

Spektrum

der Wissenschaft

Wie entstand das Leben?

Laut einer neuen Theorie
in heißen Quellen –
an Land

8,50 € (D/A/L) · 14,- sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



ANTIMATERIE Führt sie zu einer neuen Physik?

AUTONOME AUTOS So werden sie die Städte verändern

NEUROBIOLOGIE Gehirne aus der Petrischale

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Ab sofort bei Ihrem Zeitschriftenhändler!



Print | 5,90 €
Download | 4,99 €

www.spektrum.de/aktion/drogen



EDITORIAL DAS GRÖSSTE ALLER RÄTSEL

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Welches sind die großen Fragen an die Wissenschaft? Gemeinsam mit der Redaktion von »Zeit Online« fragten wir das die Nutzer im September. Mehr als 1500 Menschen reichten ihre Vorschläge ein, darunter recht konkrete wie »Warum werden Menschen von Musik emotional angesprochen?« oder »Was muss wirklich getan werden, um die Biosphäre der Erde vor der Zerstörung zu bewahren?«. Die meisten Eingaben berührten jedoch jahrhundertealte, fast schon philosophische Probleme, und diese ließen sich in fünf Komplexe zusammenfassen: Warum gibt es das Universum? Woher kommt das Leben? Was ist Bewusstsein? Wird es jemals Weltfrieden geben? Und: Könnten wir einmal unsterblich sein? In der Woche vom 16. bis zum 20. Oktober haben wir diese fünf »allergrößten Fragen« der Reihe nach auf www.zeit.de/grosse-fragen mit Forscherinnen und Forschern diskutiert. Rede und Antwort standen hierbei die Wissenschaftsblogger der »SciLogs«, der Blog-Plattform von »Spektrum der Wissenschaft«, die wir vor zehn Jahren gegründet haben (www.scilog.spektrum.de).

Während im Vorfeld der Aktionswoche die Frage nach dem Ursprung des Universums das stärkste Interesse, sprich die meisten Einzelfragen hervorrief, entpuppte sich am Ende die Entstehung des Lebens als spannendstes Geheimnis – wenn man die Klickzahlen als Kriterium wählt. Und es ist tatsächlich eine gleichermaßen packende wie offene Frage, denn die Wissenschaft tut sich hier nach wie vor schwer mit der Antwort. So verabschieden sich manche Forscher gerade von der bisher vorherrschenden Theorie, wonach das Leben an Schloten in der Tiefsee entstanden ist. Stattdessen vermuten sie seinen Beginn jetzt in heißen Quellen von Vulkanlandschaften. Drei Vertreter dieser Hypothese erläutern die Argumente in unserer Titelgeschichte ab S. 12.

Gern möchte ich Ihre Aufmerksamkeit noch auf unsere Sciencefiction-Rubrik »Futur III« lenken. Für dieses Heft griff mit Andreas Eschbach ein besonders bekannter Autor in die Tasten. Er schrieb Bestseller wie »Das Jesus-Video« sowie mehrere Bände der bekannten »Perry-Rhodan«-Reihe. Sie finden seine Kurzgeschichte »Späte Reue« auf S. 96/97.

Eine lebendige Lektüre wünscht Ihr

Carsten Könneker



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum Spezial** Biologie – Mensch – Hirnforschung 4.17 gibt einen Überblick über die Welt der Gifte – die manchmal überraschend gesund sein können.

AUTOREN DIESER AUSGABE



JÜRGEN KNOBLICH

Der Molekularbiologe züchtet mit seinem Team menschliche »Minigehirne« – so genannte Organoiden –, an denen sich Entwicklungsstörungen und Hirnerkrankungen ergründen lassen (ab S. 30).



ANA REVENGA UND ANA MARIA MUNOZ-BOUDET

Wie die Weltbank-Expertinnen ab S. 56 belegen, erweist sich die wirtschaftliche Gleichstellung der Frau als das beste Mittel gegen Überbevölkerung und Unterentwicklung.



CARLO RATTI UND ASSAF BIDERMAN

Ein Designer und ein Erfinder planen den Stadtverkehr der Zukunft – mit autonomen Autos und jeder Menge frei werdender Parkplätze, die kreativer Nutzung offenstehen (S. 78).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Blick in eine Neutrino-Falle

Das Echo verschmelzender Neutronensterne

Marker für Bakterieninfektionen

Weshalb Hummeln Blüten mögen

Kooperationsverhalten von Wölfen

AlphaGo besiegt sich selbst

Zwergplanet mit Ring

20 FORSCHUNG AKTUELL

Nobelpreis für Chemie

Kryo-Elektronenmikroskopie offenbart kleinste Strukturen.

Nobelpreis für Physiologie oder Medizin

Wie unsere innere Uhr tickt.

Nobelpreis für Physik

Auf Einsteins Fährte.

Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften

Der Mensch, das dreifach beschränkte Wesen.

29 SPRINGERS EINWÜRFE

Wie werden unsere Enkel arbeiten?

Maschinen ersetzen menschliche Kopfarbeiter.

52 SCHLICHTING!

Musikalischer Sand

Lawinenabgänge in Dünen erzeugen laute Töne.

55 IMPRESSUM

64 ZEITREISE

Von der Taschenapotheke zum Superchip

12 CHEMISCHE EVOLUTION **WIE ENTSTAND DAS LEBEN?**

Bislang galt die Tiefsee als heißester Kandidat für den Geburtsort der ersten Einzeller. Aktuelle Studien legen jedoch nahe, dass der Ursprung des Lebens in Hydrothermalquellen vulkanischer Landschaften liegt.

Von Martin J. Van Kranendonk, Tara Djokic und David Deamer

30 HIRNFORSCHUNG **MINIGEHIRNE AUS DEM LABOR**

Neurobiologen züchten aus menschlichen Zellen »Hirnorganoid«. Mit diesen möchten sie neuronale Funktionsprinzipien entschlüsseln und Therapien gegen Krankheiten wie die Alzheimerdemenz entwickeln.

Von Jürgen A. Knoblich

38 BIOWAFFEN **DIE MILZBRANDBEDROHUNG**

Der Anthrax-Unfall in Swerdlowsk im Jahr 1979 beschäftigt Wissenschaftler bis heute. Neue Erkenntnisse zeigen, wie tödlich der biologische Kampfstoff ist und dass noch immer eine Gefahr von ihm ausgeht.

Von Paul S. Keim, David H. Walker und Raymond A. Zilinskas

44 PHYSIK **AUF DER JAGD NACH ANTIMATERIE**

Teilchenphysiker am CERN suchen mit mehreren Experimenten nach subtilen Unterschieden zwischen Antimaterie und gewöhnlicher Materie. Jede Abweichung wäre ein Hinweis auf unbekannte Naturgesetze.

Von Elizabeth Gibney

56 GLEICHSTELLUNG **DIE BESTE ENTWICKLUNGSHILFE**

Neue Serie: Frauen weltweit (Teil 1) Frauen drängen in vielen Ländern auf den Arbeitsmarkt, bleiben bezüglich Ausbildung, Jobchancen oder Lohn jedoch oft benachteiligt. Dies hemmt den ökonomischen Fortschritt insgesamt.

Von Ana L. Revenga und Ana Maria Munoz-Boudet

66 BRONZETROMMELN **LEBEN UND STERBEN AM ROTEN FLUSS**

Serie: Archäologie in Vietnam (Teil 3) Prozessionen von Kriegerern und Seelen, die auf Booten ins Jenseits fahren: Die Reliefbilder großer Bronzetrommeln erzählen, woran die Menschen der Dong-Son-Kultur Nordvietnams einst glaubten.

Von Andreas Reinecke

74 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **ETHISCHE AUFRÜSTUNG DURCH BAKTERIEN**

Wird man durch seine Darmflora zu einem besseren Menschen?

Von Christoph Pöppe

78 STRASSENVERKEHR **WIE WERDEN AUTONOME AUTOS DIE STÄDTE VERÄNDERN?**

Selbstfahrende Fahrzeuge versprechen zahlreiche Probleme des innerstädtischen Verkehrs zu lösen – wenn sie geschickt eingesetzt werden.

Von Carlo Ratti und Assaf Biderman

DOTYPICTURE / STOCK.ANDBE.COM



12

TITELTHEMA
WIE ENTSTAND DAS LEBEN?

MIT FRÖL GEN VON MADELINE A. LANCASTER, MRC LABORATORY OF MOLECULAR BIOLOGY, CAMBRIDGE



30

HIRNFORSCHUNG
MINIGEHIRNE AUS DEM
LABOR

MAXIMILIEN BRICE / CERN



44

PHYSIK
AUF DER JAGD NACH
ANTIMATERIE



66

BRONZETROMMELN
LEBEN UND STERBEN
AM ROTEN FLUSS

ANDREAS REINECKE



78

STRASSENVERKEHR
AUTONOMES FAHREN

KARNEG / GETTY IMAGES / ISTOCK

84 FREISTETTERS FORMELWELT

Die Quadratur des Kreises
Sie ist unmöglich – auch wenn man das Gegenteil gesetzlich festlegen wollte.

86 REZENSIONEN

Janine Burke: Nest
Klaus-Jürgen Bremm: Preußen bewegt die Welt
Christian Hesse: Mathe to go
John Brockman (Hg.): Was sollen wir von Künstlicher Intelligenz halten?
Lars Jaeger: Supermacht Wissenschaft
Reinhard Remfort: Methodisch korrektes Biertrinken

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Späte Reue
Wenn ein Chip im Gehirn das Gewissen ausschaltet.

98 VORSCHAU

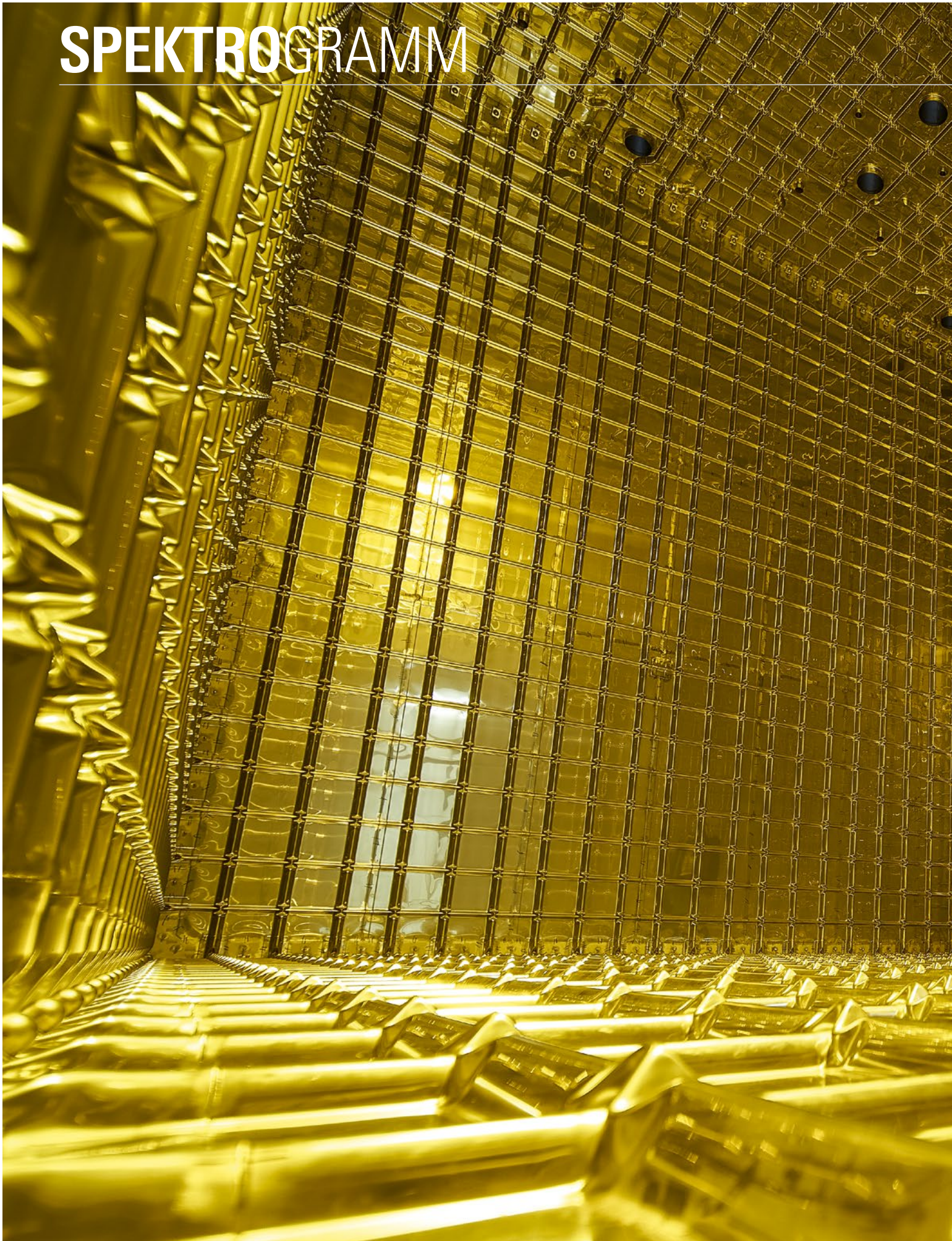
Titelbild: Getty Images / Gallo Images / Danita Delimont

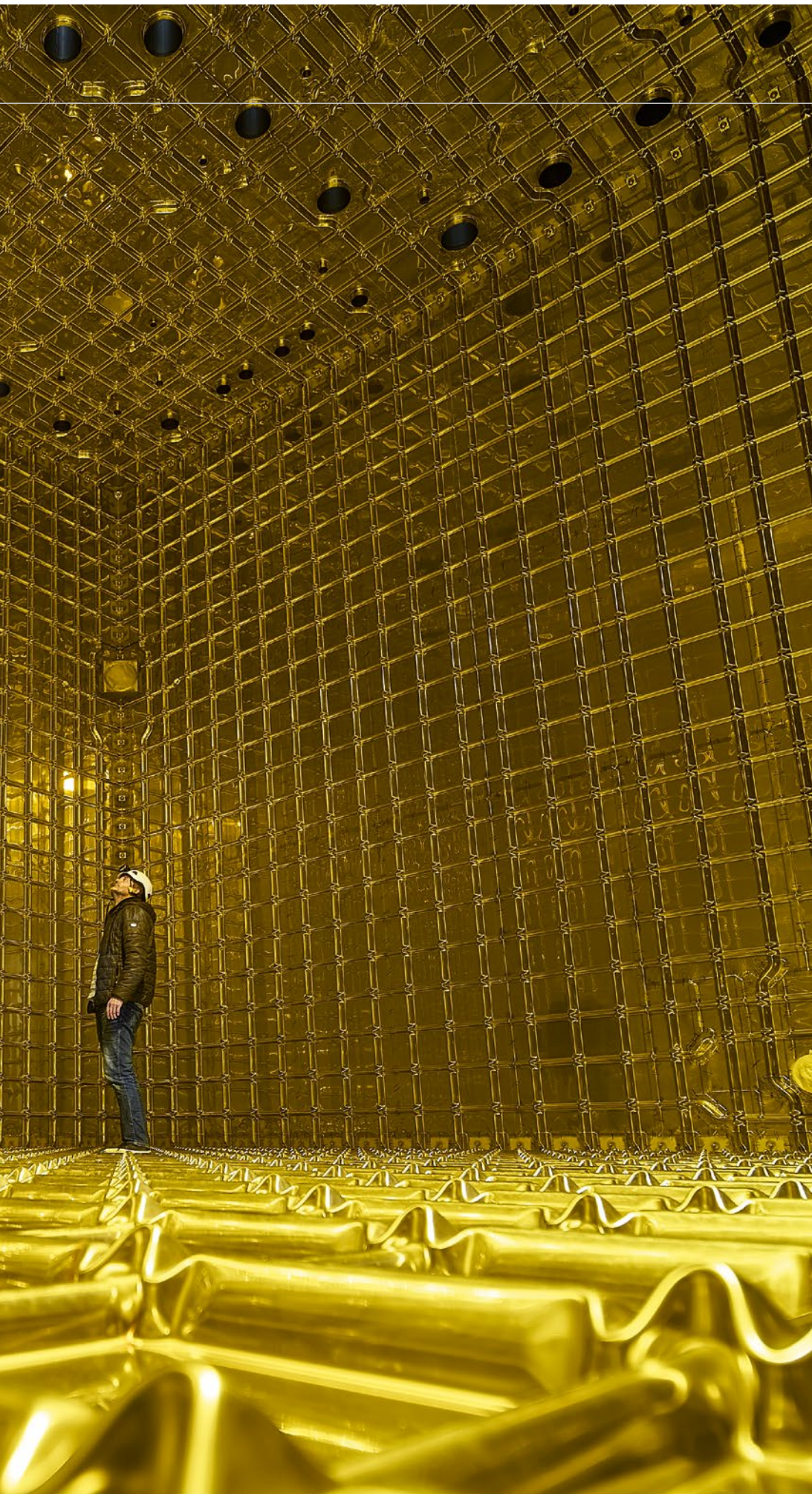


Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM

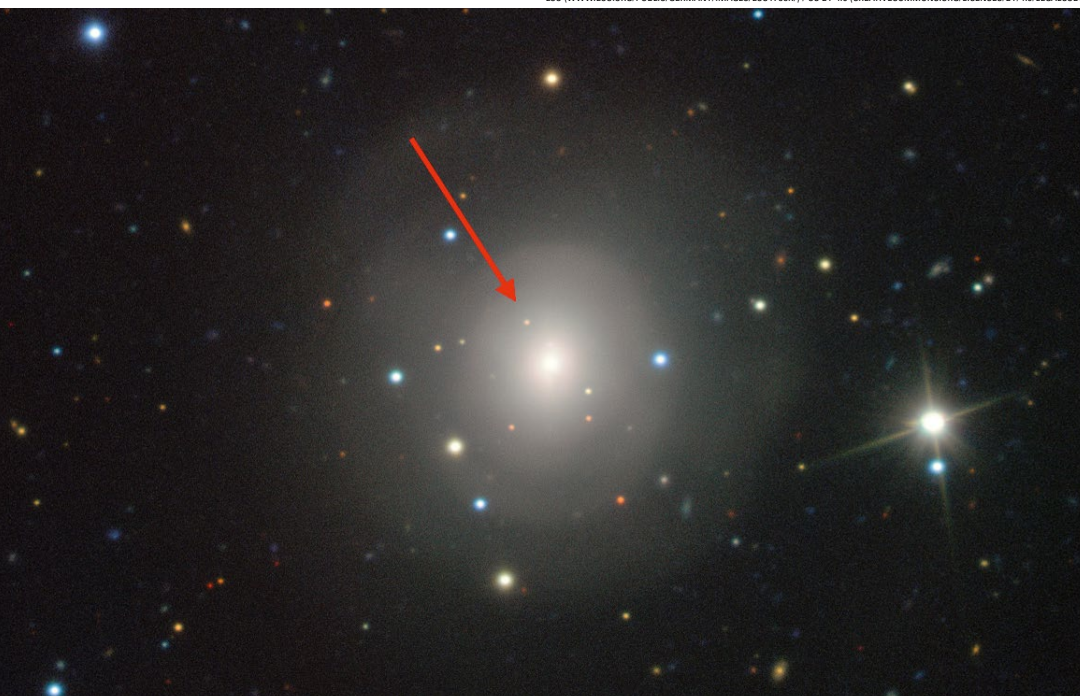




BLICK IN EINE NEUTRINO-FALLE

Physiker am Genfer Kernforschungszentrum CERN testen derzeit den Neutrinodetektor »protoDUNE«. Er ist ein Prototyp für das Großprojekt »DUNE«, das im kommenden Jahrzehnt im US-Bundesstaat South Dakota gebaut werden soll. Weil Neutrinos nur äußerst selten mit Materie wechselwirken, spüren Forscher ihnen mit riesigen Kammern nach, die mit flüssigem Argon gefüllt sind. Das Edelgas spielt gewissermaßen den Lockvogel für die extrem flüchtigen Elementarteilchen: Wenn ein Neutrino mit einem Argonatom kollidiert, entstehen sekundäre Partikel, worauf die im Detektor installierte Elektronik anspricht. Das Foto zeigt die gut 500 Kubikmeter große Kühlkammer von protoDUNE, in die 800 Tonnen flüssiges Argon passen. Die Innenseite ist mit Edelstahl beschichtet, das im Bild golden leuchtet.

CERN-Mitteilung, 28. 8. 2017



Am 17. August 2017 tauchte nahe dem Zentrum der Galaxie NGC 4993 ein heller Punkt auf (roter Pfeil). Vermutlich sind dort, 130 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt, zwei Neutronensterne verschmolzen, was eine so genannte Kilonova verursachte.

ASTROPHYSIK DAS ECHO DER NEUTRONEN- STERNE

► Mit der wohl größten Beobachtungskampagne der Astronomiegeschichte haben Wissenschaftler entschlüsselt, was bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne passiert. Bei den Objekten handelt es sich um die Kerne ausgebrannter Sterne, die aus stark komprimierter Materie bestehen. Sie messen nur wenige dutzend Kilometer, haben aber mehr Masse als unsere Sonne.

Manchmal driften zwei Neutronensterne als Paar durch den Weltraum, das sich im Lauf der Jahrtausenden immer näher kommt. Schließlich umkreisen sich die kompakten Kugeln

beinahe mit Lichtgeschwindigkeit, ehe sie zusammenkrachen und zu einem noch massiveren Objekt verschmelzen. Schon länger gehen Physiker davon aus, dass dabei die Raumzeit in Schwingung versetzt wird, wodurch sich Gravitationswellen ausbreiten (siehe »Forschung Aktuell«, S. 24).

Nun ist es erstmals gelungen, dieses Echo auf der Erde nachzuweisen: Am 17. August erreichte ein 100 Sekunden währendes Raumzeitbeben die Gravitationswellendetektoren LIGO und Virgo, das von einem Zusammenstoß zweier 1,1 bis 1,6 Sonnenmassen schwerer Neutronensterne ausging. Die Messung beantwortet eine große Frage der Astrophysik: Forscher vermuten schon länger, dass verschmelzende Neutronensterne eine gewaltige Explosion

zünden, einen so genannten Gamma Ray Burst. Tatsächlich registrierten die Forschungssatelliten Fermi und INTEGRAL am 17. August solch einen kurzen Gammablitz, der die Erde 1,7 Sekunden nach dem Gravitationswellensignal erreichte und noch dazu aus derselben Ecke des Kosmos stammte.

Einen halben Tag später lokalisierten Astronomen den genauen Ursprungsort: eine Galaxie namens NGC 4993 im Sternbild Wasserschlange, die 130 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt ist – für Kosmologen unsere unmittelbare Nachbarschaft. Nahe dem Zentrum der Sterninsel war im Vergleich zu älteren Aufnahmen ein heller Punkt aufgetaucht. Aus Sicht der Forscher handelte es sich dabei um das gewaltige Nachglimmen des Gamma

Ray Burst. Nach der Kollision der Neutronensterne breitete sich demnach eine extrem heiße Gaswolke mit einem Fünftel der Lichtgeschwindigkeit im Weltall aus. Die Materie in dieser »Kilonova« gibt über Wochen hinweg große Mengen an Strahlung ab, deren Wellenlängen sich fast über das gesamte elektromagnetische Spektrum erstrecken.

Letztlich verfolgten rund 70 Observatorien das seltene Spektakel. Die Beobachtungsdaten lieferten unter anderem deutliche Hinweise darauf, woher einige der besonders schweren Elemente im Kosmos stammen. Atomkerne wie die von Gold und Platin sind zu schwer, als dass sie wie leichtere Stoffe in Sternen erbrütet werden könnten. Sie entstehen wohl nur, wenn Atomkerne wiederholt mit extrem energiereichen Neutronen beschossen werden, Physiker sprechen von r-Nukleosynthese.

Das Lichtspektrum der Kilonova, das sich im Lauf der ersten Tage deutlich wandelte, spreche sehr dafür, dass dieser Prozess tatsächlich in der expandierenden Gashülle stattfand, berichten die Wissenschaftler. Langfristig hoffen sie, noch weitere Neutronensternkollisionen miterleben zu können. Damit ließe sich vielleicht sogar ermitteln, welche Naturgesetze die stark komprimierte Materie im Inneren der extravaganten Gebilde am besten beschreiben, was auf Grundlage der bisherigen Beobachtungen allerdings noch nicht möglich ist.

Phys. Rev. Lett. 119, 2017

MEDIZIN MARKER FÜR BAKTERIENINFEKTIONEN

▶ Weltweit werden Antibiotika unwirksam, weil Patienten sie falsch, zu lange oder zu hoch dosiert einsetzen und so die Entwicklung von Resistenzen bei Bakterien fördern. Doch Ärzte verschreiben nicht selten aus Sicherheitserwägungen Antibiotika als Medikament gegen nicht eindeutig identifizierte Erreger – etwa

bei unklaren Infektionen der unteren Atemwege. In solchen Fällen könnte demnächst ein Bluttest helfen, der auf einem bislang nicht ausreichend erforschten biochemischen Zusammenhang basiert.

Eine Forschergruppe um Philipp Schütz von der Universität Basel hat Krankheitsverläufe von mehr als 6708 Patienten aus 26 Einzelstudien noch einmal ausgewertet. Dies sollte klären, ob das Molekül Procalcitonin, die Vorstufe eines Schilddrüsenhormons,

als sinnvoller Diagnosemarker für bakterielle Infektionen taugt. Es ist bei Gesunden meist kaum oder gar nicht nachweisbar, seine Konzentration steigt aber im Zuge einer bakteriellen Entzündung im Blut an.

Die Metaanalyse bestätigt, dass der Stoff verlässlich darüber informiert, ob eine Antibiotikagabe gegen Bakterien notwendig ist. Kenntnis des Procalcitonin-spiegels kann eine Antibiotika-Therapie offenbar um rund 30 Prozent verkürzen: Die Studien zeigen, dass

Ärzte eine erfolgreiche Behandlung schneller gefahrlos stoppen, wenn in ihre Bewertung neben klinischen Daten auch die Signalmarker menge einfließt. Insgesamt sinkt in solchen Fällen nicht nur die Menge an verschriebenen Antibiotika, sondern auch das Sterberisiko, zudem meldeten die Patienten seltener Nebenwirkungen.

Procalcitonin wird bereits seit Jahren als Biomarker für unterschiedliche Risiken diskutiert. Unter anderem soll es dazu

BIOLOGIE WESHALB HUMMELN BLÜTEN MÖGEN

▶ Was macht Blüten für Hummeln attraktiv? Schon länger gehen Biologen davon aus, dass vor allem Form und Farbe einer Pflanze die Bestäuber anzieht. Frühere Studien haben hierzu jedoch eine Frage aufgeworfen: Hummeln nehmen lediglich Blau als Farbe wahr, fliegen völlig anders kolorierte Blüten aber mitunter genauso gerne an. Nun glaubt eine Forschergruppe um Edwige Moyroud von der University of Cambridge diesen vermeintlichen Widerspruch auflösen zu können: Offenbar sorgen unregelmäßige Nanostrukturen in der Oberfläche von Blütenpflanzen dafür, dass diese – unabhängig von ihrer eigentlichen Farbe – blau schimmern. Menschen können das Farbenspiel lediglich bei dunklen Blüten erkennen. Das Sinnesorgan der Insekten spricht dagegen sehr stark auf den blauen Schein an.

Normalerweise sind Pigmentpartikel für die Farbe eines Objekts verantwortlich. Sie absorbieren bestimmte Wellenlängenbereiche von Licht, wodurch bloß ein Teil der Strahlung reflektiert wird. Im Auge kommen daher nur manche Wellenlängen an, die wir jeweils als unterschiedlichen Farbton auffassen. Wie das Team um Moyroud zeigen konnte, wird die Farbe von Blütenblättern darüber hinaus noch von unregelmäßig verteilten Rillen in der Oberfläche beeinflusst. Sie werfen vorrangig besonders kurzwelliges, also blaues und ultraviolette Licht zurück.

Die Wissenschaftler entdeckten diese strukturelle Besonderheit auf Elektronenmikroskopaufnahmen von zwölf verschiedenen, nicht artverwandten Blütenpflanzen. Anschließend prüften sie, wie sehr der bläuliche



EDWIGE MOYROUD, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Das Zentrum dieser Blume umgibt ein dunkler Ring. Der Blaustich rührt nicht etwa von Pigmentpartikeln her, sondern von Nanostrukturen in der Oberfläche der Pflanze.

Schimmer Hummeln beeinflusst. Dazu stellte das Team künstliche Blüten mit unterschiedlicher Pigmentierung her – mit und ohne Unregelmäßigkeiten im Rillenmuster – und beobachtete die Reaktion der Insekten. Die Hummeln flogen blau schimmernde Pflanzen schneller und auch häufiger an, berichten die Biologen. Die eigentliche Färbung hatte dagegen keinen messbaren Einfluss auf die Beliebtheit.

Nature 10.1038/nature24155, 2017

ETHOLOGIE KOOPERATIONSVERHALTEN BEI WÖLFEN



Wölfe im Wolfsforschungszentrum im österreichischen Ernstbrunn bei einem Verhaltensexperiment: Nur wenn sie zeitgleich zwei Schnüre ziehen, erreichen sie ein Leckerli.

▶ Verhaltensforscher ahnen schon lange, dass Wölfe besser zusammenarbeiten als Hunde. Das klingt für Hundehalter vielleicht zunächst irritierend, liegt aber in der Natur der Tiere begründet: Gerade Haushunde und ihre Vorfahren hatten in den vielen Generationen ihrer Domestikation zwar häufig Umgang mit

Menschen, aber wenig Kontakt zu Artgenossen. Anders verhält es sich beim Wolf, der meist im Rudel lebt. Daher können Wölfe mit Wölfen viel besser zusammenarbeiten als Hunde mit Hunden, spekulierten Wissenschaftler aus Österreich – und bewiesen es mit einem auf die Fragestellung zugeschnittenen Versuch.

Um möglichst faire Bedingungen zu schaffen, verglichen die Forscher um Sarah Marshall-Pescini von der Universität Wien im Wolfsforschungszentrum des Wildparks Ernstbrunn 14 halb wilde, in Rudeln lebende Hunde mit einem Dutzend Wölfe. Dazu passten die Biologen ein Experiment an, das früher bereits zur Erforschung der Kooperation unter Menschenaffen diente. Dabei steht ein Tisch mit einem kleinen Snack darauf hinter einem Zaun. Die Tiere können nur an das Essen kommen, wenn zwei von ihnen zeitgleich zwei am Tisch installierte Seilzüge betätigen.

Sowohl Hunde als auch Wölfe interessierten sich für die Vorrichtung, aber Wölfe bedienten sie deutlich besser: In 100 von 416 Versuchen gelangten sie gemeinsam an ihr Essen, während gerade einmal zwei Hundepaare Erfolg hatten. Wölfe sind es den Wissenschaftlern zufolge gewohnt, gemeinsam zu fressen und sich dabei auch einmal um die besten Brocken zu streiten, ohne dass dies nachhaltige Störungen im Rudel provoziert. Hunde hingegen vermeiden Konflikte, wenn es um eine begehrte Ressource geht. Sie arbeiten dafür eher mit menschlichen Bezugspersonen zusammen. Als Nächstes wollen die Forscher untersuchen, ob vielleicht verschiedene Hunderassen unterschiedlich kooperativ sind.

PNAS 10.1073/pnas.1709027114, 2017

dienen, die Gefahr einer Sepsis bei Patienten im Operationssaal abzuschätzen. Als alleiniges Signal gilt es in diesem Zusammenhang jedoch als ungeeignet. In der Vergangenheit war unter Medizinern umstritten, ob die Procalcitoninmenge wirklich mit bakteriellen Infektionen korreliert: Die Einzelstudien – die nun in die Metaanalyse eingeflossen sind – hatten zuvor keine eindeutigen Schlussfolgerungen zugelassen.

*The Lancet Infectious Diseases
10.1016/S1473-3099(17)30592-3,
2017*

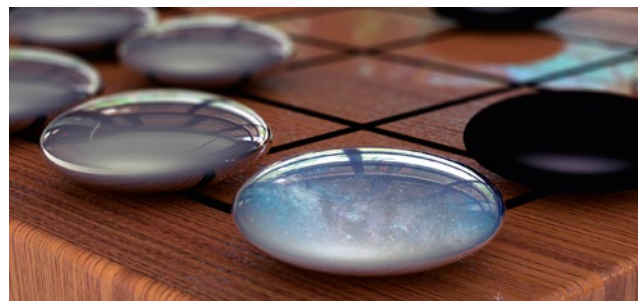
INFORMATIK ALPHAGO BESIEGT SICH SELBST

▶ Bereits im Frühjahr 2016 besiegte ein Computerprogramm einen der weltbesten

menschlichen Spieler im asiatischen Strategiespiel Go. Nun hat die Google-Tochterfirma DeepMind, die »AlphaGo« programmiert, eine deutlich verbesserte Version des Algorithmus präsentiert. »AlphaGo Zero« bringt sich das Spiel selbst-

ständig bei, muss also nicht mehr auf die Erfahrungen menschlicher Spieler zurückgreifen.

Trotzdem konnte die Software ihr Vorgängerprogramm in 100 von 100 ausgefochtenen Partien besiegen, berichtet das



DEEPMIND TECHNOLOGIES LTD

Beim Brettspiel Go legen Kontrahenten abwechselnd linsenförmige Steine auf ein gemustertes Holzbrett. Am Ende gewinnt derjenige, der größere Bereiche kontrolliert. Computer taten sich lange schwer damit, das Spiel zu meistern.

Team um den Londoner Informatiker David Silver.

Das jahrtausendealte asiatische Brettspiel Go ist deutlich komplexer als Schach, da es viel mehr Möglichkeiten für Züge gibt. Computer waren lange auch deshalb daran gescheitert, Profis zu bezwingen, weil diese auf einen über Jahrzehnte gewachsenen Erfahrungsschatz zurückgreifen können.

AlphaGo gelang schließlich der Durchbruch, da seine Programmierer neuronale Netze mit Daten aus 30 Millionen Partien menschlicher Spieler gefüttert hatten und so der Software für etliche Spielsituationen den jeweils besten Zug beibrachten.

Die neue Version kommt ohne menschlichen Erfahrungsschatz aus. AlphaGo Zero bekam lediglich die Spielregeln vorgegeben und trat anschließend immer wieder gegen sich selbst an. Dabei wählte die Software die Züge zunächst nach dem Zufallsprinzip aus, merkte sich dabei aber jeweils, ob eine Entscheidung den Sieg näherbrachte – Informatiker nennen dieses Vorgehen »bestärkendes Lernen«.

Um seinen Vorgänger zu schlagen, benötigte das Programm lediglich drei Trainingstage, in denen es allerdings fast fünf Millionen Spiele gegen sich selbst absolvierte. Die künstliche Intelligenz entdeckte dabei selbstständig einige derselben erfolgreichen Taktiken, die Menschen entwickelt hatten – und darüber hinaus noch weitere, die schließlich den Unterschied zu der älteren Version ausmachten.

Nature 10.1038/nature24270, 2017

ASTRONOMIE ZWERGPLANET MIT RING

► Mehr Himmelskörper als bisher angenommen könnten von einem Ring umgeben sein. Darauf deutet eine Entdeckung aus dem Kuipergürtel am Rand des Sonnensystems hin: Astronomen um José Luis Ortiz vom andalusischen Institut für Astrophysik haben dort den bereits länger bekannten Zwergplaneten Haumea beobachtet und dabei Hinweise auf einen etwa 70 Kilometer breiten Reif aus Bröckchen aufgespürt, der den Himmelskörper umgibt.

Bislang gingen Wissenschaftler davon aus, dass in erster Linie große Gasplaneten Ringe haben. Zwar sind solche in den vergan-

genen Jahren auch bei einigen Asteroiden im Umfeld der Gasriesen, den so genannten Zentauren, aufgetaucht. Dass jedoch deutlich größere Felsbrocken ebenfalls von solch einem Kranz umgeben sind, hatten die Forscher nicht unbedingt erwartet.

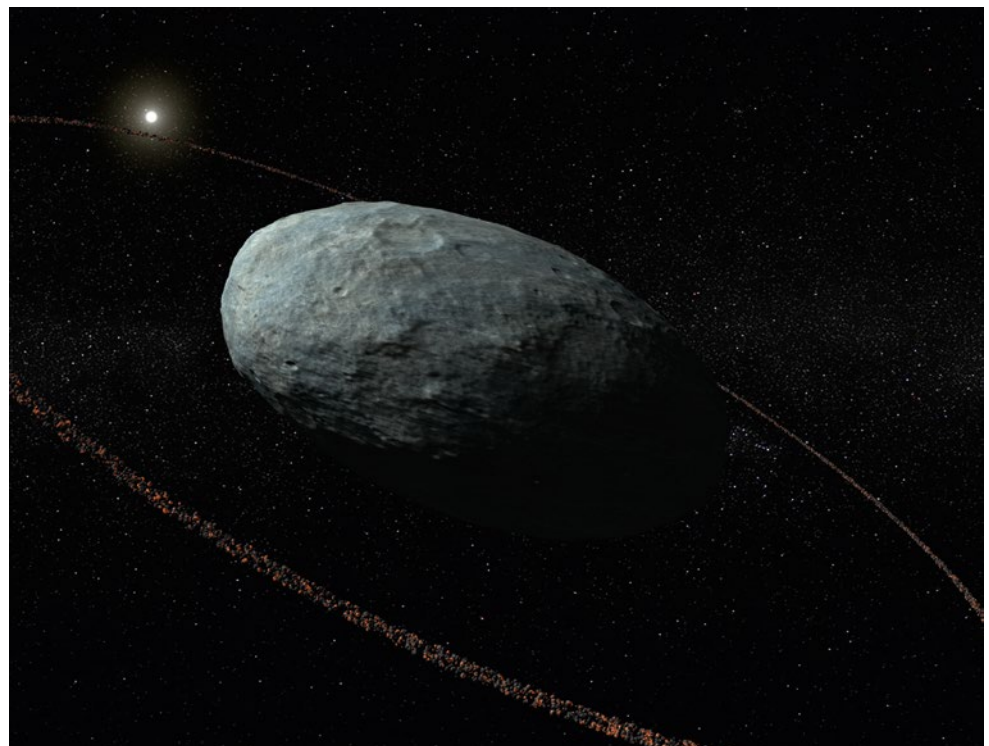
Haumea zählt neben Pluto, Eris und Makemake zu den größten Himmelskörpern jenseits des Neptuns. Er erinnert an ein langgezogenes, 2300 Kilometer großes Ei, das schnell um seine Längsachse rotiert. Da der Zwergplanet extrem weit von der Sonne entfernt ist, studierten die Astronomen ihn mittels eines Tricks: Als Haumea am 21. Januar 2017 vor einem Stern im Hintergrund vorbeizog, verdunkelte sich dieser ein klein wenig, was die Forscher mit insge-

samt zwölf Teleskopen beobachteten.

Überraschenderweise schwankte die Helligkeit des Sterns auch kurz vor und nach der Passage. Dies lasse sich am besten mit einem dünnen Ring erklären, der den Zwergplaneten in einem Abstand von etwa 1000 Kilometern umgibt, berichten die Astronomen. Wie der Ring entstehen konnte, ist bisher allerdings unklar. Möglicherweise weisen andere Brocken am Rand des Sonnensystems ebenfalls eine ähnliche Struktur auf. Dafür spreche, dass wohl auch die Zentauren einst im Kuipergürtel entstanden sind. Simulationen legen nahe, dass sie ihren Ring bei der Wanderung ins innere Sonnensystem behalten haben.

Nature 10.1038/nature24051, 2017

Künstlerische Darstellung des Zwergplaneten Haumea: Der eiförmige Fels zieht am Rand des Sonnensystems seine Bahnen und ist von einem feinen Ring umgeben.



IAA-CSIO/UHU



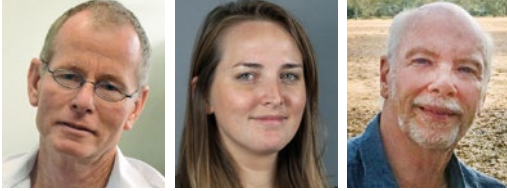
CHEMISCHE EVOLUTION WIE ENTSTAND DAS LEBEN?

Bislang vermuteten Forscher den Ursprung des Lebens in der Tiefsee. Neue Erkenntnisse deuten jedoch darauf hin, dass die ersten Einzeller in heißen Quellen vulkanisch aktiver Landschaften entstanden.

» spektrum.de/artikel/1513347



Das Leben könnte an Orten wie der »Grand Prismatic«-Thermalquelle im Yellowstone-Nationalpark begonnen haben.



Martin J. Van Kranendonk (links) leitet das Australian Centre for Astrobiology an der University of New South Wales. Seit mehr als 30 Jahren erforscht der Geologe weltweit Gesteinsformationen aus der frühen Erdgeschichte. **Tara Djokic** promoviert bei Van Kranendonk und untersucht in ihrer Arbeit geologische Hinweise auf das erste primitive Leben in Westaustralien. **David Deamer** arbeitet im Department of Biomolecular Engineering der University of California, Santa Cruz. Der Biochemiker ist Verfasser und Mitherausgeber von Büchern wie »First Life« oder »The Origins of Life«.

Die Nacht ist rabenschwarz. Zwei von uns (Djokic und Van Kranendonk) kämpfen sich in der Pilbara, einer entlegenen Region Nordwestaustraliens, durch das Unterholz zurück zu unserem Wagen, den wir auf einer kleinen Hochebene geparkt haben. Der Grund für diese unplanmäßige Nachtwanderung im Juni 2014: Djokic hat hier tagsüber in 3,48 Milliarden Jahre altem Sedimentgestein – bekannt als Dresser-Formation – eine Entdeckung gemacht, die uns die Zeit vergessen ließ. Die Felsen der Formation bestehen zum Teil aus orangefarbenen und weißen Schichten, so genanntem Geysirit. Diese Schichten entstanden durch vulkanische Geysire an der Erdoberfläche und enthalten Hohlräume. Wahrscheinlich wurde hier einst Gas in einem klebrigen Film eingeschlossen, den bakterienähnliche Mikroorganismen gebildet hatten. Das Gestein und die darin eingeschlossenen Hinweise auf frühe biologische Aktivität stützen eine neue Theorie zu einem der größten Rätsel der Wissenschaft: dem Ursprung des Lebens. Unsere Ergebnisse und weitere

Studien deuten darauf hin, dass sich die ersten Zellen vor etwa vier Milliarden Jahren auf dem Festland bildeten, in vulkanischen heißen Quellen und Tümpeln.

Die Theorie steht in deutlichem Widerspruch zu einer verbreiteten Vorstellung von der Entstehung des Lebens, die Wissenschaftler seit 1977 entwickelt haben. In jenem Jahr entdeckte eine Expedition mit dem Forschungs-U-Boot »Alvin« Hydrothermalquellen am Grund des Pazifiks. Diese Geysire der Tiefsee (bekannt als Schwarze oder Weiße Raucher) stoßen Eisen- und Schwefelminerale aus, zudem Gase wie Methan oder Schwefelwasserstoff. Ferner sind sie dicht besiedelt von einzelligen Bakterien und Archaeen sowie von großen Würmern – ein blühendes Ökosystem fernab des Sonnenlichts. Seither mutmaßen Biologen, dass sich das Leben vor zirka vier Milliarden Jahren an solchen Hydrothermalquellen entwickelt hat, weil diese Energie und Nährstoffe liefern und geschützt sind vor Naturkatastrophen an der Oberfläche des Planeten. Aber die Tiefsee-Hypothese hat ihre Schwächen. Die größte: Der Ozean enthält Unmengen Wasser. Moleküle, die miteinander reagieren müssen, um Zellmembranen und einen primitiven Stoffwechsel zu bilden, würden darin möglicherweise zu stark verdünnt.

Daher nehmen wir und andere Forscher inzwischen an, dass es Orte an Land gab, die viel geeigneter waren, Leben entstehen zu lassen: Hydrothermalbecken, deren Wasserstände fortwährend fielen und wieder stiegen. Unseren Erkenntnissen nach boten sie ausreichend hohe Temperaturen, um chemische Reaktionen zu katalysieren. Darüber hinaus konnten sich einfache Moleküle in Trockenperioden zu komplexeren organischen Makromolekülen verbinden, die sich bei höherem Wasserpegel verteilten. Wiederkehrende Trockenzeiten konzentrierten diese Polymere und erleichterten so weitere Reaktionen. Mitunter wurden Moleküle dabei in Kompartimenten aus Fettsäuren eingeschlossen – den Vorläufern von Zellmembranen.

