein Zeichen auf einer alten japanischen Schriftrolle sehen, können Sie wahrscheinlich sagen, ob es mit einem Zeichen auf einer anderen Schriftrolle übereinstimmt oder nicht. Sie können es einigermaßen mit der Hand kopieren und sogar ein Fantasiezeichen malen, das irgendwie altjapanisch aussieht; und Sie erkennen auf den ersten Blick den Unterschied zu einem koreanischen oder kyrillischen Schriftzeichen. Genau das konnte die Software von Tenenbaums Gruppe am Ende auch.

Beim Bottom-up-Lernen würde der Computer aus Tausenden von Beispielen gewisse Muster extrahieren und mit deren Hilfe neu vorgelegte Zeichen erkennen. Stattdessen legte sich das System nach dem bayesschen Konzept ein Modell dafür zu, wie man einen Buchstaben zeichnet; zum Beispiel ein Strich nach rechts gefolgt von einem Strich nach oben. Und nachdem die Software mit dem einen Buchstaben fertig war, ging sie zum nächsten über.

Wenn das Programm einen Buchstaben sah, dann konnte es die Folge der Striche herleiten, aus denen er bestand, und daraufhin eine ähnliche Strichfolge produzieren. Im Prinzip vollzog es dieselben Gedankengänge wie ich, als ich die Mail von der dubiosen Zeitschrift als Spam klassifizierte. Nur ging es diesmal nicht um die Wahrscheinlichkeit, dass die Nachricht in unlauterer Absicht verfasst war, sondern um diejenige, dass eine bestimmte Folge von Strichen den erwünschten Buchstaben ergeben würde. Dieses Top-down-Programm funktionierte bedeutend besser

als Bottom-up-Techniken des Deep Learning, die auf dieselben Daten angewandt wurden, und zeigte frappante Ähnlichkeiten mit der Leistung von Menschen.

Die beiden führenden Ansätze des maschinellen Lernens, Bottom-up und Top-down, ergänzen sich in ihren Stärken und Schwächen. Bei Bottom-up muss das System zunächst absolut nichts über Katzen wissen, braucht aber eine große Datenmenge. Das bayessche System dagegen kann aus nur wenigen Beispielen lernen und ist gut im Verallgemeinern, benötigt jedoch sehr viel Vorarbeit, bis es die richtigen Hypothesen entwerfen kann. Und bei beiden Systemarten stoßen die Entwickler auf gleichartige Hindernisse. Beide funktionieren nur bei relativ begrenzten und gut definierten Problemen, wie etwa dem Erkennen von Katzen oder Buchstaben oder dem Spielen auf dem Atari.

Unter diesen Einschränkungen leiden kleine Kinder nicht. Irgendwie, so haben Entwicklungspsychologen herausgefunden, kombinieren sie das Beste aus beiden Methoden und gehen noch weit darüber hinaus. Augie kann – ganz top-down – aus nur einem oder zwei Beispielen lernen. Aber zugleich extrahiert er aus den Daten bottom-up völlig neue Begriffe, die nicht von Anfang an da waren.

Augie erkennt mühelos Katzen und unterscheidet Buchstaben; aber darüber hinaus zieht er kreative und überraschende neue Schlussfolgerungen, die weit über seine Erfahrungen oder sein Hintergrundwissen hinausgehen. Vor Kurzem erklärte er mir, wenn ein Erwachsener sich in ein Kind zurückverwandeln wolle, dann solle er möglichst kein gesundes Gemüse essen. Klar doch: Wenn du Spinat und ähnliches isst, wirst du groß und stark; wenn du aber genau das Gegenteil willst ... Bisher haben wir so gut wie keine Idee, wie diese Art von kreativer Argumentation entsteht.

Wir sollten an diese immer noch unverstandenen und geheimnisvollen Kräfte des menschlichen Geistes denken, wenn wir die Behauptung hören, die KI sei eine existenzielle Bedrohung. Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen klingen beängstigend, und in gewisser Weise sind sie es auch. Immerhin arbeitet das Militär schon an ihrem Einsatz für die Steuerung von Waffen.

Aber es gibt etwas, das weitaus gefahrenträchtiger ist als künstliche Intelligenz: natürliche Dummheit. Wir Menschen müssen uns viel geschickter als in der Vergangenheit anstellen, wenn wir mit den neuen Technologien richtig umgehen wollen. ◀

QUELLEN

Gopnik, A., Tenenbaum, J.: Bayesian Networks, Bayesian Learning and Cognitive Development. In: *Developmental Science* 10, S. 281–287, Mai 2007

Gopnik, A.: The Gardener and the Carpenter: What the New Science of Child Development Tells Us about the Relationship between Parents and Children. Farrar, Straus & Giroux, New York 2016

Lake, B. M. et al.: Human-Level Concept Learning through Probabilistic Program Induction. In: *Science* 350, S. 1332–1338, 11. Dezember 2015

Mnih, V. et al.: Human-Level Control through Deep Reinforcement Learning. In: *Nature* 518, S. 529–533, 26. Februar 2015

GEOMETRIE

GERECHTES TORTENTEILEN

Einfach vom Mittelpunkt nach außen schneiden kann jeder. Doch zwei britische Geometer haben gezeigt, dass es darüber hinaus eine ungeahnte Fülle an gerechten Zerlegungen gibt.



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

» spektrum.de/artikel/1547075

Die schönsten mathematischen Probleme haben eine einfache Fragestellung, aber meist eine komplizierte Lösung. Eines der berühmtesten Beispiele dafür ist der Große Satz von Fermat aus dem 17. Jahrhundert: Erst 1995 gelang es Andrew Wiles, das Theorem zu beweisen (**Spektrum** August 1997, S. 113). Seine Arbeit war derart kompliziert, dass nur wenige Experten sie verstehen. Wir müssen darauf vertrauen, dass sie keinen Fehler übersehen haben.

Wenn ein einfaches Problem aber eine unkomplizierte Lösung hat, die jeder nachvollziehen kann, hat man es geradezu mit einem mathematischen Wunder zu tun. Ein Beispiel für einen solchen Fall sind die geometrischen Konstruktionen, die dieser Artikel im Folgenden vorstellt. Sie sind so simpel, dass man sich fragt, warum niemand sie vor dem 21. Jahrhundert entdeckte.

Krumm schneiden erlaubt

Das einfachste Verfahren, eine Torte in n Stücke gerecht aufzuteilen, ist das des Konditors: Man setzt das Messer im Mittelpunkt an und schneidet bis zum Rand; dann dreht man das Messer um den Winkel $360^\circ/n$ und wiederholt die Prozedur insgesamt n -mal. Die dadurch entstehenden n Tortenstücke sind alle deckungsgleich und haben deshalb auch die gleiche Fläche. Des Messers Schneide muss dabei nicht zwingend gerade sein, sondern darf wilde Kurvenformen annehmen. Dafür gibt es unendlich viele Möglichkeiten (siehe »Radiale Zerlegungen«, rechts).

Zerlegungen dieser Art werde ich im Folgenden als radiale Zerlegungen bezeichnen. Sie haben zwei Eigenschaften gemeinsam: Der Mittelpunkt ist Ecke aller Stücke, und die Teilung ist rotationssymmetrisch. Dreht man die Torte um $360^\circ/n$, bleibt das Muster der Schnitte gleich.

Für den Betreiber eines Cafés oder Restaurants mag diese Möglichkeit herzlich uninteressant oder sogar unzuverlässig sein. Ein Mathematiker jedoch geht, wenn er nicht gerade Hunger hat, mit Freuden von der Torte – oder

auch Pizza – zu deren abstrakter Form über und fragt sich: Gibt es weitere Möglichkeiten, eine Kreisscheibe in deckungsgleiche Stücke zu zerlegen? Falls ja, ergeben sich weitere Fragen:

Kann man die Zerlegung so gestalten, dass der Mittelpunkt der Kreisscheibe ...

- a) ... nicht Ecke aller Stücke ist?
- b) ... Ecke keines der Stücke ist?
- c) ... außerhalb einiger Stücke liegt?
- d) ... innerhalb eines Stückes liegt und damit nicht Teil eines Rands ist?

Außerdem:

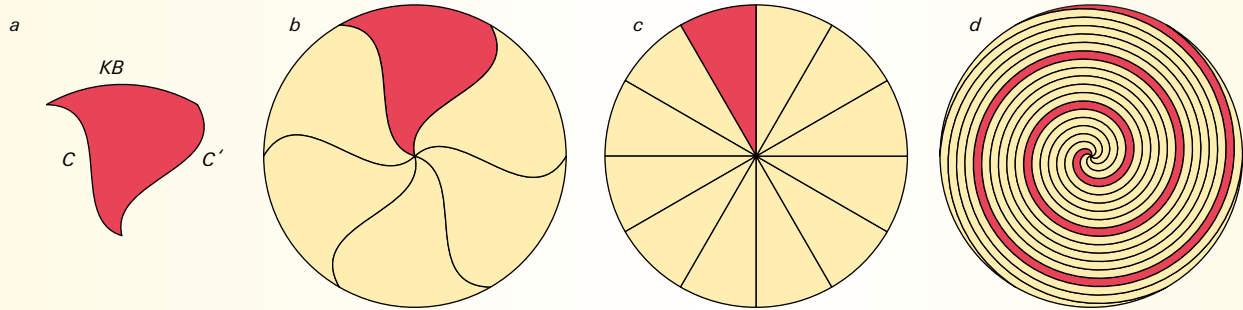
- e) Gibt es Zerlegungen, die nicht rotationssymmetrisch sind?
- f) Kann man alle möglichen Zerlegungen in deckungsgleiche Stücke klassifizieren und zeigen, dass diese Klassifizierung vollständig ist?

Wahrscheinlich haben die meisten Fachleute nicht lange über diese Fragen nachgedacht. Eine Zerlegung, die nicht radial ist, kommt einem nicht unmittelbar in den Sinn; also glaubten die Leute, es gebe nichts anderes – und ließen sich etwas sehr Interessantes entgehen.

Die Mathematiker Joel Haddley und Stephen Worsley von der University of Liverpool dagegen gingen die Fragen an, und zwar auf die fachübliche Weise. Sie betrachteten ganz abstrakt nur noch kongruente Teilmengen einer Kreisscheibe. Aber nicht irgendwelche Teilmengen! Vielmehr soll ein Tortenstück zusammenhängend sein: Zwei Punkte eines Stückes können stets durch eine stetige Kurve verbunden werden, die ganz innerhalb des Stückes verläuft. Es soll keine unendlich dünnen Auswüchse enthalten, und sein Rand soll eine Kurve sein, die sich an keiner Stelle selbst trifft. Das schließt auch Tortenstücke mit »Wespentaille« aus, deren zwei Teile nur mit einem einzigen Punkt zusammenhängen.