Darwins Bauchgefühl führt zu warmen Tümpeln auf der vulkanischen Halbinsel Kamtschatka

Heute ist die Dresser-Formation ein heißer, unwirtlicher Ort im australischen Outback. Wir haben jedoch deutliche geologische Belege dafür gefunden, dass einst ein aktives Geothermalfeld die Landschaft prägte, mit dampfenden Quellen und sprudelnden Geysiren wie im US-amerikanischen Yellowstone-Nationalpark. Das Gestein hier ist gespickt mit versteinerten Zeugen frühen Lebens, das eng mit den heißen Quellen verbunden war. Die Formation mag nicht genau der Ort sein, wo sich die ersten Einzeller bildeten. Tatsächlich berichteten japanische Forscher jüngst im Fachmagazin »Nature«, dass 3,95 Milliarden Jahre altes Sedimentgestein im Norden Labradors biogenen Kohlenstoff und damit die bislang ältesten mikrobiellen Fossilien enthält. Unsere Entdeckungen belegen dennoch eindeutig die Existenz terrestrischer Hydrothermalquellen in der frühen Erdgeschichte.

Charles Darwin mutmaßte schon 1871, Mikroorganismen wären in »warmen, kleinen Tümpeln« entstanden. Der Begründer der Evolutionstheorie könnte damit intuitiv einen Volltreffer gelandet haben. Und diese Annahme

AUF EINEN BLICK DER URSPRUNG DES LEBENS

- 1** Die Entwicklung von Organismen auf der Erde setzt Energie zum Bilden komplexer chemischer Verbindungen voraus sowie Mechanismen, die Moleküle konzentrieren und vor Zerfall schützen.
- 2** Heiße Quellen und Tümpel in Vulkanlandschaften könnten die notwendigen Grundbausteine geliefert haben. Ständige Nass-trocken-Wechsel beschleunigten dann eine Auslese essenzieller Biomoleküle.
- 3** Die landbasierte Entstehungstheorie der ersten Einzeller deutet bei der Suche nach außerirdischem Leben auf andere Orte in unserem Sonnensystem als die populäre Tiefseehypothese.



1



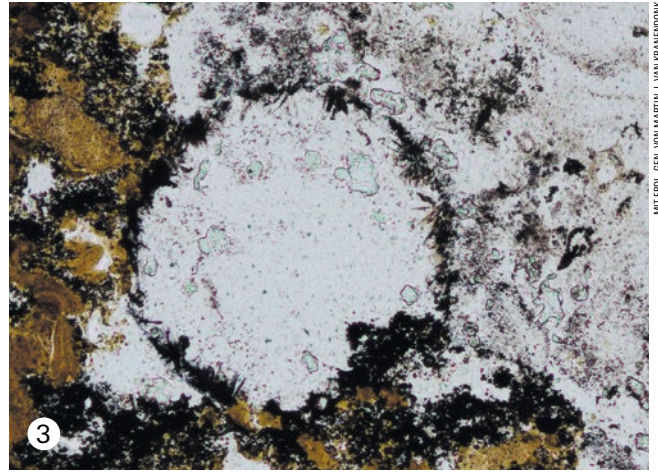
2

1 Millimeter

weist sogar weit über unseren Heimatplaneten hinaus: Wenn das Leben an Land und nicht in den Ozeanen entstanden ist, müssen wir unsere Suche nach extraterrestrischen Organismen auf andere Orte im Sonnensystem konzentrieren als bisher.

Bereits zehn Jahre vor unserer Nachtwanderung durch die Pilbara zeigte einer von uns (Deamer), dass Darwins Tümpel die Bildung der Grenzflächen erlauben, die Grundlage allen Lebens sind: Lipidmembranen, die Zellen und Zellkompartimente umschließen. Deamer leitete eine Expedition im fernen Osten Russlands, auf der vulkanisch geprägten Halbinsel Kamtschatka. Ziel war der aktive Vulkan Mutnovsky. Die Gegend vermittelte den Forschern eine Vorstellung davon, wie unser Planet vor vier Milliarden Jahren ausgesehen haben mag, bevor Leben auf der Erde existierte. So gibt es hier heiße Quellen mit wechselnden Feucht- und Trockenphasen. Deamer vermutete: Die Schwankungen des Wasserstands könnten aus einfachen Molekülen lange Polymere wie Nukleinsäuren entstehen lassen, die Informationen verschlüsseln – eine wesentliche Voraussetzung für Wachstum und Fortpflanzung erster primitiver Lebensformen. Auf gleiche Weise könnten sich andere essenzielle organische Polymere bilden, etwa Peptide aus Aminosäuren. Und in Kompartimenten aus Lipiden (Fetten) wären komplexe chemische Verbindungen vor Zerfall geschützt, womit sämtliche Bedingungen für die Entstehung einfacher Zellen erfüllt wären. Die heißen Quellen und Geysire am Mutnovsky waren für Deamer der ideale Ort, um seine Hypothese zu testen.

Er hatte ein weißes Pulver mitgebracht, eine Art Urstoff, dessen Bestandteile es vermutlich auf der noch unbelebten Erde gab. Die Mischung enthielt vier Aminosäuren,



3

Die orangefarbenen Felsen in der australischen Pilbara bestehen aus so genanntem Geysirit, einem Mineral, das Geysire heißer Quellen einst ausspuckten (1). In der Vergrößerung sieht man die charakteristischen Bänder des Gesteins: dunkle, die reich an Titan sind, sowie helle, die überwiegend aus Kalium bestehen (2). Die winzigen Bläschen (Durchmesser zirka 200 Mikrometer) in diesem 3,5 Milliarden Jahre alten Geysirit entstanden vermutlich durch Gaseinschlüsse in klebrigen Bakterienmatten (3).

Nukleinbasen (wichtige DNA- und RNA-Bausteine) sowie Phosphat, Glycerin und ein Lipid. Deamer schüttete das Pulver in eine kleine, kochend heiße Quelle. Binnen Minuten bildete sich an ihrem Rand ein weißer Schaum; zahllose, winzige Bläschen mit einer Lipidmembran, die alle etwas von dem Urstoff enthielten.

Wenn die Quelle am Rand austrocknete, würden sich die Inhalte benachbarter Kompartimente dann zu Polymeren verbinden? Könnte ein solcher Schritt bei der Entstehung des Lebens entscheidend gewesen sein? Deamer und seine Kollegen kehrten in ihre Laboratorien zurück

Zwar waren diese Zellvorläufer noch keine Organismen, sie wiesen aber eindeutig in Richtung erster Lebensformen

und mischten Nukleotide (die Grundeinheiten von Nukleinsäuren) mit Lipiden. Bei niedrigem pH-Wert und hohen Temperaturen simulierten die Wissenschaftler mehrere Nass-trocken-Zyklen, wie sie in der Kamtschatka-Quelle auftraten. Das Ergebnis waren Polymere, die zwischen 10 und über 100 Nukleotide enthielten. Anschließend untersuchten mittels Röntgenbeugung zeigten, dass diese Moleküle Ribonukleinsäuren (englisch: RNA) ähnelten. Zudem waren sie von Fetten eingekapselt und bildeten unzählige mikroskopische Kompartimente. Zwar waren diese Zellvorläufer – oder Protozellen – noch keine Orga-



Schöpfungslandschaft

Einer neuen Theorie zufolge setzten heiße Quellen, Tümpel und Geysire chemische Prozesse in Gang, die für die Entstehung des Lebens notwendig waren. Letztere verlief demnach in sieben Schritten und begann mit der Synthese verschiedener Moleküle. Darauf folgten Zyklen zunehmender chemischer Komplexität. Schließlich eroberten die ersten Einzeller vielfältige Lebensräume.

1 Synthese

Viele der elementaren Bausteine des Lebens, etwa Aminosäuren, entstanden im Welt- raum und gelangten durch Meteoriten auf die Erde.

2 Akkumulation

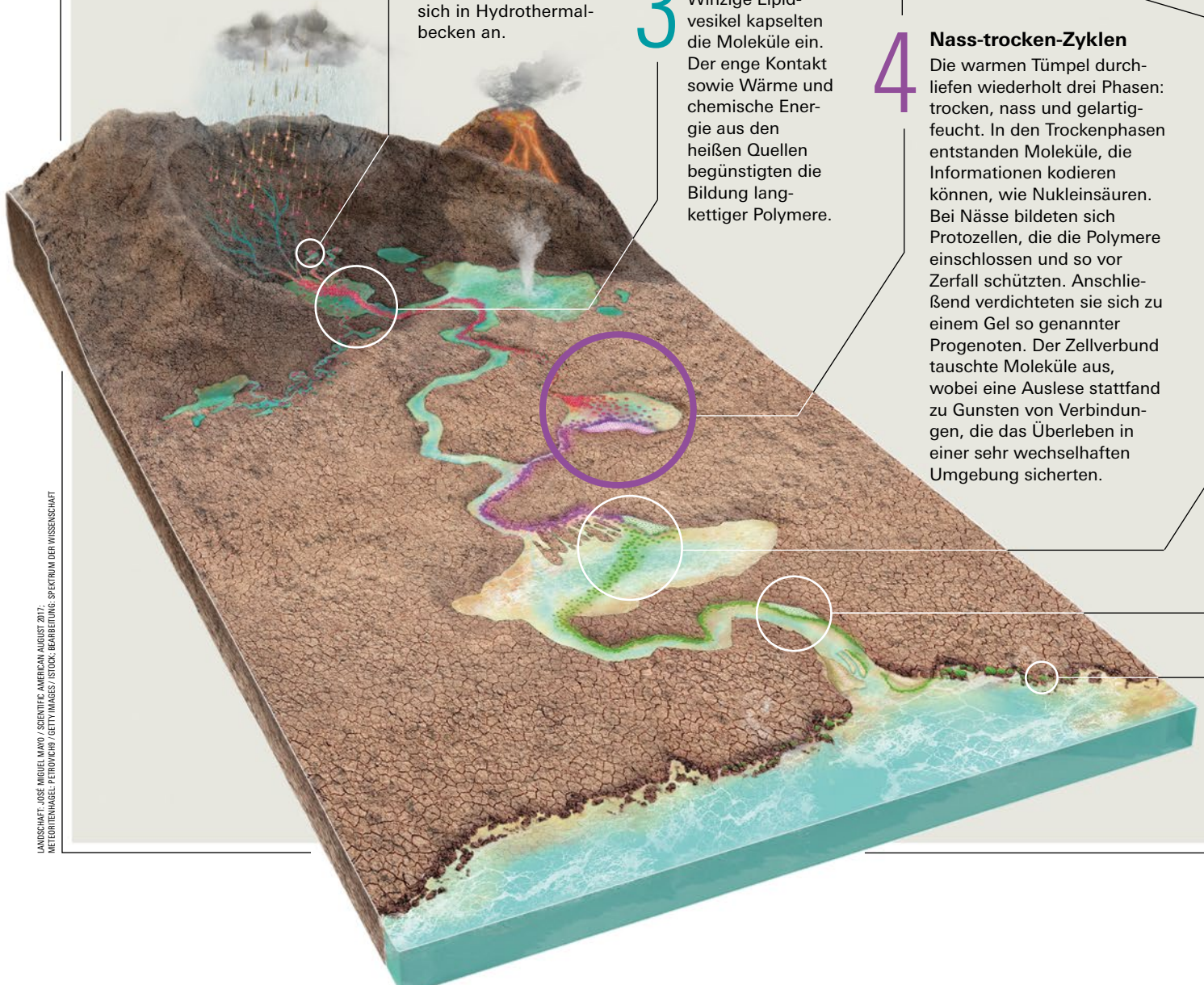
Moleküle aus dem All und organische Verbindungen aus Vulkan- landschaften häuften sich in Hydrothermal- becken an.

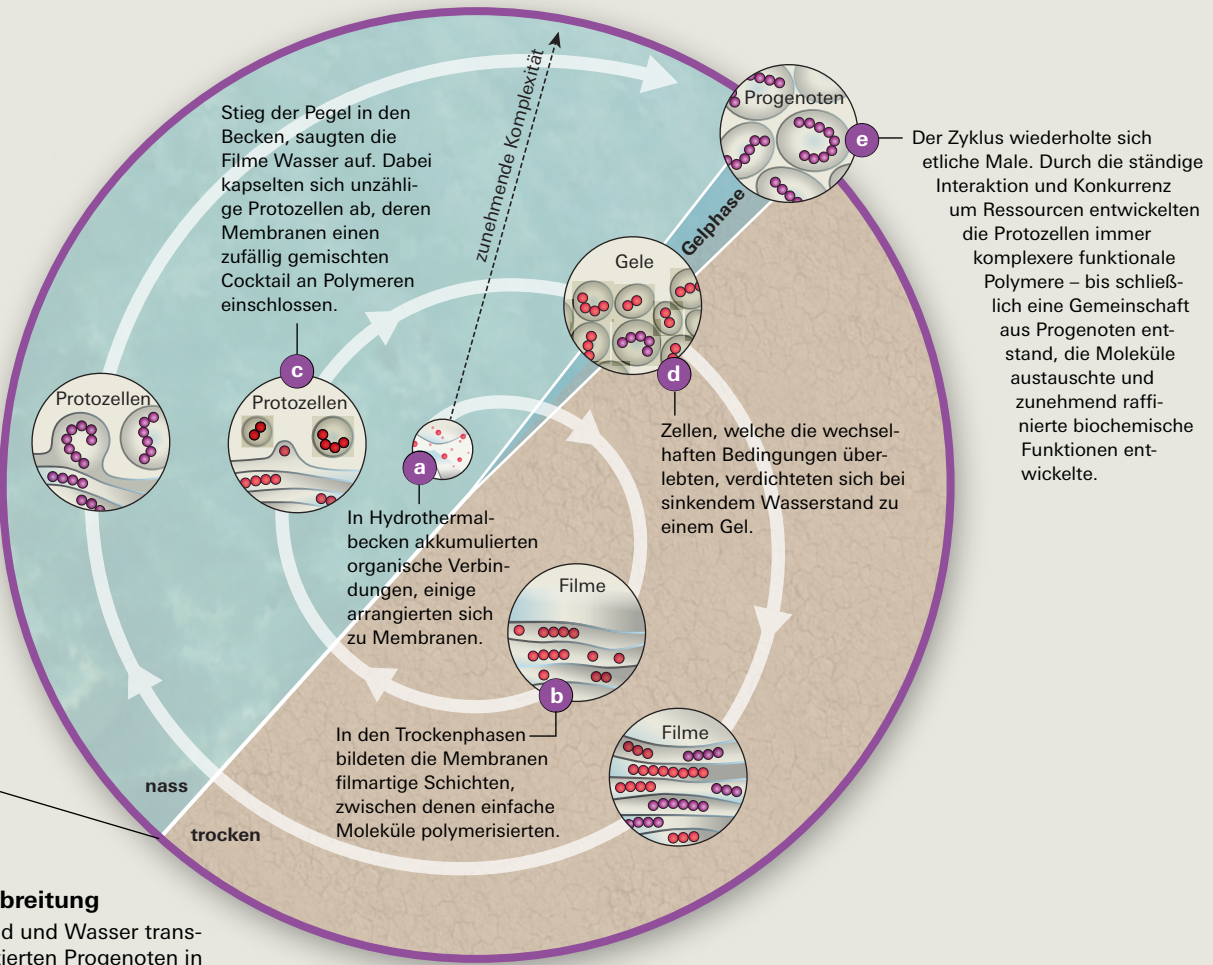
3 Konzentration

Winzige Lipid- vesikel kapselten die Moleküle ein. Der enge Kontakt sowie Wärme und chemische Ener- gie aus den heißen Quellen begünstigten die Bildung lang- kettiger Polymere.

4 Nass-trocken-Zyklen

Die warmen Tümpel durch- liefen wiederholt drei Phasen: trocken, nass und gelartig- feucht. In den Trockenphasen entstanden Moleküle, die Informationen kodieren können, wie Nukleinsäuren. Bei Nässe bildeten sich Protozellen, die die Polymere einschlossen und so vor Zerfall schützten. Anschlie- ßend verdichteten sie sich zu einem Gel so genannter Progenoten. Der Zellverbund tauschte Moleküle aus, wobei eine Auslese stattfand zu Gunsten von Verbindun- gen, die das Überleben in einer sehr wechselhaften Umgebung sicherten.





5 Verbreitung

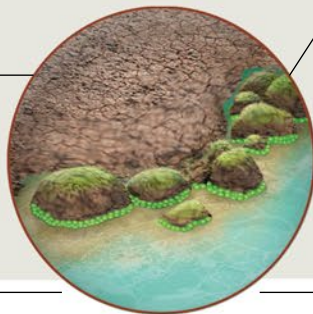
Wind und Wasser transportierten Progenoten in andere Tümpel und Flüsse. Einige, die gut an ihre neue Umwelt angepasst waren, entwickelten die Fähigkeit, Kohlendioxid mittels Fotosynthese zu fixieren. Irgendwann brachte eine Protozelle die komplizierte molekulare Maschinerie hervor, die für die Zellteilung nötig ist. Damit war der Weg frei für die erste mikrobielle Gemeinschaft.

6 Anpassung

Einige der frühen Mikroorganismen gelangten vom Süßwasser in salzhaltige Flussmündungen. Diejenigen, die dort zurechtkamen, vererbten nützliche Eigenschaften an ihre Nachkommen, die schließlich den Ozean besiedelten.

7 Kolonisierung

Meeresstürme und die Gewalt der Gezeiten übten selektiven Druck auf Mikroorganismen aus. Robuste Bakterienmatten, in denen Mineralien die Zellen miteinander verklebten, waren klar im Vorteil. Die Matten stapelten sich zu so genannten Stromatolithen. Nach und nach besetzte das Leben weitere Nischen und schaffte die Grundlage für frei lebende Einzeller. Milliarden Jahre später entwickelten sich daraus komplexe multizelluläre Organismen: Pflanzen, Pilze und Tiere.



nismen, die sich hätten fortpflanzen können, sie wiesen aber eindeutig in Richtung erster Lebensformen.

Innerhalb weniger Nass-trocken-Zyklen konnten Damer und Co in ihrem Experiment vergleichsweise komplexe chemische Verbindungen erzeugen. Der Computerwissenschaftler Bruce Damer, ein Kollege von der University of California, Santa Cruz, vermutete, dass zusätzliche Zyklen ein anderes Schlüsselement hinzufügen würden: »survival of the fittest«. Er nahm an, dass die Lipidmembranen in Trockenperioden durchlässig würden für Polymere und Nährstoffe, wodurch sich die Inhalte verschiedener Kompartimente vermischen können. In den Nassphasen würden die Membranen also stets einen neuen Molekülcocktail umschließen. Jede Mischung wäre eine Art natürliches Auslese-Experiment. Komplexere Protozellen mit einer großen Molekülvielfalt hätten unter sehr wechselhaften Umweltbedingungen bessere Chancen zu überdauern. Die Zellen, die gut an ihre Umgebung angepasst wären, könnten überlebenswichtige Polymere an die nachfolgende Generation »vererben« – ein weiterer Evolutionsschritt. Damer vergleicht dieses Modell mit einem chemischen Computer, der die Funktionen des Lebens »hochfährt« – mit zufälligen »Befehlen« kodiert durch Polymere.

Dehydrierte Bakterien liefern den entscheidenden Hinweis zum Ursprung von Einzellern

2015 erweiterte Damer sein Modell um eine dritte Phase. Die Idee dazu kam ihm während einer gemeinsamen Expedition zur Dresser-Formation. Wir suchten nach Stromatolithen, das sind fossile Bakterienmatten, die zu den frühesten Belegen für irdisches Leben zählen. In der Nähe von Gallery Hill, einer Graniterhebung übersät mit Petroglyphen (Felsbildern) der Aborigines, entdeckte Damer braune, scheinbar leblose Bakterienmatten in kleinen Vertiefungen der Felsformation. Als er ein wenig Wasser daraufgoss, nahmen die Matten eine gelartige Konsistenz an und ergrüneten, sie erwachten gewissermaßen zu neuem Leben. Wenn es auch in den Geburts-

Hydrothermalfelder sind chemisch äußerst komplex, da hier drei Grenzflächen Molekülreaktionen begünstigen

becken des Lebens eine Feuchtphase gab, in der Protozellen solche Gele bildeten, mutmaßte Damer, hätten Polymere und Nährstoffe durch die Lipidmembranen hindurch ausgetauscht werden können. Derart interagierende Zellvorläufer hätten jene Moleküle, die ihr Überleben sichern, besser hervorbringen können. Bereits 1977 haben die Evolutionsbiologen George Fox und Carl Woese eine hypothetische Urgemeinschaft des Lebens beschrieben. Aus einem Kollektiv so genannter Progenoten gingen demnach alle einzelligen Organismen hervor. Eine ähnliche Situation findet sich auch in Damers Gelmodell.

GETTY IMAGES / THEO ALDOFS



Die trockene Region Pilbara im Nordwesten Australiens war einst geprägt von heißen Quellen und Geysiren.

Auf Grund der Gaseinschlüsse und der Zusammensetzung des Gesteins erscheint uns die Dresser-Formation als geeigneter Ort für einen dreiphasigen Zyklus inklusive Gelpase. Geht man davon aus, dass einst heiße Quellen das Landschaftsbild der Pilbara prägten, dann lieferte die Gegend weitere Zutaten für die Entstehung des Lebens. Erdwärme und in hydrothermalen Flüssigkeiten gelöster Wasserstoff stellten üppige Energiequellen dar. Die säurehaltigen Fluide konnten Phosphatminerale aus tieferen Gesteinsschichten lösen. Phosphat ist essenzieller Bestandteil von Nukleinsäuren und dient in Form von ATP (Adenosintriphosphat) als zellulärer Energielieferant. Zudem enthalten die Felsen große Mengen Bor, ein Element, das unentbehrlich ist für die Synthese von Nukleinsäuren. Die Reste hydrothermalen Quellen und Verdunstungsablagerungen (Evaporite) ehemaliger Kraterseen weisen einen hohen Zink- und Mangangehalt auf. Beide Elemente finden sich in Enzymen sämtlicher Lebensformen. Schließlich gibt es in der Dresser-Formation Tongestein, dessen elektrisch geladene mineralische Oberfläche die Bildung komplexer organischer Strukturen katalysieren kann.

Was diesen Ort, der womöglich dem Ausgangspunkt des Lebens gleicht, besonders spannend macht, ist seine ungemeine Vielfalt. Zwar ist die Dresser-Formation heute trocken und felsig. Kurz nach ihrer Entstehung sind Geothermalfelder jedoch geprägt von hunderten heißer Quellen, die sich hinsichtlich pH-Wert, Temperatur, gelöster Ionen und anderer Parameter alle leicht unterscheiden. Chemisch sind diese Felder äußerst komplex, da hier drei Grenzflächen Molekülreaktionen begünstigen: zwischen Wasser und Gestein, Wasser und Luft sowie Gestein und Luft. Wenn man nun all diese Faktoren zusammennimmt – mehrmals täglich Nass-trocken-Wechsel, die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Quellen, reaktive

Grenzflächen, den Austausch von Molekülen, wenn Geysire Wasser ausspeien und wieder aufsaugen, sowie ein unterirdisches Netzwerk fluidhaltiger Spalten und Risse –, dann erzeugt eine vulkanisch aktive Gegend mit 100 Quellen problemlos eine Million neuer Kombinationen an Umweltfaktoren pro Jahr.

Jeder warme Tümpel wird so zu einem »Innovationspool«, einem Labor für anpassungsfähige Molekülensembles, denen es gelingt, sich zu vervielfältigen – während eine große Menge an Molekülen wieder zerfällt. Um die erste primitive Version einer Zelle zu erschaffen, mussten wahrscheinlich unzählige solcher Experimente ablaufen. Auf Grund der Vielzahl an chemischen Kombinationsmöglichkeiten in terrestrischen Hydrothermalfeldern könnte die Entwicklung des Lebens jedoch binnen lediglich zehn Millionen Jahren erfolgt sein. Die ersten Organismen wären demnach entstanden, sobald die Erde eine stabile Kruste hatte und vulkanische Landmassen aus dem Ozean ragten, vor ungefähr vier Milliarden Jahren.

Durchaus nicht jeder Wissenschaftler teilt unsere Einschätzung, dass terrestrische heiße Quellen die ersten Einzeller hervorbrachten. Viele favorisieren weiterhin die Theorie vom Ursprung des Lebens am Meeresgrund. Der Biochemiker Mike Russell vom Jet Propulsion Laboratory der NASA hat nach der Entdeckung von Hydrothermalquellen in der Tiefsee ein elegantes Modell entwickelt. Dem zufolge bildeten mineralische Membranen in den Schloten, die heiße Flüssigkeiten ausstießen, winzige, zellähnliche Poren. Diese trennten zunächst das alkalische Fluid und das saure Wasser des Urozeans. Das pH-Gefälle an den Schloten – vergleichbar dem zwischen Salmiakgeist (Ammoniaklösung) und Orangensaft – ließ sich energetisch nutzen; heutige Bakterien tun genau dies, um ATP für ihren Stoffwechsel zu generieren. Ozeanische heiße Quellen entlassen zudem energiereiche, reaktive Gase ins Meer, etwa Wasserstoff. Vermischte sich Letzterer mit dem im Urozean gelösten Kohlenstoffdioxid, so die Überlegung von Russell und seinen Kollegen, reduzierten Wasserstoffelektronen den Kohlenstoff im CO₂-Molekül und trieben so die Synthese komplexer organischer Verbindungen an. Irgendwann entstand daraus ein primitiver Stoffwechsel.

Gibt es außerirdisches Leben unter dem Eis entfernter Monde oder auf dem Mars?

Welches der beiden Modelle wir für richtig erachten, hat einige weit reichende Folgen: So rücken bei der Suche nach den ersten Einzellern entweder die Tiefen der Meere oder vulkanisch aktive Landmassen in den Mittelpunkt. Des Weiteren legen die beiden Hypothesen für die Jagd nach extraterrestrischen Lebensformen unterschiedliche Strategien nahe. Sollten tatsächlich ozeanische Hydrothermalquellen der Geburtsort des Lebens sein, dann sind die Saturn- und Jupitermonde Enceladus und Europa aussichtsreiche Kandidaten. Astronomen vermuten bei beiden Monden unter der Eiskruste einen Ozean sowie hydrothermale Aktivität. Wenn jedoch heiße Quellen mit schwankenden Wasserpegeln den Anfang markierten, dann sind diese Welten vermutlich leblos.

Wie stünden die Chancen bei unserem Nachbarplaneten, dem Mars? Es gibt zwar starke Indizien für einstige Seen an seiner Oberfläche, aber nichts deutet hier auf einen globalen Ozean oder tektonisch aktive Spreizungszonen hin, an denen man wie auf der Erde Hydrothermalquellen finden könnte. Sollten fortpflanzungsfähige Zellen im Meer entstanden sein, käme der Rote Planet als Heimat ähnlicher Lebensformen also kaum in Frage. Gehen die frühesten Organismen der Erde jedoch auf terrestrische Geothermalfelder zurück, dann wäre der Mars ein viel versprechender Bewerber. Es gibt dort Wasser und Anzei-

Der Rover »Spirit« entdeckte 2008 Ablagerungen auf dem Mars, die vermutlich von ehemaligen heißen Quellen stammen

chen für vulkanische Aktivität – die wichtigsten Komponenten heißer Quellen. Tatsächlich entdeckte der Rover »Spirit« in den Columbia Hills des Mars im Jahr 2008 Ablagerungen, die vermutlich von ehemaligen heißen Quellen stammen. Forscher haben diese auf ein Alter von 3,65 Milliarden Jahren datiert. Damit würden sie grob in die aktive Phase der Dresser-Formation fallen.

Egal ob der Ursprung des Lebens an Land oder im Meer zu finden ist: Beide Modelle werden die Wissenschaft wohl noch lange beschäftigen, bevor sich eine Theorie durchsetzen kann. Denn trotz der jüngsten geologischen und chemischen Entdeckungen bleiben offene Fragen. Zum Beispiel ist unklar, warum manche Tümpel der Dresser-Formation bestimmte Elemente in hoher Konzentration aufweisen und wie sich Geothermalfelder zeitlich entwickeln. Auch die Mechanismen, die der Synthese und dem Zerfall organischer Moleküle zu Grunde liegen, verstehen wir bislang nur unzureichend. Versuchsreihen mit temperierten Becken etwa könnten aufzeigen, wie komplexe Polymere entstehen und interagieren, wenn sie von Membranen umgeben sind. Wir sind zuversichtlich, dass wir so schrittweise ein präziseres Bild von der Entstehung der ersten lebensfähigen Organismen auf der Erde gewinnen werden. ◀

QUELLEN

Damer, B.: A Field Trip to the Archaean in Search of Darwin's Warm Little Pond. In: *Life* 6, 21, 2016

Damer, B., Deamer, D.: Coupled Phases and Combinatorial Selection in Fluctuating Hydrothermal Pools: A Scenario to Guide Experimental Approaches to the Origin of Cellular Life. In: *Life* 5, S. 872–887, 2015

Djokic, T. et al.: Earliest Signs of Life on Land Preserved in ca. 3.5 Ga Hot Spring Deposits. In: *Nature Communications* 8, 15263, 2017

Pearce, B. K. D. et al.: Origin of the RNA World: The Fate of Nucleobases in Warm Little Ponds. In: *PNAS*, 10.1073/pnas.1710339114, 2017

Tashiro, T. et al.: Early Trace of Life from 3.95 Ga Sedimentary Rocks in Labrador, Canada. In: *Nature* 549, S. 516–518, 2017



WILLY BLANCHARD, EMF, UNIVERSITÉ DE LAUSANNE



COLUMBIA UNIVERSITY



MRC LABORATORY OF MOLECULAR BIOLOGY, CAMBRIDGE

Der Schweizer Biophysiker Jacques Dubochet (links), Jahrgang 1942, ist Honorarprofessor an der Universität de Lausanne. Joachim Frank (Mitte) wurde 1940 in Deutschland geboren und arbeitet an der Columbia University in New York. Der britische Struktur- und Molekularbiologe Richard Henderson (rechts) wurde 1945 geboren und wirkt seit seiner Promotion am Laboratory of Molecular Biology in Cambridge.

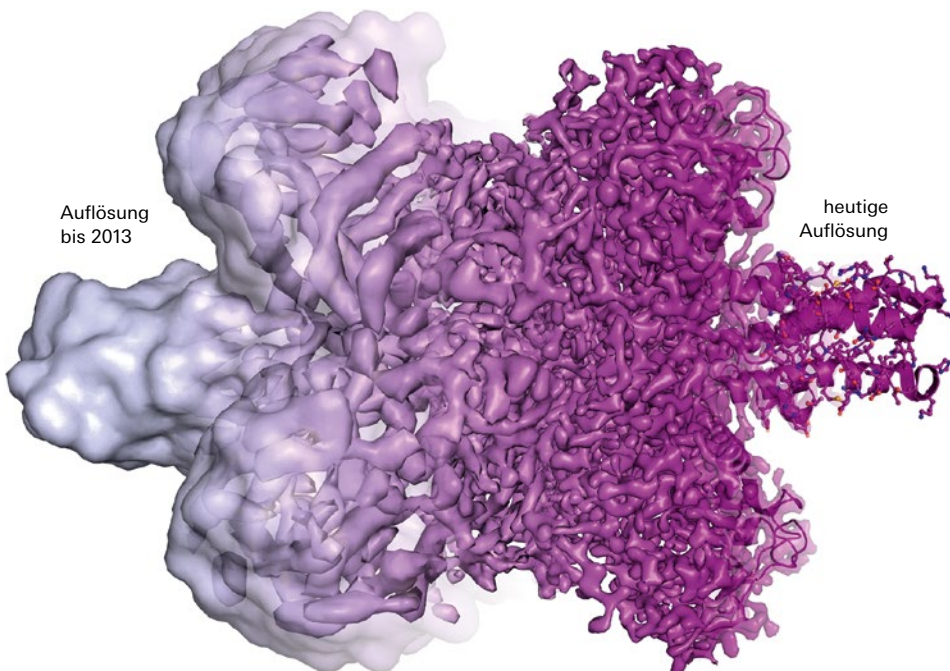
NOBELPREIS FÜR CHEMIE COOLE METHODE FÜR MOLEKÜLBILDER

Die von Jacques Dubochet, Joachim Frank und Richard Henderson entwickelte Kryo-Elektronenmikroskopie offenbart die kleinsten Strukturen von Biomolekülen.

Um die Wechselwirkungen im Mikrokosmos der Zellen genau zu verstehen, müssen Wissenschaftler die beteiligten Objekte, beispielsweise Proteine, unversehrt und möglichst detailliert darstellen. Kryo-Elektronenmikroskope gestatten das in atomarer Auflösung – ein entscheidender Durchbruch auf dem Gebiet der molekularen Biologie. Die Jury in Stockholm verleiht den Nobelpreis für Chemie 2017 an drei Forscher, die maßgeblich an der Entwicklung dieser Technik beteiligt waren: den Schweizer Jacques Dubochet sowie den gebürtigen Deutschen und Wahl-US-Amerikaner Joachim Frank, beides Biophysiker, und den britischen Struktur- und Molekularbiologen Richard Henderson.

Das Fachmagazin »Nature Methods« kürte das Verfahren bereits im Jahr 2015 zur »Methode des Jahres«. Von der herkömmlichen Elektronenmikroskopie unterscheidet sich die Technik in einem wesentlichen Punkt: Die Proben werden schockgefroren und bei Temperaturen weit unter dem Nullpunkt betrachtet, in der Regel bei rund minus 200 Grad Celsius. Nur so lassen sich biologische Objekte darstellen, die Wasser enthalten oder nur in wässriger Umgebung ihre tatsächliche Form behalten. Von besonderem Interesse sind dabei Proteine, die in Zellen vielfältige Funktionen übernehmen.

Der Erfinder der herkömmlichen Elektronenmikroskopie Ernst Ruska erhielt für diese Methode bereits 1986 den



Auflösung
bis 2013

heutige
Auflösung

Bis in die atomaren Details des Lebens

Die dreidimensionale Rekonstruktion der Struktur des Enzyms Glutamatdehydrogenase demonstriert die rapiden Fortschritte bei der Kryo-Elektronenmikroskopie. Seit 2013 erlaubt sie – vor allem dank neuer Detektoren – selbst bei einem Protein dieser Größe die Darstellung atomarer Einzelheiten (rechts) statt wie vormals nur vergleichsweise grober Umrisse (links).

© THE NOBEL FOUNDATION, FOTO: LOVISA ENGBLOM, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Nobelpreis für Physik. Vor mehr als 80 Jahren konstruierte Ruska zusammen mit dem Elektroingenieur Max Knoll die erste Version eines Mikroskops, das nicht mittels Licht eine Probe untersuchte, sondern mit einem fokussierbaren Elektronenstrahl. Die Elektronenmikroskopie übertraf die Möglichkeiten der Lichtmikroskopie deutlich und wurde seinerzeit deshalb auch als Übermikroskopie bezeichnet. Eine klassische Optik kann prinzipiell lediglich Strukturen darstellen, die etwa so groß sind wie die halbe zur Beobachtung genutzte Wellenlänge. Bei Lichtmikroskopen beschränkt das die Auflösung auf einen dreistelligen Nanometerbereich. Das reicht aus, um Zellen und größere Komponenten wie etwa den Zellkern zu betrachten. Deren molekularer Inhalt bleibt aber verborgen, insbesondere die Proteine; schon gar nicht lassen sich damit einzelne Atome erkennen.

Elektronenmikroskope liefern die nötige Auflösung – Probleme machen hier die Proben selbst

Der entscheidende Vorteil von Elektronen ist ihre wesentlich geringere Wellenlänge, die – je nach Energie – im einstelligen Nanometerbereich oder sogar darunter liegt. Somit lassen sich viel kleinere Strukturen auflösen und grundsätzlich auch Moleküle, die innerhalb von Zellen ihre Arbeit verrichten. Das jedoch sollte den Forschern zunächst verwehrt bleiben. Vor allem ein Problem schränkte die Methode ein: Anders als beim Lichtmikroskop kann man ein Objekt nicht ohne große Vorkehrungen unter den Strahl stellen. Vielmehr braucht es eine Vakuumkammer, damit die Luftmoleküle die Elektronen nicht vom Weg abbringen. Und genau diese unwirtliche Umgebung ist das Problem bei biologischen Proben: Sie enthalten Wasser beziehungsweise behalten ihr tatsächliches Aussehen nur in einer wässrigen Umgebung. In einer Vakuumkammer verdampft

alle Feuchtigkeit sofort. Zurück bleibt ein verschrumpeltes Objekt, das nur noch wenig mit dem Original zu tun hat, oder es wird bei dem Vorgang sogar regelrecht zerfetzt. Forscher ersannen zwar Methoden, die der Probe das Wasser entziehen und beispielsweise durch bestimmte Kunststoffe ersetzen. So bleibt das Objekt einigermaßen in Form, doch auch in diesem Fall muss man bezüglich seines wahren Aussehens Abstriche machen.

Den Grundstein für eine dreidimensionale Darstellung legte einer der jetzigen Preisträger, Joachim Frank, mit einer Bildverarbeitungsmethode, die er in den 1970er und 1980er Jahren entwickelte. Mit ihr lassen sich die zweidimensionalen, verschwommenen Schattenwürfe auf dem Detektor im normalen Elektronenmikroskop so aufarbeiten, dass letztlich scharfe dreidimensionale Strukturen erkennbar werden. Frank nutzte viele Einzelbilder, aufgenommen unter verschiedenen Winkeln, und ein Computerprogramm, um aus den Projektionen die dreidimensionale Erscheinung zu rekonstruieren. Dieser wesentlich bessere Einblick in die Funktionsweise des Lebens war allerdings immer noch ziemlich verzerrt, denn ohne ihre wässrige Umgebung hatten die Proteine ihre Struktur maßgeblich geändert.

Abhilfe schuf der zweite der drei nun geehrten Wissenschaftler Anfang der 1980er Jahre mit einer ausgeklügelten Methode. Jacques Dubochet konnte biologische Objekte so präparieren, dass sie auch im Vakuum gut erhalten bleiben. Er kühlte die Proben rasch und stark herunter und schockgefroren so die Wassermoleküle um die Proteine. Das Wasser hatte keine Zeit, zu kristallisieren, sich dabei auszudehnen und die Biomoleküle zu sprengen, sondern wurde zu so genanntem amorphem Eis ohne regelmäßige Struktur – die biologischen Objekte blieben bei tiefen Temperaturen in Form und ließen sich betrachten.

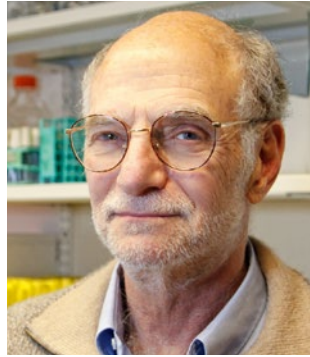
1990 erzeugte schließlich Richard Henderson auf Basis dieser Erfindungen erstmals ein dreidimensionales Abbild eines Proteins auf atomarer Ebene. Das Nobelpreiskomitee würdigte insbesondere diese Leistung, die es der Wissenschaft ermöglicht, einen Blick in die »Moleküle des Lebens« zu werfen, wie es die Bausteine der Zelle nennt. In den darauf folgenden zwei Jahrzehnten ging die Zahl der Anwendungen sprunghaft in die Höhe: Abgebildet wurden etwa das Protein, das den Schlaf-wach-Rhythmus steuert (ein Schritt auf dem Weg zum Nobelpreis 2017 für Medizin, siehe nachfolgende Meldung), Proteine, die Antibiotikaresistenzen verursachen, oder die Oberflächenstruktur des Zikavirus. Die so gewonnenen Erkenntnisse sind von unschätzbare Bedeutung für die Medizin.

Als Beispiel dafür nannte Joachim Frank in einem ersten Telefongespräch nach der Preisverkündung die Herstellung von Proteinen durch makromolekulare Komplexe namens Ribosomen. Hier und an vielen anderen Stellen erlaubt die Kryo-Elektronenmikroskopie einen nie da gewesenen Einblick in die Arbeit von Zellen und somit auch in die Geheimnisse des Lebens an sich. ◀

Janosch Deeg ist Wissenschaftsjournalist in Heidelberg. Er ist Physiker und hat selbst mit der Kryo-Elektronenmikroskopie gearbeitet.



BRANDEIS UNIVERSITY



BRANDEIS UNIVERSITY



ROCKEFELLER UNIVERSITY

Jeffrey C. Hall (links), geboren 1945 in New York, arbeitete an der Brandeis University in Waltham (Massachusetts) und an der University of Maine bei Bangor. Michael Rosbash (Mitte), Jahrgang 1944 aus Kansas City, ist an der Brandeis University tätig. Michael W. Young, 1949 in Miami geboren, forscht an der Rockefeller University in New York.

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN WIE UNSERE INNERE UHR TICKT

Die Auszeichnung geht dieses Jahr an die US-Amerikaner Jeffrey Hall, Michael Rosbash und Michael Young. Sie haben die zentralen Gene und Regulationsmechanismen für unseren übergeordneten inneren Zeitgeber gefunden.

► Tag und Nacht gibt es auf der Erde seit ihren Anfängen vor viereinhalb Milliarden Jahren. Nahezu alles irdische Leben hat sich seit seiner Entstehung, nach neuesten Erkenntnissen vor fast vier Milliarden Jahren, auf den vorhersagbaren Wechsel zwischen hell und dunkel eingestellt.

Ob Bakterium, Pflanze oder Mensch: Die verschiedensten Lebensformen folgen einem regelmäßigen »zirkadianen« Rhythmus (von lateinisch *circa*: ringsum; dies: Tag). Dieser ist den Organismen eingebaut, hat Einfluss auf Physiologie und Verhalten und wird bei Bedarf, angelehnt an die Hell- und Dunkelphasen, subtil nachjustiert. Das dafür nötige Werkzeug und Sensorium – die »innere Uhr« – zu beherrschen, ist eine Meisterleistung der Zellen. Wie diese Uhr tickt, haben Generationen von Wissenschaftlern erforscht und allmählich immer besser verstanden. Drei von ihnen, Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash und Michael W. Young, werden für ihren Beitrag nun mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2017 geehrt.

Schon im 18. und noch bis ins 20. Jahrhundert hinein war die Idee einer inneren Uhr allerdings höchst umstritten. Denn ist sie nicht eigentlich überflüssig? Könnte ein Lebewesen nicht einfach sehen, wann es hell und dunkel ist, darauf entsprechend reagieren und sich damit komplizierte Zeitmesser sparen? So einfach ist die Sachlage aber keineswegs, wie schon 1729 der französische Astronom Jean Jacques d'Ortous de Mairan (1678–1771) ahnte: Er experimentierte mit Mimosen, die ihre Blättchen tagsüber öffnen und nachts zusammenlegen. Erstaunlicherweise behielten die Pflanzen diesen rhythmischen Wechsel sogar im Dauerdunkel tagelang bei.

Das gleiche Ergebnis erzielte gut zwei Jahrhunderte später mit ähnlichen, nun technisch versierteren Experimenten der deutsche Pflanzenphysiologe Erwin Bünning (1906–1990), einer der Begründer der Chronobiologie. Er

dokumentierte die Bewegungen einzelner Blätter mit einem mechanischen Wellenschreiber. Und in den 1960er Jahren belegten Jürgen Aschoff (1913–1998) vom Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie in Seewiesen und seine Mitarbeiter, dass auch Menschen eine innere Uhr besitzen. Die Forscher ließen Freiwillige in einem Bunker wohnen, abgeschirmt von Tageslicht, Uhren oder sonstigen Anhaltspunkten für die Tageszeit. Unter diesen Bedingungen zeigten die Versuchspersonen einen fast normalen Schlafwach-Zyklus von rund 25 Stunden.

Wie die Zellen der verschiedensten Organismen einschließlich des Menschen Zeit messen, haben Wissenschaftler vor allem an den winzigen, für dergleichen Studien beliebten Taufiegen gelernt, die tags aktiv sind und nachts ruhen. Auch die diesjährigen Laureaten wählten in den 1980er Jahren als Forschungsobjekt *Drosophila melanogaster*. Sie bauten auf genetischen Erkenntnissen auf, die Seymour Benzer (1921–2007) und Ronald Konopka (1947–2015) am California Institute of Technology in Pasadena gewonnen hatten, wo einst schon der »Papst der Fliegen-genetik« Thomas Hunt Morgan (1866–1945) wirkte. Benzer und Konopka hatten in den 1970er Jahren entdeckt, dass Taufiegen individuelle Besonderheiten ihrer inneren Uhr vererben können, die auf Mutationen beruhen. Bei einigen Abweichlern tickte die innere Uhr abnorm, in anderen funktionierte sie gar nicht mehr. Dahinter vermuteten die Forscher ein damals noch nicht identifiziertes Gen, das sie *period* nannten.

Diese Erbanlage fanden Hall und Rosbash einerseits sowie Young andererseits zehn Jahre später mit inzwischen deutlich ausgefeilteren Methoden. Sie isolierten und sequenzierten das Gen und untersuchten seine Funktion. Wie sie erkannten, oszilliert die Menge des zugehörigen Proteins PER in Fliegenneuronen im 24-Stunden-Rhythmus. Eine Zeit lang reichert es sich an, dann wird es wieder weniger.

Mitten in der Nacht ist seine Konzentration am höchsten, mitten am Tag am niedrigsten.

Was beeinflusst diesen Prozess? Bald wurde klar, dass das Gen *period* seine Aktivität über eine negative Rückkopplungsschleife – einen so genannten Feedback-Mechanismus – reguliert: Nach seiner Produktion im Zytoplasma der Zellen wandert das PER-Protein in den Zellkern und unterbindet dort die Aktivität seines Gens, verhindert also, dass weitere Bauanleitungen für PER entstehen. Heute findet sich diese Art von Genregulation in jedem Biologielehrbuch. Damals aber war solch eine Rückkopplung noch längst nicht allgemein akzeptiert und schon gar nicht belegt.

Zentrale Zeitgeber und ihre diversen Helfer:

Wer bestimmt mit, was PER und TIM zu sagen haben?

Allerdings konnte dieser Mechanismus allein die präzise Rhythmik und die Flexibilität der inneren Uhr mit all ihren oft sehr subtilen Facetten noch nicht erklären. Wie etwa legt eine Zelle den Startpunkt eines Zyklus fest? Wie koordinieren sich die vielen Zellen eines Tiers oder einer Pflanze? Wie reagieren die Zellen auf sich verändernde Tageszeiten im Jahresverlauf – oder nach dem Flug in eine andere Zeitzone? Und wie justieren sie sich dann neu ein? Es musste weitere Mitspieler geben.

Als ersten Komparsen, der ebenfalls rhythmisch arbeitet, identifizierte Youngs Team bei *Drosophila* das Gen *timeless* (»zeitlos«). Sein Protein TIM verbindet sich mit PER zu einem Komplex und verzögert so dessen allzu raschen Abbau durch Enzyme. Zusammen können die beiden Proteine in den Zellkern eindringen, wo jedes sein eigenes Gen inaktiviert. Ohne TIM, so zeigten die Forscher, arbeitet die innere Uhr der Fliegen trotz eines perfekt funktionierenden *period*-Gens nicht, und umgekehrt. Nach ein paar Stunden haben Enzyme den PER-TIM-Komplex schließlich doch zerlegt, die beiden Gene werden nicht mehr ausgebremst, und der Zyklus beginnt von vorn.

Unklar blieb lange, was wohl die Produktion des Zeitgeberduos PER und TIM in Gang setzt, also die Gene wieder

aktiviert und die Herstellung je nach Bedarf justiert. Hierbei ist ein zweites Duo von Genen und ihren Proteinen im Spiel, das Chronobiologen Ende der 1990er Jahre entdeckten – zur Abwechslung bei Labormäusen. Hier kodieren die Gene *clock* und *cycle* die Proteine CLK und CYC. Diese beiden bilden ihrerseits einen Komplex, und der wiederum schaltet die Gene *period* und *timeless* an, indem er an sie andockt. PER und TIM sorgen dann dafür, dass die CLK- und CYC-Produktion wieder zurückgeht.

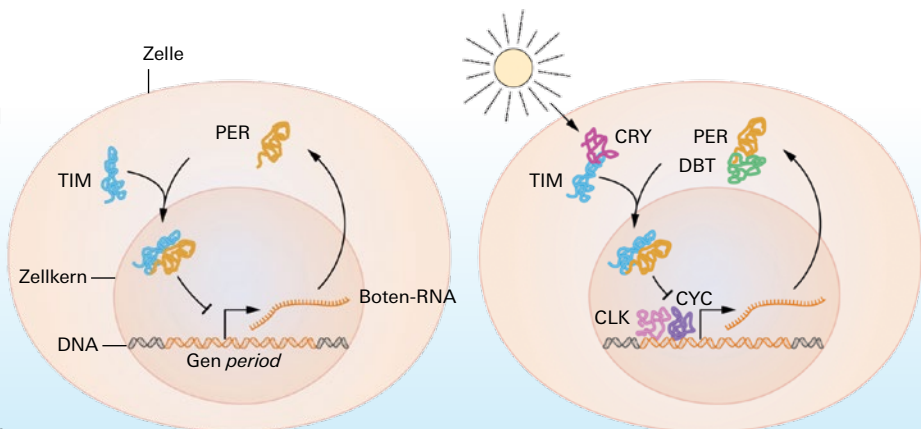
In den letzten Jahren hat die Chronobiologieforschung zu diesem komplexen System von Rückkopplungen eine Reihe weiterer Einflüsse herausgearbeitet, woran die drei Laureaten ebenfalls großen Anteil hatten. So kann sich die Dauer eines Zyklus verlängern oder verkürzen, etwa durch beschleunigten oder gebremsten Transport von Komponenten zum Einsatzort oder Beeinflussung ihres Abbaus. Youngs Team zeigte zum Beispiel, dass PER rascher zerlegt wird, sich also weniger davon ansammelt, wenn ein bestimmtes Enzym namens DBT Phosphorsignale daranhängt. Sein Gen heißt *doubletime* (»doppelte Zeit«). Andere Wissenschaftler entdeckten eine Wirkung von Tageslicht: Dieses aktiviert das Gen *cry*, das einen Bindungspartner von TIM kodiert. TIM wird daraufhin schneller abgebaut – womit nun PER rascher verschwindet.

Fast alle bei der Taufliede aufgespürten Uhrenproteine finden sich ähnlich bei Mäusen und Menschen – und zumindest im Prinzip arbeitet auch die innere Uhr von Pflanzen mit den gleichen Regulatoren. Allerdings muss man bei Vielzellern eher von inneren Uhren in der Mehrzahl sprechen, denn die Zellen der verschiedenen Gewebe messen jeweils ihre eigene Zeit. Zumindest bei Säugetieren ist überdies eine Zentraluhr nachgewiesen, die vom Gehirn aus darüber wacht, dass die Prozesse sinnvoll koordiniert oszillieren. Jener zentrale Regulator im suprachiasmatischen Nucleus des Hypothalamus bekommt dafür Input von Lichtsinneszellen der Netzhaut. Mittels Nerven- und Hormonsignalen reguliert er die vielen Nebenuhren im Körper.

Hall, Rosbash und Young haben wesentliche Steine im Fundament des boomenden Forschungsfelds Chronobiolo-

Regulationszyklus der Tagesrhythmik von Zellen

Zuerst beschrieben die Laureaten das rhythmisch aktive Gen des Proteins PER, danach das von dessen Mitspieler TIM (links). Beide Proteine reichern sich nachts in Zellen an, dringen später gemeinsam in den Zellkern vor und stoppen dort ihre Gene. Aktiviert werden Letztere von einem weiteren Proteinduo aus CLK und CYC. An dem Rückkopplungskreis sind noch mehr Proteine beteiligt (rechts).



MATTIAS KARLÉN / THE NOBEL ASSEMBLY AT KAROLINSKA INSTITUTET 2017 / NOBELPRIZE.ORG

gie gelegt. Zu entdecken und beantworten gibt es auf dem Gebiet noch genug – neben weiteren grundlegenden physiologischen Details vor allem die medizinischen Implikationen. Denn wenn die innere Uhr nicht richtig funktioniert, hat das gesundheitliche Auswirkungen, meist verursacht durch Schlafstörungen, eine typische Begleiterscheinung aus dem Takt geratene Rhythmen. Ob letztlich verstellte Taktgeber Schlafprobleme und Krankheiten bewirken oder umgekehrt aus dem Ruder gelaufene Signalkreisläufe die Rhythmen beeinträchtigen, kann im Einzelfall verschieden sein. In diesem Zusammenhang interessieren Mediziner sich unter anderem für die Regulation von Körperfunktionen durch Insulin oder Stresshormone. Ebenso werden eine Reihe von Gedächtnisstörungen sowie neurologische und psychische Erkrankungen, von Depressionen bis hin zu bipolaren Stö-

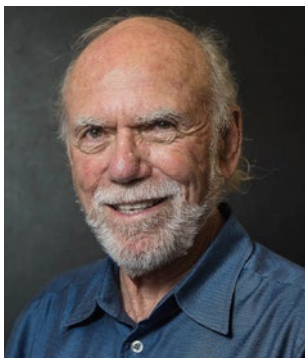
rungen, mit falsch regulierten inneren Uhren in Verbindung gebracht. Viel scheint schiefgehen zu können, wenn Zellen nicht im Einklang mit dem Tag-Nacht-Rhythmus stehen, der sie im Lauf der Evolution stets begleitet hat. ◀

Jan Osterkamp ist Redakteur bei »Spektrum.de« in Heidelberg.

LITERATURTIPPS

Kantermann, T.: Aus dem Takt. In: *Gehirn&Geist* 4/2011, S. 50–54
Ein Chronobiologe und Schlaf Forscher erörtert gesundheitliche Folgen von Nacht- und Schichtarbeit.

Young, W.M.: Wie die innere Uhr tickt.
In: *Spektrum der Wissenschaft* 6/2000, S. 74–80
Der Nobelpreisträger von 2017 erzählt die Entdeckungsgeschichte der molekularen Mechanismen unseres zentralen inneren Zeitgebers.



CALTECH



CALTECH ALUMNI ASSOCIATION



BRYCE VICKMARK, MIT FRDL. GEN. DES MIT

Barry C. Barish (links), geboren 1936, und **Kip S. Thorne** (Mitte), Jahrgang 1940, sind Professoren am California Institute of Technology. **Rainer Weiss** wurde 1932 in Berlin geboren und ist Professor am Massachusetts Institute of Technology. Die drei haben das Gravitationswellen-Observatorium LIGO Realität werden lassen.

NOBELPREIS FÜR PHYSIK AUF EINSTEINS FÄHRTE

Der diesjährige Physik-Nobelpreis ehrt die geistigen Väter der Gravitationswellenastronomie. Dank ihnen konnten Wissenschaftler 2015 erstmals die Kollision zweier Schwarzer Löcher nachweisen.

▶ Rainer Weiss hat sich schon früh für Technik begeistert, mit der Menschen große Entfernungen überbrücken.

Als Sechsjähriger, nachdem seine Familie vor den Nationalsozialisten nach Prag geflohen war, lauschte Weiss einer Radioansprache des britischen Premierministers – und war zutiefst fasziniert von der Technologie, die Stimmen auf wundersame Weise über tausende Kilometer transportieren kann. Nach der Flucht aus Europa lötete der inzwischen zwölfjährige Weiss selbst Radioverstärker zusammen und verkaufte sie an andere Immigranten in New York.

Letztlich fand der gebürtige Berliner am Massachusetts Institute of Technology (MIT) zu seiner Lebensaufgabe, der Suche nach Gravitationswellen. Diese Erschütterungen der Raumzeit, die bei der Beschleunigung von Massen entstehen, hatte Albert Einstein bereits 1916 vorhergesagt. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus – und machen Menschen seit gut zwei Jahren auf gewaltige Ereignisse auf-

merksam, die sich in weit entfernten Galaxien abspielen. Am 14. September 2015 hatten Wissenschaftler und Ingenieure des Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) die Schwerkraftwellen erstmals nachgewiesen. Sie stammten von zwei Schwarzen Löchern, die 1,4 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt verschmolzen waren. Die Kollision fand vermutlich in völliger Dunkelheit statt, gewöhnliche Teleskope hätten sie nie und nimmer aufspüren können.

Aber dank Weiss' Technikleidenschaft ist die Menschheit Zeuge des spektakulären Ereignisses geworden. Für seine Pionierarbeit beim Aufbau von LIGO erhält der 85-jährige US-Staatsbürger die eine Hälfte des diesjährigen Physik-Nobelpreises. Die andere Hälfte teilen sich seine Kollegen Kip Thorne und Barry Barish. Thorne legte in den 1970er Jahren gemeinsam mit Weiss das wissenschaftliche Fundament für die beiden vier Kilometer großen Laserinterferometer in Livingston, Louisiana, und in Hanford, Washington.

Barish leitete das Projekt von 1994 bis 2005, als es darum ging, die riesigen Detektoren zu bauen.

Gravitationswellen eröffnen der Astrophysik ein völlig neues Fenster zum Firmament. Konventionelle Teleskope fangen lediglich elektromagnetische Strahlung auf. Diese oszillierenden elektromagnetischen Felder breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, je nach Frequenz nennen wir sie Radiowellen, sichtbares Licht oder Röntgenstrahlen. Gravitationswellen sind zwar auch Schwingungen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, aber letztlich etwas völlig anderes. Hier schwingt der Weltraum an sich.

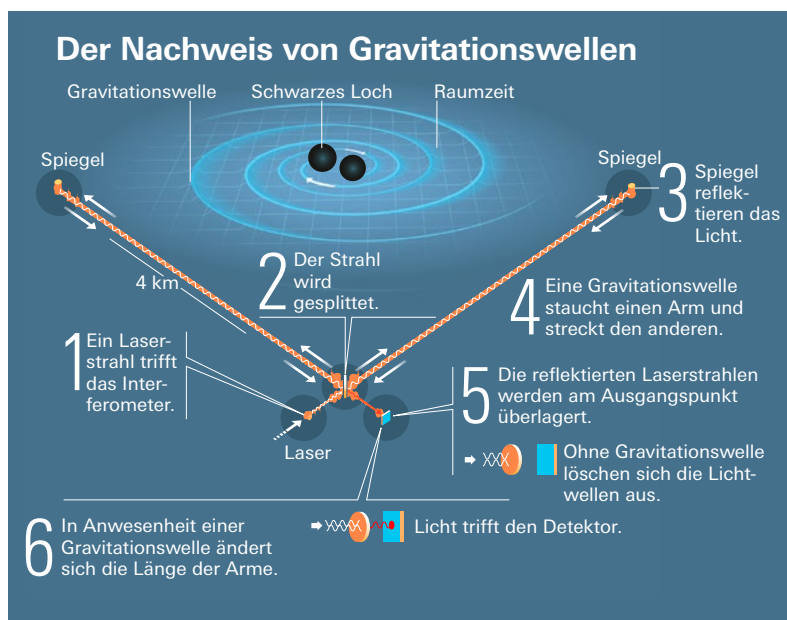
Laut Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie strahlt jede beschleunigte Masse Gravitationswellen ab. In den allermeisten Fällen sind diese Signale aber viel zu schwach für einen Nachweis. So gibt die Erde auf ihrer Kreisbahn um die Sonne eine Leistung von 200 Watt an die Raumzeit ab. Das würde gerade so für den Betrieb eines Staubsaugers reichen und erzeugt ein derart mickriges Plätschern im kosmischen Ozean, dass es sich wohl jedem Detektionsversuch entzieht.

Aber seit den 1960er Jahren gehen Physiker davon aus, dass es Himmelsobjekte gibt, die sehr viel stärkere Schwerkraftwellen ausstoßen. Schwarze Löcher und Neutronensterne vereinen ein Vielfaches der Masse unserer Sonne auf extrem kompaktem Raum. Werden sie schnell genug beschleunigt, etwa bei einer Kollision zweier solcher Objekte, müsste man das Gravitationswellenecho auch in großer Entfernung noch aufspürbaren können, prognostizierten Physiker. Wie der Knall eines Hammerschlags auf einer unendlich ausgedehnten Stahlplatte würden sich diese Vibrationen im Weltall ausbreiten.

Als Rainer Weiss mit der Mathematik der Realitätstheorie kämpfte, überlegte er sich das Konzept für LIGO

Alles, auf das eine Gravitationswelle trifft, wird binnen einiger Millisekunden mehrmals senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle gedehnt und gestaucht. Ohne spezielle Messgeräte bekommen wir davon nichts mit, da die Raumzeit enorm steif ist, vielfach steifer als Stahl. Selbst ausgesprochen starke Gravitationswellen verformen das Weltall nur minimal. Einer der vier Kilometer langen Arme der LIGO-Observatorien wird von einer passierenden Gravitationswelle beispielsweise lediglich um den Bruchteil eines Atomkerndurchmessers gestaucht – dies entspricht einer Längenänderung um den 10^{-21} Teil.

Nachweisen lässt sich diese Veränderung mit einer Abwandlung des berühmten Michelson-Interferometers. Das L-förmige Gerät besteht aus zwei rechtwinklig angeordneten Vakuumröhren. Ein Laserstrahl wird am Schnittpunkt der Arme geteilt; die beiden Teilstrahlen treffen auf frei hängende Spiegel am Ende der Röhren und werden nach ihrer Reflexion am Ausgangspunkt zusammengeführt. War das Licht in beiden Armen exakt gleich lang unterwegs – was der Fall ist, wenn die Röhren die gleiche Länge haben –, fällt Wellental auf Wellenberg, die Wellen löschen sich also gegenseitig aus. Bleibt hingegen Licht übrig, kann das ein Hinweis darauf sein, dass die Arme nicht genau gleich lang sind – etwa, weil sie von einer Gravitationswelle getroffen wurden.



Schon 1972 zeigte eine von Weiss erarbeitete Konzeptstudie, dass man Raumzeitbeben allenfalls mit einem mehrere Kilometer großen Laserinterferometer nachweisen kann. Erst ab dieser Detektorgroße wird ein Gravitationswellensignal so deutlich, dass es nicht mehr von Störeinflüssen auf der Erde überdeckt wird. Darunter fallen auch winzige Erschütterungen, beispielsweise durch Erdbeben am anderen Ende des Globus oder Sturmwellen, die auf eine weit entfernte Küste krachen.

Rainer Weiss hatte in der Studie die Auswirkungen solcher Erschütterungen als Erster im Detail berechnet – und arbeitete dann viele Jahrzehnte intensiv daran, ihren Einfluss auf die Messungen so gering wie möglich zu halten. Lange war das eine Tätigkeit, die Kollegen mitunter belächelten. Sie passt aber durchaus zu Weiss' ungewöhnlicher Lebensgeschichte: 1932 als Spross einer wohlhabenden deutsch-jüdischen Familie geboren, entscheidet er sich als junger Mann zunächst für ein Studium der Elektrotechnik am MIT – in der Hoffnung, die Klangqualität von Schallplattenspielern zu verbessern. Schnell ist Weiss von den Inhalten enttäuscht, da es vor allem um Kraftwerkstechnik ging. Schließlich beginnt er, stattdessen Physik zu studieren.

Fast endet seine wissenschaftliche Karriere, noch bevor sie richtig begonnen hat. Der Student verliebt sich in eine Pianistin, zieht ihr nach Chicago hinterher und wird während dieser Zeit von seiner Universität exmatrikuliert. Erst als die Affäre in die Brüche geht, kehrt Weiss nach Boston zurück. Für zwei Jahre arbeitet er als Techniker im berühmten Bostoner »Plywood Palace«, einem ehemaligen Weltkriegs-Labor, in dem Generationen von Physikern ihre kreativen Ideen verwirklichten. Der Atomphysiker Jerrold Zacharias fördert den jungen Tüftler, der 1955 seinen Bachelorabschluss nachholt, den Sprung in ein Promotionsprogramm schafft und schließlich Physikprofessor am MIT wird.

Als Weiss Ende der 1960er Jahre eine Vorlesung über allgemeine Relativitätstheorie halten muss, kämpft er mit der zu Grunde liegenden Mathematik. Er versucht, seine Studenten mit Hilfe von Gedankenexperimenten für den abstrakten Stoff zu gewinnen. Aus einer dieser anschaulichen Abschätzungen erwächst die Idee, Gravitationswellen mittels eines Michelson-Interferometers nachzuweisen. In den Jahren darauf plant Weiss im Plywood Palace einen 1,5-Meter-Prototyp – und stellt fest, dass auch andere Wissenschaftler am selben Thema arbeiten. Beispielsweise hatten zwei russische Physiker bereits 1963 vorgeschlagen, ein Interferometer für die Gravitationswellensuche zu verwenden, die Idee aber nur grob skizziert.

Beinahe scheitert der Plan am Geld. Die amerikanische National Science Foundation lehnt einen Forschungsantrag von Weiss ab. 1974, ein Jahr danach, erhält der Physiker jedoch einen Anruf aus Deutschland: Der Münchner Heinz Billing plant mit seiner von der Max-Planck-Gesellschaft finanzierten Forschergruppe in Garching selbst ein Laserinterferometer zur Gravitationswellensuche. Das überzeugte letztlich auch die amerikanischen Geldgeber: Sie fördern Weiss' Prototyp, wodurch Wissenschaftler diesseits und jenseits des Atlantiks an der zukunftssträchtigen Technik zu arbeiten beginnen.

1975 trifft Weiss auf Kip Thorne und überzeugt diesen, dass sich Laserinterferometer zur Gravitationswellensuche eignen. Thorne ist zu dieser Zeit bereits Professor am California Institute of Technology (Caltech) und ein angesehener Gravitationsphysiker, der wichtige Beiträge zur Theorie Schwarzer Löcher geleistet hat. Gemeinsam bauen die beiden in den Vereinigten Staaten die Disziplin der Gravitationswellensuche auf. Thorne holt dafür den genialen, aber im Umgang schwierigen Schotten Ronald Drever nach Kalifornien, wo die beiden von 1980 an ein 40 Meter großes Laserinterferometer umsetzen. In Garching entsteht zur gleichen Zeit ein ähnliches Gerät mit 30 Meter Armlänge.

1984 bringen Weiss, Thorne und Drever schließlich ein noch größeres Projekt auf den Weg, aus dem schließlich LIGO erwächst. Drever wird in den 1990er Jahren wegen Streitereien mit dem damaligen Leiter aus dem Team ausgeschlossen. Er galt lange Zeit als dritter Nobelpreisanwärter neben Weiss und Thorne, starb jedoch im März 2017. Aus Sicht manches Gravitationswellenforschers wäre auch Heinz Billing in Frage gekommen, dessen Laserinterferometer bis in die 1980er Jahre am sensitivsten waren. Billing starb jedoch im Januar 2017 im Alter von 102 Jahren.

Stattdessen erhält nun Barry C. Barish die Medaille aus Stockholm. Der Physiker gilt als herausragender Forschungsmanager und leitete LIGO in einer schwierigen Phase, als es galt, die Finanzierung für den weiteren Ausbau zu sichern. Barish habe LIGO von einem 40-Personen-Projekt der Universitäten MIT und Caltech in ein groß angelegtes, internationales Forschungsvorhaben verwandelt, so das Nobelkomitee.

Letztlich waren mehr als 1000 Forscher an der Entdeckung der Gravitationswellen beteiligt. In Deutschland leistete ein Team des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik, das seit den 1990er Jahren unter Billings Nachfolger

Karsten Danzmann den 600 Meter langen Detektor GEO600 betreibt (siehe das Interview mit ihm in **Spektrum** 10/2017, S. 20), wichtige Vorarbeiten. Im Lauf der Jahre verbesserten die Wissenschaftler die Laser, die Spiegel sowie das Vakuum in den Röhren immer weiter. Im Jahr 2002 gingen schließlich die beiden LIGO-Interferometer in Betrieb und wurde zwischen 2010 und 2015 aufwändig modernisiert.

Beim Werben für LIGO half sicherlich, dass viele Physiker schon lange von der Existenz von Gravitationswellen überzeugt waren. Die Astronomen Russell Hulse und Joseph Taylor hatten bereits 1974 ein Sternsystem aus zwei Neutronensternen aufgespürt, die sich dicht umkreisen und dabei mit der Zeit Energie zu verlieren scheinen. Diese, so die Vermutung der Forscher, geht laufend in Gravitationswellen über – ein indirekter Nachweis des Phänomens, für den Hulse und Taylor bereits 1993 den Nobelpreis erhielten.

Seit dem ersten direkten Gravitationswellennachweis im September 2015 haben die Forscher die Signale dreier weiterer Schwarzer-Loch-Paare aufgefangen, zuletzt war daran etwa der italienisch-französische Virgo-Detektor beteiligt. Am 17. August 2017 gingen den Wissenschaftlern sogar erstmals die Gravitationswellen zweier verschmelzender Neutronensterne ins Netz (siehe S. 8).

Rainer Weiss und Kip Thorne sind an diesen Entwicklungen nach wie vor beteiligt, wenn auch auf unterschiedliche Art und Weise. Thorne betätigte sich in den vergangenen Jahren in Hollywood, etwa als Koautor des Science-fiction-Films »Interstellar«, der die Physik Schwarzer Löcher einem Millionenpublikum eröffnet hat. Weiss hingegen arbeitete bis zuletzt intensiv an den LIGO-Detektoren und war unter anderem für die Vakuumröhren verantwortlich. Regelmäßig ist er die vier Kilometer langen Tunnel abgelaufen und hat Mäuse und Spinnen entfernt. Barish wandte sich nach dem Ende seiner Projektleiterzeit der Teilchenphysik zu und arbeitete am Konzept des International Linear Collider, der Nachfolger des Genfer Beschleunigers LHC werden soll.

Alle drei Preisträger dürften mit großer Genugtuung verfolgen, wie Astrophysiker ihr neu gewonnenes kosmisches Sinnesorgan nutzen. Letztlich wollen Wissenschaftler damit dem ultimativen Weltraumsound nachjagen: Auch der Urknall könnte Gravitationswellen freigesetzt haben, die in Form eines extrem schwachen Hintergrundrauschens noch durchs heutige Weltall geistern müssten – und die technisch versierte Physiker mit künftigen Gravitationswellendetektoren vielleicht eines Tages aufspüren können. ◀

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei **Spektrum** in Heidelberg.

QUELLEN

Abbott, B. P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. In: *Physical Review Letters* 116, 061102, 2016

Levin, J.: *Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space.* Penguin Random House UK, 2016

Weiss, R. (Massachusetts Institute of Technology): In: *Quarterly Progress Report No. 105, 1972, Kapitel 5*



UNIVERSITY OF CHICAGO

Richard Thaler, geboren am 12. September 1945 in East Orange (New Jersey), ist Professor an der University of Chicago Booth School of Business.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER VERNUNFT

Der Alfred-Nobel-Gedächtnispreis für Wirtschaftswissenschaften geht dieses Jahr an den Ökonomen Richard Thaler, der das Gebiet der Verhaltensökonomie mitbegründete und prägte.

Der Mensch, den die klassische Wirtschaftstheorie sich vorstellt, beurteilt alle Dinge nur nach ihrem Wert, den sie für ihn selbst haben (ihrem »Nutzen«). Unter mehreren möglichen Handlungsweisen entscheidet er sich stets für die, welche ihm den größten Nutzen einbringen wird. Er hat keine Probleme, diesen zukünftigen Nutzen aus den vorliegenden Informationen korrekt einzuschätzen, und lässt sich bei seinen Entscheidungen von nichts anderem leiten. Oder etwa doch? Tatsächlich kommt dieser »Homo oeconomicus« in der Realität praktisch nicht vor, nicht einmal als Durchschnitt größerer Gruppen, weswegen die klassische Theorie nur allzu oft in die Irre führt.

Die detaillierte Erforschung der Unterschiede zwischen Modell und Realität hat schon mehreren Wissenschaftlern Wirtschaftsnobelpreise eingebracht, darunter Reinhard Selten 1994, Daniel Kahneman 2002, Elinor Ostrom 2009, Robert J. Shiller 2013 und Angus Deaton 2015. Aber Richard Thaler war derjenige, der die wesentlichen drei Abweichungen von der theoretischen Vorstellung schon 1980 auf den Punkt brachte: Wir sind beschränkt in unseren intellektuellen Fähigkeiten, in unserer Willenskraft und – in unserem Egoismus.

Ein Mensch schätzt in der Regel den Wert eines Gegenstands höher ein, wenn er ihn bereits besitzt, als wenn er ihn kaufen müsste. Diesen »Endowment-Effekt« (Besitztumseffekt) beschrieb Thaler erstmals 1980. In einem Experiment, das er 1990 mit Kahneman und dem Wirtschaftswissenschaftler Jack Knetsch durchführte, bekam jeder zweite Proband nach dem Zufallsprinzip eine Tasse mit der Option,

sie an andere Teilnehmer weiterzuverkaufen. Im Experiment fanden überraschend wenige Verkäufe statt, weil die Probanden im Durchschnitt mehr Geld verlangten, als sie selbst bereit waren, für eine neue Tasse auszugeben. Eine Meta-studie aus dem Jahr 2014 zeigte, dass wir den Wert eines Besitzums durchschnittlich dreimal so hoch einschätzen wie den Preis, den wir dafür zu bezahlen bereit wären.

Thaler sieht den Grund für diesen Effekt darin, dass wir Nutzen je nach Vorzeichen unterschiedlich bewerten. Wir leiden stärker unter einem Verlust, als wir uns über einen gleichwertigen Gewinn freuen. Mit diesem menschlichen Wesenszug konnte Thaler auch erklären, warum viele Investoren Aktien nach einem starken Kursverlust länger in ihrem Portfolio halten, als ökonomisch rational wäre. Durch deren Verkauf würde man nämlich einen – längst eingetretenen – Verlust realisieren. Aus Furcht vor diesem Eingeständnis zieht es der Investor vor, die schlechte Aktie zu behalten und stattdessen steigende Wertpapiere zu verkaufen, obwohl die umgekehrte Strategie mehr eingebracht hätte.

Der Mangel an intellektuellen Fähigkeiten zeigt sich insbesondere beim Geldausgeben. Thaler stellte 1985 fest, dass die meisten Menschen für ihre Entscheidungen nicht das gesamte verfügbare Geld berücksichtigen, sondern Teilbudgets bilden, etwa für Haushalt, Kleidung oder die Urlaubskasse. Damit schränken sie sich selbst in ihren Optimierungsmöglichkeiten ein – vielleicht hätte es sich ja doch gelohnt, für ein Essen in diesem tollen Restaurant auf ein Urlaubsextra zu verzichten –, ersparen sich aber die gedankliche Anstrengung, unter diesen unübersichtlich vielen Möglichkeiten die richtige Auswahl zu treffen. Nachdem die Benzinpreise 2008 in den USA auf die Hälfte gefallen waren, gaben Autofahrer das eingesparte Geld nicht etwa für etwas anderes aus, sondern tankten lieber die teurere Benzinsorte. Diese mentale Haushaltsführung wirkt sich auch bei Geschenken aus. Wir gehen mit Geld, das uns durch glückliche Umstände in die Hände geraten ist, üblicherweise risikofreudiger um als mit selbst verdientem. Wer im Spielcasino schon etwas gewonnen hat, wird das zusätzliche Geld hemmungsloser einsetzen als das mitgebrachte.

Thaler und Kahneman (siehe auch **Spektrum** März 1982, S. 89) fanden auch heraus, dass wir Gewinne und Verluste nicht nach ihrem absoluten Wert beurteilen, sondern relativ zu gewissen Referenzgrößen. Nehmen wir an, Sie wollen sich in einem Geschäft eine Jacke für 100 Euro kaufen. Würden Sie einen 20-minütigen Fußmarsch auf sich nehmen, um in das nächste Geschäft zu gehen, wo die gleiche Jacke nur noch 90 Euro kostet? Die meisten Personen würden diese Frage mit Ja beantworten. Doch bei einer 1000 Euro teuren Jacke würde sich kaum jemand für diesen Spaziergang entscheiden, um 10 Euro zu sparen.

Ein besonders eindrückliches Beispiel für beschränktes und daher suboptimales wirtschaftliches Handeln fanden Thaler und weitere Kollegen 1997 bei Taxifahrern in New York. Diese pflegten an jedem Tag so lange zu arbeiten, bis sie ein gewisses Ziel an Einnahmen erreicht hatten – so gesetzt, dass ein angemessener Monatslohn dabei herauskam. Also mussten sie an ruhigen Tagen sehr lange arbeiten

und machten bei hoher Nachfrage früher Feierabend. Mit einer festen Stundenzahl pro Tag oder gar erhöhtem Einsatz an verkehrsreichen Tagen hätten sie dagegen nicht nur einen besseren Stundenlohn erzielt, sondern auch ihre Kunden besser bedient.

Thaler will nur den bevormunden, der nicht bereit ist, sich selbst Gedanken zu machen

Ein weiterer Aspekt, der das wirtschaftliche Verhalten von Menschen beeinflusst, ist die mangelnde Selbstbeherrschung. Nur allzu häufig kämpfen zwei Seelen in der Brust einer Person (**Spektrum** Dezember 2014, S. 40). Thaler und der Wirtschaftswissenschaftler Hersh Shefrin fassten 1981 diesen Konflikt erstmals in ein mathematisches Modell. Dem kurz-sichtigen Macher, der lediglich auf den aktuellen Nutzen fixiert ist, steht der vorausschauende Planer gegenüber, der langfristig in die Zukunft blickt. Die Menschen unterscheiden sich darin, wie stark diese beiden Persönlichkeiten in ihnen ausgeprägt sind. Thaler und Shefrin bemerkten 1988, dass ihre theoretische Beschreibung zu neurobiologischen Erkenntnissen über das Gehirn passt. Demnach säße der Planer im präfrontalen Kortex und der Macher im limbischen System.

Wenn der Macher ein Gut sofort und nicht erst in einem Jahr genießen will, ist das vom Standpunkt des Planers aus nicht unbedingt unvernünftig. Vielleicht bin ich nächstes Jahr ja schon tot oder aus anderen Gründen zum Genießen nicht mehr fähig. Ein rationaler Mensch pflegt daher einen zukünftigen Nutzen zu diskontieren, das heißt mit einer Art Zinsabschlag zu versehen: Für jedes Jahr, das ich warte, verliert der Genuss beispielsweise fünf Prozent an Wert.

1981 entdeckte Thaler, dass dieses Modell für den Vergleich verschiedener zukünftiger Zeitpunkte funktioniert, nicht aber für den Vergleich mit der Gegenwart. Selbst unter Vernachlässigung von Inflation und Zinsen erscheinen uns 1000 Euro, die in einem Jahr ausgezahlt werden, deutlich weniger wertvoll als der heute überreichte gleiche Geldbetrag. Dagegen ist es uns relativ egal, ob wir die 1000 Euro in einem Jahr oder erst in zwei Jahren ausgezahlt bekommen, obwohl die Zeitspanne dazwischen dieselbe ist wie zuvor. Der Macher dominiert uns in der Gegenwart also so stark, dass die Diskontierungskurve für die unmittelbare Zukunft nicht nur exponentiell, sondern viel stärker (»hyperbolisch«) abfällt.

Derselbe Mechanismus mit umgekehrtem Vorzeichen erklärt, warum viele Menschen das Abstellen von schlechten Gewohnheiten auf einen fernen Zeitpunkt schieben. Alles, wofür wir körperlichen oder geistigen Aufwand treiben müssen, erscheint uns heute viel bitterer als in der Zukunft, und zwar weit über das hinaus, was rational wäre.

Wenn die Menschen sich regelmäßig irrational verhalten, dann wäre es ja vielleicht geboten, dieser Irrationalität abzuweichen, indem man die Leute ein bisschen in die richtige Richtung schubst (»Nudging«). Mit dieser Forderung begibt sich Thaler, gemeinsam mit dem Rechtswissenschaftler Cass Sunstein, auf ein heikles Gebiet: Darf eine mit höherer Einsicht gesegnete Institution – typischerweise der Staat – den Menschen etwas vorschreiben, was gut für diese ist? Oder es ihnen zumindest derart nahelegen, dass die Leute,

die nicht darüber nachdenken, das Richtige tun? Ein solcher Paternalismus gerät zwangsläufig in Konflikt mit der Entscheidungsfreiheit des Einzelnen. Deswegen tritt Thaler für einen »libertären Paternalismus« ein. Selbstverständlich nimmt die Kantine die fetten Süßigkeiten nicht aus dem Angebot, aber sie drapiert das gesunde Obst als Blickfang für den Kunden. Oder die Regierung erklärt, wie in Finnland oder Japan, jeden Menschen zum Organspender, der nicht ausdrücklich widerspricht. Und selbst in den USA ist der Beitrag zur Rentenversicherung zwar nicht Pflicht, wie hier zu Lande, aber immerhin der Regelfall. Jeder Arbeitnehmer zahlt automatisch in die Rentenversicherung ein, kann jedoch jederzeit austreten. Das Prinzip des libertären Paternalismus ist auch in die Politik der Obama-Regierung eingegangen: Sie gründete ein Expertengremium für Verhaltenswissenschaften, das Social and Behavioural Sciences Team, das politische Konzepte basierend auf neuen Erkenntnissen des Fachs entwickelt.

Mitte der 1980er Jahre machte Thaler gemeinsam mit Kahneman und Knetsch ein weiteres Verhaltensmerkmal des Menschen zum Thema, das nicht in die Theorie vom rationalen Nutzenmaximierer passt: das Gerechtigkeitsempfinden (**Spektrum** März 2002, S. 52). So verzichteten Menschen auf einen angebotenen Geldbetrag, um fair gegenüber anderen zu sein – selbst dann, wenn niemand die gute Tat beobachten kann. Einige Probanden waren sogar bereit, Geld auszugeben, um andere zu bestrafen, die sich ihnen oder anderen gegenüber zuvor unfair gezeigt hatten. Dieses Phänomen erklärt, warum Firmen normalerweise auch während einer Rezession keine Gehälter kürzen. Das würden die Mitarbeiter nämlich als ungerecht empfinden, während dieser Einwand in der Regel nicht erhoben wird, wenn die Firma einen Mitarbeiter entlässt und an seiner Stelle einen neuen zu geringerem Gehalt einstellt. Den gleichen Effekt erlebte auch das Unternehmen Coca-Cola, das an seinen Automaten einen variablen Verkaufspreis testete. Die Kunden hatten zwar an heißen Tagen einen erhöhten Bedarf an dem kalten Getränk, waren aber nicht bereit, dafür höhere Preise zu bezahlen. Die Umsätze an diesen Automaten brachen ein, und der verantwortliche Geschäftsführer wurde entlassen.

Im Lauf seines Lebens hat Thaler also viel über das unvernünftige Verhalten der Menschen geforscht. So viel, dass er – wie er scherzend verkündete – das Preisgeld auf möglichst irrationale Art ausgeben möchte. ◀

Manon Bischoff ist Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

QUELLEN

Kahneman, D. et al.: Experimental Tests of the Endowment Effect and the Coase Theorem. In: *Journal of Political Economy* 98, S. 1325–1348, 1990

Kahneman, D. et al.: Fairness and the Assumptions of Economics. In: *The Journal of Business* 59, S. 285–300, 1986

Thaler, R.: Mental Accounting and Consumer Choice. In: *Marketing Science* 4, S. 199–214, 1985

Thaler, R., Shefrin, H. M.: An Economic Theory of Self-Control. In: *The Journal of Political Economy* 89, S. 392–406, 1981



SPRINGERS EINWÜRFE WIE WERDEN UNSERE ENKEL ARBEITEN?

Bald werden intelligente Maschinen die Wirtschaft erobern. Forscher rätseln, was dann aus der menschlichen Kopfarbeit wird.

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

» spektrum.de/artikel/1513371

Die Sorge, Maschinen würden den Menschen die Arbeit wegnehmen, ist ein alter Hut. Schon Ende des 18. Jahrhunderts revoltierten englische Strumpfwirker gegen die neuen Webstühle, die von Ungelernten – oft Kindern – bedient werden konnten. Im Lauf der industriellen Revolution und erst recht mit dem Einzug von Industrierobotern in die Werkhallen wurden immer wieder Stimmen laut, die ein »Verschwinden der Arbeit« vorhersagten: Vor den Werktoeren automatischer Fabriken würden Massen von Arbeitslosen demonstrieren.

Doch in den Industrieländern wurden weite Bereiche manueller Tätigkeit erst mechanisiert, dann automatisiert, ohne dass dauerhaftes Elend entstand. Die freigesetzten Beschäftigten, sofern sie nicht die neuen Maschinen warteten und kontrollierten, wanderten in den Dienstleistungssektor ab, wo sie heute Computer bedienen und Bildschirmarbeit leisten.

Allerdings meint der Wirtschaftshistoriker Robert C. Allen von der New York University Abu Dhabi in den Vereinigten Arabischen Emiraten, das sei ein unzulässig geschöntes, da nur auf Europa und die USA beschränktes Bild. In Asien und Afrika habe die industrielle Revolution des 19. Jahrhunderts bei Webern und Handwerkern massenhafte Verelendung bewirkt, während im 20. Jahrhundert die massive Industrialisierung Asiens umgekehrt die Löhne in den Industrielän-

Kopfarbeiter bald ohne Job?

dern drückte. Unter diesem globalen Gesichtspunkt ist Allen skeptisch, ob die aktuelle Digitalisierung der Arbeit so glimpflich abgehen wird wie von ihren Propheten prognostiziert (*Nature 550*, S. 321–324, 2017).

Jedenfalls bekommen nun auch die qualifizierten Jobs unserer Dienstleistungsgesellschaft Konkurrenz von schlaun Automaten. Künstliche Intelligenz und lernfähige Maschinen werden Aufgaben übernehmen,

für die traditionell Ärzte und Pfleger, Fahrer und Piloten, Bankangestellte und Anlageberater zuständig sind. Hunderte Millionen Kopfarbeiter könnten dadurch arbeitslos werden, schätzt der Historiker Yuval Noah Harari von der Hebräischen Universität von Jerusalem (*Nature 550*, S. 324–327, 2017).

Natürlich entstehen dabei auch neue Jobs und prosperierende Industriezweige. Hightech-Unternehmen wie Google und Apple häufen schon heute gigantische Reichtümer an, und künftige Produzenten von intelligenten Maschinen werden spezialisierte Entwickler hoch bezahlen. Zugleich drohen die Heere billiger Arbeitskräfte in den Entwicklungsländern jedoch hoffnungslos ins Hintertreffen zu geraten. Die dadurch wachsende Ungleichheit erfordert neue politische Modelle; Harari erwähnt das bedingungslose Grundeinkommen, das derzeit in mehreren Ländern lokal erprobt wird.

Noch ist gar nicht ausgemacht, ob der Wandel zur »Industrie 4.0« den Wohlstand mehreren wird. Die Voraussetzung dafür wäre steigende Produktivität – das heißt, die Wirtschaftsleistung, die ein Erwerbstätiger pro Stunde schafft, muss im Schnitt zunehmen. Doch tatsächlich stagniert diese Kennziffer derzeit; in den USA sank sie in den letzten Jahren sogar absolut, und in Europa wächst sie kaum.

Für dieses so genannte Produktivitätsrätsel – wirtschaftliche Stagnation trotz wachsender Digitalisierung – gibt es noch keine eindeutige Erklärung. Manche meinen, es handle sich um ein Messproblem: Gratisdienste wie Google oder Wikipedia tauchen in der wirtschaftlichen Gesamtrechnung nicht auf. Andere finden, man müsse nur Geduld haben, bis die neue Technik richtig greift.

Der Ökonom Robert J. Gordon von der Northwestern University in Evanston (Illinois) vermutet hingegen strukturelle Gründe: Alterung der Gesellschaft, soziale Ungleichheit und mangelhafte Bildung. Das heißt, Digitalisierung bringt's nicht automatisch.