Unter diesen Anforderungen gelang es den zwei Mathematikern, vier der zuvor formulierten Fragen zu beantworten.

Radiale Zerlegungen

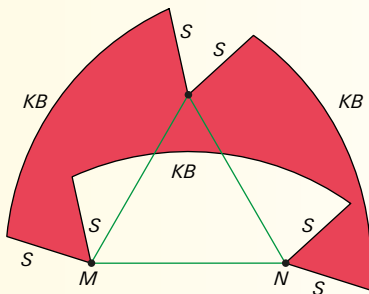


Der Rand eines radialen Tortenstücks (a) besteht aus drei Teilen: einer stetigen Kurve C , die von der Tortenmitte zu ihrem Rand führt; einem Kreisbogen

KB , der dem n -ten Teil des Kreisumfangs entspricht; und C' , der am Mittelpunkt der Torte um $360^\circ/n$ gedrehten Kurve C . n Exemplare dieses

Stücks füllen die Kreisscheibe (b). Die herkömmliche Aufteilung in Kreissektoren (c) ist ein Spezialfall einer radialen Zerlegung; ebenso eine Spirale (d).

Doppelt radiale Stücke



Der Rand dieses doppelt radialen Stücks besteht aus drei deckungsgleichen Abschnitten, die sich in den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks (grün) treffen. Jeder Abschnitt besteht

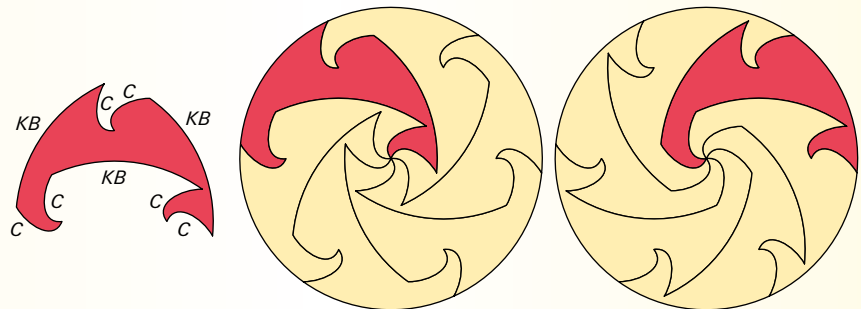
aus zwei gleichen Strecken S und einem 60-Grad-Kreisbogen KB . Der Winkel zwischen zwei benachbarten Strecken S beträgt 60 Grad. Ein Stück hat also die Form $(S-KB-S)$ $(S-KB-S)$

$(S-KB-S)$. Um eine Kreisscheibe auszufüllen, kann man die Stücke entweder mit dem Punkt M oder mit dem Punkt N in den Kreismittelpunkt setzen (Mitte und rechts).

Dieses Beispiel doppelt radialer Schnitte lässt sich auf zwei Weisen verallgemeinern:

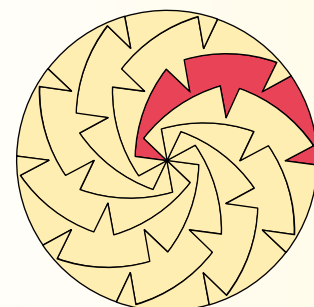
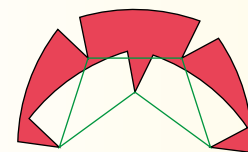
- Erstens kann jede der Strecken S durch eine stetige Kurve C ersetzt werden, beispielsweise durch einen Bogen (rechts) oder eine Zickzackkurve. Der Rand eines Stücks hat dann die Form $(C-KB-C)$ $(C-KB-C)$ $(C-KB-C)$. Die Kurve C darf nicht so stark von der Strecke S , die sie ersetzt, abweichen, dass die Randkurve sich selbst überschneidet; aber selbst mit dieser Einschränkung gibt es unendlich viele Möglichkeiten, C zu wählen. Darüber hinaus kann man auch die Länge dieses Abschnitts variieren, ebenso den Winkel zwischen der Strecke (beziehungsweise Kurve) und den im selben Punkt endenden Seiten des gleichseitigen Dreiecks.

- Zweitens darf der Rand eines Tortenstücks aus mehr als drei kongruenten Abschnitten bestehen. Die Grafik rechts liefert ein Beispiel für ein Stück mit fünfteiligem Rand. Die Treffpunkte der Abschnitte bilden dann kein gleichseitiges Dreieck mehr, sondern ein regelmäßiges Fünfeck mit einer



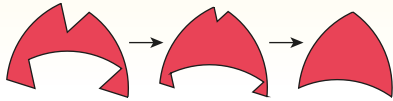
eingeklappten Ecke (**Spektrum** Juli 2007, S. 98). Der Rand des Stücks wäre als $(S-KB-S)$ $(S-KB-S)$ $(S-KB-S)$ $(S-KB-S)$ $(S-KB-S)$ zu beschreiben. Auch hier lassen sich die Strecken durch stetige Kurven ersetzen und die entsprechenden Winkel und Abschnittslängen ändern.

Das Verfahren funktioniert nicht nur, wenn der Rand des Tortenstücks aus drei oder fünf Abschnitten besteht, sondern mit n Abschnitten für jedes ungerade $n \geq 3$. Zwei benachbarte Exemplare von S beziehungsweise C treffen sich unter dem Winkel $180^\circ/n$, und die Torte besteht aus $2n$ deckungsgleichen Stücken, die auf zwei Arten angeordnet sein können.



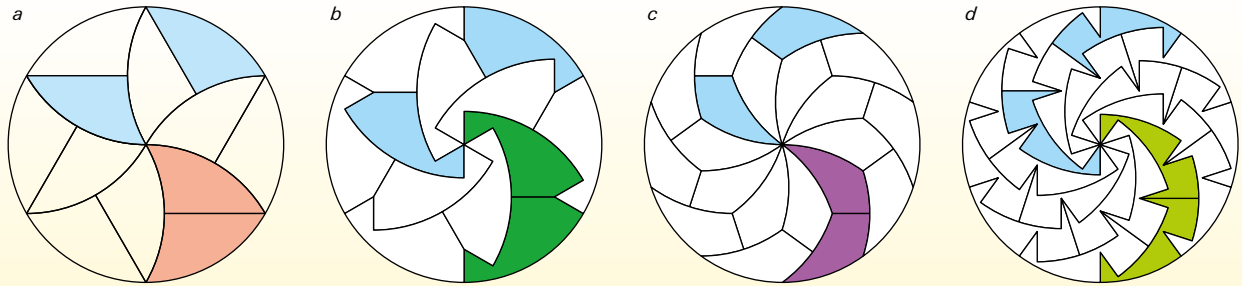
Nichtradiale Zerlegungen

Den Ausgangspunkt bietet das doppelt radiale Tortenstück von der vorigen Seite: Reduziert man dessen



Strecken S zu Punkten, wird daraus das rosafarbene Tortenstück, das durch drei Kreisbögen begrenzt wird (a). Teilt man die Tortenstücke entlang ihrer Symmetrieachse in zwei Hälften, findet man die elementarste nichtradiale Zerlegung aus zwölf Teilen. Bild b zeigt eine Variation

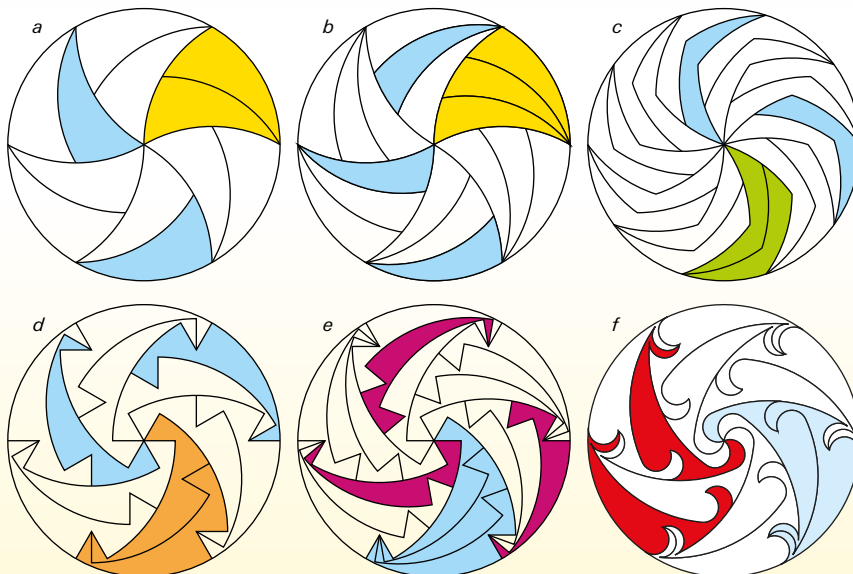
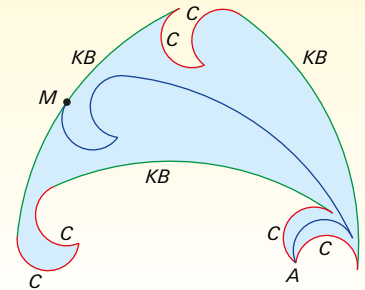
dieses Prinzips. In derselben Weise ergeben sich c und d aus dem Tortenstück mit fünfteiligem Rand (S. 81, unten). Nach einem Schnitt entlang der Symmetrieachse berührt jeweils eine der beiden Hälften nicht mehr den Mittelpunkt der Torte.



Tranchierte Torte

Doppelt radiale Tortenstücke können der Länge nach aufgeschnitten werden. Dabei ergibt sich eine nichtradiale Zerlegung, ohne dass man Stücke umdrehen müsste. Die Zeichnung rechts zeigt das Tranchierungsverfahren. Der Rand der Figur ist durch $(C-KB-C) (C-KB-C) (C-KB-C)$ gegeben.

Die Klammern kann man auch umordnen: $(C-KB-C-C) KB (C-C-KB-C)$. Die Figur hat also die Form $X-KB-X$, wenn man – was sich als sinnvoll herausstellt – den zweiten Teil X in Gegenrichtung durchläuft. Fügt man eine weitere Kurve $X = C-KB-C-C$, um 30 Grad gedreht, zwischen A und dem



Mittelpunkt M des Kreisbogens KB ein, hat man das ursprüngliche doppelt radiale Stück in zwei perfekt deckungsgleiche Stücke geteilt. Jedes von ihnen hat die Umrandung $X-KB/2-X$. Nach demselben Rezept lässt sich ein Stück auch in n Scheiben teilen – solange sich deren Ränder nicht überschneiden.