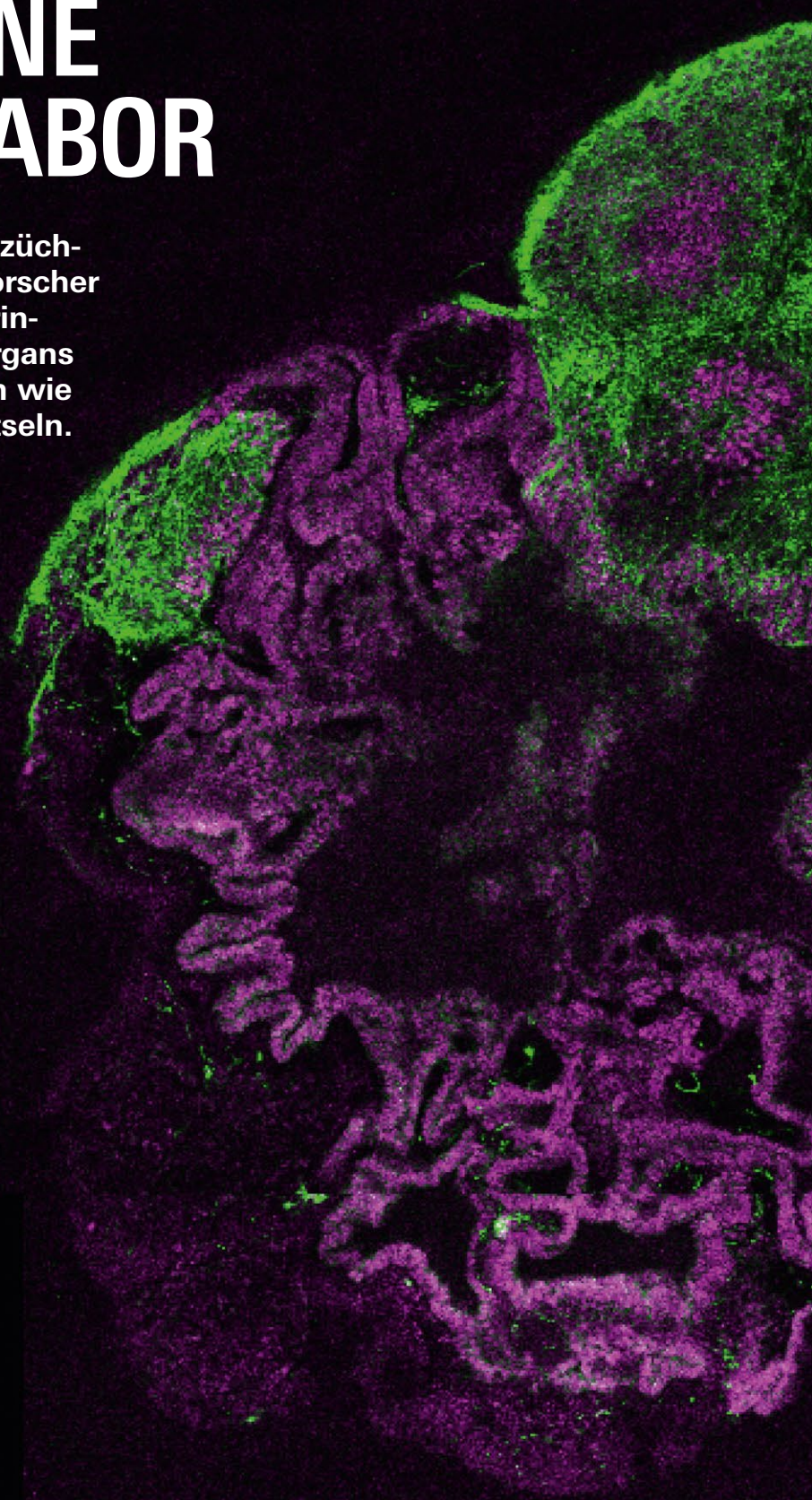
HIRNFORSCHUNG MINIGEHIRNE AUS DEM LABOR

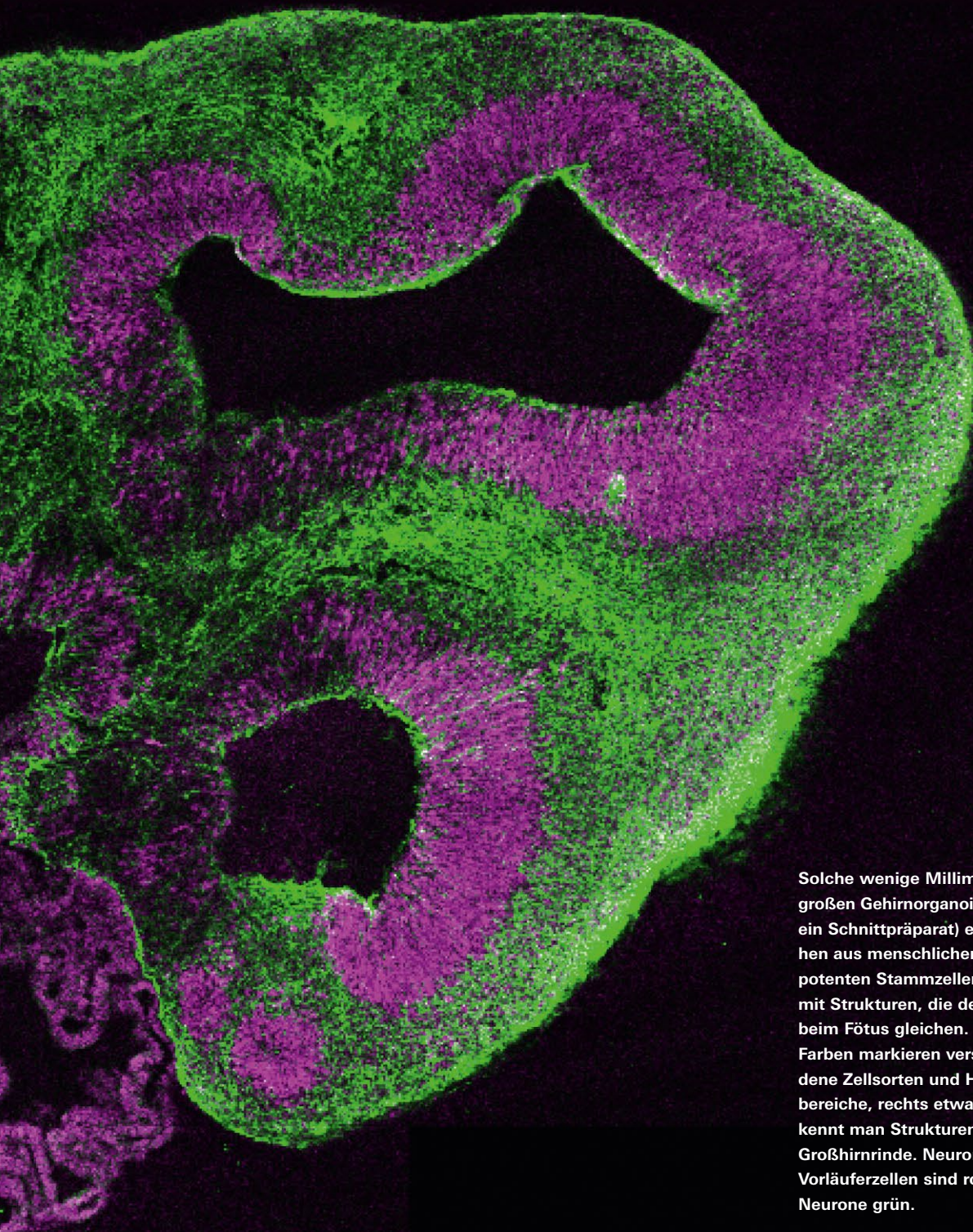
Mit aus menschlichen Zellen gezüchteten »Organoiden« möchten Forscher Konstruktions- und Funktionsprinzipien unseres komplexesten Organs beleuchten sowie Erkrankungen wie Autismus oder Alzheimer enträtseln.

»What I cannot create,
I do not understand«

(Was ich nicht selbst erzeugen
kann, verstehe ich nicht)

Richard Feynman 1988





Solche wenige Millimeter großen Gehirnorganoide (hier ein Schnittpräparat) entstehen aus menschlichen pluripotenten Stammzellen – mit Strukturen, die denen beim Fötus gleichen. Die Farben markieren verschiedene Zellsorten und Hirnbereiche, rechts etwa erkennt man Strukturen einer Großhirnrinde. Neuronale Vorläuferzellen sind rot, Neurone grün.

MIT FOTO: GEO. VON MARDELME A. LANCASTER, MRC LABORATORY OF MOLECULAR BIOLOGY, CAMBRIDGE, LANCASTER, M.A. ET AL.: CEREBRAL ORGANOID MODEL HUMAN BRAIN DEVELOPMENT AND MICROSCOPY IN NATURE 501, S. 373-379, 2013



Jürgen A. Knoblich ist stellvertretender Direktor des Instituts für Molekulare Biotechnologie der Akademie der Wissenschaften in Wien. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen neuronale Stammzellen und die Entwicklung des Nervensystems der Taufleige.

► spektrum.de/artikel/1513357

► Alles, was uns als Menschen auszeichnet, entsteht letztlich in einer 1,4 Kilogramm schweren, weichen, gelblichen Gewebemasse – die wir unser Gehirn nennen. Hier formen sich unsere Gedanken, hier fühlen wir Liebe und Hass, hier entspringen die höchsten Ideale und niedersten Motive der Menschheit. Das in seiner Form ein wenig an eine Walnuss erinnernde Gebilde ist das komplexeste Organ, das die Natur je geschaffen hat. Es enthält etwa 86 Milliarden Nervenzellen oder Neurone. Diese müssen, damit das Gehirn ordentlich funktioniert, zur richtigen Zeit entstehen, dann zum passenden Ort wandern und sich schließlich dort korrekt arrangieren und vernetzen. Das alles im Zusammenhang und Detail zu begreifen – das heißt Entwicklung, Aufbau und Arbeitsweise unseres Gehirns zu verstehen –, gilt als größte Herausforderung für die moderne Biologie.

Bisher stammt das meiste Wissen hierzu von Tierstudien, oft an Mäusen und Ratten. Tatsächlich ähneln sich die Gehirne von Nagern und Menschen in vieler Hinsicht. Sie sind im Prinzip gleich aufgebaut, verfügen über etliche identische Nervenzelltypen und erfüllen in entsprechenden Regionen vergleichbare Aufgaben. Doch es gibt einen wesentlichen Unterschied: Bei einer Maus ist die Hirnoberfläche glatt, beim Menschen tief gefurcht.

Das ist keineswegs trivial. Nach Ansicht vieler Neurowissenschaftler ergibt die stark konturierte Oberfläche letztlich ein fundamental anderes Organ. Denn bei gleichem Volumen haben in der Hirnrinde nun bedeutend mehr Nervenzellen Platz. Wohl nicht von ungefähr sind die Gehirne der intelligentesten Tiere gefaltet, wie die von Affen, Katzen, Hunden und Walen. In dem Zusammen-

hang entdeckten Evolutionsbiologen, dass die meisten Neurone des menschlichen Gehirns aus einer bestimmten Sorte so genannter Vorläuferzellen entstehen, die es bei der Maus gar nicht oder nur in geringer Zahl gibt.

Unterschiede wie diese könnten die folgende Beobachtung erklären: Viele genetische Mutationen, die beim Menschen schwere neurologische Erkrankungen hervorrufen, beeinträchtigen Mäuse wenig, wenn man ihnen die entsprechenden Erbanlagen eingepflanzt hat. Das Phänomen wäre begreiflich, sofern solche Mutationen die Entwicklung oder den Erhalt von hirnarchitektonischen Strukturen oder Zelltypen behinderten, die zwar beim Menschen existieren, bei den Nagern aber nicht. Hierin mag ein Grund liegen, wieso Forschungen an Mäusen oder Ratten noch keine bahnbrechenden Therapien unter anderem für Schizophrenie, Epilepsie und Autismus erbracht haben.

Die Neurowissenschaftler suchen deswegen dringend nach besser geeigneten Modellen für derartige Studien. Meiner Arbeitsgruppe gelang unlängst ein neuer, zukunfts-trächtiger Ansatz: Ausgehend von menschlichen Stammzellen ist es uns gelungen, dreidimensionale Gewebekulturen herzustellen, die dem Gehirn eines menschlichen Embryos verblüffend ähnlich sind. Wir können sozusagen frühe Entwicklungsstadien des menschlichen Gehirns im Miniaturformat im Labor züchten. Wir nennen diese Kulturen zerebrale Organoide. Daran lassen sich viele Prozesse untersuchen, zu deren Erforschung sich Nagetiere nicht eignen. Zum Beispiel kann man diese Gebilde dem Zika-virus aussetzen, das in letzter Zeit von sich reden macht, weil es bei ungeborenen Kindern offenbar Mikrozephalie verursacht. Oder man verpasst den Organoiden bestimmte genetische Merkmale, so dass sie Eigenschaften entwickeln, die denen von Gehirnen mit einem neurologischen Defekt ähneln.

Wichtiges Ziel: Wissenslücken füllen mit Hirnorganoiden aus menschlichen Stammzellen

In meinem Team begannen die Studien zu menschlichen zerebralen Organoiden 2012. Damals gehörte die amerikanische Forscherin Madeline A. Lancaster als Postdoc dazu, die heute an der University of Cambridge (England) arbeitet. Sie entwickelte ein Verfahren, bei dem in Zellkultur viele wesentliche Vorgänge der Hirnbildung beim Embryo bis zum etwa zehn Wochen alten Gehirn eines frühen Fötus ablaufen (siehe »Die Hirnfabrik«, rechts).

Den Anfang machen bei unseren Studien menschliche pluripotente Stammzellen, wie man sie inzwischen aus differenzierten Zellen etwa der Haut durch genetische Rückprogrammierung gewinnen kann (siehe **Spektrum** Juni 2011, S. 22). Den gleichen Zelltyp weisen Embryonen in einer frühen Entwicklungsphase auf. Pluripotenz bedeutet, dass eine Zelle unter geeigneten Bedingungen noch die verschiedensten Gewebe auszubilden vermag – zum Beispiel Blut, Knochen-, Muskel- oder Nervengewebe. Beim Embryo oder Fötus bleiben neue Stammzellen nur für wenige Tage in einem Zustand, in dem sie fast jeden Zelltyp hervorzubringen vermögen. Doch unter speziellen Kulturbedingungen lässt sich die Pluripotenz bewahren.

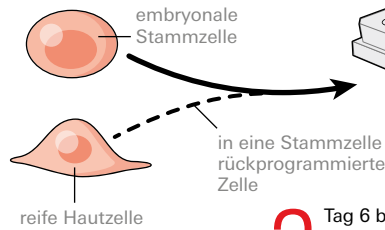
AUF EINEN BLICK MENSCHLICHE HIRNORGANOIDE

- 1** Viele grundlegende Erkenntnisse der Hirnforschung stammen von Nagetieren. Doch denen fehlen die höheren Funktionen unseres Denkkorgans.
- 2** Manche neurologischen Erkrankungen des Menschen lassen sich an Tieren nicht untersuchen, etwa Schizophrenie oder die Alzheimerdemenz.
- 3** Im Labor gezüchtete winzige Organoide eignen sich dagegen für solche Studien, weil sie ähnliche Strukturen und Zelltypen wie unser Gehirn ausbilden. Auch der Wirkung des Zikavirus kam man damit auf die Spur.

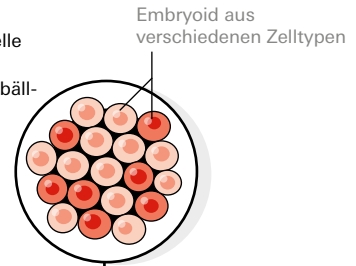
Die Hirnfabrik

Ausgehend von Stammzellen, die für diese Studien aus reifen menschlichen Zellen gewonnen wurden, lässt sich unter geeigneten Bedingungen fötales Hirngewebe züchten, so etwa Zelltypen und Strukturen der frühen Hirnrinde. Die kultivierten Zellen – genauer gesagt Embryoidkörper – benötigen dazu von außen im Wesentlichen nur die passenden Nährstoffe und ein geeignetes Medium.

1 Pluripotente Stammzellen, die sich in sämtliche Zelltypen differenzieren können, werden etwa aus Haut- oder Blutzellen gewonnen.



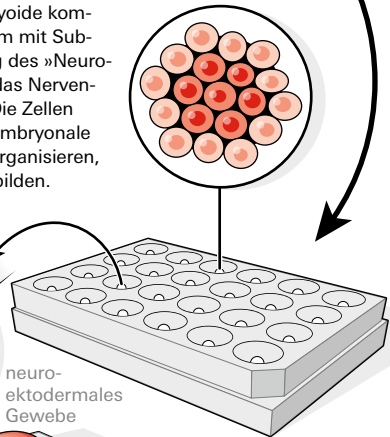
2 Tag 0 bis 5: Die Stammzelle teilt sich, und die neuen Zellen bilden ein Gewebebällchen, einen Embryoid. Schon nach drei Tagen entstehen die drei »Keimblätter«: Ekto-derm, Mesoderm und Entoderm.



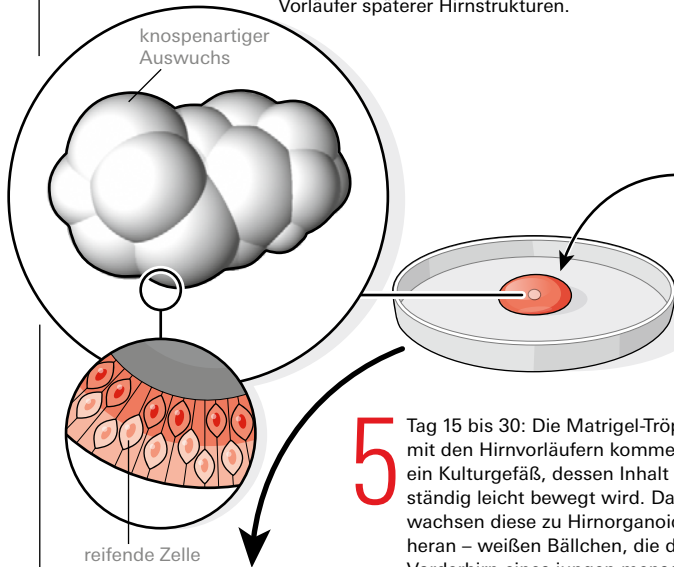
Embryone werden weiter kultiviert.

3 Tag 6 bis 10: Die Embryone kommen in ein Nährmedium mit Substanzen für die Bildung des »Neuroektoderms«, welches das Nervensystem hervorbringt. Die Zellen beginnen sich nun in embryonale Gewebeschichten zu organisieren, die später das Gehirn bilden.

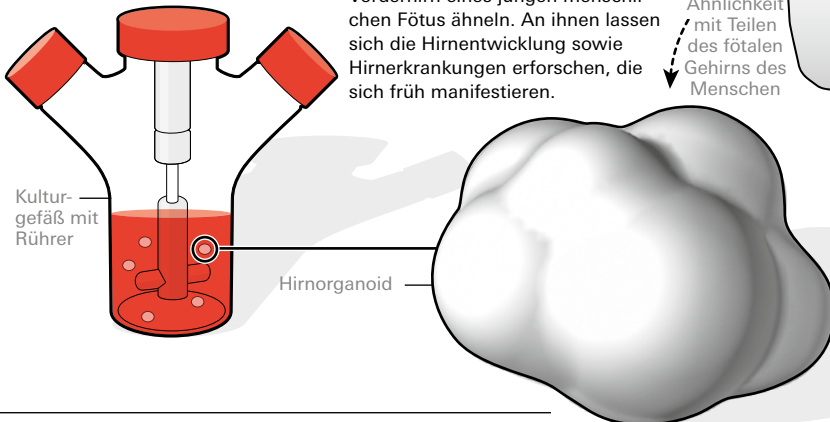
Matrigel-Tröpfchen (anderes Kulturmedium)



4 Tag 11 bis 15: Die winzigen Bällchen aus Neuroektoderm werden in Tröpfchen von Matrigel eingebettet. Dieses Kulturmedium regt die Zellen zur Teilung an und bewahrt sie vor dem Absterben. Auch erlaubt es die Ausbildung knospenartiger Auswüchse, Vorläufer späterer Hirnstrukturen.



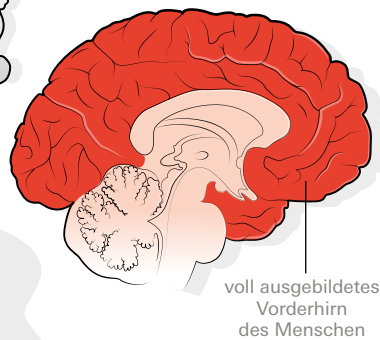
5 Tag 15 bis 30: Die Matrigel-Tröpfchen mit den Hirnvorgängern kommen in ein Kulturgefäß, dessen Inhalt ständig leicht bewegt wird. Darin wachsen diese zu Hirnorganoiden heran – weißen Bällchen, die dem Vorderhirn eines jungen menschlichen Fötus ähneln. An ihnen lassen sich die Hirnentwicklung sowie Hirnerkrankungen erforschen, die sich früh manifestieren.



Vorderhirn eines zehnjährigen Fötus

Ähnlichkeit mit Teilen des fötalen Gehirns des Menschen

Einen Monat nach Versuchsbeginn ähneln die Organoiden in vieler frapierender dem Vorderhirn eines zehnjährigen Fötus. Sie zeigen zum Beispiel eine ähnlich strukturierte Hirnrinde.



Auf solche Zellen greifen Forscher bei der Zucht von Organoiden zurück.

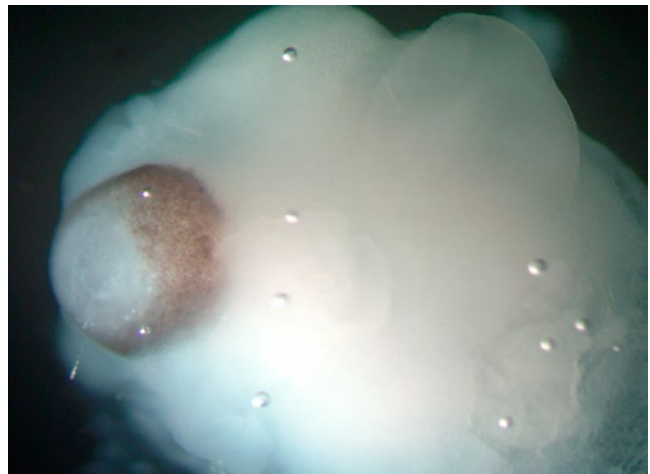
Bei unserem Verfahren werden die Stammzellen zuerst in einem flüssigen Medium kultiviert, dem sämtliche Nährstoffe zugesetzt sind, die sie benötigen, um ein so genanntes Neuroektoderm auszubilden – denn aus dem Ektoderm, dem äußeren »Keimblatt« eines Embryos, entsteht nicht nur unter anderem die Haut, sondern auch das Nervengewebe. In dem Nährmedium beginnen sich die Stammzellen bald zu teilen, und innerhalb weniger Tage bilden sich kleine Kügelchen aus vielen Zellen, die wir als Embryoide oder Embryoidkörper bezeichnen. Die betten wir in eine gallertartige Substanz namens Matrigel ein. Es handelt sich dabei um ein für solche Zwecke gern verwendetes Medium, das man von Zellen aus einem Knorpeltumor der Maus produzieren lässt. Dieses Gel erfüllt viele Funktionen der Umgebung, genauer gesagt der extrazellulären Matrix, in der die Zellen eines menschlichen Fötus heranwachsen. Zum einen enthält das Matrigel ein reiches Angebot an Substanzen, welche die Zellen zur Vermehrung anregen und am Leben erhalten. Zum anderen bietet es ihnen ein Gerüst zum Wachsen. Das ist gerade so fest, dass sie sich daran halten können, aber dennoch nachgiebig und formbar genug, um sich den sich vermehrenden Zellen anzuschmiegen.

Im passenden Milieu entstehen Replikat des fötalen Vorderhirns des Menschen

Das Ergebnis dieser Arbeiten war wirklich spektakulär. Im Matrigel wachsen die Embryoidkörper von allein zu weißlichen, unregelmäßig ausgebuchteten dreidimensionalen Gewebekügelchen heran, die einem embryonalen humanen Gehirn in vielerlei Hinsicht verblüffend ähneln. Wenn sie die passenden chemischen Signale für die fötale Hirnentwicklung erhalten, entwickeln sich unsere Kulturen von selbst zu präzisen Replikaten des menschlichen Vorderhirns, des Bereichs unseres Gehirns, der für höhere kognitive Funktionen zuständig ist.

Zum Beispiel ordnen sich die Zellen in den für die Hirnrinde so charakteristischen Schichten an. Ebenso finden wir eher locker strukturierte Gebilde, die dem so genannten choroidalen Plexus entsprechen – einem Geflecht, das in unserem Gehirn die Zerebrospinalflüssigkeit erzeugt. Nicht zuletzt entdecken wir typische innere Ausbeulungen des Nervengewebes, die als »ganglionic eminences« oder »Ganglienhügel« bezeichnet werden. Aus ihnen entstehen besondere Nervenzellen, die so genannten Interneurone, die während der Entwicklung über weite Entfernungen wandern und an ihrem Bestimmungsort die Aktivität anderer Nervenzellen dämpfen. Ebenso finden wir die Regionen, die später den Hippocampus ausbilden, den Ort, in dem unser Langzeitgedächtnis beheimatet ist.

Selbst bei genauer Betrachtung arrangieren sich die Zellen in den Organoiden im Grunde genauso wie beim acht bis zehn Wochen alten menschlichen Fötus. Einzelne der Minihirne entwickeln sogar kleine, mit pigmentierten Zellen bestückte Ausbeulungen, die an ein frühes Stadium der Augenbildung erinnern – unsere Netzhaut ist ja genau genommen Hirngewebe. Ebenso teilen und differenzieren



MADEIRA, LANGSTER UND JUREVA. KNOBLICH, IMBA, WIEN

Dieses Organoid hat eine Augenanlage ausgebildet, die links als pigmentiertes Bläschen zu erkennen ist.

sich die Zellen in den Organoiden in die gleichen Typen wie beim Embryo. Bemerkenswerterweise bilden die jungen Neurone auch Axone, die langen Ausläufer, über die Hirnnervenzellen anderen Neuronen Signale schicken und ein Kommunikationsnetz aufbauen. Letzteres scheint in den Minihirnen gleichfalls stattzufinden. Bevor sich neue Nervenzellen in das Netzwerk integrieren, müssen sie allerdings erst an ihren Bestimmungsort – häufig in ein anderes Areal – wandern. Selbst dieses Verhalten wirkt beim Fötus und bei den Organoiden erstaunlich gleich. Der Vorgang interessiert uns besonders, da an dieser Stelle bei psychiatrischen Erkrankungen des Öfteren etwas schiefgelaufen zu sein scheint.

An sich ist die Idee, im Labor Gewebe zu züchten, nicht neu. Wie so viele wissenschaftliche Entdeckungen basieren die gegenwärtigen Fortschritte in der Organoidzüchtung auf jahrelangen vorbereitenden Studien. Manche Erkenntnisse, auf denen die heutige Forschung aufbaut, wurden sogar bereits vor mehr als einem Jahrhundert gewonnen. Der amerikanische Zoologe Henry V. Wilson (1863–1939) etwa beobachtete schon 1907, dass sich bestimmte einfache Tiere wie Schwämme wieder zu intakten Organismen reorganisierten, nachdem er sie in einzelne Zellen zerlegt hatte. Das warf früh die Frage auf, ob womöglich auch für das Gehirn Programme existieren, anhand derer sich seine Teile zusammenfügen. Weitere wichtige Beiträge hierzu lieferte der deutsch-amerikanische Embryologe Johannes Holtfreter (1901–1992), der 1939 entdeckte, dass die verschiedenen Zelltypen eines Froschembryos wieder zueinander finden – sich »reaggregieren« – und ihre frühere Form annehmen können.

In den 1980er Jahren gab es dann einen regelrechten Boom an »Reaggregationsstudien« zu komplexen Organen oder Organteilen. Sofern man in Laborkulturen die richtigen Zelltypen zusammengab, fanden sie sich beispielsweise zu einer Netzhaut oder selbst zu einer Hirnrinde zusammen. Hierauf baute Yoshiki Sasai (1962–2014) vom Riken-Zentrum für Entwicklungsbiologie in Kobe (Japan) ab dem Jahr 2006 auf. Er setzte erstmals pluripotente Stammzel-

len ein, um Nervengewebe zu gewinnen. Damit gelang es ihm, im Labor menschliche Netzhaut zu erzeugen (siehe **Spektrum** Juli 2011, S. 16). Dieses Verfahren haben wir mit einer bahnbrechenden Methodik des niederländischen Mediziners, Immunologen und Molekulargenetikers Hans Clevers von der Universität Utrecht kombiniert. Von ihm kommt die Idee, zum Züchten von Organoiden aus Stammzellen Matrigel zu verwenden. Hiermit schaffte er es, Gewebe von Darm, Magen, Leber und Bauchspeicheldrüse zu gewinnen.

Bei unseren Studien machen wir uns noch weitere umwälzende Methoden der biomedizinischen Forschung zu Nutze. Wie schon angedeutet, verwenden wir so genannte reprogrammierte (rückprogrammierte) Stammzellen und untersuchen mittels Gentechnik an den Hirnorganoiden die Bedeutung von Mutationen.

Ohne Embryonen: Mit wenigen gezielten Eingriffen von der reifen Zelle zur pluripotenten Stammzelle

Das Zurückprogrammieren von differenzierten Körperzellen in einen frühen Zustand – quasi das Zurückstellen der genetischen Entwicklung – entwarf Shinya Yamanaka von der Universität Kyoto, wofür er 2012 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin erhielt (siehe **Spektrum** Dezember 2012, S. 20). Wie er herausfand, lassen sich mit Hilfe von wenigen genetischen Manipulationen, nämlich nur ein paar molekulare Faktoren, praktisch alle Typen von reifen Zellen in pluripotente Stammzellen zurückverwandeln. Egal, ob sie von der Haut oder aus Blut gewonnen wurden: Solche Stammzellen kann man wiederum dazu bringen, verschiedene Typen von Hirnzellen zu generieren, und aus denen können zerebrale Organoide heranwachsen. Embryonen benötigt man für solche Studien also nicht länger.

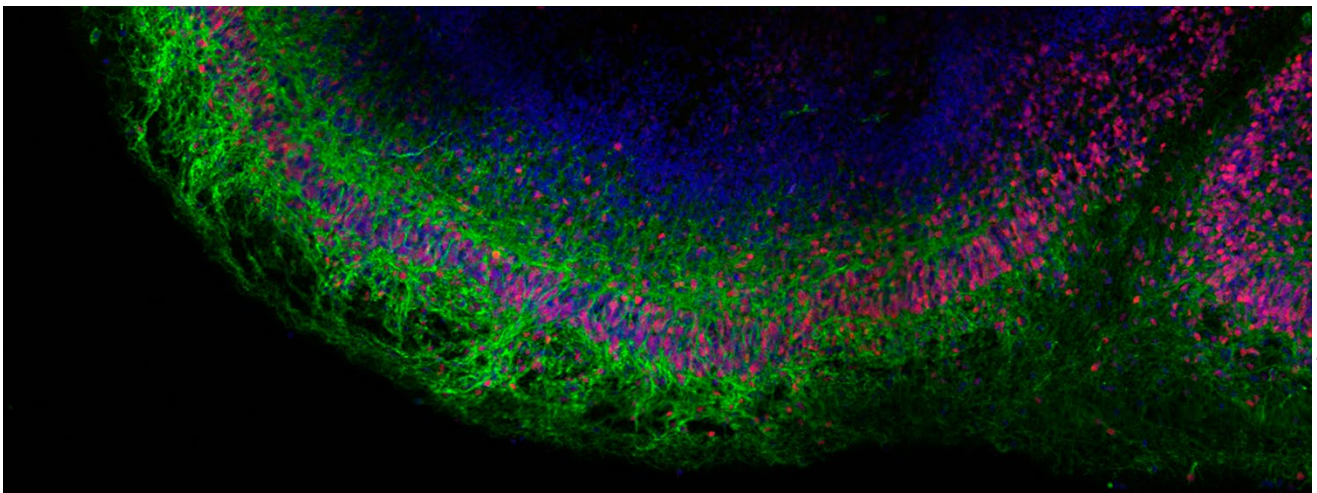
Die Möglichkeit der genetischen Rückprogrammierung öffnet biomedizinischen Untersuchungen über Erkran-

kungsmechanismen neue Wege. Zum Beispiel lassen sich aus Zellen von Patienten, die an einem genetischen Defekt leiden, Organoide züchten, die man mit welchen aus Zellen von gesunden Menschen vergleicht. Denn solch ein Fehler beeinträchtigt oft bereits frühe Stadien der Organentwicklung. Wir selbst haben auf diese Weise schon Phänomene der Mikrozephalie untersucht, die durch genetische und diverse andere Ursachen bedingt sein kann. Betroffene Kinder kommen mit einem viel zu kleinen Gehirn auf die Welt. Die Organoide, die wir mit den Zellen eines Patienten züchteten, waren ebenfalls wesentlich kleiner als normal. Da wir mit den genannten Methoden aus den Zellen eines Menschen praktisch beliebig viele Organoide erzeugen können, sollen nun detaillierte Analysen der molekularen Mechanismen erfolgen, die das Hirnwachstum beim Fötus behindern. Ähnliche Studien sind für Schizophrenie, Epilepsie und andere Krankheiten denkbar, bei denen man gern wüsste, auf welchen Fehlbildungen des Gehirns sie beruhen.

Auch Organoide aus reprogrammierten Zellen von gesunden Menschen nutzen der Medizin. Im Fall des Zikavirus haben Forscher mehrerer Labors in Brasilien und später in den USA daran nachweisen können, dass dieser Erreger tatsächlich in der Schwangerschaft das Hirnwachstum behindert und die Mikrozephalie vieler Neugeborener in Südamerika verursacht haben dürfte. Wie sich zeigte, sterben in Organoiden, die mit dem Virus infiziert sind, zahlreiche Nervenzellen ab. Die Gebilde sind dadurch am Ende deutlich kleiner als die nichtinfizierten Vergleichsexemplare, ganz ähnlich wie bei unseren eigenen Arbeiten mit Zellen eines Mikrozephaliepatienten.

Forschungen an Organoiden werden sicherlich noch eine Menge weiterer Fragen rund um das Zikavirus klären helfen. Beispielsweise verstehen die Mediziner noch nicht, wieso es sich nur in einigen Weltregionen so katastrophal auswirkt. Um das herauszufinden, könnte man verschie-

Das Schnittbild der sich entwickelnden Großhirnrinde bei einem Organoid lässt erkennen, dass sich eine primäre Rinde oder Rindenplatte (kortikale Platte) auszubilden beginnt, wenn man ihm geeignete Stützstrukturen bietet. Nervenzellen sind grün, neuronale Stammzellen rot und die Zellkerne blau markiert.



MADEIRA, A., LANGGASTER UND JÜRGEN A. KNÖRICH, IMBA, WIEN

dene Organoide mit jeweils einem anderen Virusstamm traktieren. Ein Rätsel ist ebenfalls, aus welchem Grund längst nicht jedes Kind, das dem Virus im Mutterleib ausgesetzt war, mit einem zu kleinen Gehirn geboren wird. Ein weiterer wichtiger Aspekt wäre die Andockstelle, also der Rezeptor, über den das Virus sich Zutritt in die Hirnzellen verschafft. Nicht zuletzt könnte man Wirkstoffe gegen diesen Erreger zuerst an Organoiden erproben, bevor dann klinische Studien an Patienten stattfinden.

Auch mit Hilfe modernster Gentechnologie – so genannten Genomengineerings (Manipulation des Genoms) – lassen sich an Organoiden gezielt Krankheitsursachen abklären. Gesunden Zellen kann man eine Mutation einpflanzen, von der man annimmt, dass sie hinter einer bestimmten Krankheit steht, und dann Entwicklung und Verhalten der Minihirne untersuchen. Mehr noch: An Organoiden ließe sich erproben, ob die Reparatur des verdächtigen Gens oder der verdächtigen Mutation wirklich die gewünschten Auswirkungen hat. Falls ja, wüsste man nun, an welcher Stelle im biochemischen Apparat der Zelle neue Therapien ansetzen müssten.

Neurowissenschaftler stehen quasi in den Startlöchern, um weitere mögliche Anwendungen der Organoid-Technologie zu erkunden. Einen der vordersten Ränge nimmt dabei die Medikamentenentwicklung ein. Die Minihirne könnten viele der heute noch verlangten Studien an Tieren überflüssig machen und so nicht zuletzt die Kosten erheblich senken. Zum einen lässt sich an ihnen austesten, ob ein Wirkstoff den gewünschten Effekt hat. Zum anderen können zerebrale Organoide offenbaren, ob ein Medikament der Hirnentwicklung des Kindes schadet. Das berüchtigte Teratogen (Thalidomid) wäre schwangeren Frauen um 1960 bestimmt nicht verschrieben worden, hätte man den Wirkstoff damals zuvor an Hirnorganoiden getestet. Wie wir heute wissen, beeinträchtigt es nicht nur die Ausbildung der Gliedmaßen – was nachträgliche Tierversuche bestätigten –, sondern unter anderem auch das Nervensystem und Gehirn in einer frühen Entwicklungsphase.

Überdies erweisen sich die gezüchteten Minihirne als sehr wertvolle Modellsysteme für Evolutionsbiologen. An ihnen lässt sich herausfinden, welche Gene uns im Vergleich mit anderen Primaten zu unserem riesigen Gehirn verhelfen. Genomvergleiche brachten bereits Aufschluss über genetische Hintergründe einiger kognitiver Unterschiede, so etwa über essenzielle Gene für die menschliche Sprache. Aber wie diese Gene dazu beitragen, war bislang vielfach nicht recht klar. Jetzt können die Forscher

Erbgutsequenzen von verschiedenen Affenarten in menschliche Hirnorganoide einsetzen und die Auswirkungen verfolgen. Umgekehrt lassen sich auch menschliche Gene oder ganze Genomabschnitte in Affenorganoide überführen, um deren Bedeutung zu studieren.

Keine Angst vor zerebralen Organoiden – sie werden nie so etwas wie ein Bewusstsein entwickeln

Manche Leute gruselt es, wenn sie sich vorstellen, dass Menschengehirne in einem Glaskolben wachsen. Bei vielen weckt das Assoziationen an den Sciencefiction-Film »Matrix«, in dem intelligente Maschinen ganze Menschen massenhaft in Kulturgefäßen züchten. Doch für irgendwelche Befürchtungen dieser Art besteht keinerlei Anlass. Die Hirnorganoide werden mit Sicherheit niemals auch nur annähernd so etwas wie ein Bewusstsein hervorbringen. Denn dafür muss ein Geschöpf Sinneseindrücke aus der Außenwelt aufnehmen und verarbeiten. Erst dann vermag es ein inneres Modell von der Realität zu entwickeln. Den Organoiden fehlt jeder sensorische Input, sie können weder sehen noch hören. Selbst wenn wir sie mit einer Kamera und einem Mikrofon verbinden könnten, müsste man die eintreffende visuelle und auditorische Information erst noch in eine Signalform übersetzen, die von dem Konglomerat aus Hirnzellen in der Laborschale erfasst und vor allem verstanden würde. Bis auf Weiteres ist dies schon allein technisch gesehen wohl eine unüberwindbare Hürde.

Zerebrale Organoide stellen folglich keine funktionsfähigen Gehirne dar. Sie sind vielmehr Gewebeklumpen, die lediglich molekulare und zelluläre Funktionen des natürlichen Organs spektakulär genau nachbilden. Sie ähneln darin allenfalls kleinen Gewebestückchen, die bei Hirnoperationen entfernt werden.

Dennoch wirft die Arbeit mit Organoiden natürlich ethische und juristische Fragen auf. Diese Gebilde entstehen ja alle aus Zellen von Menschen, und die haben Persönlichkeitsrechte. Wir Forscher müssen daher bei solchen Studien alle ethischen und juristischen Vorgaben einhalten, die in Industrienationen für die Arbeit mit Gewebeproben gelten. So müssen die Patienten selbstverständlich im Vorhinein ihr Einverständnis erklären. Und nicht jeder Kandidat fühlt sich wohl bei dem Gedanken, dass aus seinen Zellen im Labor gehirnähnliche Strukturen gezüchtet würden.

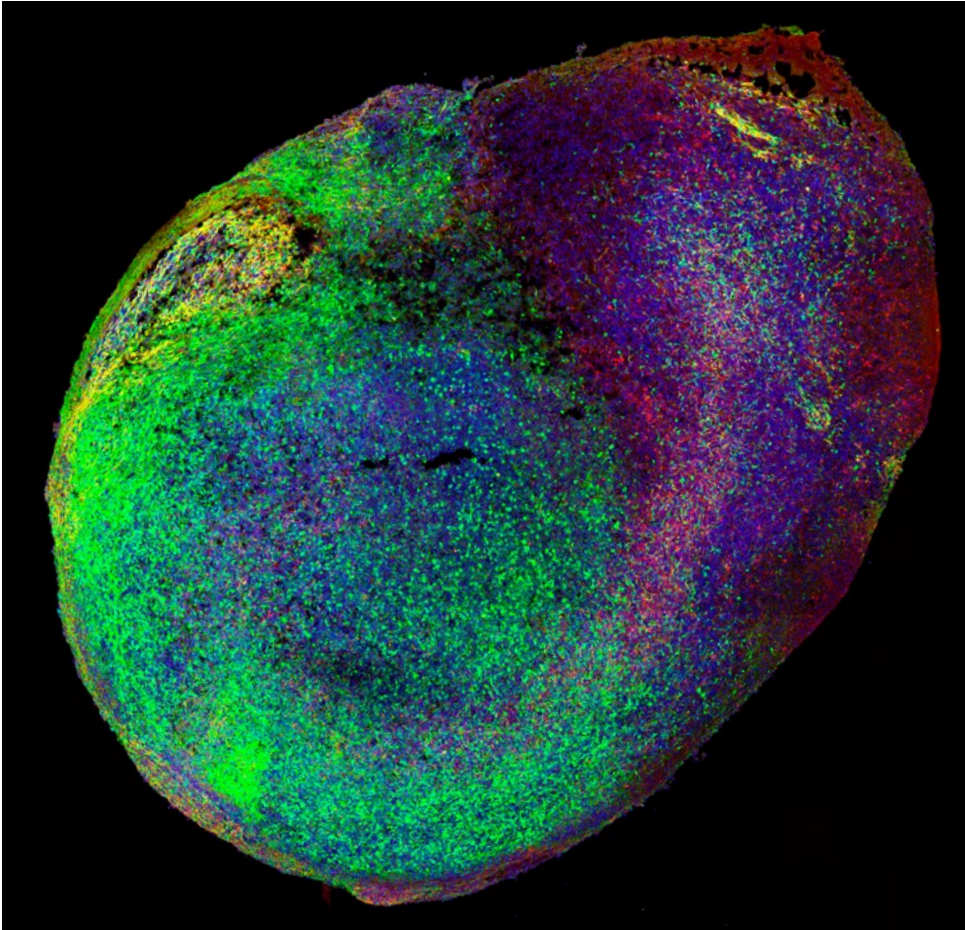
Das wissenschaftliche Potenzial dieser Technologie überwiegt aber eindeutig die möglichen Schattenseiten. Schon jetzt dienen zerebrale Organoide dazu, an ihnen aussagekräftige medizinische und toxikologische Untersuchungen durchzuführen – ganz ohne Tierversuche. Trotzdem arbeiten mein Team wie auch andere daran, sie noch zu optimieren. Die derzeitigen Versionen haben beispielsweise keine Blutgefäße. In frühen Entwicklungsphasen macht das den Minihirnen zwar noch nichts aus, doch nach einiger Zeit beginnen Zellen wegen Sauerstoff- und Nährstoffmangel abzusterben. Theoretisch sollte es möglich sein, auch Blutgefäße in die Organoide zu integrieren. Man könnte dafür etwa neue 3-D-Drucktechniken einsetzen oder aber Gefäße ihrerseits aus Stammzellen züchten.



FOTOLIA / GIORDANO AITA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



Hier wurden zwei Organoiden miteinander verschmolzen, die unterschiedliche frühe Hirnstrukturen ausgebildet hatten. An solchen »Zwittern« lassen sich Zellwanderungen zwischen verschiedenen Hirngebieten und das Wachsen von langen Zellausläufern untersuchen.

Denn auch im natürlichen Fall wachsen Adern ins Gehirn, und vielleicht lässt sich das in den Kulturen ebenfalls anregen.

Den Minihirnen der ersten Jahre fehlte außerdem ein fester, »geordneter« räumlicher Aufbau wie beim Embryo. Bei dem sind oben und unten sowie vorn und hinten klar erkennbar und immer gleich, während jedes Organoid bisher anders, fast beliebig sortiert aussah und außerdem manchmal ganz verschiedene Hirnteile wiedergab. Jetzt gerade gelang es uns, solche Gebilde entlang einer biosynthetischen Matrix zu züchten und ihre Variabilität dadurch erheblich zu verringern. Im natürlichen Gehirn geben komplexe Signalsysteme die Ausrichtung der verschiedenen Achsen an. Das ließe sich nachahmen. Vielleicht gelingt es sogar, Organoiden zu generieren, die an einem Ende ein Vorderhirn, am anderen ein Hinterhirn ausgebildet haben.

In Bezug auf Hirnerkrankungen ist es aufschlussreich, zu verfolgen, wie und wohin junge Nervenzellen wandern – und ebenso, wann und wie stark sich die Nervenbahnen und Schaltkreise ausbilden. Um dem näher zu kommen, haben wir schon jeweils zwei unterschiedliche zerebrale Organoiden, die im Aufbau zwei verschiedenen Hirnteilen ähnelten, miteinander verschmolzen (Bild oben). An ihnen sollte man normale und abnorme Wechselbeziehungen zwischen Hirnarealen untersuchen können. Langfristig möchten wir im Labor nicht nur Leitungsbahnen nach-

bauen, sondern überdies gesamte Schaltkreise. Dabei denken wir etwa an Netzwerke, die Suchtverhalten steuern, die bei Angst oder Aggressionen wichtig sind oder die zum »Belohnungssystem« des Gehirns gehören.