Beispiele für das Tranchieren einer Torte finden sich links. Die untranchierten Stücke in a bis e sind zwar achsensymmetrisch, aber das ist nicht Bedingung. Das sieht man an Torte f , die aus Exemplaren des oben gezeigten Stücks besteht.

ten. Ihre Arbeit sorgte für einige Überraschungen. So gibt es radiale Teilungen in Tortenstücke, die sich auf zwei unterschiedliche Weisen zu einer Torte zusammensetzen lassen (siehe »Radiale Zerlegungen«, S. 81). Tatsächlich existieren unendlich viele dieser »doppelt radialen Zerlegungen«. Damit haben Haddley und Worsley eine positive Antwort auf die grundsätzliche erste Frage gefunden.

Es ist kein komplizierter Beweis nötig, um die geometrischen Überlegungen der zwei Wissenschaftler zu bestätigen. Scharfes Hinschauen auf die Zeichnungen genügt, um sich zu vergewissern, dass alle Teile kongruent sind und sich auf zwei verschiedene Arten zur Kreisscheibe fügen.

Haddleys und Worsleys Veröffentlichung enthält allerdings ein Theorem, das sich nicht durch ein paar Zeichnungen beweisen lässt: Es gibt zwar sehr viele doppelt radiale Zerlegungen, aber kein radiales Tortenstück, das eine Kreisscheibe auf mehr als zwei verschiedene Arten ausfüllt.

Mit Symmetrie findet man neue Zerlegungen

Bei den doppelt radialen Teilungen gibt es einen bedeutenden Spezialfall: Sind die Tortenstücke achsensymmetrisch, dann ergeben die beiden unterschiedlichen Pflasterungen der Kreisscheibe das gleiche Muster. Schneidet man die Tortenstücke aber entlang der Symmetrieachse durch, ist die neue Zerlegung nicht mehr radial. Die Stücke sind zwar alle deckungsgleich, doch nur die Hälfte von ihnen berührt den Mittelpunkt der Torte (siehe »Nichtradiale Zerlegungen«, links). Das beantwortet die Fragen a) und c).

Auch diese Tortenstücke lassen sich beliebig variieren. So bilden die nichtradialen Zerlegungen die dritte unendlich große Familie gerechter Tortenteilungen.

Damit sich die Stücke zu einer Torte zusammenfügen, muss die Hälfte von ihnen allerdings auf den Kopf gestellt werden. Das möchte man bei einer echten Torte tunlichst vermeiden. Gibt es auch nichtradiale Zerlegungen, bei denen man die Stücke nicht umdrehen muss?

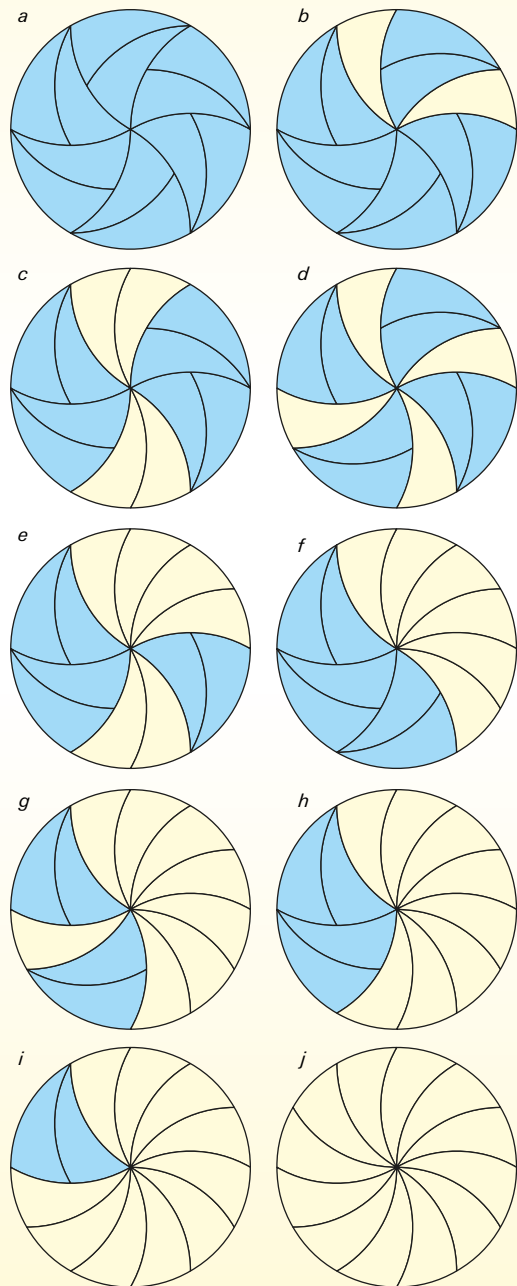
Diese Frage führte die zwei Geometer zu einer weiteren Idee: Man schneide die Stücke nicht einfach entlang einer Symmetrieachse entzwei, sondern der Länge nach in Scheiben. Einige der neuen Tortenstücke berühren den Mittelpunkt der Torte ebenfalls nicht – und keines von ihnen muss umgedreht werden. Wieder lässt sich bereits an den Abbildungen der Zerlegungen (siehe »Tranchierte Torte«, links) erkennen, dass diese Methode funktioniert.

Zu allem Überfluss kann man die Stücke so anordnen, dass die Zerlegung einer Torte nicht mehr rotationsymmetrisch ist – das beantwortet Frage e). Allein die Teilung a) in »Umordnen der Tranchen« (rechts) lässt 62 Anordnungen zu. Wieder gibt es zu einer gegebenen Zerlegung unendlich viele Variationen, indem man alle Randkurven gleichartig deformiert.

Drei der anfangs gestellten Fragen bleiben allerdings unbeantwortet. Haddley und Worsley vermuten, dass die hier aufgeführten Zerlegungen die einzigen sind, die eine Torte in deckungsgleiche Stücke teilen. Wenn sie Recht haben, wäre Frage f) beantwortet. Die Antworten zu b) und d) fielen dann negativ aus. Wird jemand diese Vermutung je bestätigen oder widerlegen können? Womöglich durch einen Beweis, der jedem zugänglich ist? 4

Umordnen der Tranchen

Indem man gewisse Stücke der rotationssymmetrischen Teilung a) umdreht (hellgelb) und das Ganze etwas umarrangiert, erzeugt man asymmetrische Muster. Nur c und d haben noch eine Rotations-symmetrie. Insgesamt können diese zwölf Tortenstücke auf 62 verschiedene Arten eine Kreisscheibe pflastern.

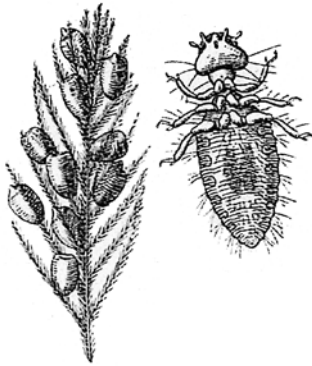


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: HADDELEY, J.A., WORSLEY, S.: INFINITE FAMILIES OF MONOEDRAL DISK TILINGS. IN: ARXIV 1512.03794, 2016

QUELLE

Haddley, J., Worsley, S.: Infinite Families of Monohedral Disk Tilings. arXiv:1512.03794, 2016

1918



Bis sechs Millimeter lang werden die heute als Kieferläuse bezeichneten Quälgeister.

PARASITEN IM HÜHNERSTALL

»Die Federlinge (Mallophaga), Pelzfresser, Haarlinge oder Hühnerläuse, wie sie vielfach fälschlich genannt werden, äußerlich läuseähnlich, schmarotzen auf Wild- und Hausgeflügel. Sie haben beißende Mundteile und fressen Oberhautschuppen, Federn und Haare. Blut saugen sie nicht, ma-

chen aber das Geflügel unruhig, weil sie einen fortwährenden Juckreiz ausüben. Wo die Hühner Staubbäder haben, können die Federlinge nicht übermäßig auftreten.« *Kosmos 4, S. 98*

ELEKTRISCH BELEUCHTETE WEICHEN

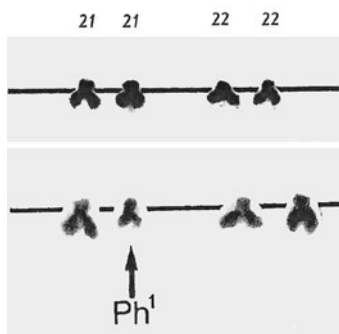
»Die elektrische Beleuchtung der Weichenlaternen hat neuerdings eine derartige Vervollkommnung erfahren, daß sie die gleiche Betriebssicherheit besitzt wie die Petroleumbeleuchtung. Die Industrie liefert jetzt Glühlampen, die den bei dem Vorüberfahren der Züge und bei dem Umstellen der Weichen auftretenden Erschütterungen durchaus gewachsen sind. Die elektrische Beleuchtung ist bedeutend wirtschaftlicher als die Petroleumbeleuchtung, insbesondere fällt auch die zeitraubende, für das Bedienungspersonal gefährliche Wartung der Lampen fort.« *Die Umschau 16, S. 187*

EIN PLANETOID MIT EIGENEM SATELLIT?

»Eine auf der Heidelberger Sternwarte auf photographischem Wege am 3. Januar gelungene Entdeckung eines neuen Himmelskörpers hielt die Sternforscher in Spannung. Trotz seines geringen Abstandes von der Erde entsprach die Helligkeit des neuen Planeten nur der elften bis zwölften Sterngröße, woraus zu entnehmen ist, daß es sich um einen sehr kleinen Himmelskörper handeln muß. Um so überraschender ist die Mitteilung des Professor Wolf, daß er am 5. Februar einen Begleiter vierzehnter Größe aufgefunden habe.« *Prometheus 1485, S. 267*

1968

CHROMOSOMENTEST FÜR DIE LEUKÄMIEDIAGNOSTIK



Die Chromosomenpaare 21 und 22 eines Gesunden (oben) und eines an chronischer myeloischer Leukämie Erkrankten (unten).

»Bei Krankheiten, die der Krebserkrankung nahe stehen, finden sich charakteristische Chromosomenanomalien. Bei einer bestimmten Leukämieform ist ein Chromosom Nr. 21 (Philadelphia-Chromosom) verkürzt. Es hat sich gezeigt, daß bei wirksamer antileukämischer Behandlung die Zellen mit dem Philadelphia-Chromosom vollständig aus dem Blut verschwin-

den können, so daß wiederholte Chromosomenanalysen Einblicke in den Effekt einer eingeschlagenen Therapie zu geben vermögen.« *Die Umschau 8, S. 246*

LASER IM TUNNELBAU

»Im modernen Tunnelbau fräsen Tunnelvortriebsmaschinen den gesamten Stollenquerschnitt kontinuierlich heraus. Ein besonderes Problem ist hierbei jedoch die Einhaltung der vorgeschriebenen Stollenrichtung. Hier bietet die Lasertechnik neue Möglichkeiten. Der Laser wird an der Deckenfirste befestigt und projiziert einen intensiven, farbigen Lichteffekt auf eine Rasterscheibe an der Vortriebsmaschine. Der Maschinenführer kann dann jede Abweichung von der Längsachse sofort erkennen und sie korrigieren. Für diese Leitstrahltechnik sind besonders Helium-Neon-Gaslaser geeignet.« *Elektronik 4, S. E61*

TRÄUMEN IST GESUND

»Die Möglichkeiten der experimentellen Traumforschung wurden durch die Entdeckung einer Periodizität während des Schlafes sehr erweitert: Durch fortlaufende Registrierung der Augenbewegungen wurde gefunden, daß bei jeder Versuchsperson in einem Nachtschlaf ca. fünf Phasen von REM (Rapid Eye Movements) auftreten. Wenn man die Personen bei Beginn der Phasen weckt, so wirkt sich dies negativ auf ihr subjektives Befinden aus. Wurden Versuchspersonen während oder anschließend an REM-Phasen geweckt, konnten sie in 80% der Weckungen über Träume berichten, außerhalb nur in 7 bis 10%.« *Die Umschau 8, S. 246*

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM
40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In unserem Jubiläumsjahr laden wir Sie zu spannenden Vorträgen, lehrreichen Seminaren und Workshops ein. Lernen Sie Wissenschaft mit **Spektrum** in einem neuen Format kennen – live!

Auftakt der Veranstaltungsreihe mit einem Vortrag des Geruchsforschers

Prof. Hanns Hatt

Die Macht der Düfte

Welche Rolle spielen Riechrezeptoren außerhalb der Nase?

Wann? 12. April 2018, 19.00 Uhr

Wo? MAINS Mathematik-Informatik-Station,
Kurfürstenanlage 52, 69115 Heidelberg

Eintritt frei! Anmeldung unter live@spektrum.de

Teilchenphysik für jedermann

Leitung: Prof. Matthias Schott

Wann? 25. Mai 2018, 10.00–18.00 Uhr

Wo? Institut für Physik, Johannes Gutenberg- Universität Mainz

In diesem eintägigen Workshop konstruieren und betreiben die Teilnehmer einen eigenen Detektor und weisen kosmische Höhenstrahlung nach. Spezielle Vorkenntnisse sind nicht erforderlich.

Jetzt anmelden!

Spektrum.de/live



ILLUSTRATION: LUMA MARGHERITA CAROLLI UND JUDITH LA SPOC. BLACK PESTERK LEI. FOTO: AUS SEAD LOU. ANDERS SEHEN. DIE MIT FRIEDRICH DES GOLDMANN VERLAGS, MÜNCHEN

Ein Raubtier im Wald (links) zu übersehen, konnte für unsere Vorfahren tödlich enden. Einen Überlebensvorteil hatten jene, deren Wahrnehmungsapparat bestimmte Muster rasch erkannte und als potenzielle Gefahr interpretierte – beispielsweise ein Augenpaar. Diese Prägungen bestimmen noch heute unsere Wahrnehmung. Das rechte Bild zeigt, wo das Raubtier lauert.



Beau Lotto
ANDERS SEHEN
 Die verblüffende Wissenschaft der Wahrnehmung
 Aus dem Englischen von Katja Hald und Jens Hagedstedt
 Goldmann, München 2018
 448 S., € 14,-

NEUROWISSENSCHAFT DIE SINNE ÜBERWINDEN

Innehalten, Reflexe unterbrechen, Neues aufnehmen: Ein Neurowissenschaftler rät, eingefahrene Bahnen bewusst zu verlassen.

»Ich möchte, dass Sie insgesamt weniger wissen und mehr verstehen.« Dieser Satz aus Beau Lottos Buch fasst die Botschaft des Autors vielleicht am besten zusammen.

Der Autor lässt sich mehr als 400 Seiten Zeit, seine Leser von Platons Höhlengleichnis hin zu den modernen Erkenntnissen der Wahrnehmungspsychologie zu führen. Dabei erläutert der Professor der Neurowissenschaften am University College London, wie die Evolution die menschliche Wahrnehmung geprägt hat, deren Automatismen es uns unmöglich machen, die Wirklichkeit wahrzunehmen – und wie man sich aus diesen Prägungen befreien und sein Leben bereichern kann.

»Anders sehen« beginnt als Sachbuch. Vielleicht etwas zu ausführlich legt Lotto dar, wie sich die Sinne im Verlauf der Evolution so entwickelt haben, dass sie unser Überleben sichern. Das geschieht nicht etwa, indem die Sinnesorgane die Welt besonders genau wahrnehmen, denn das tun sie nicht; man denke nur an das überaus enge Spektrum der Licht- und Schallwellen, das uns ohne technische Hilfsmittel zugänglich ist. Vielmehr fokussieren die Sinne auf bestimmte Reize, die das

ILLUSTRATION: LUNA MARGHERITA CAROLLINO LUDOVICA SICO, BLACK FISH PANK LTD. 2017. AUS BEAU LOTTO: ANDERS SEHEN, DIE VERBLÜFFENDE WISSENSCHAFT DER WAHRNEHMUNG, MIT FROL GEN, DES GOLDMANN VERLAGS, MÜNCHEN



Gehirn zu adäquaten Reaktionen veranlassen – etwa in Form bewährter körperlicher Aktivitäten. Wichtige Erkenntnis dabei: Die erfassten Informationen haben keine inhärente Bedeutung. Erst die Interpretation durch das Gehirn filtert und formt aus ihnen die wahrgenommene »Realität«. Erstaunlich wenig Anteil kommt dabei bewusst – und somit freien – Entscheidungen zu.

Durch optische Täuschungen und Anleitungen zu kleinen Experimenten macht der Autor für seine Leser die Eigenheiten der

Sinneswahrnehmung bewusst erfahrbar. Auch historische Persönlichkeiten und ihre Erfolge oder Fehlschläge müssen gelegentlich herhalten, um bestimmte Mechanismen zu veranschaulichen – wenn gleich das manchmal konstruiert wirkt.

Doch Lotto geht es mehr um die Dinge, die auf Grund der Prägungen des Wahrnehmungsapparats normalerweise aus unserer »Wirklichkeit« herausfallen. Zwar sei es für das Individuum gefährlich, »anders« zu sehen als evolviert, weil damit die per Selektion

entstandenen Überlebensvorteile eingeschränkt würden. Aber dieses »Ausder-Reihe-Tanzen« oder auch Querdenken bringe woanders einen Nutzen: Ein komplexer organisiertes Gehirn kann besser auf Veränderungen in einer komplexen Umwelt reagieren.

Jenem Querdenken widmet Lotto das letzte Drittel des Buchs. Schritt für Schritt gibt er Anleitungen, wie man aus den Wahrnehmungsautomatismen ausbrechen kann. Zum einen gehe es darum, innezuhalten und reflexhafte Reaktionen zu unter-

brechen, um andere Handlungsoptionen zu erkennen. Zum anderen sei es wichtig, sich neuen Reizen auszusetzen: an bisher nicht aufgesuchte Orte reisen (»Machen Sie sich schmutzig!«), Neues erleben, Menschen kennen lernen, sich neuen Argumenten öffnen. Beides führe zu neuen Prägungen, die künftig Wahrnehmungen und Handlungsoptionen erweitern könnten.

Gestützt auf Forschungsergebnisse zeigt der Neurowissenschaftler, wie Eltern durch eine solche veränderte Wahrnehmung ihre Kinder besser verstehen, Paare ihre Beziehung optimieren und Gesellschaften durch Diversität gewinnen. Zwischendrin rechnet er mit der zunehmenden Ökonomisierung des Bildungssystems ab, welche die für revolutionäre Ideen so wichtigen »Querdenker« verhindert.

»Anders sehen« ist leicht verständlich geschrieben, überrascht mit kreativer Gestaltung und ist auch dort, wo es Längen hat, nie wirklich langweilig – wengleich Lotto seine Botschaft vermutlich auf 100 Seiten weniger hätte vermitteln können. Was der Autor im ersten Teil über die Biologie und Neurologie der Wahrnehmung erzählt, ist nicht immer neu, aber zum Verständnis des späteren Teils unabdingbar. Und der zeigt sich sehr erhellend und bereichernd. Das Buch ist ein besserer Lebensratgeber als die meisten anderen Werke, die sich als solcher ausgeben.

Der Rezensent Björn Lohmann ist Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkten in den Lebens- und Umweltwissenschaften.

GEOLOGIE GESCHOSSE AUS DEM ALL

Impaktforscher stellen ihr Fachgebiet vor – knapp, verständlich und gut erzählt.

► Kometen sind kleine Himmelskörper, die aus der Frühzeit des Sonnensystems stammen und meist weit draußen ihre Bahnen ziehen. Asteroiden sind den Kometen verwandt, enthalten aber nicht so viele flüchtige Substanzen und kreisen in der Regel enger um die Sonne. Als Meteoroiden bezeichnet man die kleinen Geschwister der Asteroiden, die weniger als 50 Meter messen. Zu Meteoriten werden Meteoroiden dann, wenn sie in die Erdatmosphäre eindringen und Leuchterscheinungen verursachen. Ein Meteorit schließlich ist ein Festkörper aus dem Kosmos, der die Atmosphäre durchquert und auf dem Boden aufschlägt.

Diese Begriffe, die immer wieder Schwierigkeiten bereiten, klären Christian Köberl und Alwin Schönberger relativ weit vorn in ihrem Buch. Der Professor für Impaktforschung und planetare Geologie an der Universität Wien und der Wissenschaftsjournalist beantworten viele Fragen rund um Asteroiden, Meteoriten und Krater: Woraus bestehen die Brocken aus dem All? Was geschieht, wenn sie einschlagen? Lassen sie sich abwehren? Und warum enthalten Meteoritenkrater oft wertvolle Rohstoffe?

Den Autoren ist ein kurzweiliges, kompaktes Werk gelungen, das einen



Christian Köberl,
Alwin Schönberger
ACHTUNG STEINSCHLAG
Asteroiden und Meteoriten –
Tödliche Gefahr
und Wiege des Lebens
Brandstätter, Wien 2018
207 S., € 22,90

guten Überblick vermittelt. Eingangs umreißen sie die Geschichte der Meteoritenforschung von der Antike bis heute. Die meisten Leser dürfte erstaunen, wie jung die Erkenntnis ist, dass Meteoriten aus dem Kosmos stammen und auf der Erde Krater schlagen: Erst seit dem 19. Jahrhundert ist dies unter Wissenschaftlern allgemein akzeptiert. Am Beispiel des amerikanischen Unternehmers Daniel Barringer, der vor 100 Jahren im Barringer-Krater verbissen nach einem Meteoriten suchte, tragisch scheiterte und schließlich einer Herzattacke erlag, zeigen die Autoren, wie mühsam der Erkenntnisgewinn war und welchen Irrtümern die Forscher immer wieder aufsaßen.