Mittlerweile sind diese Forschungen weiter vorangeschritten, als wir uns noch vor ein paar Jahren erträumt hätten. An Hirnorganoiden werden bereits Krankheiten untersucht und Medikamente erprobt. Dass nun für viele Fragen keine Versuchstiere mehr notwendig sind, sondern man stattdessen mit komplexem Hirngewebe aus Laborkultur arbeiten kann, eröffnet ein neues Kapitel der Biologie und der Medizin. ◀

QUELLEN

Bagley, J. A. et al.: Fused Cerebral Organoids Model Interactions between Brain Regions. In: *Nature Methods* 14, S. 743–751, 2017

Kelava, I., Lancaster, M. A.: Dishing out Mini-Brains: Current Progress and Future Prospects in Brain Organoid Research. In: *Developmental Biology* 420, S. 199–209, 2016

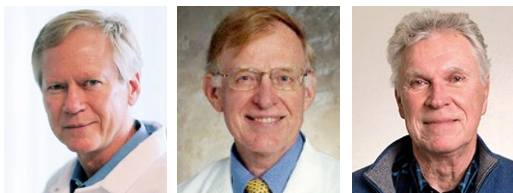
Lancaster, M. A. et al.: Guided Self-Organization and Cortical Plate Formation in Human Brain Organoids. In: *Nature Biotechnology* 35, S. 659–666, Juli 2017

LITERATURTIPP

Wolf, C.: Es werde Hirn. In: *Gehirn&Geist* 10/2016, S. 12–19
Bericht von den Forschungen mit Minigehirnen, ihren Aussichten und ihren Grenzen

BIOWAFFEN DIE MILZBRAND- BEDROHUNG

Vor knapp 40 Jahren starben in einem geheimen sowjetischen Militärlabor mehr als 60 Menschen. Neue Erkenntnisse zu der Tragödie zeigen, wie tödlich Biowaffen sein können, wie leicht es ist, sie zu entwickeln – und die Kontrolle darüber zu verlieren.



Paul S. Keim (links) ist geschäftsführender Direktor des Pathogen and Microbiome Institute an der Northern Arizona University in Flagstaff. **David H. Walker** (Mitte) ist geschäftsführender Direktor des Center for Biodefense and Emerging Infectious Diseases an der University of Texas Medical Branch in Galveston. **Raymond A. Zilinskas** ist Direktor des Chemical and Biological Weapons Nonproliferation Program am Institute for International Studies in Monterey, Kalifornien.

► spektrum.de/artikel/1506465

Am 2. April 1979 entwich aus einem Schornstein auf einem sowjetischen Militärgelände nahe Swerdlowsk ein rätselhaftes Pulver. Im Lauf der darauf folgenden Wochen erkrankten in der nahe gelegenen zentralasiatischen Stadt Swerdlowsk (dem heutigen Jekaterinburg) mindestens 80 Anwohner. Zunächst sah es so aus, als hätten sie sich bloß eine Grippe eingefangen. Nach ein paar Tagen kamen allerdings weitere Symptome hinzu, darunter massive innere Blutungen. Letztlich starben mindestens 68 Menschen, wobei die genaue Zahl bis heute nicht feststeht.

Ein paar Eingeweihte auf der Militärbasis Swerdlowsk-19 wussten sofort, was passiert war. Auf dem Gelände entwickelten sowjetische Forscher eine biologische Waffe, die auf einem Stamm des Erregers der Infektionskrankheit Milzbrand basieren sollte. Wegen fehlender Luftfilter war der Stoff am 2. April nach außen gelangt – in unbekannter Menge und einer besonders perfiden Form: Wissenschaftler der geheimen Forschungsbasis hatten ein Substrat, das Sporen des Bakteriums *Bacillus anthracis* enthielt, so fein zermahlen, dass der Staub problemlos eingeatmet werden und tief in die Lunge eindringen konnte.

Einmal im Körper, keimen die kapselförmigen Sporen und ändern ihre Form. Sie werden zu langen Stäbchen, die sich vermehren und im Blut ausbreiten. Dabei scheiden sie toxische Proteinkomplexe aus, die verschiedene Gewebearten angreifen. Besonders gefährlich sind die Sporen, wenn man sie einatmet: Sofern der Patient nicht sofort ein geeignetes Antibiotikum bekommt, stirbt er binnen Tagen.

In Swerdlowsk hielt das sowjetische Militär den Ausbruch jedoch geheim, fatalerweise auch gegenüber den lokalen Behörden. Diese hätten vielleicht einige Leben mehr retten können, wenn sie gewusst hätten, worauf die rätselhaften Symptome der erkrankten Anwohner zurückgingen.

Aber der sowjetische Geheimdienst KGB versuchte verzweifelt, den Unfall zu vertuschen. Im Herbst 1979 sickerte die Geschichte trotzdem an die Öffentlichkeit durch und erwischte westliche Analysten und Geheimdienste kalt. Sie hatten bis dahin keine Ahnung, dass die Sowjetunion an biologischen Waffen arbeitete – und damit gegen ein 1972 geschlossenes Abkommen verstieß, das deren Entwicklung, Herstellung, Lagerung und Nutzung verbietet. Etwa 100 Länder einschließlich der UdSSR und den USA hatten diese Biowaffenkonvention unterzeichnet. Trotzdem reichten die USA keine förmliche Klage ein.

Damals beschäftigte Experten auch eine heikle Frage: Hatten sowjetische Forscher das Bakterium *B. anthracis* genetisch modifiziert, um seine tödliche Wirkung zu steigern? Westliche Geheimdienste hielten das zu der Zeit für sehr plausibel, schließlich experimentierten Wissenschaftler bereits intensiv mit gentechnischen Verfahren. Heute gehen wir davon aus, dass die Biotechniker in Swerdlowsk lediglich einige Chemikalien hinzumischten und ein paar andere Kniffe einsetzten, damit sich die Milzbrandsporen leichter in der Luft verteilen konnten.

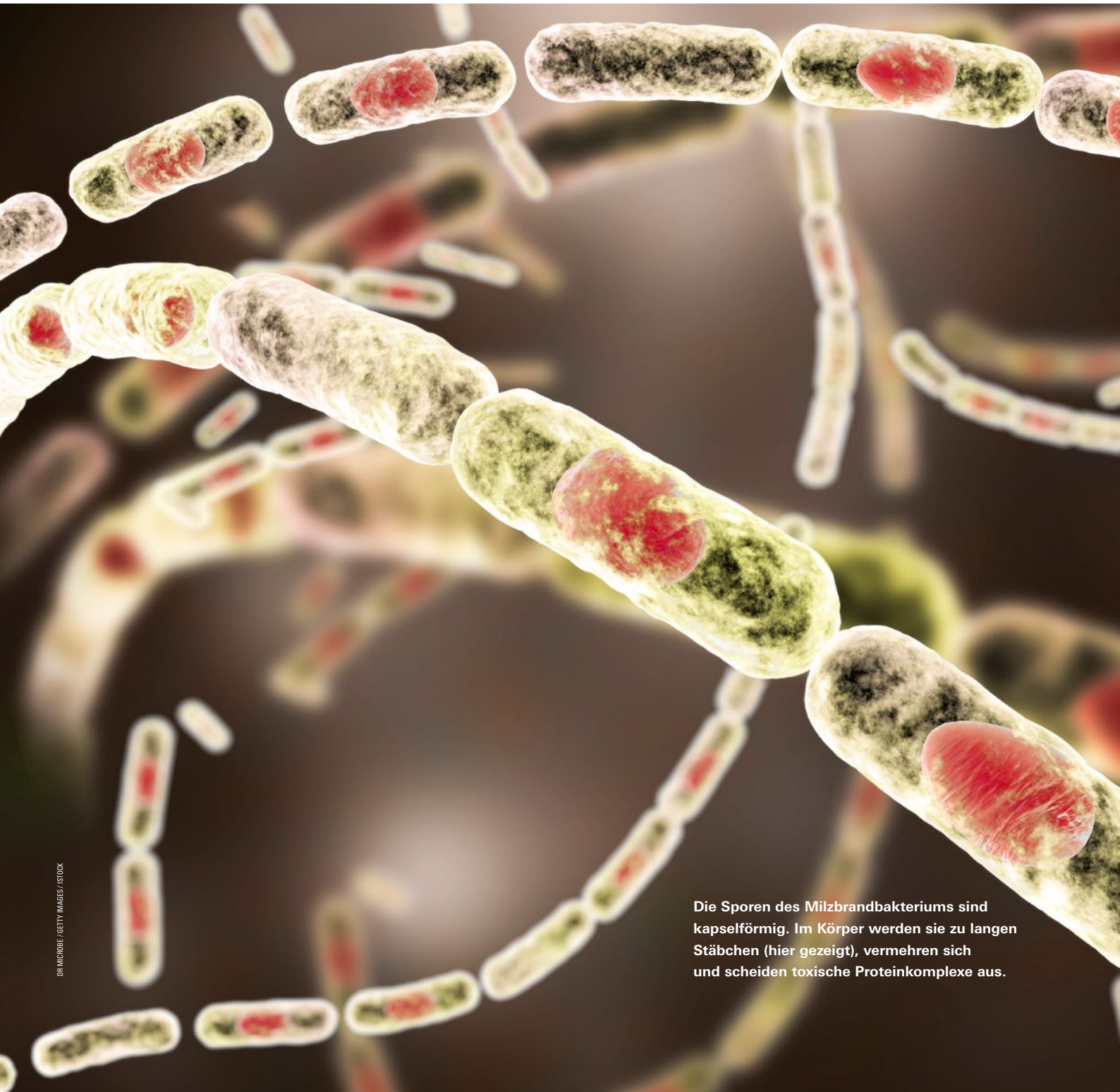
Die Sowjetunion räumte letztlich ein, dass es in Swerdlowsk einen Milzbrandausbruch gegeben hatte. Offizielle Stellen stritten jedoch ab, dass der Militärapparat etwas

damit zu tun hatte. Die wahre Ursache der Tragödie sei ein gastrointestinaler Milzbrand gewesen, ausgelöst durch die Schlachtung und den Verzehr von Tieren, die mit natürlich vorkommenden Sporen infiziert gewesen seien. Die Behauptung wurde später widerlegt, als internationale Experten die Gelegenheit hatten, von Pathologen vor Ort gesicherte Autopsieproben zu untersuchen.

Im Jahr 1992 gab der damalige russische Präsident Boris Jelzin schließlich zu, dass die frühere Sowjetunion ein großes Programm zur Erforschung und Produktion von biowaffentauglichen Substanzen unterhalten hatte. Jelzin versicherte, den sofortigen Abbruch des Programms ange-

ordnet zu haben. Mittlerweile frei gegebene Dokumente zeigen aber, dass dies nur die halbe Wahrheit war: Demnach setzte das russische Militär seine Biowaffenforschung fort – und verheimlichte das vor der zivilen Staatsführung.

Auf jeden Fall änderte sich die Politik wieder, als Wladimir Putin 1999 Präsident wurde. Seine Regierung blieb bei der Aussage aus Sowjetzeiten, dass es auf russischem Boden niemals ein offensives Biowaffenprogramm gegeben habe. Jedwede Forschung auf diesem Gebiet ziele allein auf den Schutz vor biologischen Angriffen und nicht darauf, selbst welche durchzuführen. Eine Aussage, die im Einklang mit der Biowaffenkonvention steht.



Die Sporen des Milzbrandbakteriums sind kapselförmig. Im Körper werden sie zu langen Stäbchen (hier gezeigt), vermehren sich und scheiden toxische Proteinkomplexe aus.

Heute versucht ein neu erstarktes Russland seinen Einfluss in der Weltpolitik zu vergrößern. Vor diesem Hintergrund finden wir es wichtig, die Lektion aus Swerdlowsk nicht zu vergessen. So haben Untersuchungen von uns und anderen Forschern gezeigt, dass es für ein Land oder eine Terrororganisation nicht besonders schwierig ist, ein Biowaffenprogramm im Verborgenen aufzubauen, zumal dafür bereits ein Minimum an bioindustrieller Infrastruktur ausreicht. Die USA haben ihr eigenes Biowaffenprogramm Anfang der 1970er Jahre aufgegeben. Dennoch drängt die Regierung nicht mit dem nötigen Nachdruck darauf, dass andere Nationen dies auch tun.

Einst galt Milzbrand als eine Krankheit von Hirten, Webern und Gerbern

Milzbrand war schon lange bekannt, bevor Militärstrategen Anfang des 20. Jahrhunderts das Potenzial seiner Pathogene als Waffe entdeckten. Zuvor galt die Krankheit als Problem von Hirten, Webern und Gerbern. In den 1870er Jahren entdeckte der deutsche Mikrobiologe und spätere Nobelpreisträger Robert Koch (1843–1910), dass der Keim *B. anthracis* das Leiden hervorruft. Wie Koch zeigte, verwandeln die Bakterien sich in längliche Stäbchen, wenn sie sich in einer Umgebung befinden, in der sie schnell wachsen können – beispielsweise im feuchten, nährstoffreichen Inneren von Tieren. Im Trockenen hingegen entwickeln die Mikroben harte, nahezu unverwüsthliche Sporen, die Jahrzehnte und manchmal sogar Jahrhunderte in der Umwelt überdauern können und dabei ihr tödliches Potenzial bewahren. Als Koch gesunden Mäusen die Sporen injizierte, verwandelten diese sich in infektiöse Bazillen, die Milzbrand auslösten und die Tiere töteten.

Heute sind sich Experten sicher: Es ist sehr wichtig, Milzbrand frühzeitig zu erkennen und zu behandeln. Der französische Wissenschaftler Louis Pasteur (1822–1895) hat einige Jahre nach Kochs Entdeckung sogar einen Impfstoff dagegen entwickelt. Ohne ihn hängt die Todesrate maßgeblich von der Eintrittspforte des Erregers ab:

Gelangen auch nur wenige Sporen in die Lunge, verläuft die Infektion ohne Behandlung immer tödlich. Die Mortalität bei unbehandelten Hautinfektionen beträgt hingegen nur zehn Prozent, bei gastrointestinalem Milzbrand ist sie nicht bekannt, dürfte aber zwischen 25 und 60 Prozent liegen. Mit Blick auf seine Eigenschaften liegt es auf der Hand, dass sich der Milzbranderreger in Form von trocken und kühl gelagerten Sporen zur unkonventionellen Kriegsführung eignet. Somit können Militärs sie im industriellen Maßstab herstellen und irgendwann gegen feindliche Soldaten auf dem Schlachtfeld einsetzen. Ein strategischer Nebeneffekt: Auf kontaminierten Böden dürfen jahrzehntelang keine Tiere grasen.

Für jeden, der eine Zivilbevölkerung in Angst und Schrecken versetzen will, bietet Lungenmilzbrand einen zusätzlichen Vorteil. Die Symptome zu Beginn – Fieber, Abgeschlagenheit und Muskelschmerzen – ähneln denen einer Grippe oder Lungenentzündung, was in betroffenen Regionen für große Unsicherheit sorgen würde. Erst einige Tage später leiden infizierte Patienten plötzlich unter Kurzatmigkeit. Auch werden ihre Lippen blau, und in der Brust sammelt sich Flüssigkeit. Zu diesem Zeitpunkt ist der Tod normalerweise unvermeidlich. In der Autopsie zeigen sich dann charakteristische innere Blutungen nahe der Lunge und rund um das Gehirn.

Ein schlichtes Missverständnis bei Wartungsarbeiten führte 1979 zur Katastrophe

Der Unfall ereignete sich am 2. April 1979 im Forschungsinstitut für Mikrobiologie auf dem Militärgelände Swerdlowsk-19. Bis heute hat kein Außenstehender den Komplex betreten. Dennoch haben wir im Lauf der vergangenen Jahrzehnte und insbesondere nach Auflösung der Sowjetunion den Hergang der Katastrophe rekonstruiert, Puzzlestück für Puzzlestück. Wir haben dazu zahlreiche Wissenschaftler, Ärzte und Techniker interviewt, die zum damaligen Zeitpunkt in der Stadt Swerdlowsk arbeiteten oder deren Kollegen am Forschungsinstitut tätig waren.

Auf Grundlage dieser Informationen glauben wir, dass das sowjetische Biowaffenprogramm bereits 1928 startete. Auf seinem Höhepunkt in den späten 1980er Jahren waren dort etwa 60 000 Menschen beschäftigt. *B. anthracis* entwickelte sich rasch zu einem der wichtigsten Pathogene in dem Programm. Frühe Forschungsergebnisse hatten gezeigt, dass sich das Bakterium leicht waffentauglich machen lässt. 1949 entstand dann nahe Swerdlowsk, am Standort einer alten Infanterieschule, das erste Militärlabor. Es lag zunächst ein ganzes Stück außerhalb der Siedlung. 15 Jahre später hatte sich die Stadt rund um die geheime Anlage ausgedehnt. Trotz der Nähe zur Zivilbevölkerung entschied das Verteidigungsministerium in den 1960er Jahren, die Anlage auszubauen, so dass dort Arbeiter Tonnen an *B.-anthracis*-Sporen produzieren konnten, die Voraussetzung für ein robustes Biowaffenprogramm. Wie wir inzwischen wissen, gab es Mitte der 1950er Jahre im US-Bundesstaat Arkansas vergleichbare Produktionsstätten, die man aber später zerstörte.

Die Planer der sowjetischen Anlage statteten letztlich ein vierstöckiges Gebäude in Swerdlowsk mit großen

AUF EINEN BLICK DIE LEHREN AUS SWERDLOWSK

- 1** 1979 starben in der Sowjetunion dutzende Menschen an Milzbrand. Heute ist klar, dass der Ausbruch auf einen Unfall in einer Biowaffenforschungsstätte zurückging.
- 2** Das Milzbrandbakterium *Bacillus anthracis* eignet sich bestens für den Einsatz in unkonventionellen Waffen, da es feine, dauerhafte Sporen bilden kann, deren Einatmung tödlich ist.
- 3** Teile des früheren sowjetischen Biowaffenprogramms wurden in den 1990er Jahren eingestellt. Experten befürchten jedoch, dass Russland das Biowaffenprogramm wiederbelebt hat.

Bioreaktoren für die Anzucht von *B. anthracis* aus. Außerdem installierten sie Trocknungsanlagen, in denen die Bakterien Sporen entwickelten. Dies sind übliche Maßnahmen, wenn man lebende Organismen in industriellem Maßstab herstellen will. Neu waren die nächsten Schritte. Die Wissenschaftler mischten bestimmte Chemikalien – wir wissen noch immer nicht, welche – zu den Sporen, um zu verhindern, dass diese verklumpen und damit Brocken bilden können, die für die Inhalation zu groß sind. Anschließend trockneten die Techniker den Mix und zermahlten ihn zu einem feinen Pulver, das tief in die Lunge eindringen kann. Das tödliche Endprodukt kam schließlich zur Lagerung in Edeltanks.

Das Trocknen und Mahlen sorgte unter den damaligen Bedingungen zwangsläufig dafür, dass sich tödliche Sporen im gesamten Gebäude verteilten. Die Arbeiter trugen zu ihrer eigenen Sicherheit dicke Schutzanzüge, und die Luft in den Räumen musste erst gereinigt werden, bevor sie nach außen gelangen durfte. Der Aufwand dafür war überschaubar. So passierten die kontaminierten Luftströme der Trocknungsanlagen eine Reihe von Abluftfiltern. Diese hielten größere Partikel wie Staub zurück und entfernten winzige Teilchen wie die Sporen des Milzbrand-erregers.

Doch am 2. April 1979 kam es anscheinend zu einem Missverständnis. Das Team der Tagschicht entfernte zu Wartungszwecken zwei der Filter. Zu dem Zeitpunkt waren die Trocknungsanlagen abgeschaltet, und die Arbeiter wollten überprüfen, wie leistungsfähig die Filter noch waren. Sie behaupteten später, eine Anweisung im Betriebszentrum hinterlassen zu haben, der zufolge man die entsprechenden Trockner nicht benutzen sollte. Nur erfuhr die Nachtschicht aus irgendwelchen Gründen nichts davon und startete bei Schichtbeginn den üblichen Produktions- und Trocknungszyklus.

So nahm die Katastrophe ihren Lauf. Da einige der hintereinandergeschalteten Filter fehlten, verstopfte einer der nächsten. Irgendwann platzte er, wodurch der Druck in der Lüftungsanlage schlagartig anstieg. Das fiel einem der Arbeiter zwar sofort auf, und die 30 oder 40 Mitglieder der Nachtschicht beeilten sich, die Anlage herunterzufahren. Aber das Produktionsverfahren war zu komplex, um es von einer Minute auf die andere zu stoppen. Das Abschalten dauerte ganze drei Stunden, in denen eine ungeheure Anzahl an Sporen ungehindert durch den 25 Meter hohen Abluftschacht ins Freie gepustet wurde.

Nachdem die Truppe realisiert hatte, was passiert war, erstattete ihr Schichtleiter dem Befehlshaber von Swerdlowsk-19 Bericht. General V. V. Mikhaylov informierte das Verteidigungsministerium in Moskau. Dieses wiederum trug dem General auf, Stillschweigen zu bewahren. Der KGB konfiszierte später alle Krankenakten und Autopsieberichte. So weiß heute niemand, wie viele Sporen während des Unfalls entwichen sind. Experten schätzen, dass es sich um ein halbes bis ein Kilogramm kontaminiertes Material handelte, in dem sich zwischen ein paar Milligramm und ein Gramm an Sporen befanden. Unter der Annahme, dass die Erreger voll lebensfähig waren und weiträumig niedergingen, hätten wohl mehrere hundert-



Kolonien von *B. anthracis*, gewachsen auf einer Agarplatte im Labor.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC)

tausend ahnungslose Menschen an Milzbrand erkranken können – schließlich hatte Swerdlowsk damals 1,2 Millionen Einwohner. Jedoch hatte die Stadt großes Glück: Der Wind blies die Sporen vom Zentrum weg über eher spärlich bewohnte Gebiete.

Autopsieproben der Verstorbenen halfen endlich, den Keim einzuordnen

Erst nach und nach haben wir mehr über die Biologie des *B. anthracis*-Stamms gelernt, der für die Tragödie in Swerdlowsk verantwortlich war. In den 1990er Jahren konnte etwa ein Expertenteam um Matthew Meselson von der Harvard University zweimal medizinische und epidemiologische Untersuchungen in der Stadt durchführen. Eine andere wichtige Datenbasis sind Autopsieproben, die russische Ärzte während der kooperativeren 1990er Jahre internationalen Forscherteams zur Verfügung stellten. Dank Fortschritten in der Biotechnologie konnten westliche Wissenschaftler diese Proben mittlerweile eingehend analysieren.

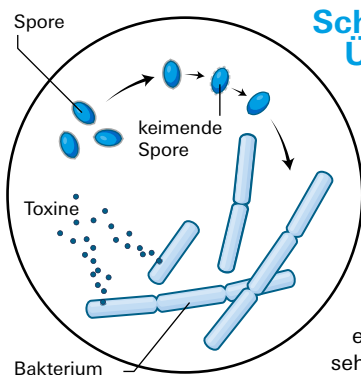
Einer von uns (Walker) hat Meselson auf seiner ersten Reise begleitet und sprach bei dieser Gelegenheit auch mit in der Region ansässigen Pathologen. Unter ihnen war Lev Grinberg. Er brachte Autopsieproben (sicher fixiert in Formalin und eingebettet in Paraffin) von Opfern zur weiteren Untersuchung in die USA. Ein anderer von uns (Keim) arbeitete im Los Alamos National Laboratory mit Paul Jackson zusammen, um die DNA aus diesen Proben zu extrahieren. Wir konnten bestätigen, dass die Patienten an Milzbrand gestorben waren. Wie spätere Forschungsergebnisse anderer Fachleute ergaben, weist der Swerdlowsk-Stamm, auch bekannt als *B. anthracis* 836, eine einzigartige genetische Signatur auf.

Mit dem molekularen Fingerabdruck in Händen können Experten nun die Ausbreitung des Stamms in der Welt verfolgen. So erkannten Wissenschaftler um Paul Keim im Jahr 2001, dass der Swerdlowsk-Stamm nicht bei den Anthrax-Attacken in den USA, bei denen Briefe mit Milzbrandsporen fünf Menschen töteten, verwendet worden war. Zu jenem Zeitpunkt waren allerdings nur kleine Bereiche des Genoms von *Bacillus anthracis* 836 bekannt und noch viele Fragen offen.

Erst 2015 konnte ein Team um Keim aus den Autopsieproben zweier Swerdlowsk-Milzbrandopfer die gesamte Genomsequenz jenes Bakterienstamms nachbilden. Die

Drei Formen von Milzbrand

Bacillus anthracis, der Milzbranderreger, löst je nach Eintrittspforte in den Körper unterschiedliche Krankheitsbilder aus. Sobald Bakterien in die Blutbahn gelangen, kann die Infektion rasch tödlich enden. Der Erreger ist zwar weltweit in der Natur verbreitet, eignet sich wegen seiner Merkmale aber auch als Biowaffe: Unter anderem bildet das Bakterium dauerhafte Sporen, die chemisch behandelt und so klein gemahlen werden können, dass sie tief in die Lungen eindringen. Dort können sie die gefährlichste Form des Milzbrands auslösen.



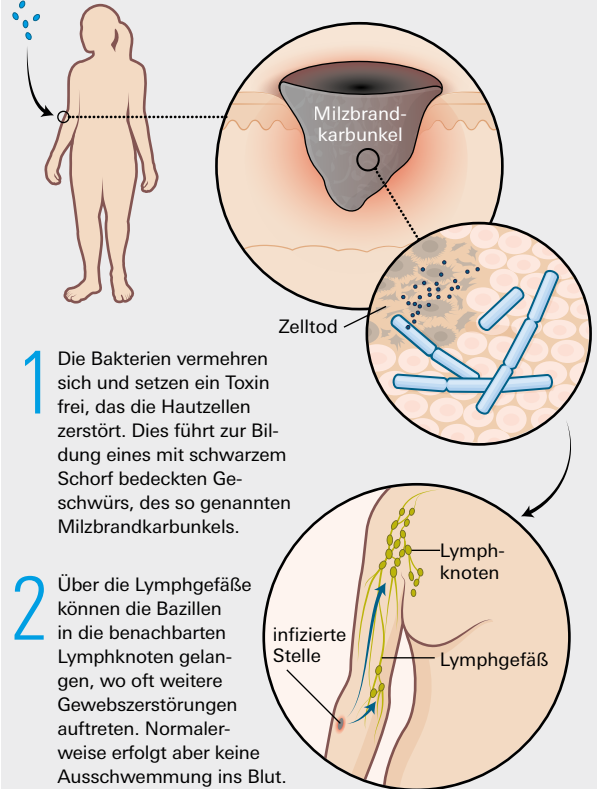
Scheintod als Überlebenstrick

Das Milzbrandbakterium kommt in zwei verschiedenen Formen vor: entweder als stäbchenförmiges Bakterium, das sich vermehren und gewebsschädigende Toxine ausschütten kann, oder als widerstandsfähige Spore, die in einem »scheintoten« Zustand sehr lange lebensfähig bleibt.

Sporen bilden sich immer dann, wenn die äußeren Bedingungen wie zu große Trockenheit das Überleben der Bakterien beeinträchtigen könnten. Sind die Bedingungen günstig – wie im feuchten, nährstoffreichen Inneren eines Körpers –, können die Sporen wieder keimen und viele infektiöse Bakterien freisetzen.

Hautmilzbrand

Bei der seit Jahrhunderten und bis heute am häufigsten vorkommenden und am seltensten tödlich verlaufenden Form von Milzbrand infiziert *B. anthracis* die Haut; es bildet sich eine Läsion, die an einen Spinnenbiss erinnert.



1 Die Bakterien vermehren sich und setzen ein Toxin frei, das die Hautzellen zerstört. Dies führt zur Bildung eines mit schwarzem Schorf bedeckten Geschwürs, des so genannten Milzbrandkarbunkels.

2 Über die Lymphgefäße können die Bazillen in die benachbarten Lymphknoten gelangen, wo oft weitere Gewebszerstörungen auftreten. Normalerweise erfolgt aber keine Ausschwemmung ins Blut.

beiden Bakterienproben erwiesen sich als identisch und stimmten zudem mit *B. anthracis* 836 überein. Wie die 2016 veröffentlichte Genanalyse zeigte, gehört der Stamm zur bekannten »Trans-Eurasia«-Gruppe. Außerdem fanden die Autoren keine Hinweise auf eine gentechnische Modifikation, die etwa die Virulenz oder Antibiotikaresistenz verstärkt oder einen Impfschutz vereitelt hätte. Die Wissenschaftler des sowjetischen Militärs waren also auf ein Bakterium gestoßen, das bereits von Natur aus tödlich genug war, um als Waffe in Frage zu kommen.

Insgesamt mahnt das Debakel von Swerdlowsk, dass man bei einer Milzbrandattacke die Opferzahlen am ehes-

ten gering halten kann, wenn man bereits aktiv wird, bevor sich die Sporen verteilt haben. Trotz der Milliarden US-Dollar, welche die US-amerikanische Regierung in die Forschung zum Schutz vor Biowaffen investiert, fehlt unserer Meinung nach eine einheitliche und umfassende Strategie für den Umgang mit biologischen Bedrohungen. Der einzige in den USA verfügbare Impfstoff, der nachweislich nach Kontakt mit *B. anthracis* eine Erkrankung verhindern kann, muss über mehrere Monate mehrfach verabreicht werden und erfordert danach regelmäßige Auffrischungsimpfungen.

Derzeit weiß niemand, ob es noch Bestände aus der *B.-anthracis*-Produktion der ehemaligen Sowjetunion gibt. Nach einer Vereinbarung zwischen den USA, Usbekistan und Kasachstan vernichtete man 30 Tonnen sporenhaltiges Material. In den 1990er Jahren führten Experten in den ehemaligen Sowjetrepubliken einige Produktionsstätten einem zivilen Nutzen zu, unter den wachsamen Augen internationaler Wissenschaftler. Aber keine ausländische Expertengruppe durfte die drei russischen Institute des Verteidigungsministeriums oder die fünf zivilen »Seuchenschutz«-Institute besuchen oder gar inspizieren,



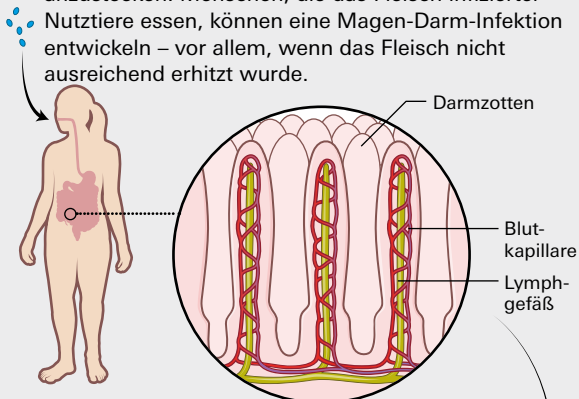
FOTOLIA / DECADE3D

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

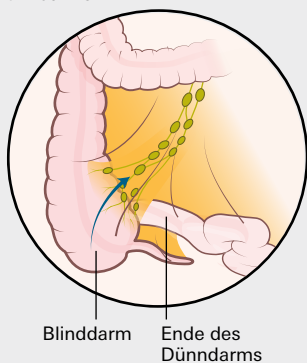
Magen- oder Darmmilzbrand

Herdentiere laufen besonders große Gefahr, sich anzustecken. Menschen, die das Fleisch infizierter Nutztiere essen, können eine Magen-Darm-Infektion entwickeln – vor allem, wenn das Fleisch nicht ausreichend erhitzt wurde.

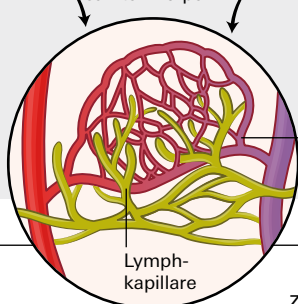


1 Der genaue Mechanismus ist zwar noch unklar, aber die Bakterien infizieren zunächst die Darmzotten am Ende des Dünndarms.

2 Manchmal gelangen die Bazillen in das Lymphgefäßsystem und verbreiten sich im Körper.

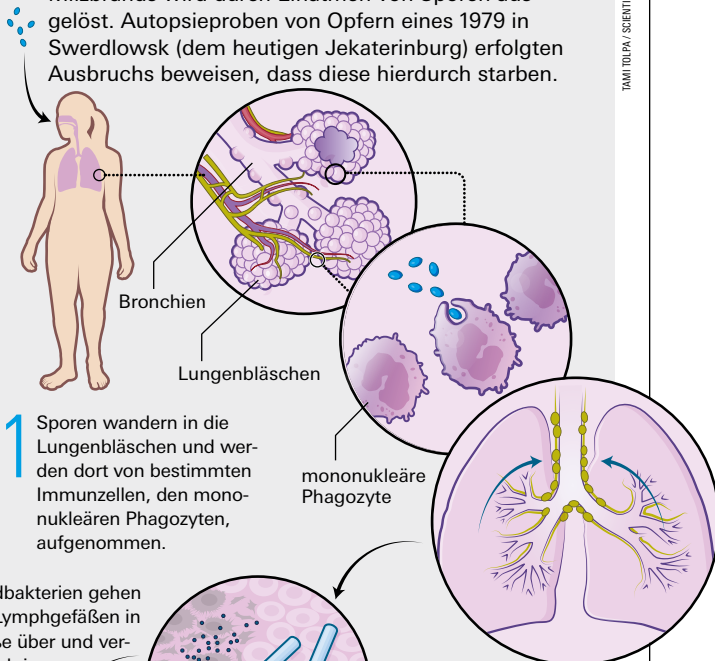


3 Milzbrandbakterien gehen von den Lymphgefäßen in Blutgefäße über und verbreiten sich im gesamten Körper.



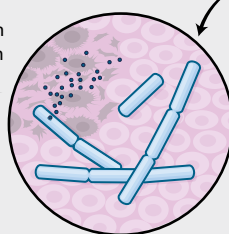
Lungenmilzbrand

Diese am häufigsten tödlich verlaufende Form des Milzbrands wird durch Einatmen von Sporen ausgelöst. Autopsieproben von Opfern eines 1979 in Swerdlowsk (dem heutigen Jekaterinburg) erfolgten Ausbruchs beweisen, dass diese hierdurch starben.



1 Sporen wandern in die Lungenbläschen und werden dort von bestimmten Immunzellen, den mononukleären Phagozyten, aufgenommen.

2 Sobald die Sporen in Lymphknoten des Brustraums gelangen, entwickeln sie sich zu (vegetativen) Bakterien, die sich vermehren und Toxine ausschütten.



die eine Rolle in der Biowaffenforschung und in der Produktion von biowaffentauglichen Substanzen spielten.

Seit 2003 hat das US-amerikanische Außenministerium neun Waffenkontrollberichte veröffentlicht. In allen wird Russland verdächtigt, das Biowaffenabkommen von 1972 zu verletzen. Die Berichte enthalten zwar keine Details, die diese Behauptung untermauern, denn wahrscheinlich handelt es sich um geheime Informationen. Doch es gibt genug weitere Gründe zur Besorgnis. So zeigen im Internet einsehbare Satellitenaufnahmen modernisierte Gebäude auf dem Gelände von Swerdlowsk-19. Auch sind dort neue Bauten hinzugekommen. Außerdem schrieb Wladimir Putin 2012 in einer russischen Zeitung, in Zukunft würden »auf neuen Prinzipien (Strahlentechnik, geophysikalischer Technik, Wellentechnik, Gentechnik, psychophysikalischer oder anderer Technik) beruhende Waffensysteme« entwickelt. Der russische Verteidigungsminister verkündete später, sein Ressort mache hinsichtlich dieser Ziele Fortschritte. In diesem Zusammenhang kann man auch sehen, dass Putin am 1. Januar 2015 die fast 25-jährige Partnerschaft zwischen den USA und Russland

zur aktiven Demontage nuklearer Bestände auslaufen ließ.

Die Besorgnis erregenden öffentlichen Signale hätten die letzten US-Administrationen eigentlich dazu veranlassen sollen, die russische Regierung mit einem möglichen Verstoß gegen das Biowaffenabkommen zu konfrontieren. Soweit wir das beurteilen können, ist dieser Schritt ausgeblieben. Auch die aktuelle US-Regierung scheint keine entsprechende Rüge zu planen. Unsere Befürchtung ist, dass man Russland damit quasi grünes Licht für die Entwicklung fortschrittlicher Biowaffen gibt. Darauf dürften viele Länder auf der Erde schlecht vorbereitet sein. ◀

QUELLEN

Boddie, C. et al.: Assessing the Bioweapons Threat. In: Science 349, S. 792–793, 2015

Centers for Disease Control and Prevention: A History of Anthrax. Online-Veröffentlichung 15. August 2016 www.cdc.gov/anthrax/resources/history

Leitenberg, M., Zilinskas, R.A.: The Soviet Biological Weapons Program: A History. Harvard University Press, 2012

PHYSIK AUF DER JAGD NACH ANTIMATERIE

Im Schatten des Large Hadron Collider wetteifern mehrere Experimente darum, erste Indizien für eine Physik jenseits des Standardmodells zu entdecken.



Elizabeth Gibney ist Physikjournalistin des Wissenschaftsmagazins »Nature« in London.

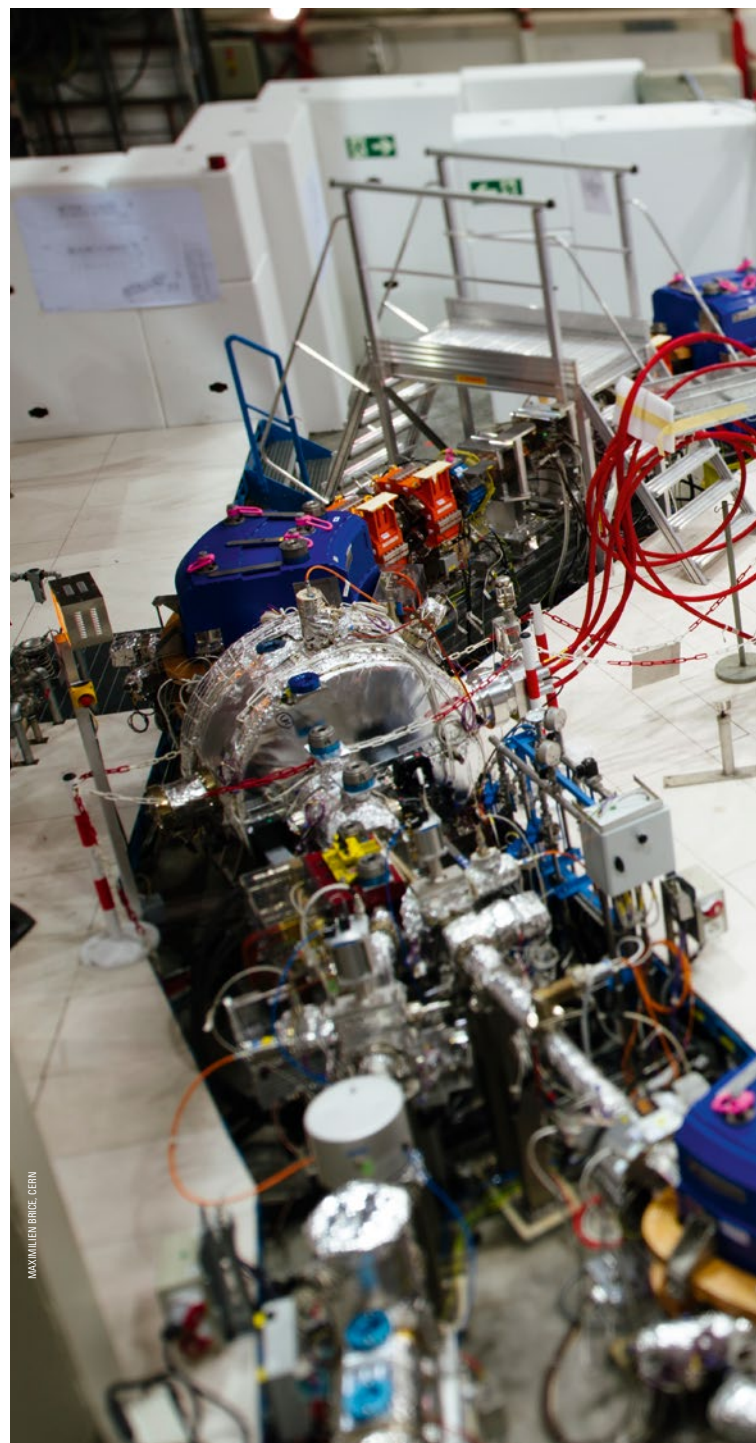
» spektrum.de/artikel/1513359

Ein hoher Hangar der Europäischen Kernforschungsorganisation CERN bei Genf birgt sechs Anlagen, die mit unterschiedlichen Methoden das Wesen einer der am schwersten fassbaren Substanzen im Universum aufklären sollen. Die Experimente liegen nur Meter voneinander entfernt und manchmal sogar übereinander: Zwei Strahlträger überkreuzen sich wie Rolltreppen im Einkaufszentrum, und tonnenschwere Betonblöcke hängen bedrohlich über den Köpfen.

»Wir haben einander immer im Blick«, betont Physiker Michael Doser; er leitet das Experiment AEGIS und hofft damit als Erster zu entdecken, wie Antimaterie – das seltene Spiegelbild normaler Materie – auf die Gravitation reagiert.

Doser und seine Wettbewerber müssen miteinander auf engem Raum zurechtkommen. Das CERN besitzt die weltweit einzige Quelle von Antiprotonen, das heißt von Teilchen, die sich wie Protonen verhalten, bis auf entgegengesetzte Werte für ihre Ladung. Im Hangar liegt der Antiproton Decelerator (Antiprotonen-Entschleuniger), ein Speicherring mit 188 Meter Umfang. Ihn speisen dieselben Beschleuniger wie seinen viel größeren und berühmteren Bruder, den Large Hadron Collider (LHC). Antiprotonen treten mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in den Decelerator ein; er bremst die Teilchen ab und liefert einen Antiprotonenstrom, den die sechs Experimente abwechselnd anzapfen können. All das muss vorsichtig geschehen, denn sobald die Antiteilchen auf Materie stoßen, zerstrahlen sie zu purer Energie.

Seit Jahrzehnten versuchen die Forscher möglichst viele Antiprotonen zu erzeugen und damit gebildete Antiwasserstoffatome so lange wie möglich festzuhalten. In



MAXIMILIEN BRICE / CERN

den letzten Jahren wurden dabei rapide Fortschritte erzielt: Man vermag nun wirklich Antimaterie zu beobachten und deren Eigenschaften und interne Strukturen immer präziser zu messen. Jeffrey Hangst, der das Experiment ALPHA leitet, kann mit Antiwasserstoff im Prinzip dasselbe anstellen wie mit Wasserstoff. »Auf diese Phase habe ich ein Vierteljahrhundert hingearbeitet«, meint er stolz.

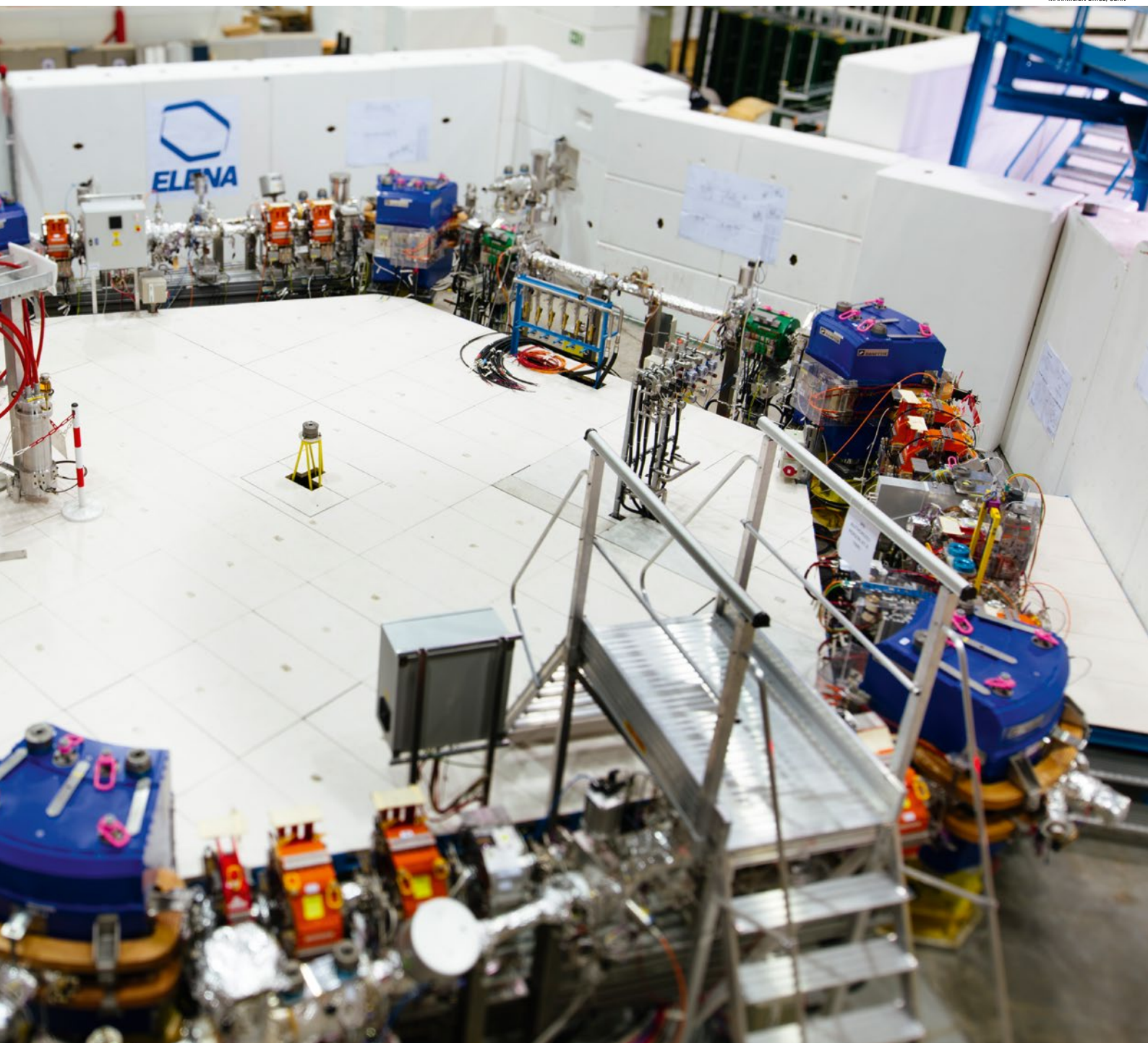
Von den Experimenten hängt viel ab: Schon eine winzige Differenz zwischen den Eigenschaften von Materie und Antimaterie würde erklären, warum überhaupt etwas existiert. Nach allem, was Physiker wissen, sollten im frühen Universum gleiche Mengen von Materie und Anti-

materie entstanden sein – und hätten einander sofort wieder vernichtet. Das geschah offensichtlich nicht. Die Ursache des fundamentalen Ungleichgewichts bleibt eines der größten physikalischen Geheimnisse.