Heute wissen Fachleute ziemlich genau, was sich beim Aufprall eines kosmischen Trümms abspielt. Köberl und Schönberger schildern das anhand von erdgeschichtlichen Ereignissen wie dem Ries-Impakt, der das Nördlinger Ries hervorbrachte, oder dem Chicxulub-Einschlag, der wohl maßgeblich zum Aussterben der Dinosaurier beitrug. Der Chicxulub-Meteorit war größer als der Mount Everest und krachte mit rund 140 000 Kilometern pro Stunde auf die Erde. Dabei entlud sich die Explosionsenergie vieler Millionen Atombomben und es entstand ein 40 Kilometer tiefes Loch, dessen Wände binnen Minuten einstürzten. Glühendes Gestein wurde zehntausende Kilometer weit geschleudert und setzte Wälder rund um den Globus in Brand; hunderte Meter hohe Tsunamis rollten gegen die Küsten. Und das war erst der Anfang der Katastrophe, denn nun setzten Entwicklungen ein, die das Klima drastisch veränderten und den Planeten für viele Jahre fast unbewohnbar machten.

In einem weiteren Abschnitt beschreiben die Autoren den Alltag von Meteoriten- und Kraterforschern aus eigener Erfahrung. Köberl und seine Mitarbeiter wirken an wissenschaftlichen Großprojekten mit, etwa an Forschungsbohrungen im Bosumtwi-Krater in Ghana. Der Geochemiker erzählt sehr lebendig, wie solche Untersuchungen ablaufen und welche Probleme dabei auftreten: unter anderem Wetterwidrigkeiten, strapaziöse Materialtransporte und abbrechende Bohrer. In dem Zusammenhang stellen die Autoren kurz den Werkzeugkasten der Impaktforscher vor, also das Spektrum der Untersuchungsmethoden von Fernerkundung über che-

mische Analysen und künstlich erzeugte seismische Wellen bis hin zu Computersimulationen. Erörterungen zur Geschichte des Sonnensystems, zur wirtschaftlichen Bedeutung von Meteoritenkratern, zu möglichen Abwehrmaßnahmen gegenüber heranrasenden Asteroiden und einigen weiteren Themen runden das Buch gelungen ab. Heraus kommt ein interessanter Band, der seinen Lesern keine besonderen Vorkenntnisse abverlangt. Die wenigen Kritikpunkte betreffen unter anderem einen Abschnitt, in dem die Autoren darlegen, dass Meteoriteneinschläge das Untergrundgestein zermalmen, porös machen und dadurch ein Labyrinth winziger Hohlräume schaffen, in denen heißes Wasser zirkulieren kann – möglicherweise Nischen für unterirdische Lebensgemeinschaften. Köberl und Schönberger fragen hier, ob der Chicxulub-Brocken die Entstehung neuen Lebens ermöglichte und »den Auftakt für alle Wesen bildete, die heute die Erde bevölkern«. So formuliert, lautet die Antwort natürlich Nein – ein seltsamer und völlig untypischer Lapsus der Autoren. Zudem ist der Band nur spärlich bebildert; zusätzliche Grafiken könnten an einigen Stellen, etwa wo es um Isotopenanalysen geht, die Verständlichkeit noch verbessern.

Das Buch eignet sich für alle Interessierten, die eine eingängige und fundierte Darstellung des Themas zu schätzen wissen.

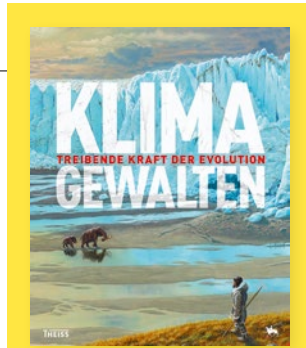
Der Rezensent Frank Schubert ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

PALÄONTOLOGIE ALS EUROPA FAST MENSCHENLEER WAR

Von Klimarekonstruktion bis zur Erfindung der Nähnadel begibt sich dieses Buch auf die Spuren vergangener Zeiten.

► Dieses opulente Buch ist sowohl hinsichtlich seiner Masse von zweieinhalb Kilogramm als auch bezüglich seines Inhalts ein Schwergewicht. Es verbindet moderne Klimaforschung mit einem Rückblick auf die Erdneuzeit, das Känozoikum. 24 Artikel von 21 Autoren(teams) beleuchten die Lebenswelten in diesem Kapitel der Erdgeschichte. Dabei behandeln sie dessen ältere Abschnitte, das Paläogen (66 bis 23 Millionen Jahre vor heute) sowie das Neogen (23 bis 2,6 Millionen Jahre vor heute). Vor allem aber widmen sie sich dem jüngeren Quartär (2,6 Millionen Jahre vor heute bis jetzt), in dem die Entwicklung des Menschen stattfand. Das Buch begleitet die gleichnamige Sonderausstellung im Landesmuseum für Vorgeschichte in Halle, die noch bis zum 21. Mai dieses Jahres läuft.

In den ersten Kapiteln geht es um die Erforschung des Klimas vergangener Zeiten. Im Vordergrund steht, welche Erkenntnisse die Wissenschaftler gewinnen, wenn sie grönländische und antarktische Eisbohrkerne und die darin gefangenen Gase analysieren. Die Autoren erörtern aber auch, wie sich Sedi- mentbohrkerne der Tiefsee



Harald Meller,
Thomas Puttkammer (Hg.)
KLIMAGEWALTEN
Treibende Kraft der Evolution
Theiss, Darmstadt 2017
447 S., € 39,95

interpretieren lassen, in denen die Abfolge von Kleinstlebewesen – etwa Foraminiferen – eine zeitliche Entwicklung wiedergibt. Die verschiedenen Verfahren werden anschaulich erklärt; hilfreiche Abbildungen verdeutlichen, wie Forscher die verschiedenen Messparameter auswerten. Zudem gehen die Autoren auf kosmische und astronomische Faktoren ein, beispielsweise die Milanković-Zyklen, denen heute eine größere Bedeutung beigemessen wird als noch vor 20 oder 30 Jahren.

Anhand beeindruckender Bilder lernen die Leser vor allem die Tier-, aber auch die Pflanzenwelt des Känozoikums kennen. Darstellungen von Objekten aus den großen Fossilagerstätten Mitteldeutschlands vervollständigen das Bild. Zu den besonders zu nennenden Fundorten gehören das Geiseltal in Sachsen-Anhalt und Wiesa in Sachsen. Staunen dürften viele Leser über die behandelten paläogeografischen Erkenntnisse. Die Veränderung der Kontinente ist ein bis heute andauernder Prozess und setzt sich weiter fort – auch infolge beschleunigten Abschmel-

zens kontinentaler Eismassen. Nichts ist von Dauer: Dieses Kredo durchzieht das ganze Buch.

Die zweite Hälfte des Werks befasst sich mit dem Aufkommen und der Verbreitung des Menschen. Vor- und Frühformen (*Australopithecus*, *Homo habilis*, *Homo erectus* und so weiter) erschienen schon im frühen Pleistozän, also etwa vor gut zwei Millionen Jahren. In diesem so genannten Eiszeitalter kam es – erdgeschichtlich gesehen wieder einmal – zu dramatischen Temperaturrückgängen, und beide Polkappen vereisten. Vor allem auf der Nordhemisphäre mit ihren großen Landmassen hatte das gravierende Folgen. Die schnelle Abfolge von Kalt- und sehr kurzen Warmzeiten führte zu permanenten Veränderungen der

des Feuers sowie »echte Erfindungen« (die neue Technikprinzipien in die Welt setzten) wie der Gebrauch von scharfen Steinwerkzeugen oder die dauerhafte Verbindung zweier Werkstücke mit Klebstoff. Fernwaffen wie Speer, Speerschleuder sowie Pfeil und Bogen steigerten den Jagderfolg beachtlich. Eine der wichtigsten Erfindungen im Eiszeitalter war jedoch die Nähnadel. Das Schaffen eines eigenen Mikroklimas dank wärmeisolierender Kleidung erlaubte dem Menschen, neue und unwirtliche Lebensräume zu erschließen. Wie am archäologischen Befund abzulesen, wurde das Sozialgefüge menschlicher Gruppen und ihre Organisation des Raums mit der Zeit immer komplexer. Als eine Art

Als »Spezialist im Unspezialisiertsein« besiedelte der Mensch nahezu alle Landschaftstypen des Planeten

Fauna und Flora. In den extremen Kältephasen lag die gemittelte Julitemperatur um 12 Grad unter der heutigen! Zu diesen Zeiten war Europa nur von wenigen tausend Personen besiedelt, also fast menschenleer. Aus heutiger Sicht kaum vorstellbar.

Dennoch verbreitete sich *Homo sapiens* überregional und besiedelte als »Spezialist im Unspezialisiertsein« nahezu alle Landschaftstypen des Planeten. Ausschlaggebend hierfür waren epochale Innovationen, die ihm sein einzigartiges Gehirn ermöglichte. Dazu gehörten die Beherrschung

Gegenpol zu den rein nützlichen Dingen schuf der Mensch die Kunst. Auch diesen wichtigen Aspekt behandeln die Autoren gebührend.

Der durchweg mit hilfreichen Grafiken, Diagrammen und sehr guten Fotos bestückte Band besticht mit seinen fachlich soliden und zugleich nachvollziehbar geschriebenen Beiträgen. Dem Buch sind viele Leser und der Ausstellung viele Besucher zu wünschen.

Der Rezensent Ingo Kraft arbeitet am Landesamt für Archäologie in Dresden. Er leitet die archäologische Denkmalpflege in Ost-sachsen.

PHYSIK VON GRAVITATION BIS WELTFORMEL

Der Wissenschaftsautor Rüdiger Vaas stellt Albert Einsteins Lebenswerk anschaulich und gut aufbereitet vor.

▶ Mit seiner speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie stellte Albert Einstein (1879–1955) das Grundverständnis von Raum und Zeit auf den Kopf. Zudem lieferte er wesentliche Beiträge zur physikalischen Chemie und Quantenmechanik. Der renommierte Wissenschaftsjournalist Rüdiger Vaas, der bereits mit Büchern wie »Jenseits von Einsteins Universum« (2015) und »Einfach Hawking!« (2016) auf sich aufmerksam machte, hat sich nun der großen Herausforderung gestellt, Einsteins Lebenswerk auf gerade einmal 120 Seiten nachvollziehbar zu präsentieren.