Die CERN-Experimente werden das Rätsel wahrscheinlich nicht so bald lösen. Bislang erweist sich die Antimaterie als völlig identisch mit ihrer Zwillingsschwester, und viele Physiker finden das ganz in Ordnung, denn jeder Unterschied würde die Grundlagen der modernen Physik erschüttern. Doch die sechs Antimaterieanlagen, die beim CERN eine 30 Jahre lange Forschungstradition fortsetzen, wecken neue Hoffnungen, seit der LHC vergeblich nach

2016 wurde der im Umfang 30 Meter große Entschleunigerring ELENA fertig gestellt. Seit August 2017 laufen die ersten Tests mit Antiprotonen; Strahlen aus den Antiteilchen werden hier für hochpräzise Experimente weiter abgebremst.

MAXIMILIEN BRICE, CERN



Teilchen jagt, die das Antimaterieparadox erklären könnten. Außerdem haben die raschen Fortschritte beim Manipulieren von Antimaterie den Teams eine Aufrüstung der Antiprotonenfabrik beschert – einen hochmodernen Decelerator, der seit August 2017 allmählich den Betrieb aufnimmt und schließlich bis zu 100-mal mehr Teilchen bereitstellen soll.

Mit Positronen und Antiprotonen zum Antiwasserstoff

Die Antimateriephysik begann 1928 mit der vom britischen Physiker Paul Dirac (1902–1984) aufgestellten und nach ihm benannten Gleichung für ein Elektron, das sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Wie Dirac erkannte, besitzt seine Gleichung stets zwei Lösungen, eine positive und eine negative. Diesen mathematischen Umstand deutete er später als Hinweis auf die Existenz eines Antielektrons, heute Positron genannt, und postulierte ganz allgemein, zu jedem Teilchen müsse es ein Gegenstück aus Antimaterie geben.

Der US-amerikanische Experimentalphysiker Carl David Anderson (1905–1991) wies 1932 die Existenz des Positrons nach, als er ein Teilchen entdeckte, das dem Elektron glich, aber in einem Magnetfeld in entgegengesetzter Richtung abgelenkt wurde. Wie die Physiker bald erkannten, entstehen Positronen bei Teilchenkollisionen recht häufig, indem sich ein Teil der Stoßenergie in Materie-Antimaterie-Paare verwandelt. Ab 1950 produzierten Forscher bei viel höheren Energien durch entsprechende Paarerzeugung auch Antiprotonen. Aber es dauerte weitere Jahrzehnte, bis es gelang, Antiprotonen und Positronen zu Antiwasserstoffatomen zu vereinen.

Positronen hervorzubringen ist relativ einfach. Sie entstehen bei gewissen radioaktiven Zerfällen und lassen sich mit elektrischen und magnetischen Feldern gut einfangen. Um die viel massereicheren Antiprotonen zu gewinnen, schießt man hochenergetische Protonen auf ein dichtes Metall, doch die aus solchen Kollisionen hervorgehenden

Partikel bewegen sich so schnell, dass eine elektromagnetische Falle sie nicht festzuhalten vermag.

Also gilt es, die Teilchen stark abzubremsen, oder fachsprachlich: zu kühlen. Beim CERN begann man 1982, Antimaterie mit dem Low Energy Antiproton Ring (LEAR) zu bremsen und zu speichern. Erst 1995, ein Jahr vor LEARs Stilllegung, glückte damit die Erzeugung der ersten Antiwasserstoffatome.

Als LEARs Nachfolger nahm 2000 der Antiproton Decelerator den Betrieb auf. Wie sein Vorgänger fokussiert das Gerät die Antiteilchen zunächst mit Magneten und verlangsamt sie anschließend mit starken elektrischen Feldern. Zudem kühlen Elektronenstrahlen die Antiprotonen durch Energieaustausch – ohne sie dabei zu berühren, denn beide Teilchentypen sind negativ geladen und stoßen einander ab. So werden die Antiprotonen auf ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit verlangsamt, doch das ist immer noch viel zu viel. Darum muss jedes der sechs Experimente die Partikel weiter abbremsen und einfangen.

Unterwegs gibt es starke Verluste. Jeder Schuss mit 30 Millionen Antiprotonen pro Experiment beginnt mit zwölf Billionen Protonen, die auf ein Target treffen. Bis beispielsweise Hangsts ALPHA-Experiment seine Antiprotonen dann so weit gebremst hat, dass sie mit Positronen Antiwasserstoff bilden können, bleiben bloß 30 Teilchen übrig; der Rest entweicht, wurde vernichtet oder ist zu schnell. Mit so wenigen Antiatomen zu experimentieren, ist ungeheuer mühsam, betont Hangst.

Harte Konkurrenz im Wettstreit benachbarter Experimente

Die Forschung beim CERN wird um 2025 Konkurrenz bekommen: In Darmstadt entsteht für mehr als eine Milliarde Euro die internationale Anlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Anlage zur Forschung mit Antiprotonen und Ionen). Vorläufig hat das CERN das Monopol für langsame Antiprotonen. Derzeit laufen dort fünf Experimente; ein sechstes namens GBAR ist fast fertig. Jedes arbeitet nach einem eigenen Prinzip, und alle versuchen im Wettstreit die Messwerte unabhängig voneinander zu bestätigen (siehe »Antimaterie auf dem Prüfstand«, rechts).

Die Anlagen müssen sich einen Strahl teilen. Darum bekommen in jeder 14-Tages-Periode nur drei Experimente Strahlzeit, wobei sie sich in Acht-Stunden-Schichten abwechseln. Damit die empfindlichen Messungen nicht ruiniert werden, garantieren wöchentliche Koordinations-treffen, dass jeder weiß, wann der Magnet des Nachbarn in Betrieb ist. Trotz der Nachbarschaft erfahren die Teams von Erfolgen der Konkurrenz meist erst durch deren Veröffentlichung. »Der Wettbewerb motiviert uns«, erklärt Hangst.

Heute untersucht nur eines der sechs Experimente – BASE – unmittelbar die aus dem Decelerator strömenden Antiprotonen. BASE hält die Teilchen in einer so genannten Penning-Falle fest. Darin fixieren elektrische Felder die Partikel vertikal, und Magnetfelder zwingen sie auf eine Kreisbahn. Das Team kann Antiprotonen mehr als ein Jahr lang speichern und das Verhältnis von Ladung zu Masse anhand der Kreisbewegung in der Falle äußerst exakt messen. Mit einem komplizierten Verfahren lässt sich auch

AUF EINEN BLICK FALLEN FÜR FLÜCHTIGE SONDERLINGE

- 1 Beim Teilchenphysiklabor CERN suchen mehrere Experimente nach subtilen Unterschieden zwischen Antimaterie und gewöhnlicher Materie. Jede Abweichung wäre ein Hinweis auf unbekannte Physik.
- 2 Antimaterie lässt sich äußerst schwierig einfangen und manipulieren. Erst in den letzten Jahrzehnten wurden die Versuchsanordnungen ausgefeilt genug für Präzisionsmessungen.
- 3 Den bisherigen Daten zufolge verhalten sich beide Materieformen identisch. Dank verbesserter Apparaturen bricht jedoch gerade eine neue Ära hochgenauer Versuche an.

Antimaterie auf dem Prüfstand

Bei sechs Experimenten am Teilchenphysiklabor CERN hoffen die Wissenschaftler auf subtile Unterschiede zwischen Antimaterie und gewöhnlicher Materie. Alle Apparate liegen innerhalb des ringförmigen Antiproton Decelerator, der Antiprotonen auf brauchbare Geschwindigkeiten entschleunigt. Die Experimente bremsen die Teilchen weiter ab – beispielsweise, um sie mit Positronen zu Antiwasserstoff zu kombinieren.

Die Antimaterie

Antiproton

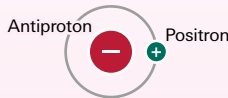
Das Antiteilchen des Protons entsteht bei hoch-energetischen Kollisionen und muss stark abgebremst werden.

Positron

Das Antiteilchen des Elektrons entsteht bei radioaktiven Zerfällen.

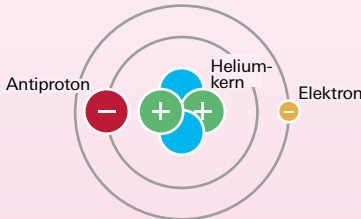
Antiwasserstoff

Ein Antiproton und ein Positron lassen sich zu Antiwasserstoff kombinieren.



Antiprotonisches Helium

Bei diesem exotischen Gebilde tritt im Heliumatom ein Antiproton an die Stelle eines Elektrons.



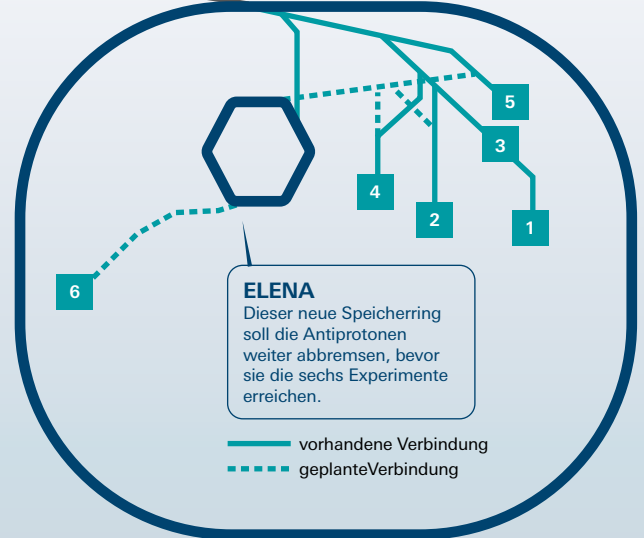
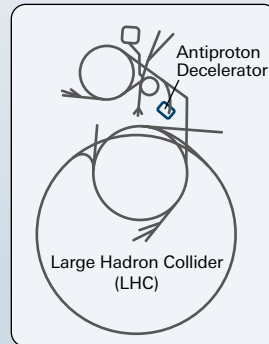
Die Entschleuniger

Antiproton Decelerator

Der 188 Meter lange Speicherring verlangsamt die eingespeisten Teilchen mit elektromagnetischen Feldern und Elektronenstrahlen binnen 100 Sekunden auf ein Zehntel ihrer Geschwindigkeit.

Antiprotonenquelle

Energieriche Protonen bombardieren ein Indium-Target und erzeugen Antiprotonen.



ELENA

Dieser neue Speicherring soll die Antiprotonen weiter abbremsen, bevor sie die sechs Experimente erreichen.

— vorhandene Verbindung
- - - geplante Verbindung

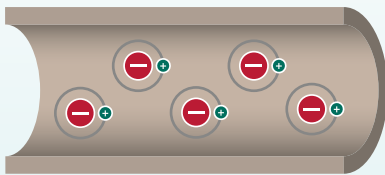
Die Experimente

1 ALPHA

Beginn: 2005

Untersuchte Eigenschaften: Ladung, Energieniveaus und Schwerebeschleunigung von Antiwasserstoff

Methode: Kombiniert Antiprotonen und Positronen in einer elektromagnetischen Falle zu Antiwasserstoff, der mit Lasern erforscht wird



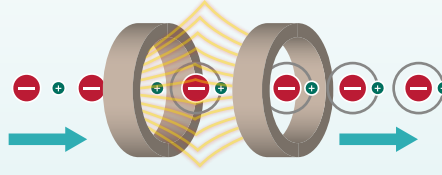
magnetische Falle

2 ASACUSA

Beginn: 2000

Untersuchte Eigenschaften: Massenverhältnis Antiproton/Elektron, Energieniveaus von Antiwasserstoff und antiprotonischem Helium

Methode: Bildet aus eingefangenen Antiatomen einen polarisierten Strahl, der mit Mikrowellen und Lasern erforscht wird

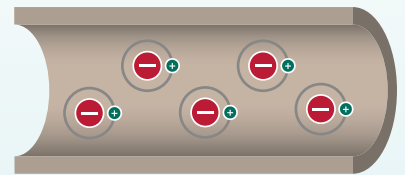


3 ATRAP

Beginn: 2000

Untersuchte Eigenschaften: Magnetisches Moment und Ladung-Masse-Verhältnis von Antiprotonen; Energieniveaus von Antiwasserstoff

Methode: Untersucht gefangene Antiprotonen sowie Antiwasserstoffatome, die durch Mischung langsamer Positronen mit Antiprotonen erzeugt werden

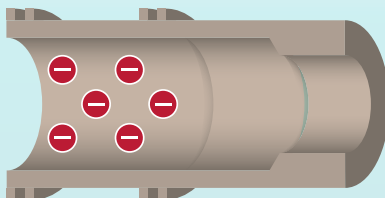


4 BASE

Beginn: 2014

Untersuchte Eigenschaften: Ladung-Masse-Verhältnis und magnetisches Moment von Antiprotonen

Methode: Speichert Antiprotonen in einem Behälter, beobachtet dann ihre Bahn in einer Falle oder transportiert sie zu mehreren Fallen, um verschiedene Eigenschaften zu messen

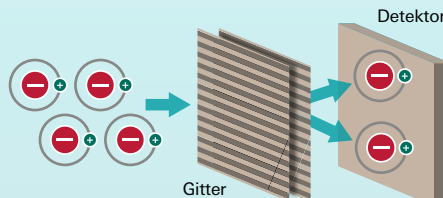


5 AEGIS

Beginn: 2015

Untersuchte Eigenschaften: Schwerebeschleunigung von Antiwasserstoffatomen

Methode: Beobachtet die Muster, die parallele Strahlen angeregter Antiwasserstoffatome beim Durchgang durch ein Gitter erzeugen

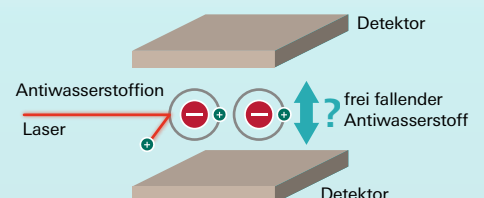


6 GBAR

Beginn: 2018 (geplant)

Untersuchte Eigenschaften: Schwerebeschleunigung von Antiwasserstoffatomen

Methode: Lasergekühlte Berylliumionen kühlen Antiwasserstoffionen, die zwei Positronen enthalten. Ein Laser entfernt ein Positron, und das Antiwasserstoffatom bewegt sich im freien Fall.





Im September 2016 montierten und überprüften Wissenschaftler zentrale Komponenten des neuen Antiprotonen-Entschleunigers ELENA.

das magnetische Moment des Antiprotons bestimmen, quasi dessen innerer Magnetismus. Dabei schickt man einzelne Teilchen schnell durch mehrere separate Fallen und misst ihr wechselndes Verhalten bei winzigen Frequenzänderungen eines äußeren Mikrowellenfelds. Teamleiter Stefan Ulmer, Physiker am RIKEN-Forschungszentrum in Wako (Japan), hat die Technik perfektioniert. »Das ist mir ein Herzensanliegen«, sagt er.

Die anderen CERN-Experimente erforschen Antiwasserstoff. Da er sich elektrisch neutral verhält, ist er immun gegen äußere elektrische Felder und somit kaum zu kontrollieren. Nur auf Grund seiner schwachen Magneteigenschaften lässt sich das Antiatom mit einer so genannten magnetischen Flasche bändigen. Damit die Flasche wirkt, müssen die Magnetfelder in ihrem Innern räumlich enorm variieren: um ein Tesla – damit hebt ein Schrottplatzmagnet ein ganzes Auto – pro Millimeter. Damit die Atome nicht trotzdem entweichen, werden sie auf 0,5 Kelvin gekühlt.

Die ersten Antiwasserstoffatome wurden mit schnellen Antiprotonen erzeugt und existierten nur 40 milliardstel Sekunden. 2002 entschleunigten zwei Experimente, ATRAP und ALPHAs Vorgänger ATHENA, erstmals die Antiprotonen so weit, dass nennenswerte Mengen von Antiwasserstoff entstanden – jeweils viele tausend Atome. Fast zehn Jahre später gelang der Durchbruch: Die Antiatome wurden minutenlang eingefangen. Seither haben die Teams Ladung und Masse bestimmt und mit Laserstrahlen Energieniveaus vermessen. 2016 berichtete ALPHA von hochpräzisen Tests des Übergangs vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand (siehe **Spektrum** Juli 2017, S. 30)

und im August 2017 von genauen Untersuchungen der Hyperfeinstruktur, der winzigen Energieverschiebungen, welche die Wechselwirkung zwischen Antiproton und Positron im Antiwasserstoff verursacht.

Auf diese Weise prüfen die CERN-Experimente, ob Materie und Antimaterie sich in irgendeiner Eigenschaft unterscheiden. In jedem Fall geht es darum, die verbliebenen Unsicherheiten zu reduzieren, erklärt der altgediente Antimaterieforscher Masaki Hori. Er leitet das ASACUSA-Experiment, das frei fliegende Antiatome ohne den störenden Einfluss von Fallen mit Lasern untersucht. 2016 gelang dem Team eine genaue Messung des Massenverhältnisses von Antiproton zu Elektron mit Hilfe exotischer Heliumatome, bei denen ein Antiproton die Stelle eines Elektrons einnimmt. Bisher zeigen alle Messungen keinerlei Unterschied zwischen Materie und Antimaterie. Jedes Resultat stellt die Lehrmeinung besser auf die Probe, dass sie wirklich exakte Spiegelbilder voneinander sind.

Auf der Suche nach dem kleinen Unterschied

Die Entdeckung der winzigsten Differenz zwischen Materie und Antimaterie wäre eine Sensation. Sie würde bedeuten, dass das fundamentale Prinzip der CPT-Symmetrie, die Invarianz bei Umkehr von Ladung, Parität und Zeit, nicht uneingeschränkt gilt. Gemäß der CPT-Invarianz gelten in einem spiegelbildlichen Universum, das von Antimaterie erfüllt ist und in dem die Zeit rückwärtsläuft, dieselben physikalischen Gesetze wie in unserer Welt. Die CPT-Symmetrie ist die Basis von Relativitätstheorie und Quantenfeldtheorie; ihr Bruch würde die gesamte Physik in Frage stellen. In der Tat sagen nur exotische Theorien

voraus, dass die Antimaterie-Experimente überhaupt etwas finden werden.

Deshalb betrachten die LHC-Physiker ihre Kollegen von nebenan »mit abwartender Skepsis«, meint Doser, der seit 30 Jahren Antimaterie erforscht. »Sie finden, unsere Arbeit macht Spaß und ist interessant, wird aber kaum etwas Neues ergeben.« Der CERN-Theoretiker Urs Wiedemann scheint diese Ansicht zu teilen. Die Fähigkeit der Experimente, Antimaterie zu manipulieren, sei »verblüffend«, und solche Tests der Theorie seien wichtig, aber »wenn Sie mich fragen, ob es einen guten physikalischen Grund gibt, dass bei immer größerer Genauigkeit etwas Neues herauskommt, würde ich mit Nein antworten«.

Allerdings hat auch der LHC bisher wenig zur Lösung des Antimaterierrätsels beigetragen. Wie Experimente seit den 1960er Jahren zeigen, bevorzugen manche physikalische Prozesse, etwa der Zerfall exotischer K-Mesonen in gewöhnlichere Teilchen, ein wenig die Erzeugung von Materie. LHC-Experimente suchen nach weiteren Phänomenen dieser Art sowie nach einem ganzen Zoo hypothetischer Teilchen, deren Verhalten im frühen Universum das enorme Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie im späteren Kosmos erklären könnte. Für die Vermutung gibt es eigentlich gute Gründe: Solche Teilchen postuliert die so genannte Supersymmetrie, eine Theorie, die das Standardmodell der Teilchenphysik auf plausible Weise ergänzt. Doch trotz jahrelanger Suche wurden keine supersymmetrischen Objekte gefunden, und die einfachsten und elegantesten Versionen der Supersymmetrie kommen kaum noch in Frage. »Heute sucht der LHC nach hypothetischen Teilchen, ohne dass eine Theorie dahintersteht. In gewisser Weise ist das die gleiche Situation wie bei uns«, meint Doser.

Die anspruchsvolle Suche nach einer unwahrscheinlichen, verkehrten Welt

Einige Teams wagen sich nun an die nächste große Herausforderung und messen die Schwerebeschleunigung von Antimaterie. Allgemein wird erwartet, dass sich Antimaterie unter Gravitation genauso verhält wie Materie, aber manche Theorien spekulieren über eine »negative Masse«: Antimaterie würde von Materie nicht gravitativ angezogen, sondern abgestoßen. Freilich wäre ein derartiges Universum nach Meinung der allermeisten Theoretiker von vornherein instabil. Um ein Antiatom im freien Fall zu messen, muss es extrem gekühlt werden. Schon die kleinste Wärmefluktuation überdeckt das Signal des fallenden Atoms. Auch kommen nur neutrale Partikel wie Antiwasserstoff in Frage, denn selbst weit entfernte Quellen elektromagnetischer Felder können auf geladene Teilchen größere Kräfte ausüben als die Gravitation.

Schon bald möchte Hangsts Gruppe mit einer vertikalen Version des ALPHA-Experiments definitiv klären, ob Antimaterie aufwärts- oder abwärtsfällt. »Natürlich hoffen wir die Ersten zu sein«, betont er, »sonst würden wir gar nicht damit anfangen.« Zwei weitere Experimente – Dosers AEGIS und der Neuzugang GBAR – machen dem Team Konkurrenz. AEGIS wird die Krümmung eines waagerechten Antiwasserstoffstrahls messen, während GBAR die

Antiatome im freien Fall auf einer vertikalen Strecke von 20 Zentimetern beobachten soll. Beide Experimente steigern die Präzision zusätzlich mittels Laserkühlung, welche die Temperatur der Antiatome auf wenige tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt senkt.

GBAR wird erstmals von ELENA profitieren, einem mehr als 20 Millionen Euro teuren Speicherring mit 30 Meter Durchmesser, der innerhalb des Antiprotonen-Entschleunigers liegt und die aus diesem austretenden Antiprotonen weiter bremsen soll. Letztlich wird ELENA für alle Experimente fast gleichzeitig schärfer fokussierte Strahlen liefern, deren Partikel um den Faktor sieben verlangsamt sind und sich entsprechend leichter einfangen lassen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



GENERALFMV / STOCK.ADOBE.COM

Seit die Teams Antimaterie routinemäßig manipulieren und vermessen können, interessieren sich immer mehr Physiker dafür, berichtet Hangst; sie steuern sogar Ideen für weitere Experimente bei. Umgekehrt richten sich die Gruppen an Außenstehende und bieten ihre Verfahren zur Anwendung auf andere Forschungsgebiete an. So arbeitet das GBAR-Team an einer tragbaren Falle, um Antiprotonen zu einem CERN-Experiment namens ISOLDE zu tragen, wo sie helfen können, exotische radioaktive Zerfälle zu analysieren.

Doser vermutet, dass es bis 2030 trotz aller technischen Hindernisse gelingen wird, mit Antimaterie fast so geschickt umzugehen wie mit normaler Materie – und beispielsweise Antiatomuhren herzustellen. »Um mich herum entstehen gerade haufenweise Ideen«, sagt er. »Hoffentlich darf ich noch lange beim CERN bleiben, denn meine Pläne reichen für die nächsten 30 Jahre.«

QUELLEN

Ahmadi, M. et al.: Observation of the Hyperfine Spectrum of Antihydrogen. In: Nature 548, S. 66–69, 2017

Ahmadi, M. et al.: Observation of the 1S–2S Transition in Trapped Antihydrogen. In: Nature 541, S. 506–510, 2017

Hori, M. et al.: Buffer-Gas Cooling of Antiprotonic Helium to 1.5 to 1.7 K, and Antiproton-to-Electron Mass Ratio. In: Science 354, S. 610–614, 2016

Nagahama, H. et al.: Sixfold Improved Single Particle Measurement of the Magnetic Moment of the Antiproton. In: Nature Communications 8, 14084, 2017

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 548, S. 20–23, 3. August 2017

Wissen verschenken und Freude bereiten – mit einem Geschenk-Abonnement!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

Print 12 Ausgaben, € 89,-
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 95,-



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

Print 12 Ausgaben, € 85,20
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

Print 12 Ausgaben, € 89,-
Digital 12 Ausgaben, € 60,-
Print + Digital € 95,-



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

Print 4 Ausgaben, € 29,60
Digital 4 Ausgaben, € 21,-
Print + Digital € 33,60

Jetzt bestellen:

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

Ein ganzes Jahr Freude

- Bestellen Sie für sich oder einen lieben Menschen die passende Lektüre – gedruckt oder digital.
- Pünktlich zu dem von Ihnen gewünschten Termin verschicken wir die erste Ausgabe zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.
- Und damit auch Sie Grund zur Freude haben, erhalten Sie von uns als Dank für Ihre Bestellung ein Geschenk Ihrer Wahl.

Astro-Kalender



Coffee-to-go-Becher von ebos



Baumspende



Buch



Spektrum-Stofftaschen-Set

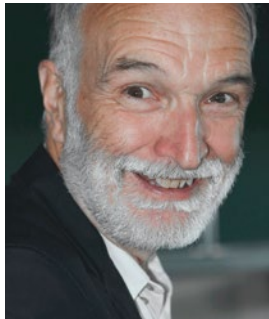


Kennerspiel des Jahres 2017



www.spektrum.de/geschenk

SCHLICHTING! MUSIKALISCHER SAND



Wenn sich Sandschichten am Abhang einer Düne gegeneinander verschieben, kann das die Körner zu kollektiven Schwingungen anregen. Das Ergebnis: überraschend laute Töne.

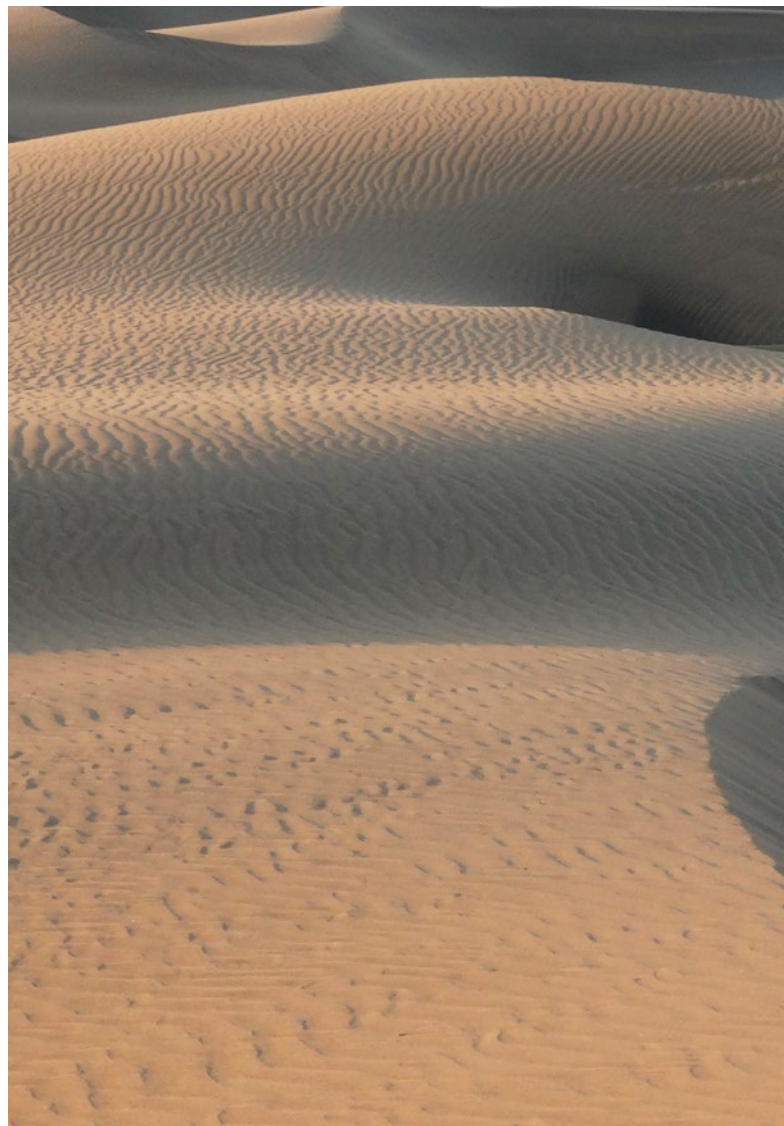
H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

» spektrum.de/artikel/1513361

► Als ich zum ersten Mal den weitläufigen Atlantikstrand in der Nähe von Bordeaux betrat und durch den lockeren Sand zum Meeressaum stapfte, wurde jeder Schritt von einem relativ hohen Quietschton untermalt. Ich war sehr erstaunt, dass trockener Sand durch bloßes Betreten zum Klingen gebracht werden kann. Schließlich sind die Körner in ihrer Schlichtheit und in der Einfachheit ihrer Wechselwirkungen kaum zu übertreffen.

Dieses Quietschen ist überdies nur ein kleiner Teil eines gewaltigen Lautrepertoires. Von jeher berichten Chronisten darüber, wie in vielen Sandwüsten und Dünenlandschaften ohne menschliche Einwirkung Bodenbewegungen – etwa bei Lawinenabgängen – von teilweise ohrenbetäubenden und manchmal mehrere Minuten anhaltenden Tönen begleitet werden. Je nach Frequenz und Lautstärke sprechen Ohrenzeugen etwa vom Singen, Pfeifen, Dröhnen, Brüllen, Brummen, Bellen oder Tosen des Sands, und es erinnert sie unter anderem an rollenden Donner oder, ganz modern, an das Geräusch tief fliegender Flugzeuge. Heute lassen sich diese Aussagen in Dezibel und Hertz präzisieren: An der Oberfläche der Dünen werden Schallpegel von bis zu 110 Dezibel gemessen, und die Frequenzen bewegen sich in einem Bereich von 50 bis fast 800 Hertz. Dabei sind die Geräusche zum Teil zehn Kilometer weit zu hören.

Man kann sich gut vorstellen, dass die scheinbar aus heiterem Wüstenhimmel kommenden akustischen Signale früher Reisende in Angst und Schrecken versetzt und zu wilden Spekulationen über ihren Ursprung geführt haben. So erzählt bereits Marco Polo im 13. Jahrhundert aus der Wüste Gobi von bösen Geistern, die »manchmal die Luft mit den Klängen der verschiedensten Musikinstrumente füllten, manchmal aber auch mit Trommeln oder Waffenlärm«. Später beschreiben weitere Wüstenbesucher dieses Phäno-



H. JOACHIM SCHLICHTING

men immer wieder, unter anderem Charles Darwin 1839 in seiner »Voyage of the Beagle«.

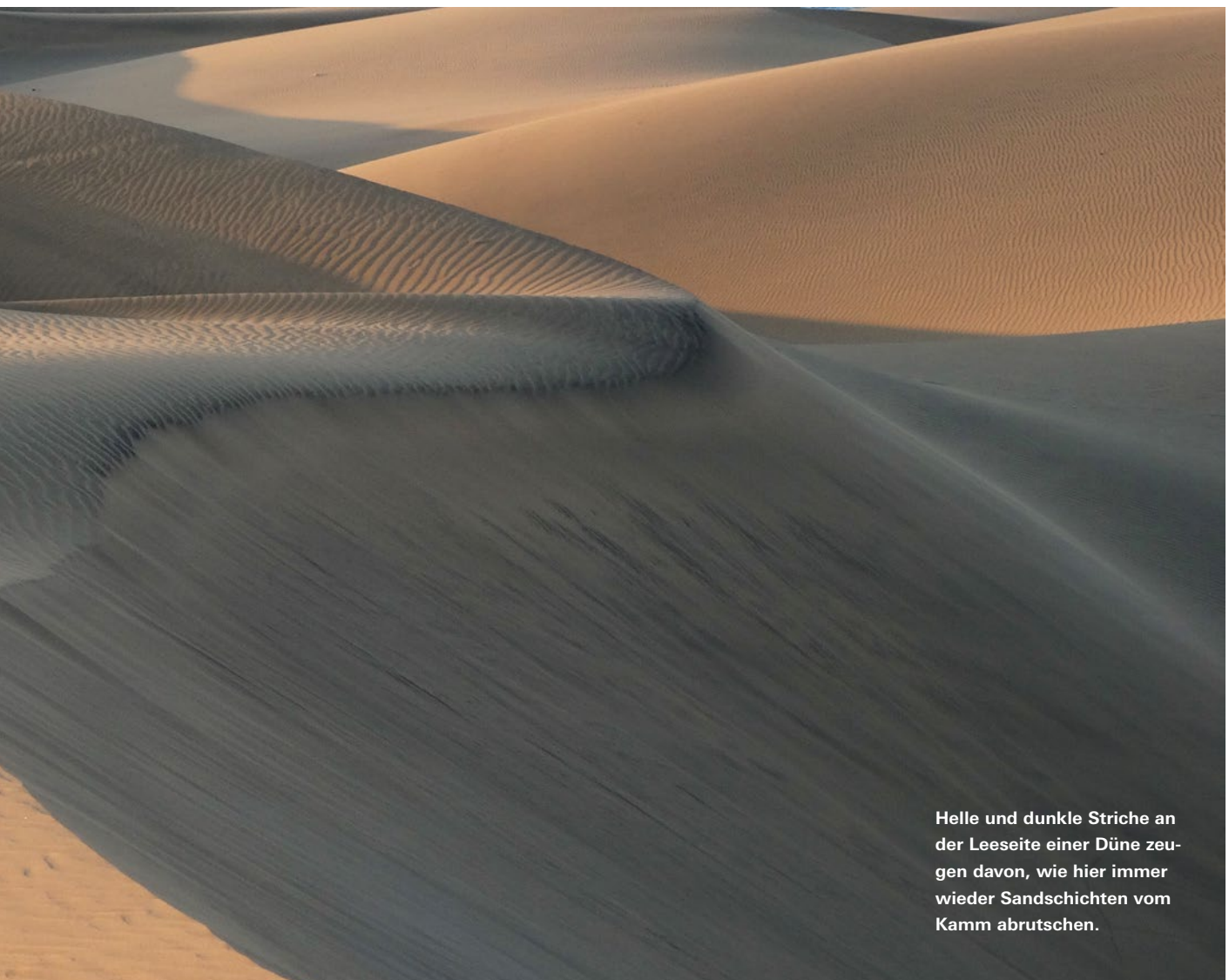
Obwohl der Lawinenabgang bald als wesentlicher Antriebsmechanismus erkannt wurde, blieben die besonderen Umstände, unter denen das Dröhnen möglich ist, zunächst im Dunkeln. Erst in den letzten Jahrzehnten haben Physiker das Problem intensiver erforscht. Einig ist man sich über Sandkörner als Urheber des lautstarken Gesangs. Sie können beim Lawinenabgang in sehr großer Zahl in kollektive Schwingungen versetzt werden. Dafür sind besondere Umstände erforderlich, beispielsweise möglichst kugelförmige, sehr trockene Steinchen, eine glatte, von Staub und anderen Verunreinigungen freie Oberfläche und eine weitgehend einheitliche Größe.

Manche, unerbittlich nachgiebig, geben beim Abgleiten an der Böschung eigentümliche Töne von sich, schrill oder tief: »klingende Sande«

Hans Magnus Enzensberger (*1929)

Das klingt fast nach Laborbedingungen. Wie kommt es natürlicherweise zu so idealen Voraussetzungen? Eine wesentliche Rolle spielt dabei der fast ständig wehende Wind. Er transportiert Sand und baut die Dünen immerfort auf und ab, indem er Körnchen auf der Luvseite der Düne aufnimmt und an ihrem Kamm wieder absetzt. Dadurch entsteht ein Sandüberhang, der von Zeit zu Zeit in Form von Lawinen an der Leeseite abgleitet (siehe Foto unten).

Mit dem Sandtransport geht oft eine Sortierung der Sandkörner einher, weil diese umso weiter fliegen, je kleiner sie sind. Wer sich einmal die Sandrippel anschaut, die viele Dünen wie Runzeln überziehen, stellt fest, wie einheitlich die Teilchen oft nach Art und Größe angeordnet sind. Gleich geformte Partikel haben auch



Helle und dunkle Striche an der Leeseite einer Düne zeugen davon, wie hier immer wieder Sandschichten vom Kamm abrutschen.

H. JOACHIM SCHLICHTING



An den Leeseiten von Dünen (linkes Foto) gehen immer wieder Lawinen unterschiedlicher Größe ab, wobei sich einzelne Sandlagen durch Scherkräfte manchmal regelrecht



auffächern (rechts). Dabei schwingen die Schichten und erzeugen mitunter sehr laute Töne – wie genau, ist unter Physikern bis heute umstritten.

ein gemeinsames Schicksal: Auf langen Transportwegen mit zahlreichen Wechselwirkungen haben sie alle eine ähnliche Prozedur durchgemacht wie Steine in einer Trommelmaschine und zeigen daher auch denselben Grad an Abrundung und Glättung.

Beim Abgang einer Lawine gleitet eine Sandschicht am leeseitigen Dünenhang hinab und wird in sich geschert. Die verschiedenen Lagen verschieben sich parallel zueinander und zwar so, dass die tieferen wegen der darin zunehmenden Reibung hinter den höheren zurückbleiben (siehe rechtes Foto oben). Dabei purzeln die Sandkörner der höheren Schicht über die darunter befindlichen, fallen danach sofort zurück, um erneut hochgerissen zu werden. Und das wiederholt sich während der gesamten Reise in der Lawine. Es kommt also zu einem mehr oder weniger periodischen Auf und Ab der Sandkörner. Diese Schwingungen machen sich normalerweise als relativ leises akustisches Rauschen bemerkbar.

Wie kann aus einem solchen unkoordinierten Vorgang allerdings eine kollektive Schwingung hervorgehen, die nötig ist, um ein lautes Dröhnen mit einer dominierenden Grundfrequenz zu erzeugen? Das ist unter den Wissenschaftlern bis heute nicht abschließend geklärt.

Eine Gruppe französischer Physiker um Bruno Andreotti aus Paris geht davon aus, dass beim Rutschen von Lawinen elastische Wellen in den Sandlagen ausgelöst werden. Diese würden die individuellen Zusammenstöße der Sandkörner innerhalb der Lawine synchronisieren und die Schichten zu einer Art Lautsprechermembran formen, die dann die Schwingungen auf die umgebende Luft überträgt und sie als Ton hörbar macht.

Wirken die Sandschichten wie Lautsprecher – oder die Dünen wie Resonanzkörper?

Messungen zufolge ist die Amplitude der elastischen Schwingung der oberen Sandschicht unabhängig von der jeweiligen Lawine und sogar von der konkreten Düne. Sie beträgt ein Viertel des Durchmessers der beteiligten Sandkörner. Aus der Scherrate – der Geschwindigkeit, mit der sich die Teilchen der äußeren Lage gegen die darunter liegenden verschieben – konnten die Forscher die Frequenz der Stöße berechnen. Diese stimmt ziemlich genau mit der Tonhöhe der zugehörigen Lawine überein. Die Wissenschaftler sehen damit ihr Modell bestätigt.

Anders argumentiert eine Arbeitsgruppe um Nathalie Vriend von der University of Cambridge. Ihr Ansatz ba-

siert auf der in der wissenschaftlichen Literatur immer wieder geäußerten Vorstellung, die Dünen würden ähnlich wie ein Musikinstrument (Streich- oder auch Blasinstrument) zum Tönen gebracht. Bei einem Streichinstrument versetzt etwa ein Bogen die Saiten in Schwingung. Das allein führt aber nur zu einem kaum wahrnehmbaren Ton. Erst der verbundene und zum Mitvibrieren gezwungene Resonanzkörper verwandelt die Schwingungsenergie fast vollständig in Schall.

Ganz ähnlich soll das bei der Anregung der dröhnenden Dünen verlaufen: Bleiben die einzelnen Sandlagen innerhalb der abgehenden Lawine wenigstens zeitweise erhalten und werden als Ganzes gegeneinander verschoben, kann es zum kollektiven Schwingen der Körnchen kommen. Das soll die Düne selbst als mächtigen Klangkörper in Resonanz versetzen. Konkret wirkt sie wie ein akustischer Wellenleiter, wie man ihn beispielsweise vom Schlauch eines Stethoskops kennt. In so einem Objekt bilden sich stehende Schallwellen aus, deren Frequenz durch den Durchmesser des Wellenleiters bestimmt wird. Dieser wird in unserem Fall außen durch die angrenzende Luft und innen durch den härteren und dichteren Bereich der Düne festgelegt und trägt meist etwa ein bis zwei Meter. Ein typischer Wert für eine daraus berechnete Grundfrequenz ist 81 Hertz. Sie passt trotz der bei der Berechnung nötigen starken Idealisierungen gut zu den Werten der üblichen Grundfrequenzen, die sich aus einer Analyse der Schallspektren ergeben, nämlich zwischen 70 und 110 Hertz.

Glaubt man hingegen dem französischen Schriftsteller Guy de Maupassant und dessen 1882 erschienener Novelle »La peur« (Die Angst), verrät der tosende Sand den Beduinen die Anwesenheit von Dschinnis, den Dämonen der Wüste.

Angesichts alledem ist mein Staunen über das Quietschen am Strand auf der Suche nach einer Erklärung eher noch größer geworden. Obwohl ich mir vorstelle, dass der Forschungsaufwand zur Analyse dieses speziellen Phänomens wesentlich geringer sein müsste als bei den singenden Dünen, gibt es bislang keine überzeugende Lösung.

Das Quietschen wird zwar im Zusammenhang mit dem Brummen häufig angesprochen, aber es stechen eher die Unterschiede hervor: Ersteres ist viel höher (500 bis 2500 Hertz) sowie kürzer (nur ein Bruchteil einer Sekunde). Außerdem quietschen brummende Sandkörner nicht und umgekehrt. Ich werde im Urlaub an der Atlantikküste wohl noch ein wenig über das Geräusch rätseln müssen.

QUELLEN

Andreotti, B.: The Song of Dunes as a Wave-Particle Mode Locking. In: Physical Review Letters 93, 238001, 2004

Hunt, M. L., Vriend, N. M.: Booming Sand Dunes. In: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 38, S. 281–301, 2010

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), Robert Gast, Dr. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator 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 Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

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

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

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. Claudia Hecker, Elke Reinecke, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park,

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 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk:

Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste

Nr. 38 vom 1.1. 2017.

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: © 2017 (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.



GLEICHSTELLUNG DIE BESTE ENTWICKLUNGSHILFE

NEUE SERIE: GENDER Weltweit nehmen immer mehr Frauen am Wirtschaftsleben teil. Dabei bleiben sie hinsichtlich Ausbildung, Arbeitsqualität und Lohn deutlich benachteiligt. Das ist nicht nur unfair, sondern hemmt auch die gesamte ökonomische Entwicklung.



Ana L. Revenga (links) ist stellvertretende Chefökonomin der Weltbank; sie beschäftigt sich dort seit 24 Jahren mit den Themen Armut und Verteilungsgerechtigkeit. **Ana Maria Munoz-Boudet** arbeitet als leitende Sozialwissenschaftlerin bei der Weltbank. Ihre Spezialgebiete sind globale Armut und Ungleichheit.

► spektrum.de/artikel/1513363

► In den letzten 50 Jahren hat sich die Situation von Frauen und Mädchen in den Entwicklungsländern enorm verbessert. Das belegen zahlreiche Indikatoren, zum Beispiel die Lebenserwartung: Während eine 1960 geborene Frau im Mittel nach 54 Jahren starb, werden die meisten 2008 geborenen Mädchen wohl ihren 72. Geburtstag erleben. In derselben Zeit sank die Fertilität – die durchschnittliche Kinderzahl pro Frau – so rasch wie noch nie. Dieser Wandel hängt mit verschiedenen Errungenschaften der Frauen in armen Ländern zusammen: Viel schneller als in den heute reichen Nationen gab es Fortschritte auf den Gebieten Bildung, Beschäftigung und sexuelle Selbstbestimmung. In den USA dauerte es lange 123 Jahre, bis eine Frau nur noch drei statt sechs Kinder gebar, in Indien 44 – und im Iran bloß 10 Jahre.

Zwei Drittel aller Länder bieten beiden Geschlechtern einen Zugang zur Grundschule, und in mehr als einem Drittel sitzen mehr Mädchen als Jungen in den Klassen. Ganz anders als früher stellen Frauen nun die Mehrheit der Universitätsabsolventen. In den vergangenen drei Jahrzehnten drängten mehr als eine halbe Milliarde von ihnen auf den Arbeitsmarkt; das bedeutet, dass heute weltweit vier von zehn Arbeitskräften weiblich sind.

Trotz aller Fortschritte klafft eine hartnäckige Lücke zwischen den Geschlechtern. Zwar leben Frauen insgesamt länger als Männer, doch in Afrika südlich der Sahara und in einigen anderen Weltregionen ist die Müttersterblichkeit so hoch wie im Europa des 19. Jahrhunderts vor der Einführung der Geburtshygiene. Noch immer besetzen

SERIE Frauen weltweit
Teil 1: Dezember 2017 Die beste Entwicklungshilfe Ana L. Revenga und Ana Maria Munoz-Boudet
Teil 2: Januar 2018 Die Rückkehr der fehlenden Töchter Monica Das Gupta
Teil 3: Februar 2018 Die akademische Geniefälle Andrei Cimpian und Sarah-Jane Leslie

Frauen weniger Machtpositionen in Politik und Wirtschaft. Und während immer mehr Frauen für Lohn arbeiten, werden sie weiterhin schlechter eingestuft als ihre männlichen Kollegen.

Diese Missstände sind skandalös, nicht nur unter rechtlichen, sondern auch unter entwicklungspolitischen Gesichtspunkten. Entwicklung bedeutet weniger Armut und besseren Zugang zu Dienstleistungen, außerdem mehr Entscheidungsfreiheit und Selbstbestimmung. Nach unserer Überzeugung ist es klüger, die Gleichberechtigung auf die Tagesordnung zu setzen – insbesondere die Chance für Frauen, eigenes Geld zu verdienen – und dadurch von selbst die Entwicklung voranzutreiben, statt



Wenn es gelänge, den Beschäftigungsgrad von Frauen im subsaharischen Afrika an den der Männer anzugleichen, stiege dort die Produktivität Prognosen zufolge um zwölf Prozent.



Berufe mit einem hohen Frauenanteil wie Erntehelferin oder Lehrerin werden tendenziell schlechter bezahlt. In allen Wirtschaftsbereichen erhalten Männer oft einen höheren Lohn als Frauen in der gleichen Position, selbst wenn man Bildungs- und Altersunterschiede berücksichtigt.

umgekehrt zu hoffen, dass Entwicklungshilfe indirekt die Lage der Frauen verbessert.

Die Wohlstandskluft zwischen den Geschlechtern schließt sich nicht von allein. Erstens gilt es, die Barrieren wegzuräumen, welche einen gleichgestellten Zugang zu wirtschaftlichen Chancen verhindern; das erhöht die Produktivität und somit das Einkommen für jedermann. Zweitens: Bessere Bildung, Gesundheit und Entscheidungsfreiheit für Frauen heben den Wohlstand von Mutter und Kind. Drittens: Frauen an die Macht! Sobald nicht mehr nur Männer etwas zu sagen haben, verschieben sich politische Initiativen und finanzielle Ausgaben fast automatisch hin zu Themen wie Hygiene, Gesundheit und Schulbildung.

Leider ist das viel leichter gesagt als getan. In allen Ländern, ob reich oder arm, und in allen Wirtschaftszwei-

gen, vom Ackerbau bis zum Unternehmertum, hemmt vor allem der Mangel an Gleichstellung weiterhin den Fortschritt.

Knappe Produktionsmittel, Bevormundung und Klischees blockieren ökonomischen Aufstieg

Die erste Hürde, die Frauen im Weg steht, ist der grundsätzliche Zutritt zur Wirtschaft. In den meisten Teilen der Welt hat die weibliche Lohnarbeit zwar beträchtlich zugenommen, aber überall klafft zwischen Männern und Frauen bezüglich der Teilnahme am Arbeitsmarkt eine Lücke – im Nahen Osten und Nordafrika beträgt der Unterschied ganze 53 Prozent!

Selbst wenn Frauen diese Barriere durchbrechen können, stoßen sie selten auf faire Bedingungen. Bäuerinnen haben es schwerer, an Düngemittel, Landmaschinen und hochwertiges Saatgut zu kommen, weshalb ihre Erträge oft geringer sind. Ebenso erlangen Unternehmerinnen nur eingeschränkt Zugang zu Kapital und Krediten: weil sie seltener Landbesitz oder andere Sicherheiten anbieten können, weil ein Mann den Kreditantrag unterschreiben muss oder weil die Bank Frauen einfach für unzuverlässiger hält. Deshalb werfen weibliche Geschäfte oft tatsächlich weniger Gewinn ab, und es entsteht ein schwer zu durchbrechender Teufelskreis. Sobald diese Hindernisse beseitigt werden, nimmt die gesamte Produktivität sofort deutlich zu. Einer neuen Studie zufolge würde das Herbeiführen unternehmerischer Gleichstellung Produktivität und Einkommen in Subsahara-Afrika um 12 Prozent erhöhen, im Nahen Osten und Nordafrika gar um 38 Prozent.

In den USA und Kanada, wo die Abweichung der Arbeitsmarktteilhabe zwischen den Geschlechtern weniger als 15 Prozent beträgt, verursachen andere Faktoren Unterschiede. Mann und Frau streben in verschiedene Wirtschaftssektoren: Frauen arbeiten eher im Erziehungs- und Sozialbereich, Männer mehr im Bau- und Verkehrs-

AUF EINEN BLICK FRAUEN IM ARBEITSLEBEN

- 1** Wenn Frauen besseren Zugang zum Wirtschaftsleben sowie zur Bildung und Familienplanung gewinnen, profitiert davon die gesamte Gesellschaft.
- 2** Zwar schließt sich weltweit allmählich die soziale Kluft zwischen den Geschlechtern, aber vor allem in den Entwicklungsländern bilden traditionelle Normen hartnäckige Hindernisse.
- 3** Uralte Rollenklischees, die Frauen vorschreiben, was sich gehört, verschwinden nicht über Nacht. Emanzipatorische Maßnahmen und Programme wirken nur, wenn sie über längere Zeit durchgeführt werden.

sektor. Dabei landen Erstere meist in den unteren Einkommensgruppen. Zum Beispiel ist eine Frau häufig Lehrerin, Krankenschwester oder Bürokräftin, aber selten Ärztin, Schul- oder Abteilungsleiterin. Unternehmerinnen konzentrieren sich sogar eher auf traditionell weibliche Sektoren wie Nahrung oder Bekleidung.

Die Trends beruhen auf Vorurteilen über vermeintlich typisch weibliche und männliche Tätigkeiten: Frauen sind angeblich von Natur aus fürsorglicher, Männer geeigneter für körperliche Arbeit und Führungsaufgaben. Der kritische Punkt ist, dass die besonders »weiblichen« Berufe schlechter bezahlt werden. Im globalen Mittel verdient eine berufstätige Frau 81 Cent für jeden Dollar, den ein männlicher Arbeiter einstreicht. In Jordanien und der Elfenbeinküste beträgt der Einkommensunterschied mehr als 80 Prozent. Die reichen Länder sind keine Ausnahme: In Neuseeland bekommen Frauen 5 Prozent weniger Lohn, in Südkorea liegt der Abstand sogar bei 36 Prozent. In Pakistan verdienen Lehrerinnen auf dem Land um 30 Prozent weniger als Lehrer.

Zementierte Geschlechterrollen sehen Frauen vor allem am heimischen Herd

Hinter der hartnäckigen Lohnlücke stecken verfestigte soziale Normen. Da Frauen traditionell einen viel größeren Teil ihrer Zeit für Betreuung und Haushalt aufwenden als die Männer, haben sie weniger Zeit für bezahlte Jobs. Und wenn die Frau am Arbeitsleben teilnimmt, ändert das zunächst gar nichts an der Überzeugung, sie sei vor allem für häusliche Pflichten zuständig. In Ghana verrichtet die Frau mehr als 80 Prozent der Hausarbeit, auch wenn sie Alleinverdienerin ist. Dieses Ungleichgewicht herrscht fast überall, auch in Amerika und Europa; selbst in den fortschrittlichsten Milieus gilt es als naturgegeben. Die Betreuungszeiten in Kindergärten sowie die Stundenpläne in Schulen passen selten zu einer voll berufstätigen Mutter; sie soll sich aber – im Unterschied zum Vater – selbstverständlich frei nehmen, sobald ein Kind der beiden Eltern erkrankt.

Leider umgehen die meisten Maßnahmen zur gerechteren Zeitverteilung diese Normen, statt sie direkt in Frage zu stellen. Populäre Gegenbeispiele sind der Anspruch auf Elternzeit und Kinderbetreuung in Krippen. Wie erwartet nehmen in allen Ländern, wo der Zugang zu Krippen und Vorschuleinrichtungen verbessert wurde, mehr Frauen am Arbeitsleben teil. Dabei spielen Verkehrsanbindung, Öffnungszeiten, Bezahlbarkeit und Kapazität der Einrichtung wichtige Rollen.

Offensichtlich verschafft diese Politik den Müttern mehr Zeit. Anfang der 1990er Jahre begann Argentinien mit einem Programm zur Förderung der frühkindlichen Erziehung. Nach sieben Jahren gab es 175 000 Vorschuleinrichtungen. Wie Forscher beobachteten, erhöhte sich die Berufstätigkeit der Mütter im Lauf des Programms um 7 bis 14 Prozent. Diese positiven Effekte treten sogar dann auf, wenn die Vorschule nicht ganztags öffnet.

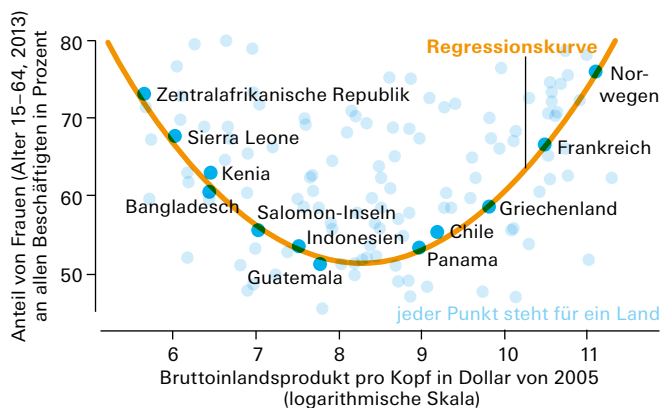
Maßnahmen wie besserer Mutterschutz sowie Elternzeit – auch für Väter – sind nicht immer so erfolgreich. In Deutschland führte die Erweiterung des Mutterschutzes dazu, dass mehr Frauen nach Ablauf der Schutzfrist wieder zum vorherigen Arbeitsplatz zurückkehrten. Doch als das benachbarte Österreich 1990 die Schutzfrist von einem auf zwei Jahre verdoppelte, ging der Prozentsatz der Frauen, die nachher überhaupt wieder arbeiteten, erheblich zurück.

In Skandinavien bieten die Elternzeitprogramme den Vätern spezielle Anreize, nach der Geburt des Kindes zu Hause zu bleiben. Schwedische Papas bekamen persönlichen, nicht übertragbaren Urlaub, was sie veranlasste, tatsächlich mehr Zeit mit ihren Kindern zu verbringen. Laut Studien bleiben diese Männer dauerhaft in die Erziehung ihrer Kinder involviert, verabschieden sich aber allmählich von anderen Haushaltspflichten, sobald der Elternurlaub endet.

Hinter der beruflichen Diskriminierung steckt nicht etwa eine von vornherein unterschiedliche Befähigung beider Geschlechter, sondern der geringere Wert, den wir weiblichen Arbeitskräften beimessen. In den Entwicklungsländern

Die U-Kurve der Frauenarbeit

Im Anfangsstadium der wirtschaftlichen Entwicklung stellen Frauen einen hohen Anteil an der arbeitenden Bevölkerung, denn die Länder sind so arm, dass alle arbeitsfähigen Bürger mit anpacken müssen; der Großteil im landwirtschaftlichen Sektor. Wenn sich die Agrarländer allmählich zu Industrienationen wandeln, fließen höhere Einkommen in städtische Haushalte, und ein größerer Teil der Frauen hört auf zu arbeiten. Doch schließlich reifen die Länder zu modernen Dienstleistungsgesellschaften heran, und die Frauen kehren wieder auf den Arbeitsmarkt zurück.



JEN CHRISTIANSEN. NACH: ANA MARIA MUNOZ-BOJDET UND WORLD DEVELOPMENT INDICATORS. THE WORLD BANK / SCIENTIFIC AMERICAN, SEPTEMBER 2017



Soziale Normen zwingen Frauen an den Herd, während die Männer arbeiten gehen. Auch in reichen Ländern, wo Frauen öfter berufstätig sind, leisten sie weiter den Großteil häuslicher Arbeit.

manifestiert sich der Unterschied schon bei Schulbesuch und Ausbildung. Zwar besuchen in den Industrieländern auch viele Frauen Universitäten, doch bereits bei der Wahl des Studienfachs beginnen die geschlechtsspezifischen Unterschiede. In den USA sind zwar fast 60 Prozent der Collegeabsolventen weiblich, aber nur 35 Prozent von ihnen erwerben einen akademischen Grad in einem wissenschaftlich-technischen Fach.

Um die Diskriminierung weiblicher Arbeit aufzuheben, reicht geschlechtsneutrale Bildungspolitik nicht aus. Die öffentliche Hand muss gezielt arbeitspolitische Maßnahmen ergreifen, insbesondere für junge Arbeitssuchende. Als Vorbild dienen etwa die Jóvenes-Programme für

Auch Regierungen diskriminieren Frauen: In 66 Prozent aller Länder dürfen sie nicht dieselben Jobs ausüben wie Männer

Jugendliche, die in den frühen 2000er Jahren in Lateinamerika durchgeführt wurden. Durch eine Kombination von Ausbildung und Praktika sowie Anreize für Unternehmerinnen förderten sie die Berufstätigkeit junger Frauen und sorgten für höhere Löhne.

Aber der Erfolg der Jóvenes-Programme lässt sich leider nicht verallgemeinern. So hinderten bei einem ähnlichen Berufsbildungsprogramm in Malawi familiäre Verpflichtungen die jungen Frauen an der Teilnahme. Ein jordanisches Pilotprogramm namens NOW (New Opportunities for Women) wiederum bezog mehr als 1000 Frauen

ein, die ein so genanntes Community College (eine Art Berufsschule) absolviert hatten. Die Nachfrage nach dem Programm war extrem hoch: Viele Teilnehmerinnen schlossen die Berufsausbildung mit Erfolg ab, und die Hälfte der Absolventinnen fand – dank Lohnunterstützung für Unternehmer – einen Job. Doch die Wirkung blieb so kurzlebig, dass sich an der Arbeits- und Lohnstatistik gar nichts änderte. Somit verhinderten offenbar ebenso in Jordanien soziale Normen und unternehmerische Vorurteile den Erfolg der Initiative.

Wenn ein bestimmter Wirtschaftssektor traditionell weniger Frauen beschäftigt, neigen die Unternehmer zu Vorurteilen über deren Fähigkeiten. Arbeitgeber stellen ungern Mitarbeiterinnen ein, weil sie höhere Kosten durch Mutterschaftsurlaub fürchten, oder sie nehmen an, Frauen seien nicht die Hauptverdiener und daher zu schwach motiviert. Zahlreiche Untersuchungen belegen das diskriminierende Verhalten von Unternehmern, wenn ihnen identische Bewerbungen von weiblichen und männlichen Kandidaten vorgelegt werden. Außerdem kommen oft geschlechtsspezifische Seilschaften ins Spiel: Wenn Frauen in einem Beruf spärlich vertreten sind, entgehen ihnen Karrierechancen, und sie werden nicht gefördert. In vielen Ländern suchen Unternehmen in Stellenanzeigen noch immer ausdrücklich nach männlichen Bewerbern, und benachteiligen weibliche bei der Jobsuche ganz offen. In 174 von 189 Ländern, die eine Antidiskriminierungsdatei der Weltbank namens »Women, Business and the Law« erfasst, ist es Arbeitgebern nicht untersagt, Stellensuchende nach Familienstatus und Familienplanung auszufragen.

Auch Regierungsinstitutionen können Frauen diskriminieren. In 66 Prozent aller Länder dürfen sie nicht dieselben Jobs wie Männer ausüben. Viele Nachfolgestaaten der Sowjetunion sind besonders restriktiv. In Russland sind

den Frauen derzeit fast 460 Berufe verboten, darunter Stahlarbeiterin, Busfahrerin, Feuerwehrfrau und die Arbeit auf einer Ölbohrplattform. In anderen Ländern brauchen Frauen die Zustimmung des Mannes, um einen Beruf anzutreten, ein Konto zu eröffnen oder ein Geschäft zu betreiben. In Chile hat ausschließlich der Ehemann das Recht, das gemeinsame Ehevermögen zu verwalten. In Pakistan darf eine verheiratete Frau nicht wie ein verheirateter Mann Handel treiben. In der Mongolei dürfen viele Frauen nachts nicht arbeiten. Im Jemen kann der Gatte der Frau die Berufstätigkeit verbieten.

So herrscht ein ganzes Geflecht einander verstärkender Diskriminierungen: Frauen sind für Hausarbeit zuständig, werden schlechter für den Arbeitsmarkt gerüstet und stoßen dort auf institutionelle Hindernisse. Vor allem in Entwicklungsländern steht ihnen nur Teilzeitarbeit offen, männlich dominierte Jobs wie Ingenieurtechnik und Bau wirken von vornherein abschreckend, und wiederholte Diskriminierungserfahrungen bei der Jobsuche entmutigen Frauen, so dass sie den Teufelskreis der Ungleichheit nicht durchbrechen.

Individuelle, nachhaltige Förderprogramme ermöglichen eine faire Teilhabe am Arbeitsleben

Die Vielfalt der Faktoren erfordert ein flexibel abgestimmtes Vorgehen. Wenn man bedenkt, wie sehr sich Märkte, Institutionen und Normen von einem Land zum anderen unterscheiden, kommt eine generelle Patentlösung nicht in Frage. Wie oben beschrieben stößt das, was im einen Fall funktioniert, anderswo auf heftigen Widerstand.

Dennoch gilt dreierlei ganz allgemein:

1. Erfolgreiche Interventionen müssen das Problem, dass die traditionell weibliche Hausarbeit den Frauen kaum Zeit für Berufstätigkeit lässt, frontal angehen und die entsprechenden Normen in Frage stellen.
2. Die Maßnahmen müssen den Frauen Zugang zu Informationen, Fertigkeiten und professionellen Netzwerken verschaffen, damit die Produktivität von Arbeiterinnen, Bäuerinnen und Unternehmerinnen diejenige von Männern erreichen kann.
3. Um für wirtschaftliche Fairness zwischen den Geschlechtern zu sorgen, muss offensiv gegen die diskriminierenden Spielregeln vorgegangen werden, die auf Märkten und in Institutionen herrschen.

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Intervention, die mehrere Fliegen mit einer Klappe schlägt, ist das Programm ELA (Empowerment and Livelihood for Adolescents), das die Nichtregierungsorganisation BRAC (Building Resources Across Communities) in Uganda durchgeführt hat. Es verlieh jungen Frauen im Alter zwischen 14 und 20 Jahren Selbstsicherheit und Berufserfahrung, und zwar in so genannten Mädchenklubs unter Anleitung eines erwachsenen Mentors. Die Klubs dienten aber auch als Schutzraum, in dem heranwachsende Mädchen entspannt plaudern und Erfahrungen austauschen konnten. Ein Viertel der weiblichen Teenager in den 100 vom Programm erfassten Gemeinden nahmen daran teil, und die Ergebnisse waren eindrucksvoll. Die Teilnehmerinnen übten vier Jahre später mit um 72 Prozent höherer Wahrscheinlichkeit eine



Tätigkeit aus, die ihnen ein Einkommen verschaffte. Doch vor allem veränderte das Programm die Einstellungen und Ansprüche der Mädchen. Zum Beispiel glaubten die Teilnehmerinnen eher, dass Frauen Geld für ihre Familien verdienen sollen; und sie machten sich weniger Sorgen darüber, später einen guten Job zu finden. Der Einstellungswandel hatte eine erstaunliche Nebenwirkung: Die Anzahl der Teenagerschwangerschaften sank um 34 Prozent und die der Frühehen gar um 62 Prozent.

Wer solche Programme durchführt, darf sich nicht mit schnellen Erfolgen zufriedengeben. Letztlich geht es immer darum, mehr Frauen in den Arbeitsmarkt einzuführen – und sie dort zu halten. Das kann auf Dauer nur gelingen, wenn für sie in der Arbeitswelt faire Bedingungen herrschen. Zuallererst müssen sich die traditionellen Normen wandeln, welche die Männer in den Beruf schicken und den Frauen die Hausarbeit zuweisen.

Der Aufwand für antidiskriminierende Maßnahmen konkurriert mit anderen Prioritäten der Entwicklungsarbeit wie Nahrungssicherung und Armutsbekämpfung. Gerade deshalb ist es nötig, nicht mit guten Worten, sondern mit erprobten Programmen gegen die soziale Ungleichheit der Geschlechter vorzugehen. Denn je gerechter die Gesellschaft ist, desto besser entwickelt sie sich. ◀

QUELLEN

Cuberes, D., Teignier, M.: Aggregate Effects of Gender Gaps in the Labor Market: A Quantitative Estimate. In: Journal of Human Capital 10, S. 1–32, 2016

Munoz-Boudet, A. M., Revenga, A.: Breaking the STEM Ceiling for Girls. In: Future Development Blog, Brookings Institution, online 7. März 2017

World Development Report 2012: Gender Equality and Development. World Bank, 2012

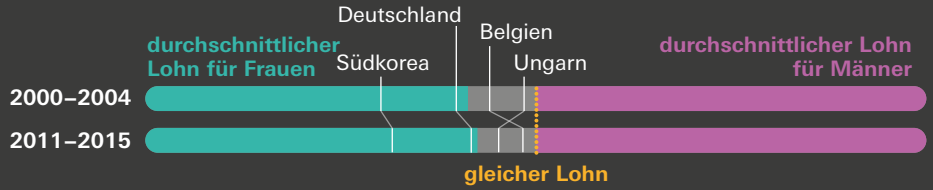
Die Ungleichheit der Geschlechter

Obwohl die Gleichstellung der Geschlechter weltweit voranschreitet, offenbaren Statistiken aus den vergangenen Jahrzehnten, dass Frauen verglichen mit Männern noch immer schlechtere wirtschaftliche und soziale Chancen haben. Manche der so genannten Gendergaps, beispielsweise der Mangel an Frauen in Regierungspositionen, resultieren aus kulturellen Vorurteilen gegenüber den jeweiligen Geschlechtern in Führungspositionen. Andere Unterschiede lassen sich auf Faktoren zurückführen, die Frauen per Definition stärker betreffen – etwa ein eingeschränkter Zugang zu Verhütungsmitteln oder Abtreibungen.

Amanda Montañez

LOHN

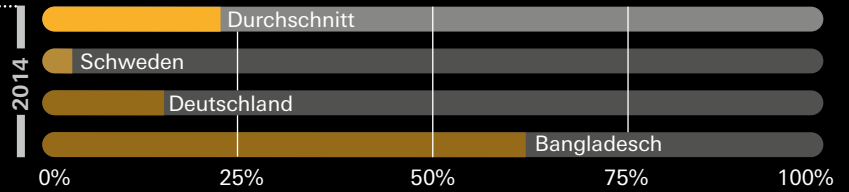
Rund um die Welt verdienen weibliche Angestellte im Schnitt weniger als ihre männlichen Kollegen. Obwohl sich dies in den letzten Jahrzehnten verbessert hat, konnte bisher keines der hier untersuchten 31 Länder diese Lohnlücke schließen.



AUSBILDUNG

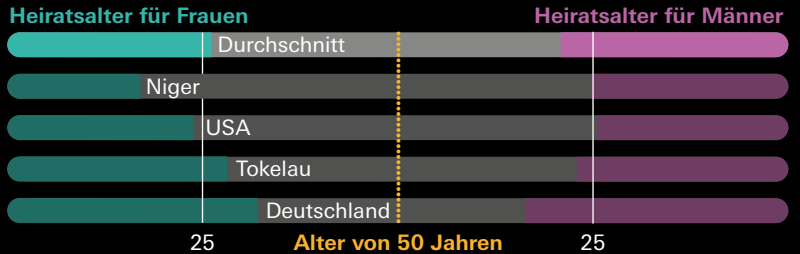
In Deutschland machen Frauen 45% der Hochschulabsolventen aus. Aber fast ein Viertel der weltweiten Bevölkerung ist der Meinung, dass eine Hochschulausbildung für Jungen wichtiger ist als für Mädchen. Diese Grafik basiert auf Zahlen aus 85 Ländern.

Menschen, die glauben, dass für Jungen eine höhere Ausbildung wichtiger ist als für Mädchen



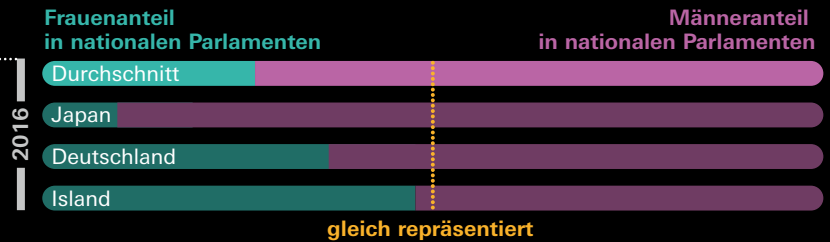
HEIRATSALTER

Frauen neigen dazu, in jüngerem Alter zu heiraten als Männer. Basierend auf den Daten von 104 Ländern und Territorien stellt diese Grafik das durchschnittliche Alter von denjenigen dar, die vor ihrem 50. Geburtstag heiraten.



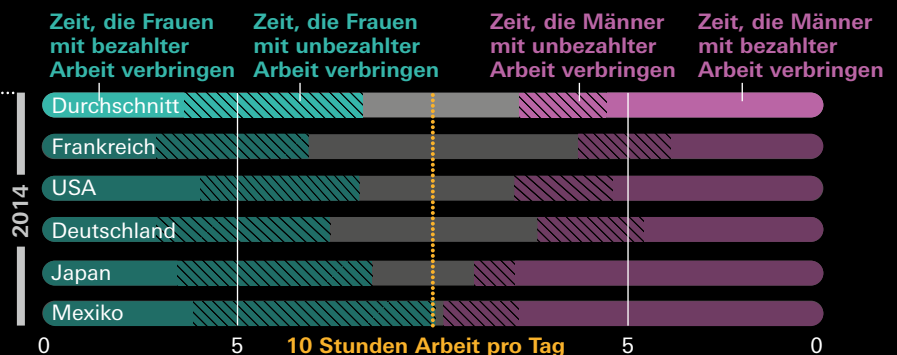
PARLAMENTSSITZE

Obwohl sie die Hälfte der Bevölkerung ausmachen, sind Frauen in Regierungen erheblich unterrepräsentiert. Die Grafik illustriert den durchschnittlichen Frauenanteil in 44 nationalen Parlamenten.



UNBEZAHLTE ARBEIT

Frauen verbringen im Schnitt jeden Tag mehr Zeit mit Arbeit als Männer, aber im Vergleich ist ein höherer Anteil ihrer Arbeit unbezahlt. Dazu gehören Aufgaben wie Kinderbetreuung und Hausarbeit. Die Grafik veranschaulicht dieses Ungleichgewicht auf der Basis von 29 Ländern.

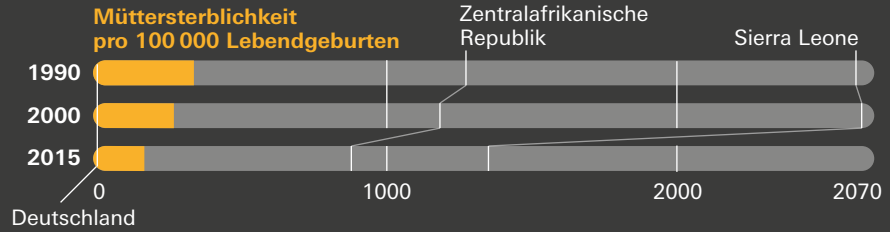


GENDERGAPS

FORTSCHRITTE

MÜTTERSTERBLICHKEIT

Daten aus 181 Ländern und Territorien zeigen, dass die Rate von Müttern, die durch Komplikationen bei der Schwangerschaft oder Geburt sterben, global kontinuierlich gesunken ist. In vielen Entwicklungsländern ist diese Rate allerdings noch immer hoch.



VERHÜTUNG

Statistiken aus 120 Ländern deuten darauf hin, dass der Bedarf an Verhütungsmitteln weltweit bei 18 Prozent der verheirateten Frauen im Alter von 15 bis 49 Jahren nicht gedeckt ist.

verheiratete Frauen im Alter von 15–49 Jahren, die einen ungedeckten Bedarf an Verhütungsmitteln haben



BEZAHLTE ELTERNZEIT

Frauen tragen den Großteil der Verantwortung für die Kinderversorgung, besonders in den ersten Lebensjahren der Kinder. Die meisten Länder unterstützen frischgebackene Mütter und Väter mit einer bezahlten Elternzeit, wie Daten aus 160 Ländern zeigen. Eine Ausnahme sind die USA – den Preis dafür zahlen vor allem die Mütter.

bezahlter Mutterschutz



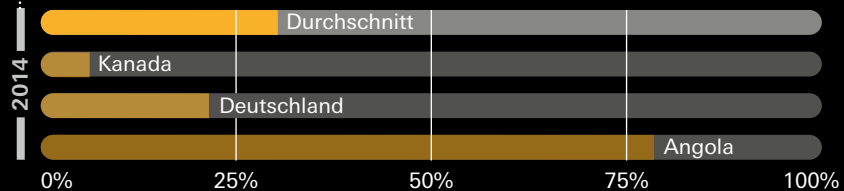
bezahlte Elternzeit



HÄUSLICHE GEWALT

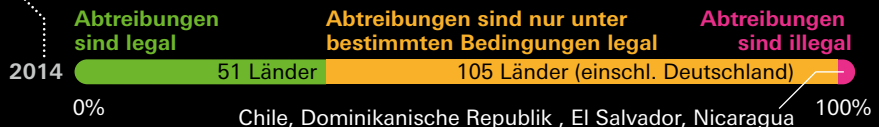
Zahlen aus 103 Ländern zeigen, dass ein hoher Prozentsatz von Frauen im Lauf ihres Lebens physischer oder sexueller Gewalt von einem Intimpartner ausgesetzt wird.

Anteil der Frauen, die häusliche Gewalt erfahren haben



ABTREIBUNGEN

In den meisten der hier dargestellten 160 Länder sind Abtreibungen illegal oder nur eingeschränkt möglich. Beispielsweise herrscht in manchen Ländern ein Abtreibungsverbot nach der 20. Schwangerschaftswoche, in anderen dürfen Abtreibungen nur nach einer Vergewaltigung oder bei Inzest durchgeführt werden.

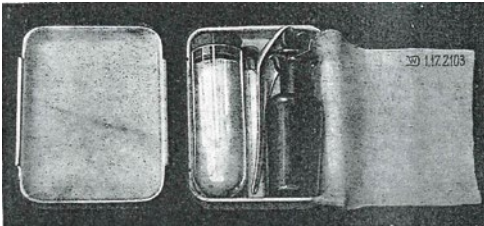


a Die kleinen neuseeländischen Territorien von Tokelau zählen zu den wenigen Orten auf der Welt, wo die Bräute mit 28 Jahren etwas älter als die Bräutigame sind, die im Schnitt 27 Jahre alt sind.

b Ärzte empfehlen generell, dass Mütter ihre Kinder die ersten sechs Monate stillen. Dieser Zeitraum ist somit das logische Minimum für einen bezahlten Mutterschutz.

1917

SAUBERES WASSER DANK TASCHENAPOTHEKE



Entkeimungslabor für Soldaten und Abenteurer.

»Es ist bekannt, daß Typhus, Cholera, Ruhr durch den Gebrauch verunreinigten Trink- und Waschwassers hervorgerufen und übertragen werden. Darum sollte niemand ihm unbekanntes Wasser genießen. Die neue Taschenapotheke »Dräger-aqua« enthält verschiedene Chemikalien, durch die man Wasser keimfrei machen kann, ohne den Geschmack zu beeinträchtigen. Die Chemikalien sind in einer doppelteiligen Metallschachtel untergebracht, die zum Ansetzen und Filtern der Lösung benutzt wird. Kein Soldat im Felde, keine Reisender sollte ohne diese Entkeimungsapotheke sein.« *Die Umschau 50, S. 878*

»Es ist bekannt, daß Typhus, Cholera, Ruhr durch den Gebrauch verun-

DONNERNDER METEORIT

»Am 3. April 1916 wurde in Hessen eine seltene Naturerscheinung beobachtet. Um 3 ½ Uhr nachmittags bei vollem Sonnenschein leuchtete plötzlich eine glänzende Feuerkugel am Himmel auf, zog steil abwärts der Erde zu und erlosch nach nur 4 Sekunden. Die Bahn war am Himmel durch einen langen weißen Rauchstreifen bezeichnet. Einige Minuten nach der Lichterscheinung erfolgte auf einem Gebiet von etwa 100 km im Durchmesser ein Donnerschlag, der so stark war, daß die Leute erschreckt in die Keller flüchteten, in der Meinung, daß ein feindlicher Fliegerangriff stattfinde.« *Kosmos 12, S. 325*

WAS DEM EINEN SEIN ROT ...

»Den Farbensinn betrachtet man in der Regel als eine Normale, die man als die Fähigkeit definiert, Farben nach Ton, Stärke und Helligkeit benennen oder wenigstens auseinanderhalten zu können. In Wirklichkeit gibt es aber keine solche Normale. Die Abweichungen beruhen auf anatomischen und psychologischen Besonderheiten. Interessante Erscheinungen sind Nebenformen, die man als F a r b e n - h ö r e n und - s c h m e c k e n bezeichnet. Es handelt sich dabei um das Überspringen der Reize von einer Nervenbahn auf eine andere, [was] die Wissenschaft als Synästhesie oder Synopsie bezeichnet.« *Prometheus 1467, S. 119*

1967



Beeindruckender Lavastrom.

VULKANAUSBRUCH AUF KAMTSCHATKA

»Im Herbst 1966 ereignete sich die bisher letzte Eruption des Kljutschewskaja-Sopka, des 5000 m hohen Vulkans, 80 km westlich der Küste des Stillen Ozeans. Am aktivsten war der tiefliegendste Krater. Aus zwei Öffnungen wurde ununterbrochen flüssige Lava bis zu einer

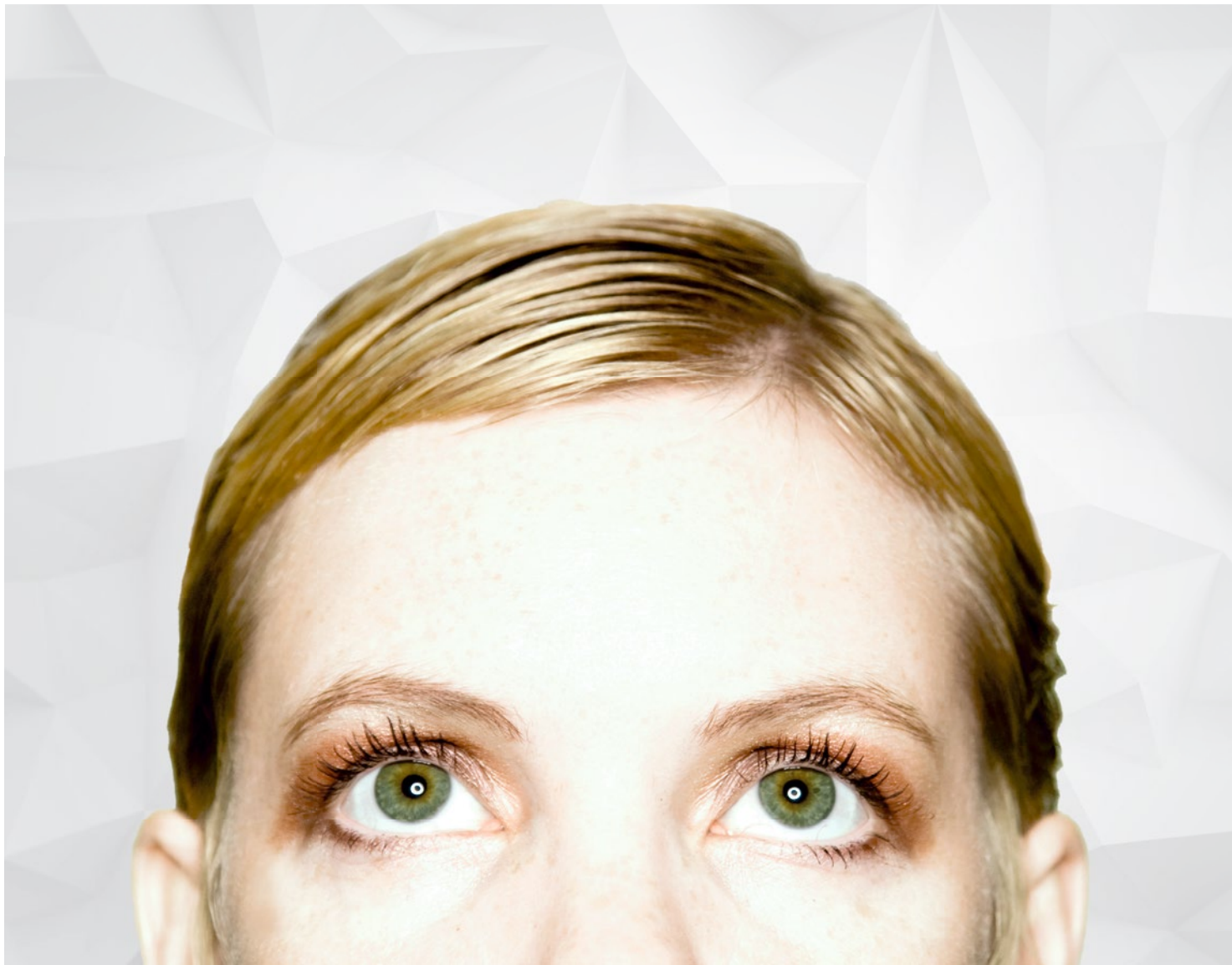
Höhe von 600 m gefördert. Im oberen Teil zerfiel die Fontäne in eine Vielzahl von noch plastischen Schlackebomben, die nach ihrem Herunterstürzen allmählich einen Kegel aufbauten. Vom Fuß des Kegels floß die bis 1150°C heiße Lava auseinander. Ihre Strömungsgeschwindigkeit betrug im Durchschnitt 10 bis 12 m/min. Der Lavastrom überzog sich mit einer Erstarrungskruste, unter der die Lava weiterglühte.« *Die Umschau 23, S. 774*

DER FAST-SCHON-MEGABYTE-CHIP

»Am Lawrence Radiation Laboratory der Universität von Kalifornien wurde vor wenigen Wochen das bisher größte computergesteuerte Informations-Speichersystem der Welt in Betrieb genommen. Die Anlage arbeitet mit einer neuartigen Speichertechnik, wobei zu jeder einzelnen Information ein direkter Zugriff möglich ist. Die Daten werden mit Hilfe einer Kathodenstrahlröhre auf Filmchips (35 x 70 mm) aufgezeichnet. Auf diese Weise finden rund $5 \cdot 10^6$ bit auf einem einzigen Chip Platz. Das System kann über 10^{12} bit speichern, was etwa – um einen anschaulichen Vergleich zu geben – 25000 Lexikonbänden entspricht.« *Die Umschau 23, S. 778*

UTOPIA 1980

»Ums Jahr 1980 wird nach Ansicht britischer Techniker die Zentralheizung überholt sein. Wohnräume werden dann gegen jeden Wärmeverlust isoliert sein, so dass die von Glühbirnen, Haushaltsgeräten und dem menschlichen Körper ausgestrahlte Wärme reichen wird, um eine angenehme Temperatur zu erhalten. Weiter entwickelte ein Techniker den Plan einer Stadt, in der Autos, Fabriken und Laufbänder elektrisch betrieben werden. Die Hausfrau werde vom Bett aus imstande sein, ihren Herd übers Telefon zu bedienen.« *Neuheiten und Erfindungen 375, S. 226*



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

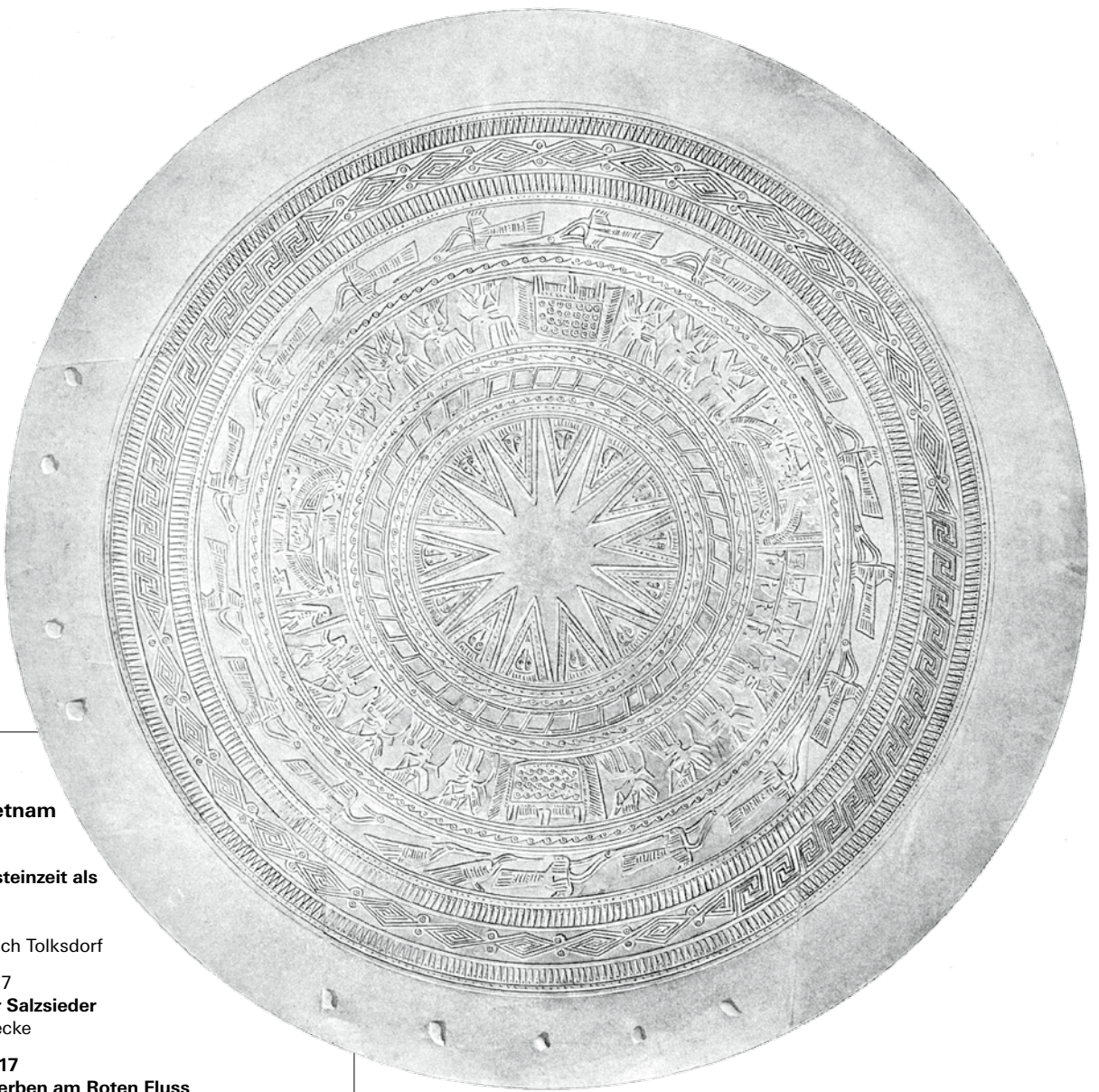
Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

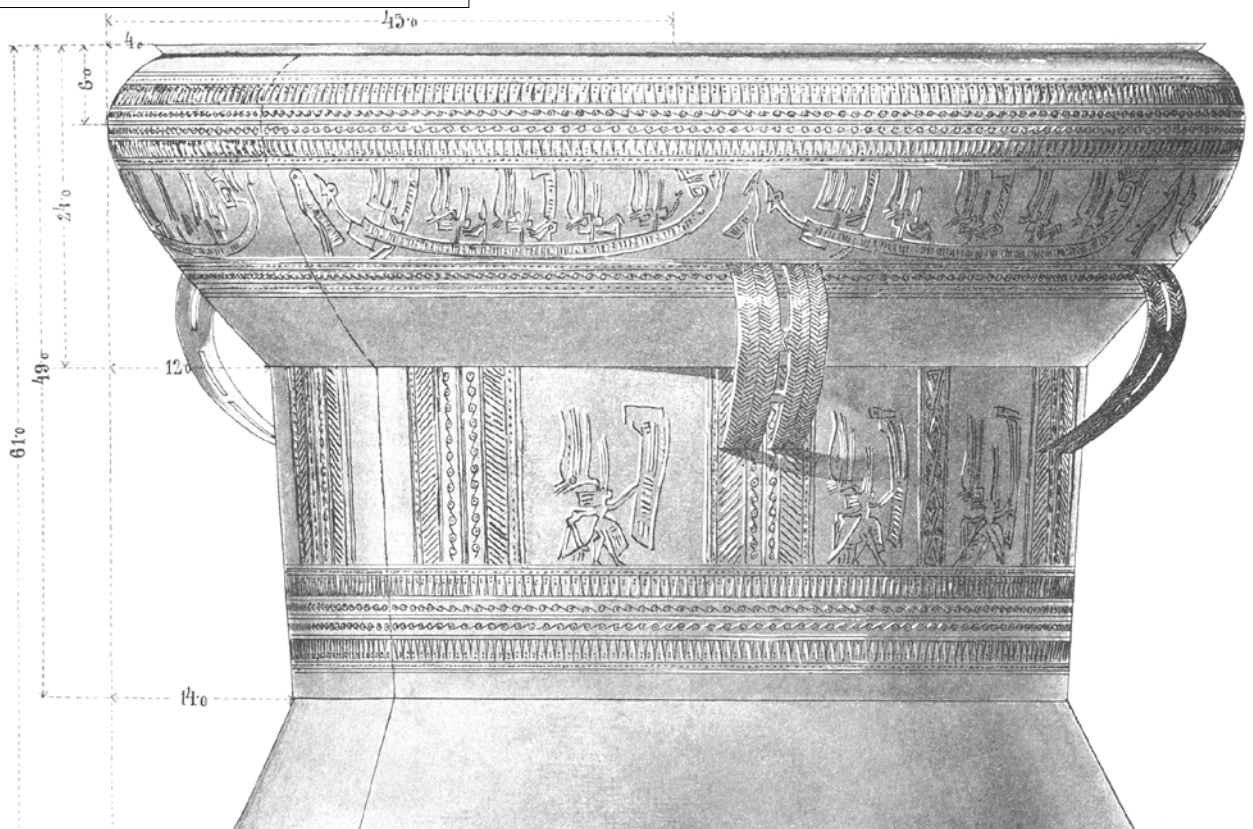
nature

MADE: FRANK HEGER



SPEKTRUM-SERIE
Archäologie in Vietnam

- Teil 1: Oktober 2017
**Vietnams Altsteinzeit als
Bambuszeit?**
Ingo Kraft und
Johann Friedrich Tolksdorf
- Teil 2: November 2017
Die Hügel der Salzsieder
Andreas Reinecke
- Teil 3: Dezember 2017
Leben und Sterben am Roten Fluss
Andreas Reinecke



BRONZETROMMELN LEBEN UND STERBEN AM ROTEN FLUSS

SERIE: VIETNAM Prozessionen von Kriegerern und Seelen, die auf Booten ins Jenseits fahren: Die Reliefbilder großer Bronzetrommeln erzählen vom Glauben der Dong-Son-Kultur Nordvietnams.