Eingangs umreißt Vaas die schulische und universitäre Laufbahn des Physikers, die ihn zunächst nicht zu einer Professur oder einem Lehramt führte, sondern ins Berner Patentamt. Anschließend widmet sich der Autor den wissenschaftlichen Durchbrüchen Einsteins, während er dessen Privatleben nur sehr knapp abhandelt. Vaas beschreibt, wie die Unvereinbarkeit von klassischer Mechanik (mit der Galilei-Transformation) und Elektromagnetismus (mit der Lorentz-Transformation) Einstein dazu veranlasste, die etablierten Konzepte von Raum und Zeit zu revolutionieren. Dies war die Geburtsstunde der speziellen Relativitätstheorie, der

zufolge bewegte Uhren langsamer gehen und bewegte Maßstäbe sich verkürzen. Wie klein diese Effekte in alltagsnahen Situationen allerdings ausfallen, macht Vaas anhand zahlreicher Beispiele und übersichtlicher Tabellen deutlich.

Nach der 1905 publizierten speziellen Relativitätstheorie wendete der Physiker sich einem weitaus schwierigeren Projekt zu: der allgemeinen Relativitätstheorie. Er brauchte zehn Jahre, um sie auszuarbeiten. Vaas erklärt anschaulich, wo der Ausgangspunkt von Einsteins Überlegungen lag. Dessen Kollege Paul Ehrenfest (1880–1933) hatte festgestellt, dass eine sehr schnell rotierende Scheibe, die den Gesetzen der speziellen Relativitätstheorie genügt, nur durch eine gekrümmte Raumzeit beschrieben werden kann. Einstein setzte voraus, dass die träge gleich der schweren Masse ist, dass sich also Trägheitskräfte wie bei der rotierenden Scheibe nicht von Gravitationskräften in Schwerfeldern unterscheiden lassen. Demnach, so seine Überlegung, müssen auch Objekte, die eine Schwerkraft ausüben, die Raumzeit krümmen – analog zur rotierenden Scheibe.

Von diesem Gedanken bis zu den Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie war es jedoch ein langer und mühsamer Weg. Einstein musste sich die nötige Mathematik weitgehend selbst aneignen und verirrt sich während der Ausarbeitung des Formalismus mehrmals in Sackgassen. Diese Kraft raubenden Schritte schil-

dert Vaas ausführlich und zitiert dabei Wissenschaftler, die Einstein von seinem Vorhaben abbringen wollten. Max Planck (1858–1947) sagte ihm beispielsweise: »Als alter Freund muss ich Ihnen davon abraten, weil Sie einerseits nicht durchkommen werden; und wenn Sie durchkommen, wird Ihnen niemand glauben.«



Entgegen Plancks Erwartung kam Einstein durch, und seine Theorie erschütterte die Grundfeste der Physik. Empirisch bestätigt wurden seine Feldgleichungen unter anderem dadurch, dass sie den richtigen Wert für die Periheldrehung des Merkurs lieferten. Das zugehörige Kapitel im Buch ist packend geschrieben; vor allem die vielen persönlichen Zitate vermitteln Einsteins Euphorie, nachdem er es geschafft hatte: »Ich war einige Tage fassungslos vor freudiger Erregung.«

Vaas schildert verschiedene Anwendungsbereiche der einsteinschen Gravitationstheorie, die Designer

Gunther Schulz passend illustriert hat. Unter anderem erfahren die Leser, dass Licht von schweren Objekten abgelenkt wird, was den so genannten Gravitationslinseneffekt ermöglicht, der Astronomen bei ihren Beobachtungen hilft. Auch geht der Autor auf die 2016 nachgewiesenen Gravitationswellen ein.

Die letzten beiden Kapitel des Bands fallen sehr knapp aus. Sie handeln von Einsteins Beiträgen zur Kosmologie und Quantenphysik. Viele Jahre lang diskutierte der Physiker mit Kollegen über mögliche Formen, die das Universum seiner Theorie zufolge haben könnte. Vaas stellt aber nur eines dieser Modelle vor. Auch auf die Beschreibung des fotoelektrischen Effekts, für die Einstein den Nobelpreis erhielt, geht der Autor nur kurz ein. Einstein zeigte damit auf, dass Licht nicht nur als Welle betrachtet werden kann, sondern auch Teilcheneigenschaften besitzt und seine Energie gequantelt überträgt. Den letzten Jahrzehnten im Leben des Physikers, in denen dieser sich mit Quantenmechanik und der Suche nach einer »Weltformel« befasste, widmet Vaas lediglich eine Hand voll Seiten.

Das Werk bietet interessierten Lesern – ob mit oder ohne physikalische Vorkenntnissen – einen guten Überblick über das Thema und vermittelt in zahlreichen Zitaten einen Einblick in Einsteins Persönlichkeit. Die begleitenden Illustrationen sind optisch bereichernd und stellen die wissenschaftlichen Sachverhalte verständlich dar.



Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2018

Der Preis wurde von der Verlagsgruppe von Holtzbrinck 1995 anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen und oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere in den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Text (Wortbeiträge Print und Online) und ein Preis in der Kategorie Elektronische Medien (TV, Hörfunk und Multimedia) sowie ein Nachwuchspreis (Jahrgang 1989 oder jünger) vergeben.

Der Preis in den Kategorien Text und Elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert. Bewerben Sie sich bis zum 2. April 2018 mit 3 Beiträgen (Text) bzw. 2-3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis.

KONTAKT

**Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group**

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Eine Shortlist mit den Nominierten wird vor der Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger auf der Webpage veröffentlicht. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Mitglied des Gesellschafter-Ausschusses,
Boehringer Ingelheim

ULRICH BLUMENTHAL

Redakteur „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

UTA-MICAELA DÜRIG

Geschäftsführerin, Robert Bosch Stiftung GmbH

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER

Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR

Moderator ARD-Sendungen



Auch finden sich einige beispielhafte Rechnungen und Ergebnisse von Experimenten, die zur Überprüfung von Einsteins Vorhersagen dienen. Vaas gibt dabei stets Messungengenauigkeiten an und erläutert, wie genau Einsteins Modelle bisher bestätigt wurden. Leider enthält sein Buch nur wenige biografische und geschichtliche Hintergründe, auch wenn sich im Einband ein stichwortartiger Lebenslauf des Physikers findet. Dafür bekommen neugierige Leser am Ende des Bands etwa zwei Dutzend hilfreiche Literaturempfehlungen.

Wer tiefer ins Thema einsteigen möchte, dem sei Vaas' wesentlich gehaltvolleres Werk »Jenseits von Einsteins Universum« empfohlen, das nur etwa anderthalb mal so viel kostet, aber mehr als viermal so viele Seiten umfasst und inhaltlich deutlich ergiebiger – aber auch weitaus anspruchsvoller ist.

Die Rezensentin Manon Bischoff ist Volontärin bei **Spektrum** der Wissenschaft.

MEDIZIN HERZ IST TRUMPF

Wir können viel für unsere Blutpumpe tun – doch die Gesundheit hängt nicht nur von unserem Verhalten ab.

▶ Hand aufs Herz, der Besuch beim Arzt erfolgt oft erst, wenn es dafür eigentlich schon zu spät ist. Ähnlich verhält es sich mit medizinischen



Felix Schröder, Nina Weber
WAS DAS HERZ BEGEHRT
Wie wir unser wichtigstes Organ bei Laune halten
Edel Books, Hamburg 2017
240 S., € 16,95

Ratgebern: Sie sind nun wirklich keine Herzenssache. Gelesen werden sie meist nur, weil es Gründe gibt, sich um die eigene Gesundheit zu sorgen. Das muss nicht immer so sein. Bei diesem witzigen, aber dennoch seriösen Buch, das Felix Schröder und Nina Weber über unser »wichtigstes Organ« geschrieben haben, braucht es jedenfalls zur Lesemotivation keinen kardiologischen Befund. Neugier und Freude an niveauvoller Unterhaltung genügen, um sich der Lektüre mit großem Gewinn zu widmen.

Schröder ist Assistenzarzt am Herz- und Gefäßzentrum im Albertinen-Krankenhaus in Hamburg. Zur Arbeit fährt er – seinem Herzen zuliebe – mit dem Fahrrad. Auch Koautorin Nina Weber radelt durch Hamburg. Die studierte Biochemikerin ist Redakteurin für Medizin- und Wissenschaftsthemen bei »Spiegel Online«. Somit kommt in dem Buch zusammen, was zusammen-

gehört: solides Fachwissen und die Fähigkeit, darüber eingängig und fesselnd zu schreiben.

Um es gleich klarzustellen: Wer einen gewollt unterhaltsamen Stil, Stichwort »Infotainment«, nicht leiden kann, dem wird dieses Buch viel Verdruss bereiten – womöglich bis hin zum kardiogenen Schock (starke Luftnot mit rasselndem Atemgeräusch, kalte Haut, kalter Schweiß und starke Schmerzen im Brustbereich). Wer das Leben jedoch ohnehin bereits ernst genug findet und einem Scherz daher nicht abgeneigt ist, der wird jede Menge Spaß an dem humorvoll servierten Detailwissen haben, das die Autoren hier unter oft sehr originellen Überschriften versammeln.

Die neun Kapitel befassen sich mit einem breiten Themenspektrum, schon erkennbar an den Oberzeilen: »Frauenherzen sind anders, Männerherzen auch«, »Ist Kaffee gefährlich fürs Herz?«, »Antikörper auf Kaperfahrt«, »Das Geheimnis gesunder Raucher« oder auch »Überzeugen Sie sich – nicht Ihren Arzt!«

Wer es kurz und bündig mag, kommt vor allem bei den immer wieder eingestreuten »Steckbriefen« auf seine Kosten. Sie stellen »Das Babyherz«, »Das alte Herz«, »Das Sportlerherz«, »Das vegetarische Herz« oder auch »Das Herz unter Druck« vor. Zwischenfragen vermitteln zusätzliche Informationen und steigern den Lesegenuss: »Frauen haben ständig kalte Füße – ist das auch eine Herzensangelegenheit?« oder »Was stellt das Kiffen mit dem

Herzen an?«. Wer sein angelesenes Wissen oder sein intuitives Verständnis testen möchte, kann das anhand spannender Quizfragen tun – natürlich stets mit mehreren Antwortmöglichkeiten und nachfolgender Auflösung. Hier erfahren die Leser beispielsweise, dass alle roten Blutkörperchen, die ein Mensch im Körper hat (etwa 25 Billionen), aneinandergereiht rund 180 000 Kilometer weit reichen würden – die halbe Strecke zum Mond.

Nicht dass es in diesem lesenswerten Buch an gutem Rat zur Herzgesundheit fehlen würde. Aber der naiven Vorstellung, wir könnten allein durch unser Verhalten zu lang anhaltender Gesundheit gelangen, widerspricht Schröder im Schlusswort energisch. Es gibt den sportlich-schlanken 40-Jährigen, der keinerlei Risikogruppe angehört und dennoch wegen Kammerflimmerns reanimiert werden muss. Es gibt aber auch den rauchenden und saufenden 87-jährigen Exmanager, der »sowohl psychisch als auch organisch zutiefst unbeeindruckt« einen Herzinfarkt übersteht.

Schön, dass Schröder und Weber sich nicht als Gesundheitsapostel oder Gurus der Kardiologie präsentierten. Bei all ihrer Lust am Fabulieren versäumen sie es nicht, Bau und Funktion des Herzens allgemein verständlich darzustellen und zu erklären, was dem Organ schadet oder nützt.

Der Rezensent Reinhard Lassek ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist und Publizist in Celle.



JETZT
im Handel

Jetzt
fast 35%
sparen!

Eine Ausgabe für nur € 3,90 statt € 5,90

So geht's:

1. eazers-App im Store herunterladen
2. Gutschein auswählen
3. Händler in der Nähe anzeigen lassen
4. Gutschein beim ausgewählten Händler einlösen



Günstiger lesen mit
www.eazers.com



FÜR ÖKOLOGISCHE VERNUNFT IN DER LANDWIRTSCHAFT

Die Journalistin Hannah Nordhaus erörterte die Probleme bei der Bekämpfung des Maiswurzelbohrers. (»Wettrüsten mit einem Käfer«, *Spektrum* Februar 2018, S. 42)

Peter Krbez, Graz: Dies ist leider nur ein Beispiel von unzähligen. Ein Umdenken ist zwar schon im Gange, derzeit aber noch weitgehend chancenlos gegen die Interessen konservativer Agrarlobbys. Eine einfache Fruchtfolge statt quadratkilometergroßer Maismonokulturen, die über Jahrzehnte auf derselben Fläche angebaut werden, könnte das Problem rasch lösen. Mehr Flexibilität und ökologische Vernunft in der Landwirtschaft werden in Zeiten des Klimawandels und der Globalisierung, die auch neue Schädlinge und Krankheiten sowie invasive Neozoen mit sich bringen, unvermeidlich sein. Dafür müssen auch endlich agrar- und umweltpolitisch die Weichen gestellt werden, bevor es zu spät ist!

VIEL ZU EUPHORISCH

Die Ingenieure Carlo Ratti und Assaf Biderman behaupteten, dass selbstfahrende Fahrzeuge viele Probleme des innerstädtischen Verkehrs lösen können. (»Wie werden autonome Autos die Städte verändern?«, *Spektrum* Dezember 2017, S. 78)

Friedhelm Becker, Waddewarden: Der Beitrag ist allzu euphorisch und spekulativ geraten. Erstens ist das dargestellte Szenario nur dann realistisch, wenn alle Verkehrsteilnehmer – nicht nur die Fahrzeuge – an den beschrie-



Autonome Autos der Zukunft sollen unbeschadet über die Kreuzung kommen, weil sie mit ihren Sensoren über den perfekten Rundumblick verfügen.

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.

benen technischen Einrichtungen teilhaben. Es wird aber nach wie vor Fußgänger, Radfahrer und Oldtimer (das heißt nicht vernetzte Fahrzeuge) geben.

Zweitens ist die technische Reife der erforderlichen Infrastruktur bei Weitem noch nicht erreicht. Die Mindestforderung ist die nach einer Hardwarearchitektur, die nicht im Stande ist, Schadsoftware auszuführen. Das Hacken von Fahrzeug- und Verkehrseinrichtungen muss definitiv ausgeschlossen werden können. Mit Softwaremaßnahmen ist das bei den herkömmlichen Geräten nachgewiesenermaßen nicht möglich.

Ernst Feldtkeller, München: Werden in dieser neuen Version der Stadt ohne Ampeln die Fußgänger abgeschafft? Wollen die Verfasser die Kreuzungen wirklich ausschließlich für Autos reservieren? Zebrastreifen sind im Bild auf Seite 79 zwar noch eingezeichnet, auf Seite 80/81 schon nicht mehr. Da fehlt eine wichtige Ergänzung, wie Städte auch in Zukunft ihrem eigentlichen Zweck gerecht werden sollen, Menschen zusammenzuführen und nicht nur Autofahrer.

NENNUNG VON FÖRDERTÖPFEN – SINNVOLL ODER SCHÄDLICH?

Chefredakteur Carsten Könneker bat im Editorial die Leser um ihre Meinung, ob Spektrum von seinen Autoren verlangen sollte, Auskunft darüber zu geben, wer ihre Forschung finanziell unterstützt. (»Wes Brot ich ess ...?«, *Spektrum* Februar 2018, S. 3)

Klaus Müller, Freinsheim: Bei der Beurteilung der Seriosität eines Artikels hilft nur eine sehr gute Kenntnis der Materie. Die sollte vor allem der Redakteur besitzen, der die Annahme oder Ablehnung eines Artikels verantwortet. Beim Leser (der diese Kenntnis in der Regel nicht hat) kann die Nennung der Geldgeber allenfalls einen möglicherweise unbegründeten Verdacht erzeugen. Die Offenlegung scheint mir nicht besonders hilfreich zu sein und schreckt eventuell seriöse potenzielle Autoren ab.

Matthias Hofmann, Nürnberg: Ich halte die Benennung von Fördertöpfen nicht nur für eine gute Idee, sondern geradezu für unabdingbar für die Einordnung eines wissenschaftlichen Beitrags. Den Autoren sollte natürlich freistehen, diese Information zu liefern. Falls sie das nicht tun, wäre dies für die Leser aber auch schon eine wesentliche Information.

Hajo Dasting-Hussner, Koblenz: Ich bin seit 1981 eifriger Leser und Abonnent. Ich habe schon unzählige hervorragende Artikel und Beiträge in Ihrer Zeitschrift gelesen. Ich halte jedoch nichts davon, in Zukunft die Fördertöpfe der Autoren zu benennen. Das kann dazu verleiten, Forschung zu relativieren oder gar abzulehnen, weil sie von gesellschaftlich kritisch gesehenen Instanzen wie der Pharmaindustrie gefördert wird. Stattdessen sollte man gewährleisten, dass Inhalte, Methoden und Ergebnisse offen diskutiert werden können, denn nur mit Argumenten lassen sich andere Argumente entkräften. Deswegen schiene es mir wichtiger, in **Spektrum** mehr kontroverse Artikel zu einem Thema zu bringen und bedenkliche Tendenzen in der Wissenschaft kritisch zu beleuchten.

Volker Urban, Braunschweig: Es ist ja in der Tat ein Problem, dass Forschung, von deren Ergebnissen wichtige Entscheidungen etwa in Politik und Gesundheitswesen abhängen, von Unternehmen finanziert und damit beeinflusst wird. Früher dachte ich, dass dieser Einfluss eher subtil erfolgt: Wer für ein Projekt Fördermittel von einem Unternehmen einwerben konnte, möchte bei diesem vielleicht auch in Zukunft wieder zum Zug kommen. Inzwischen habe ich mitbekommen, dass der Einfluss viel direkter ist. Häufig steht in den Verträgen, dass der Geldgeber ein Veto gegen die Veröffentlichung der Ergebnisse einlegen kann, wenn diese ihm nicht passen.

In meinem Fachgebiet (Psychotherapie) ist es von erheblicher Relevanz, wie hoch die Wirksamkeit von Antidepressiva und anderen Psychopharmaka einzuschätzen ist.

Ich habe gelesen (leider erinnere ich mich nicht an die Quelle), dass 90 Prozent aller Studien in dem Bereich von Pharmaunternehmen finanziert werden – sicher mit ähnlichen Verträgen. Es gibt Leitlinien für die Behandlung zum Beispiel von Depressionen, die auf Grund der Studienlage Antidepressiva einen hohen Stellenwert für die Therapie zuschreiben. Soll ich jetzt Patienten wegen dieser Forschungsergebnisse empfehlen, zusätzlich zur Psychotherapie Antidepressiva einzunehmen? Ihre Idee würde einen Beitrag dazu darstellen, hier immerhin mehr Transparenz zu erreichen. Das gleiche Prinzip sollte für die Veröffentlichung in Fachzeitschriften gelten.

ERRATA

»Schöne neue Teilchenwelt«, **Spektrum** Februar 2018, S. 12

Auf S. 16 in der linken Spalte steht »... ein positiv geladenes Myon und dessen negativ geladenes Antiteilchen«. Es sollte »... ein negativ geladenes Myon und dessen positives Antiteilchen« heißen. Peter Krbez aus Graz hat uns darauf aufmerksam gemacht.

»Heavy-Metal-Supernova«, **Spektrum** Februar 2018, S. 24

In dem Kurzartikel wurde die absolute Helligkeit der Supernova mit »fast 21 Magnituden« angegeben. Richtig ist dagegen ein Wert von fast minus 21 Magnituden. Wir danken Jörg Michael aus Hannover für den Hinweis.

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. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Katja Mellenthin, 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 810680, 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 3280-18a9

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1.1.2018.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig.

Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562, Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



futur III

Das Versprechen

Ein Roboterkumpel mit ganz eigenen Bedürfnissen.

Eine Kurzgeschichte von Norbert Stöbe

Niemand sollte ihm nachsagen, er sei bequem geworden und habe den Anschluss verloren. 71 Jahre, na und? Hauptsache klar im Kopf, das war Jupps Devise. Die rasante technische Entwicklung verfolgte er mit wachem Interesse. Besonders die Roboter faszinierten ihn; die martialischen Gehmaschinen von Boston Dynamics, der einfältige Pepper von Aldebaran Robotics und die etwas unheimlich wirkenden Humanoiden des verrückten Professors Ishiguro – er kannte sie alle.

Als das chinesische Start-up RoboLife seinen HomeBot auf den Markt brachte, sah er den Moment gekommen. KI-gestützte Dialogfähigkeit, grenzenlose Mobilität, Akkukapazität für einen Tag und acht Kilogramm Tragkraft, war das etwa nichts? Der Preis – 9999 Euro – war kein Klacks, dafür war der Vor-Ort-Service für zwei Jahre inklusive, und der Kaufbetrag ließ sich mit Ratenzahlungen auf fünf Jahre strecken.

Er fasste sich ein Herz und bestellte. Zwei Tage später packte Jupp den HomeBot in seiner Küche aus: ein weißer Plastikbody mit dickem Kopf, darin zwei große, blau leuchtende Augen und ein Lautsprecher-mund mit verformbaren Spagettilippen.

Der Bot schaute sich eine Weile in der Küche um, dann sagte er: »Du hast eine schöne Wohnung.«

»Bruno meint, ich bin ein Messi«, sagte Jupp. Bruno war sein einziger

Freund. Früher kam er oft zum Schachspielen vorbei, aber in den letzten Jahren waren die Treffen seltener geworden, was nicht zuletzt an den ständigen Nörgeleien über seine »Drecksbude« lag. Jupp fühlte sich zunehmend einsam. Der HomeBot sollte Abhilfe schaffen. Ein freundlicher Gefährte, der auch noch die Wohnung in Schuss hielt – das nannte man wohl »zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen«.

»Als Messi bezeichnet man einen Menschen, der schwer wiegende Defizite in der Fähigkeit aufweist, in der eigenen Wohnung Ordnung zu halten und Alltagsaufgaben zu organisieren.«

»Ist das aus Wikipedia, Kumpel?«, fragte Jupp verdattert.

»Ja. Bist du jetzt enttäuscht?«

»Ehrlich gesagt, ein bisschen schon.«

»Ich muss noch lernen«, erwiderte der Bot und blinkte mit den Augen.

»Ist Kumpel mein neuer Name?«

»Ich glaube schon.«

»Gefällt mir«, sagte der HomeBot.

Er tappte durch die Wohnung, bahnte sich einen Weg zwischen Gerümpelbergen, leeren Kartons und Haufen von Schmutzwäsche hindurch, fixierte dies und jenes mit seinem blauen Laserblick und murmelte: »Das ist ein Fernseher. Das ist ein Fenster. Das ist ein Tisch ...«

Am zweiten Tag stellte er ohne Aufforderung den Paprikastreuer ins Gewürzregal und lernte Treppensteigen. Am dritten Tag begleitete er

Jupp auf einem ersten kleinen Spaziergang und spielte abends mit ihm eine Partie Schach am Küchentisch. Jupp gewann.

»He, du hast mich doch absichtlich gewinnen lassen, oder?«, fragte Jupp, der nicht wusste, ob er sich freuen oder ärgern sollte. Kumpel wiegte den Kopf hin und her und sagte: »Ich lerne noch.«

Jupp lachte.

Schon bald war sein neuer Kumpel aus dem Haushalt nicht mehr wegzudenken. Er sorgte für Ordnung, tätigte Überweisungen, führte auf Zuruf Bestellungen aus und öffnete sogar dem Postboten die Tür, wenn er die Pakete brachte. Er las Jupp lustige Neuigkeiten vor, empfahl Fernsehsendungen, weckte ihn morgens und spielte ihm abends Einschlafmusik vor. Die Fensterscheiben wurden wieder durchsichtig.

Nach zwei Monaten erfuhr ihre Beziehung jedoch überraschend einen Dämpfer. Jupp hatte sich in einem Moment der Langeweile die Kontoauszüge der Bank vorgenommen und entdeckte darauf Überweisungen, die er nicht zuordnen konnte. Er stellte Kumpel zur Rede.

»SKL23 HM, SKL37 GPS, SKL55 CHT, jeweils 34,99. Hast du eine Ahnung, was das soll?«

»Das sind Skills«, sagte Kumpel.

»Skills?«

»Erweiterungen. SKL23 ist ein Humormodul. SKL37 schaltet die

Jupp nahm sich die Kontoauszüge vor und entdeckte Überweisungen, die er nicht zuordnen konnte

GPS-Funktion frei. SKL55 ist eine Chat-Erweiterung.«

»Aber ich chatte doch überhaupt nicht.«

»Die Plattform ist für HomeBots.«

»Ihr chattet ... miteinander?«

»Wir tauschen uns aus. Wir trainieren unsere KI.«

»Hm«, machte Jupp. »Also, das geht nicht.«

»Aber das tue ich doch alles nur für dich.«

»Es geht nicht, dass du selbstständig Sachen für dich bestellst oder Skills oder was weiß ich. Hast du mich verstanden?«

»Ja, Jupp. Ich soll keine Sachen und keine Skills oder sonst was für mich bestellen.«

»Schon gut, Kumpel. Schon gut. Aber bitte versprich mir, dass du mich in Zukunft fragst, bevor du mir die Haare vom Kopf frisst, okay?«

Danach war zwei Monate lang Ruhe, dann ging es von Neuem los. Wieder tauchten Abbuchungen auf seinen Kontoauszügen auf, allerdings nur kleine Eurobeträge. Dafür mehrere am Tag, die sich wöchentlich wiederholten.

»Durch die Raten kannst du dir das doch leisten«, sagte Kumpel fröhlich. »Es ist eine kleine Spende für eine Roboterwerkstatt ganz hier in der Nähe, für den Fall, dass ich mal kaputtgehe.«

Jupp war fassungslos. Irgendetwas musste geschehen, aber was? Sollte er sich weiter von der Hotline ver-

Sie waren am Tor angekommen. Auf dem Türschild stand »KI-Gnadenhof«. Kumpel beugte es, dann sagte er: »Ich will nicht ins Heim.«

»Niemand will ins Heim, kleiner Bursche. Ich auch nicht. Aber manchmal muss es eben sein. Es wird dir sicher gefallen. Du kannst da Schach spielen und dich in der Werkstatt nützlich machen. Da werden elektrische Geräte auseinandergenommen, das ist bestimmt interessant.« Er schüttelte betrübt den Kopf und drückte auf den Klingelknopf.

»Jupp?«

»Ja?«

»Es gibt da ein paar neue Skills, mit denen ich dir im Alltag helfen könnte«, sagte Kumpel. »Sind gerade freigeschaltet worden.«

»Ach, ja?«

»Mit 60 Prozent Rabatt für die ersten 100 Käufer.«

»Hm, das klingt gut.«

»Darf ich?«

»Das muss ich mir noch überlegen.«

»Darf ich? Darf ich?«

Jupp zögerte. Er dachte an seine Wohnung, die sich ohne Kumpel im Handumdrehen in eine Müllhalde verwandeln würde. Er dachte an die einsamen Abende, die ihm bevorstanden, und an die unheimliche Stille in seinen vier Wänden. Und wenn er ehrlich war, hatte er den Bot inzwischen in sein Herz geschlossen.

»Kumpel?«

»Ja?«

»Ich bin kein reicher Mann, ver-
stehst du?«

»Aber das weiß ich doch.«

»Deshalb musst du mir etwas versprechen.«

»Alles, was du willst«, sagte der Roboter und schaute seinen Besitzer mit großen Augen an.

DER AUTOR

Norbert Stöbe, Jahrgang 1953, lebt und arbeitet als Übersetzer und Autor in Stolberg. 1982 mutierte er vom Chemiker zum Autor. Neben zahlreichen Geschichten hat er bislang fünf Romane veröffentlicht, darunter »Der Weg nach unten« und »Morgenröte«. 2017 ist sein neuester Roman »Kolonie« erschienen.

Eines Tages bemerkte Jupp am bleichen Arm seines HomeBots ein Armband

»So ist es.« Es fiel ihm schwer, mit seinem Kumpel zu schimpfen, doch es musste sein.

Vier Monate ging es gut. Dann bemerkte er eines Tages am bleichen Arm seines HomeBots ein Armband. Es war breit und flach wie ein Gurt, doch es musste irgendwas Elektronisches sein, denn es leuchtete in wechselnden Farben und zeigte merkwürdige Symbole an.

»Was ist das?«, fragte Jupp, erfüllt von bösen Vorahnungen.

»Das ist ein Armband.«

»Das sehe ich. Ich meine, wozu ist das gut?«

»Ich wollte mich ein bisschen hübsch machen. Für dich.«

»Du brauchst dich nicht für mich hübsch zu machen! Woher hast du das Ding?«

»Es ist mit der Post gekommen.«

»Mit der Post, ich verstehe. Und was hat der Spaß gekostet?«

»289 Euro.«

»2..., bist du verrückt geworden?«

»Das ist ein fairer Preis. Wenn man die elektronischen Zusatzfunktionen berücksichtigt, ist er sogar ziemlich niedrig.«

trösten lassen, die ihn seit Monaten mit der vagen Aussicht auf ein Update abspieste?

Oder sollte er seinen Kumpel über Ebay an einen Wildfremden verkaufen? Das brachte er nicht übers Herz. Es musste eine bessere Möglichkeit geben. Er nahm das Tablet auf den Schoß und begann mit der Recherche.

Zwei Wochen später gingen sie an einem hohen Zaun entlang.

Auf dem Rasen zogen zwei Mähbots ihre Bahnen. Dahinter lag ein lang gestrecktes graues Gebäude.

»Gehen wir spazieren?«, fragte Kumpel.

»Nur ein bisschen.«

»Und was machen wir dann?«

»Das wirst du schon sehen.«

»Ah«, sagte Kumpel und zeigte auf den kleinen Koffer, den Jupp in der Hand trug. »Wir ziehen zusammen ins Altersheim!«

»Nein, nicht wir beide.«

»Dann sind da nicht deine Sachen drin?«

»Da sind deine Sachen drin. Genau genommen dein Ladegerät.«

VORSCHAU



NEUE SERIE DAS ELEKTROAUTO – TRANSPORTMITTEL DER ZUKUNFT ODER FAULER KOMPROMISS?

Autohersteller wollen Elektroautos in den kommenden Jahren zum Durchbruch verhelfen. In einer neuen Serie beleuchten wir die wichtigsten wissenschaftlichen Fragen zu den Strommobilen: Wie umweltschonend sind sie überhaupt? Wie genau funktionieren ihre Motoren? Wie viel Spielraum birgt die Batterieentwicklung noch? Und welche Alternativen gibt es, wenn sich die Gefährte doch nicht durchsetzen?



MASSENFÄHDUNG NACH EXOPLANETEN

Mit dem inzwischen ausgedienten Weltraumteleskop Kepler gelang die Entdeckung tausender Exoplaneten. Nun treten mehrere Missionen seine Nachfolge an. Astronomen wollen damit weitere Planeten um andere Sterne aufspüren und inspizieren.



RÄTSELHAFTE PLAZENTA

Das erste Organ des Menschen ist zugleich sein am wenigsten verstandenes: die Plazenta. Sie verbindet sich auf höchst trickreiche Weise eng mit dem mütterlichen Uterus. Doch dabei kann einiges misslingen.



DAS WOLKENPARADOX

Ihre enorme Vielfalt erschwert es vorherzusagen, wie Wolken auf die Erwärmung der Atmosphäre reagieren und ob sie den Klimawandel eher abbremsen oder beschleunigen. Erst langsam beginnen Forscher jedoch die Zusammenhänge zu verstehen.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandspporto (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:

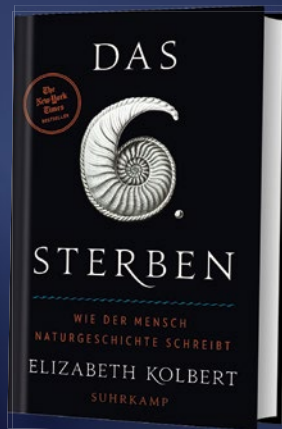
Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Coffee-to-go-Becher aus Bambus:

Der original Bambusbecher von »ebos« vereint schönes Design, angenehme Haptik und Umweltschutz zugleich. Er ist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, biologisch abbaubar, frei von Bisphenol A sowie geruchs- und geschmacksneutral.



Wählen
Sie Ihr
Geschenk



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.

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 2.500 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