Andreas Reinecke ist Chefkurator der Wanderausstellung »Schätze der Archäologie Vietnams«, die er gemeinsam mit den Teams der archäologischen Museen in Herne, Chemnitz und Mannheim konzipierte. Er arbeitet als Referent für Südostasien am Deutschen Archäologischen Institut in Bonn und forscht vor allem zu Vietnam und Kambodscha.

► spektrum.de/artikel/1497907

Die Bronzezeit Vietnams begann bescheiden: Im ersten Jahrtausend v. Chr. erleichterten Beilklingen, Angelhaken, Speerspitzen und andere kleinere Objekte das Leben am Roten Fluss. Im 4. Jahrhundert v. Chr. aber betrat die Dong-Son-Kultur die Bühne der Geschichte, und sie tat es im wahrsten Sinn des Wortes mit einem Paukenschlag: In ihren Dörfern fertigten Bronzegießer gewaltige Trommeln aus dem golden schimmernden Metall mit einer Kunstfertigkeit, die bis heute nie wieder erreicht wurde. Wer einen Einblick in die Glaubenswelt jener Menschen der Vorgeschichte sucht, gewinnt ihn aus

Die Moulié-Trommel mit ihren fein gearbeiteten Reliefs (links) wurde 1889 auf der Weltausstellung in Paris gezeigt.



ANDREAS REINECKE

den eindrucksvollen Darstellungen auf den Instrumenten. Sie thematisieren vor allem den Übergang Verstorbener ins Jenseits und den Verbleib der Ahnen.

Für den Wiener Völkerkundler Franz Heger (1853–1931) wurden diese Instrumente zur Passion, seit er das erste Exemplar 1883 auf der »Bronze-Ausstellung« im k. k. Österreichischen Museum für Kunst und Industrie sah. Welche Funktion das ungewöhnliche, nach seinem Besitzer später Wilczek I genannte Objekt hatte, war damals noch unklar; es mochte ein Tisch oder Kessel gewesen sein. Der Adlige hatte es bei einem Antiquitätenhändler in Florenz erworben, mehr war nicht bekannt.

Als Heger sechs Jahre später die Weltausstellung in Paris besuchte, wusste er bereits durch Recherchen, dass Wilczek I eine alte Trommel aus Südostasien war. Eine weitere Bronzetrommel, ein wahres Prachtexemplar, hielt der Länderpavillon von Tongking bereit, dem französischen Protektorat in Nordvietnam. Fasziniert studierte Heger die in die Metalloberfläche eingearbeiteten Reliefzeichnungen von Menschen, Booten, Häusern und sogar Trommeln. Dieses besondere Stück gehört zu den zehn bildreichsten Bronzetrommeln, die bisher in Südostasien entdeckt worden sind; mit einer Höhe von 61 Zentimetern ist sie zudem eine der größten.

Der Forscherdrang Hegers war geweckt. Seinen Aufzeichnungen nach beschäftigte er sich »zwei Tage hindurch mit diesem ausserordentlichen Stücke«. Er fertigte Skizzen und Abreibungen der Verzierungen an, maß sie aus und notierte alles, was ihm auffiel. Auch diesmal lagen nur wenige konkrete Informationen zur Herkunft vor: Die Trommel war in der heutigen Provinz Hoa Binh entdeckt worden; sie gehörte Tongkings Vize-Resident Jean

Ernest Moulié und war ihm von einer Häuptlingswitwe der Muong-Minderheit geschenkt worden.

Franz Heger, inzwischen Direktor der Anthropologisch-ethnographischen Abteilung des Naturhistorischen Museums Wien, versuchte vergeblich, das einmalige Stück zu erwerben. Zwar konnte er seine Studien nicht fortsetzen und fand seine eigenen Zeichnungen zu schematisch, sie sind aber dennoch bis heute die besten, die zum Moulié-Instrument je veröffentlicht wurden. Es eröffnet den Reigen in Hegers 1902 publizierten Werk »Alte Metalltrommeln aus Südost-Asien«. Dieses Buch war wegweisend; es wurde sogar 2004 noch einmal in chinesischer Sprache aufgelegt. Insgesamt beschrieb der Ethnograf 153 Trommeln und erwähnte weitere 12 in Nachträgen am Schluss des Buchs. Anhand stilistischer Merkmale definierte er vier Grundtypen sowie Zwischenformen. Schilderungen in chinesischen Schriften folgend schätzte der Forscher den ältesten Typ I, zu dem er auch die Moulié-Trommel zählte, korrekt auf ein Alter von mehr als 2000 Jahren.

Heger und die Moulié-Trommel markieren den Beginn der prähistorischen Archäologie Südostasiens. Inzwischen wurden mehr als 500 Bronzetrommeln vom Typ I entdeckt, die meisten in Nordvietnam und im angrenzenden Südchina, einige aber auch in einem Gebiet zwischen Westthailand und Indonesien. Ihre handwerkliche Qualität und der reiche Bilderschmuck beeindrucken auch heute noch.

Wie man Trommeln gießt, wurde vor mehr als 2500 Jahren im Gebiet der heutigen chinesischen Provinz Yunnan erfunden. Auch sie durchquert der Rote Fluss, über den die Technologie zur Dong-Son-Bevölkerung gelangte. Die entwickelte einen eigenen Verzierungsstil mit weniger plastischen, dafür mehr geometrischen Elementen als in China. Das Verfahren unterschied sich aber nicht von jenen Gusstechniken, die bronzezeitliche Kulturen weltweit entwickelten. Aus Lehm entstand zunächst eine Kernform, um die drei Außenformen angepasst wurden: zwei Hälften für den Trommelmantel und eine runde Form für die



ANDREAS REINERKE

Im Dorf Lang Che in der Provinz Thanh Hoa werden heute Bildtrommeln nach altem Vorbild hergestellt. Dabei werden die Verzierungen direkt in eine Tonschicht der Gussformen gearbeitet.

Schlagfläche. Zwischen Kern- und Außenformen sicherten bronzene Abstandhalter eine gleichmäßige Wandung.

Zeitaufwändiger war es, gegebenenfalls Verzierungen auf Vorlagen aus Holz, Ton oder Wachs zu entwerfen; vermutlich nahm dies Wochen in Anspruch. Wo sollten größere Bereiche, wo die Einzelelemente platziert werden? Jede Darstellung verlangte eine detaillierte Planung, denn die Vorlagen ließen sich nur schwer korrigieren. Vermutlich erleichterten Schablonen, Motivstempel und vorgefertigte Formen den Prozess, hinzu kamen einfache Zirkel und Messstäbe.

Offenbar waren Fehler trotzdem nicht zu vermeiden, wie ein Schmuckband der Moulié-Trommel demonstriert: Es ist ein typisches Dekor der Dong-Son-Schlaginstrumente und zeigt langschnäblige Vögel, möglicherweise ein Totemtier. In diesem Fall unterlief dem Künstler ein Missgeschick: Als 16 Vögel auf dem Modell der Schlagfläche platziert waren, blieb nur eine Lücke für ein weiteres Tier. Ungerade Zahlen galten jedoch als schlechtes Omen, also quetschte er dennoch zwei Vögel in den engen Platz.

Nach der Fertigstellung der Trommel richtet der Anführer ein Festessen aus

Da Forscher die Trommeln weit über Südostasien verstreut entdeckten, galten sie als Handelsware. Gegen diese bis heute in vielen Publikationen vertretene Ansicht sprechen mehrere Argumente. Auf die außerordentliche Wertschätzung der Instrumente lässt schon eine der ältesten vietnamesischen Schriftquellen schließen. In den »Annalen von Annam« berichtet der Beamte Le Tac im Jahr 1335 rückblickend auf die frühere Geschichte: »Wenn eine neue Trommel fertig gegossen ist, dann wird sie mitten auf den Hof gestellt, es wird zum Festessen eingeladen, alle Leute der gleichen Sippe finden sich in großer Zahl ein. Mädchen der reichen Familien nehmen einen Dreizack aus Gold oder Silber und schlagen auf die Trommel.«

AUF EINEN BLICK MONUMENTALES SCHLAGZEUG

- 1** Vor mehr als 2000 Jahren ließen Klan-Chefs Trommeln aus Bronze gießen. Die größten Exemplare sind mehr als 80 Zentimeter hoch, es gibt aber auch Miniaturversionen.
- 2** Die Instrumente entstanden zunächst in chinesischen Werkstätten und ab dem 4. Jahrhundert v. Chr. in der Dong-Son-Kultur am Roten Fluss.
- 3** Kunstvolle Reliefbilder illustrieren die damalige Vorstellungswelt, insbesondere den Übergang in die Welt der Toten. Sie zeigen aber auch Häuser, Kleidung, Boote, Waffen, Instrumente und vieles andere aus dem Alltag des Dong-Son-Menschen.

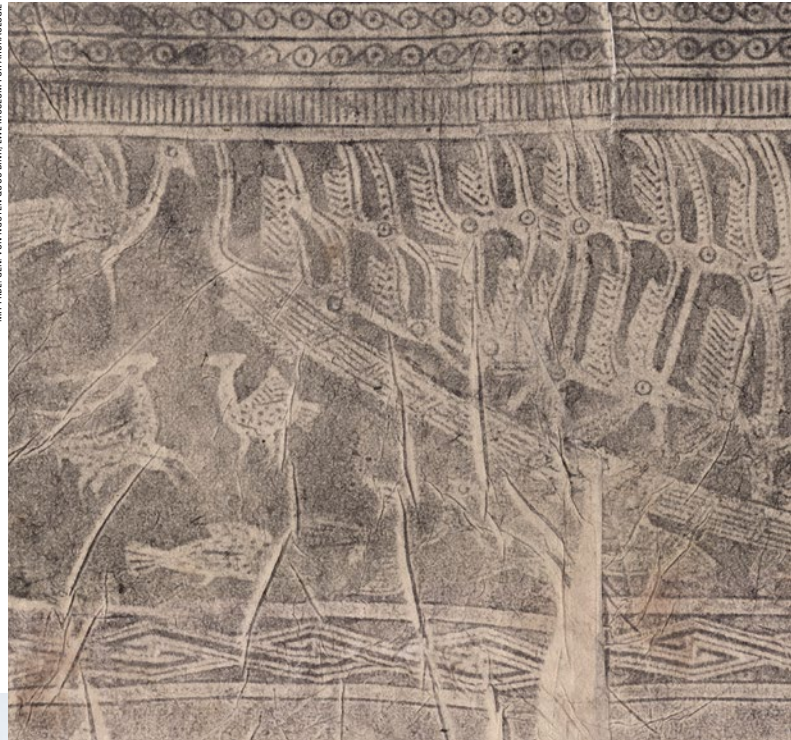
In einer Alltagswelt aus Bambus- und Holzprodukten übten diese riesigen, golden glänzenden Objekte sicher eine ungeheure Faszination auf die Menschen aus. Mit donnerndem Klang riefen sie zur Ernte, zum Totenfest und in den Krieg. Ihre reiche Bildsprache, in Szenen entgegen der Uhrzeigerrichtung orientiert, erzählte nicht vom Alltag, sondern beschrieb die komplexen Rituale eines Weltbilds, das sich an Polaritäten orientierte: Mann und Frau, Körper und Seele, zwei kontrastierende Haustypen. Man erkennt Prozessionen gefiederter Krieger mit Waffen oder Musiker mit Instrumenten. Im Zentrum dieser Bilderwelt stand der Übergang vom Diesseits des Lebens in das Jenseits der Toten – zu den Ahnen.

Dergleichen tauscht man nicht gegen andere Güter ein, seien diese auch noch so kostbar. Die Trommeln besaßen einen unschätzbaren ideellen Wert. Sie waren zentrale Symbole der Ahnenverehrung und blieben im Besitz der führenden Familie einer Gemeinschaft, begleiteten den Anführer oftmals als Beigabe oder gar als Sarg über das Leben hinaus in das Grab. Es gab ähnliche Darstellungen auf anderen Bronzegefäßen jener Epoche. Doch kein Medium war so gut geeignet, das kollektive Gedächtnis zu bewahren, wie diese Trommeln.

Viele ihrer Geheimnisse wurden inzwischen gelüftet, aber manche Fragen lassen sich noch immer nicht präzise beantworten. Die Gründe sind teilweise recht banal: Umfassende Publikationen sind die Ausnahme, selten enthalten sie detaillierte Darstellungen der Verzierungen. Viele Fragen zur Materialherkunft, zum Gussprozess und zu Werkstatttraditionen werden sich nicht klären lassen, ohne

Auf der Sao-Vang-Trommel ist ein Boot zu sehen mit einer Mannschaft aus »gefiederten Seelen«, Fischen und Vögeln – Symbolen der Ober- und Unterwelt. Eine Abreibung der Trommel mit chinesischer Tinte auf Rindenpapier des Do-Baums macht solche feinen Verzierungen sichtbar. Die Sao-Vang-Trommel aus dem Nationalmuseum für die Geschichte Vietnams in Hanoi ist die größte bekannte Bronzetrommel in Südostasien.

MIT FRIEDR. GEN. VON NGUYEN QUOC BINH, LWL-MUSEUM FÜR ARCHÄOLOGIE



MIT FRIEDR. GEN. VON NGUYEN QUOC BINH, LWL-MUSEUM FÜR ARCHÄOLOGIE





MIT FOTO: GEN. VON ANDREAS WEISBERGER, LWL-MUSEUM FÜR ARCHÄOLOGIE

Fünf Männer waren nötig, um die über 200 Kilogramm schwere Bronzetrommel von Sao Vang als Leihgabe für den Transport nach Deutschland vorzubereiten.

die genaue Zusammensetzung der Bronze zu kennen, doch auch archäometrische Analysen zur Herkunftsbestimmung des verwendeten Kupfers, Zinns oder Bleis gibt es kaum.

Vor allem aber fehlt meist eine sorgfältige Dokumentation des Funds, denn der Großteil der Trommeln kam zufällig zu Tage, beispielsweise beim Bestellen eines Ackers, bei der Lehmgewinnung oder bei Baumaßnahmen, jedoch nicht im Zuge archäologischer Ausgrabungen. In welcher Position und mit welchen anderen Objekten sie wie tief in der Erde lagen, wissen Forscher demnach nicht. Deshalb sind manche der von Franz Heger definierten Typen immer noch nicht sicher datiert. Auch Aussagen zum Anlass der Deponierung einer Trommel bleibt ohne archäologischen Fundzusammenhang meist Spekulation.

Zu den Ausnahmen zählt die Trommel, die 1961 im »Bootsgrab Nr. 2« von Viet Khe ausgegraben wurde (siehe Bilder rechts). Die archäologische Stätte ist eine von gut 50 im Bereich des Roten Flusses, an denen so genannte Baumsarggräber ans Licht kamen; insgesamt gab es davon 170. Man kennt diese Art der Beisetzung auch aus Europa, zum Beispiel aus dem bronzezeitlichen Dänemark: Ein Baumstamm wurde halbiert und ausgehöhlt, die Leiche eines Hochrangigen mit Beigaben in eine Hälfte gelegt und mit der anderen zugedeckt (siehe auch »Die lange Reise des Egtved-Mächens«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 1/2017, S. 24–25). Eine ähnliche

Sitte kam wohl im 3. Jahrhundert v. Chr. von Südchina nach Nordvietnam. In einigen Gräbern fanden sich Paddel, in manchen, darunter Viet Khe, hat man gar einen ehemals als Boot benutzten Einbaum halbiert und umfunktioniert. Offenbar betrachteten die Menschen der Dong-Son-Kultur einen Baumsarg als symbolisches Wasserfahrzeug für die Reise ins Jenseits.

Lediglich das Oberteil der dort entdeckten Trommel mit der Schlagfläche war vollständig, vermutlich war das Instrument nicht komplett deponiert worden. Die Bronzetrommel gehört mit 23 Zentimeter Durchmesser zu den kleineren Exemplaren — aber dass man sie dort hineinlegte, ist ein Sonderfall, denn es ist die einzige in den 170 Bootsgräbern dieser Epoche. Das legt eine herausgehobene Stellung des Verstorbenen nahe. Tatsächlich war er den Waffen und dem Bronzegeschirr nach ein hochrangiger Militär entweder mit chinesischen Wurzeln oder mit guten Verbindungen zum mächtigen Nachbarn.

Neben der Einteilung der Bronzetrommeln nach Heger in die Typen I bis IV untergliedern Fachleute den ältesten Typ I der Dong-Son-Kultur anhand der Bildmotive noch weiter in mehrere Gruppen. Die Trommel von Viet Khe gehört zur Gruppe B. Dieser fehlen Darstellungen von Menschen, Booten oder Häusern, wie sie für »Bildtrommeln« der Gruppe A typisch sind, ebenso wie jene Froschfiguren auf der Schlagfläche (Gruppe C), die Religionsexperten mit einem Wasserkult verbinden.

Eine Holzprobe des Einbaums wurde 1970 mit der Radiokohlenstoffmethode auf 810 bis 390 v. Chr. datiert. Allerdings war damit nicht die Grablegung bestimmt, sondern nur ein sehr grober Zeitrahmen für das Alter des Holzes, aus dem das Boot bestand. Das Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie hat den gesamten Grabkomplex vor wenigen Jahren erneut datiert. Demnach war der Tote frühestens im 3. Jahrhundert v. Chr. bestattet worden. Den Baumstamm für den Einbaum hatte man also viel früher gefällt.

Die größte Trommel stand zunächst unter dem Verdacht, eine Fälschung zu sein

Dessen ungeachtet gehören Trommel und Grab zu den ältesten Zeugnissen der Dong-Son-Kultur, die damit frühestens im 4. Jahrhundert v. Chr. begann. Auch ein zweiter gängiger Eckpfeiler der Chronologie in Südostasien, das Grab 56 von Ban Don Ta Phet in Westthailand mit einem Bronzegefäß dieser Kultur, stammt wohl nicht aus dem 4., sondern vom Ende des 2. Jahrhunderts v. Chr.

Eine ganz besondere Trommel wurde vor mehr als zehn Jahren im Gebiet des Flughafens von Sao Vang, etwa 35 Kilometer westlich der nordvietnamesischen Stadt Thanh Hoa entdeckt. Sie steckte den Berichten nach mit der Schlagfläche nach unten im Boden wie ein Behälter. 2006 erwarb sie das Nationalmuseum für die Geschichte Vietnams in Hanoi; neun Jahre später entdeckten deutsche Archäologen sie dort im Magazin. Sie war unter einer Plane verborgen, denn inzwischen stellten Museumsmitarbeiter ihre Echtheit in Frage, da sie nicht so recht in eine der bekannten Stilgruppen passen wollte: Auf dem oberen Rand sind vier Froschfiguren aufgesetzt, was sie in Grup-

pe C einordnen würde, andererseits gibt es zahlreiche bildliche Darstellungen vom Typ Gruppe A.

Manche heutigen Bronze gießereien Vietnams können tatsächlich Trommelfälschungen mit künstlicher Patina liefern. Aber solche Imitationen sind meist dickwandiger und vor allem niemals so groß: Die Sao-Vang-Trommel wiegt mit ihren 85,5 Zentimetern Höhe etwa 200 Kilogramm. Fünf starke Männer waren notwendig, um sie aus dem Museumsmagazin zu holen und für den Transport nach Deutschland vorzubereiten. Sie wird in der Wanderausstellung »Schätze der Archäologie Vietnams« gezeigt. An ihrer Echtheit gibt es angesichts der authentischen Bilderwelt nunmehr keinen Zweifel. Das aber bedeutet, dass die drei Motivgruppen nicht verschiedene, aufeinander folgende Phasen repräsentierten, sondern gleichzeitig existierten. Möglicherweise ergänzten sie sich funktional. Größe und Symbolik mögen aber auch den Geschmack der Auftraggeber oder die Kreativität der Handwerker widerspiegeln.



MIT FROL. GEN. VOM MUSEUM HAI PHONG



MIT FROL. GEN. VOM MUSEUM HAI PHONG

Die vier Froschfiguren demonstrieren, wie viel Detailarbeit nötig war. Es wurde dafür zunächst ein Modell vermutlich aus Holz mit etwa 300 eingravierten Linien auf dem Froschrücken angefertigt. Damit wurden vier baugleiche Gussformen aus Lehm hergestellt, die man dann mit der großen Gussform der Schlagfläche verband.

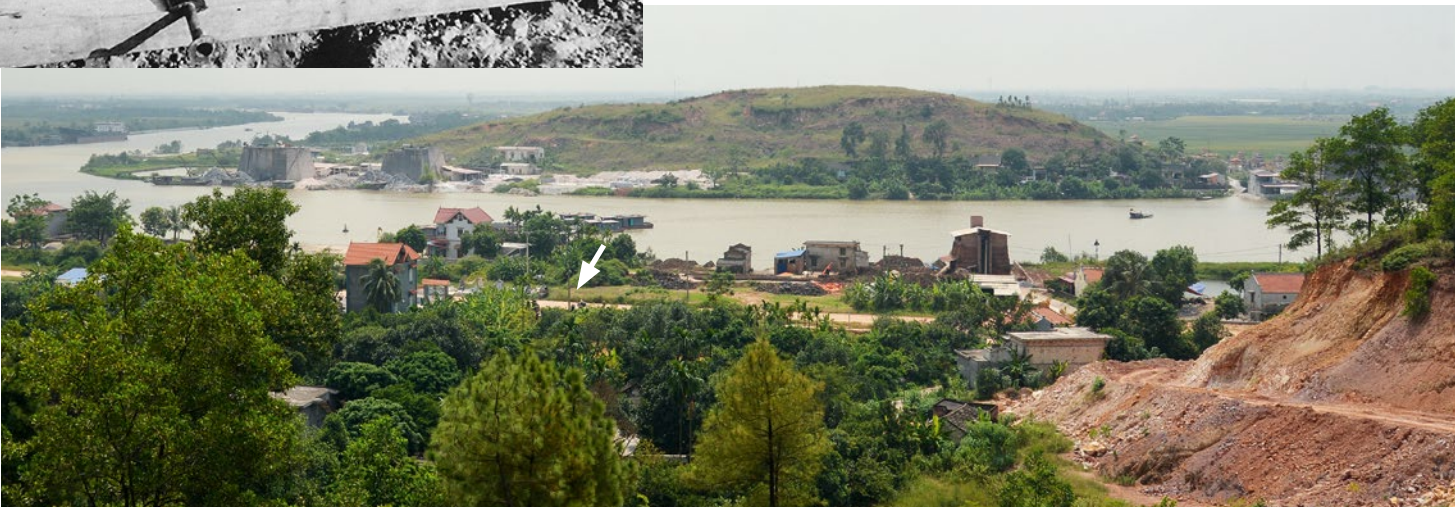
Mit viel Fantasie füllte man auch die Zwischenräume des zwölfzackigen Sterns im Zentrum mit dem Motiv von Pfauenfedern. Dieser Vogel ist auf einigen Dong-Son-Trommeln vollständig zu sehen und symbolisierte wohl außerordentliche Schönheit. Seine Sonderstellung betonte Le Tac in seinem Bericht aus dem 14. Jahrhundert, wonach die chinesischen Besatzer in den ersten Jahrhunderten n. Chr. die Pfauen der einheimischen Bevölkerung überließen, statt sie zusammen mit Gewürzen, Elfenbein und Fasanenfedern als Abgaben zu verlangen.

Die ungewöhnlich große Trommelfläche mit einem Durchmesser von 116 Zentimetern verlangte Sonderlösungen bei der Ausschmückung. Üblich war nur ein Vogelband, doch hier gab es genug Platz für zwei. Das innere zeigt 20 Vögel, deren beim Flug gekrümmter Hals an Reiher erinnert, allerdings gleicht der schnabellose Kopf eher einer Schlange. Zwischen jeweils zwei Tieren schweben kleinere, fast schlangenförmige Wesen. Im äußeren Vogelband sind 18 der üblichen langschnäbeligen Vögel



MIT FROL. GEN. VOM MUSEUM HAI PHONG

1961 wurden in Viet Khe am Han-Fluss Bootsgräber entdeckt (schwarz-weiße Bilder, unten die heutige Ansicht). Die Gräber (Pfeil) waren reich ausgestattet.



ANDREAS REINECKE

zu sehen. Eine Besonderheit ist auch die Darstellung der Prozession: Bei anderen Exemplaren sieht man einen Zug naturalistisch wirkender Krieger mit Federschmuck, hier sind diese so stark stilisiert, dass sich die Assoziation »gefiederte Seelen« aufdrängt (siehe Bild S. 69).

Vier Pfostenhäuser unterbrechen die Prozession – was sich nur auf den wenigen, reich verzierten Bildtrommeln findet. Entsprechend der dualistischen Weltsicht erkennt man zwei Haustypen, die eine Polarität symbolisieren. Der erste wirkt raffiniert, mit schrägen Wänden und einem sattelförmigen Dach. Unter diesen beiden »V-Häusern« der Sao-Vang-Trommel sitzen oder stehen sich Paare gegenüber, die feiern, trinken und musizieren. Der zweite, einfachere Haustyp ähnelt einem Speicher, wie sie in südostasiatischen Dörfern auch heute noch anzutreffen sind. Neben einem befindet sich eine Person mit Federkopfschmuck. Auch unter diesen Häusern gibt es etwas zu sehen: ein Hund unter dem einen, eine Trommel unter dem anderen. Beide Speicherhäuser sind überdies mit Kreisäugen verziert, wie sie auch an Stelle der Köpfe der gefiederten Wesen im Prozessionszug dargestellt sind. Sehr wahrscheinlich handelt es sich nicht um eine profane Wandverzierung – diese Speicher waren »Seelenhäuser«.

Bereits 1929 hatte der französische Forscher Victor Goloubew auf verblüffende Parallelen zwischen solchen Dong-Son-Bildern und Totenfest-Darstellungen der Dayak hingewiesen, einem jüngeren Stamm auf Borneo. Der Verdacht liegt nahe, dass sie mythologische Vorstellungen teilten, die über mehrere Jahrtausende weiträumig weitergegeben wurden. Auch in der Religion der Dayak symbolisieren zwei Häuser unterschiedlichen Stils den Gegensatz zwischen Diesseits und Jenseits.

Es lassen sich noch weitere Kulturvergleiche anstellen. So zeigt die Schlagfläche der Moulié-Trommel eine Plattform mit vier Menschen neben jedem V-Haus. Diese schlagen offenbar mit langen Stangen verschieden große Trommeln, die sich unter der Plattform befinden. Die Instrumente stehen nicht direkt auf der Erde, sondern erhöht, so dass sich unter ihnen jeweils ein Resonanzraum bildet. Das erinnert an das »Talempong batu« Westsumatras, ein Lithophon, dessen Klangsteine auf Bambusstangen über einer Grube liegen. In der Moulié-Szene scheinen die vier Personen abwechselnd zu trommeln. Das erinnert zum einen an das tägliche Reisstampfen mit Stangen und Mörsern, zum anderen wieder an die Totenfeiern der Dayak: Das Ankleiden des Verstorbenen, die Sarglegung, der Transport und schließlich die Grablegung werden dem ganzen Dorf mit Schlägen auf vier verschiedenen großen Pauken mitgeteilt.

Ober- und Unterwelt sind auch das Thema des Mantels der Sao-Vang-Trommel, dessen bauchiger, oberer Teil ebenfalls reich bebildert ist. Sechs lange Boote mit hochgezogenen Vor- und Achtersteven tragen dort die »gefiederten Seelen«. Über ihnen ziehen Vögel dahin, unter ihnen schwimmen Fische. Für die Bewohner des von vielen Flüssen als Hauptverkehrswegen durchzogenen Gebiets war es selbstverständlich, dass auch die letzte Reise auf einem Fluss verlief. Während die großen Bronzetrommeln Einblicke in die Glaubenswelt der Dong-Son-

Menschen geben, verraten Miniaturausgaben davon einiges über ihr Sozialleben. Sie messen zwischen zwei und zwölf Zentimeter Höhe – zu wenig, um stehend zu klingen. Viele tragen in der Mitte der Schlagfläche das bekannte sternförmige Sonnenmotiv, ansonsten sind die Objekte oft nur mit einfachen geometrischen Mustern verziert. Für diese Miniaturtrommeln hat man sich lange Zeit kaum interessiert. Doch sie sind ein exzellentes »Leitfossil«: Da sie außerhalb Nordvietnams kaum vorkamen und auch keine Nachfolgetypen bekannt sind, gehören sie zu den besonders charakteristischen Hinterlassenschaften der Dong-Son-Bevölkerung.

Dienten diese Beigaben den Ärmeren als Ersatz für die kostbaren, großen Bronzetrommeln? Wohl nicht, denn in dem Fall müssten sie viel häufiger zu Tage kommen. In einer der größten der bislang untersuchten Nekropolen am Roten Fluss, Lang Ca in der Provinz Phu Tho, entdeckten Archäologen in 307 Gräbern diverse Beigaben, darunter aber nur eine einzige Miniaturtrommel. Einer alternativen Hypothese zufolge könnte es ein Zahlungsmittel sein, doch auch dann müsste man sie öfter entdecken. Eine Öse auf den meisten Exemplaren deutet zudem darauf hin, dass sie wie ein Glöckchen vielleicht neben dem Hausaltar hingen.

In der Not wurden die Bronzetrommeln vergraben – oder auf der Flucht mitgenommen

Zu dieser Funktion kommt eine zweite: Als Totenbeigabe besaßen diese Imitationen vermutlich eine Stellvertreterrolle. Das verdeutlicht ein Grab von Binh Da bei Hanoi, das Bauern 1982 zufällig entdeckten. Gerade 30 Zentimeter tief steckte eine Trommel vom Typ I mit einem Durchmesser von 41 Zentimetern im Boden. Auf der Schlagfläche sollen zehn bronzene Miniaturgegenstände gelegen haben, darunter eine Miniaturtrommel, ein Dreizack, ein Tüllenbeil, ein Glöckchen, eine Kelle und ein lanzenspitzenähnliches Objekt. Wer immer dort bestattet worden ist, gehörte vermutlich zu den Begüterten. Dank der Miniaturbronzen konnte seine Familie diesen Reichtum demonstrieren, ohne sich von symbolträchtigen Gütern trennen zu müssen.

Der Stamm der Dayak von Borneo zeigt mit der Darstellung von zwei »Seelenbooten« eine ähnliche Vorstellung vom Übergang ins Totenreich wie die Menschen der Dong-Son-Kultur in Vietnam.





Die Miniaturtrommel links ist zehn Zentimeter hoch und gehört damit schon zu den größeren ihrer Art. Diese Bronzeobjekte aus der Dong-Son-Zeit galten sicher als sehr wertvoll, auch wenn man auf ihnen nicht spielen konnte wie auf den großen Exemplaren.

Religion und Gesellschaft – die Bronzetrockeln bieten eine Fülle an Informationen über die Dong-Son-Kultur. Mitunter weisen sie sogar darüber hinaus und erlauben es, die Dörfer vom Roten Fluss in einen größeren geschichtlichen Zusammenhang einzuordnen. Ein solches Exemplar ist ein großes Instrument, das ebenfalls 1982 zufällig entdeckt wurde. Die Fundstätte ist Co Loa, eine Festung nahe dem heutigen Hanoi.

Chinesischen Quellen und archäologischen Ausgrabungen der letzten Jahre nach war sie Mitte des 3. Jahrhunderts v. Chr. errichtet worden – als Machtbasis des Reichs Au Lac, das sich im Bereich der Dong-Son-Kultur gebildet hatte. In China war dies die Phase der streitenden Reiche, in der Dynasten und Generäle erbittert um die Vorherrschaft stritten. Viele Einwohner Südchinas flohen nach Nordvietnam, Truppen überfielen Dörfer am Roten Fluss, eine Festungsanlage war vonnöten. Das von der Han-Dynastie geeinte China okkupierte dann das Gebiet am Roten Fluss 111 v. Chr.

Wie die schwere Sao-Vang-Trommel lag auch das Instrument von Co Loa auf seiner Schlagfläche, die Verzierungen ähneln einander ebenfalls. Doch diesmal konnte der Inhalt des zum Behälter umfunktionierten Instruments geborgen werden: mehr als 200 Bronzeobjekte, darunter Pflugscharen, Beile und Speerspitzen. Allerdings fehlte jeder Hinweis auf eine Bestattung. Eine chinesische Münze, die seit dem 3. Jahrhundert v. Chr. in China in Umlauf

war, lieferte einen ersten Anhaltspunkt für die Datierung; leider ist sie inzwischen verschollen.

Bereits in der Erstveröffentlichung 1983 wurde eine chinesische Inschrift auf der Innenseite des Trommelfußes erwähnt. Eine aktuelle Übersetzung lautet: »48. Trommel von Tay Vu mit einem Gewicht von 281 Pfund.« In der Han-Zeit entsprach ein Pfund etwa einem Viertel eines heutigen Kilogramms. Die Inschrift ignorierte also den künstlerischen und symbolischen Wert der Bronzetrockeln und reduzierte sie auf ihr Metallgewicht.

Alles in allem handelt es sich um einen klassischen Hortfund: Menschen vergruben wertvollen Besitz in kriegerischen Zeiten. Vermutlich geschah das in Co Loa, nachdem General Ma Yuan (14 v. Chr.–49 n. Chr.) einen Aufstand gegen die chinesischen Besatzer 43 n. Chr. niedergeschlagen hatte. Denn wie die »Annalen der späten Han« verraten, befahl er seinen Truppen, alle Bronzetrockeln zu konfiszieren und einzuschmelzen. Indem er ihre Symbole vernichtete, wollte der Sieger den Widerstand der Einheimischen ein für alle Mal brechen.

Manch ein Angehöriger der Elite verließ seine Heimat, wie es viele schon seit dem Eindringen der Chinesen getan hatten. Und damit erklärt sich auch, wie Bronzetrockeln bis nach Kambodscha und Indonesien gelangten: nicht als begehrte Handelsware, sondern als kostbarster Besitz von Flüchtlingen, die im Exil ihren Traditionen und Glaubensvorstellungen treu blieben. ◀

QUELLEN

Bernet Kempers, A. J.: The Kettledrums of Southeast Asia. A Bronze Age World and its Aftermath. Modern Quaternary Research in Southeast Asia 10. A. A. Balkema, Rotterdam 1988

Heger, F.: Alte Metalltrommeln aus Südost-Asien. Hiersemann, Leipzig 1902

Reinecke, A. (Hg.): Schätze der Archäologie Vietnams. Begleitband zur Sonderausstellung. Nünnerich-Asmus, Mainz 2016

Tjoa-Bonatz, M. L., Reinecke, A. (Hg.): Im Schatten von Angkor. Archäologie und Geschichte Südostasiens. Philipp von Zabern, Darmstadt 2015



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN ETHISCHE AUFRÜSTUNG DURCH BAKTERIEN

Wird man ein besserer Mensch, weil man die richtigen Mikroben in seinem Darm beherbergt? Ein mathematisches Modell liefert tatsächlich Argumente für diese skurril erscheinende These.



Christoph Pöppe ist Spektrum-Redakteur für Mathematik und Computertechnik.

» spektrum.de/artikel/1513365

Wie ist es zu erklären, dass Angehörige vieler Tierarten einschließlich des Menschen bereitwillig Nachteile für sich selbst in Kauf nehmen, um einem Artgenossen einen Vorteil zu verschaffen? Die klassische Evolutionstheorie hat da ein Problem. Altruistisches Handeln hilft zwar der Gemeinschaft, wenn der Vorteil für den Begünstigten größer ist als der Nachteil für den Helfer, nicht aber dem Handelnden selbst. Eine erbliche Disposition zu solchem Verhalten müsste eigentlich aussterben. Denn die Träger dieses Merkmals mindern durch ihr Handeln ihre Fitness und damit die Zahl ihrer Nachkommen gegenüber denen, die stets nur ihren eigenen Vorteil suchen.

Die offensichtliche Tatsache, dass der Altruismus nicht ausgestorben ist, schreit also nach einer Erklärung. Prominent geworden ist die vom »egoistischen Gen«: Die gute Tat trifft nur nahe Verwandte. Ein altruistisch Handelnder verhilft zwar nicht direkt seinen eigenen Genen zur Weiterverbreitung, sondern zum Beispiel denen seines Bruders. Die sind aber zur Hälfte mit seinen eigenen identisch. Altruismus aus Eigennutz betreiben also nicht die Individuen selbst, sondern ihre Gene.

Tatsächlich finden sich Tiere, die ihre Wohltaten nach ihrer Verwandtschaft mit dem Begünstigten bemessen. Den Extremfall stellen die Staaten bildenden Insekten dar. Aber Altruismus ist weit über die eigene Familie hinaus zu beobachten.

Die nächste Erklärung (der »reziproke Altruismus«) läuft darauf hinaus, dass der Wohltäter erwarten kann, seinerseits Wohltaten zu erfahren, typischerweise, aber nicht notwendig vom Empfänger der guten Tat. Wenn diese Erwartung erfüllt wird, ist das gedeihlich für alle Beteilig-



ten; aber man ist stets in Gefahr, von einem Partner ausgebeutet zu werden, der sich nicht revanchiert. Schlimmer noch: Die Erwartung nicht zu erfüllen ist gegenüber jedem Partner, einem »Guten« (Altruisten) wie einem »Bösen« (Nichtaltruisten), die vorteilhaftere Strategie.

In der Spieltheorie ist genau dieses Problem unter dem Namen »Gefangenendilemma« intensiv diskutiert worden. Gutes tun kostet den Täter etwas, bringt aber dem Begünstigten mehr Vorteile, als der Wohltäter an Nachteilen hat. Nichtstun kostet nichts und bringt keinem etwas. So abstrakt formuliert, lässt sich das Problem analysieren, mit dem Ergebnis, dass der Zustand »alle verhalten sich böse« ein so genanntes Nash-Gleichgewicht ist. Das heißt, durch einseitiges Abweichen von diesem Zustand kann sich jeder der Beteiligten nur verschlechtern. Also wird das nicht passieren – es sei denn, man begegnet sich mehr als einmal im Leben. Wer beim letzten Mal gut behandelt worden ist, kann das als Indiz dafür ansehen, dass sein Partner sich auch dieses Mal so verhalten wird, und daraufhin seinerseits die altruistische Strategie wählen.

Dieses »iterierte Gefangenendilemma« ist wegen seiner abstrakten Formulierung gut zu programmieren. Das haben in den 1970er und 1980er Jahren viele Leute ge-

tan – was die Computer schon damals nicht überforderte (**Spektrum** August 1983, S. 8; für neuere Ansätze siehe **Spektrum** Spezial 2/2012 »Mathematische Spiele und Strategien«, S. 26). Das Ergebnis war überraschend einfach. Eine Verhaltensdisposition (»Strategie«), die den Beteiligten nur sehr bescheidene geistige Fähigkeiten abverlangt, kann sich evolutionär durchsetzen: Behandle deinen Partner so, wie er dich das letzte Mal behandelt hat (»Tit for Tat«).

Kinder erben die Strategien ihrer Eltern

Typischerweise beginnt eine derartige Computersimulation mit einer großen Population von Individuen mit verschiedenen angeborenen Strategien. Immer wieder begegnen sich, vom Zufall bestimmt, zwei von ihnen, tun einander das an, was ihre Strategie ihnen vorschreibt, und sammeln je nach dem Ergebnis Punkte. Nach einer gewissen Zahl von Begegnungen reproduzieren sie sich und vererben dabei ihren Kindern ihre Strategie. Die Kinderzahl ist proportional dem erreichten Punktestand, der als Fitness im darwinschen Sinn zu verstehen ist.

Aber selbst eine Population, die nur aus Tit-for-Tat-Strategen besteht, kann zusammenbrechen, wenn – sagen

Wird die frühe Sozialisation im Kindergarten möglicherweise durch den Austausch von Darmbakterien begünstigt?



DRY / PATRICK PLEIL

Altruismus dank Mikroben, vereinfacht:

In der einfachsten Version des Modells von Hadany, Lewin-Epstein und Aharonov lebt eine Population von vielen einzelnen Organismen – nennen wir sie »Wesen« – in einem Gebiet ohne jede räumliche Struktur. Das Verhalten eines Wesens wird vollständig durch das bestimmt, was in seinem Darm lebt. Die Wesen mit den Mikroben der Sorte α gehören zu den »Guten«: Sie verabreichen jedem, dem sie begegnen, eine Wohltat, die dem Empfänger b Einheiten einbringt – etwas Nahrhaftes oder allgemein etwas, was die Fitness vermehrt. Die gute Tat kostet den Wohltäter c Einheiten; c ist kleiner als b und b wiederum kleiner als 1, was der Fitness entspricht, mit der jedes Wesen auf die Welt kommt. Aus einer Begegnung zweier Guten gehen also beide mit einem Gewinn $b-c$ hervor.

Die »Bösen« dagegen, das heißt die Träger der Mikrobenart β , geben

nichts und wenden entsprechend auch nichts dafür auf. Von einer Begegnung mit ihresgleichen haben sie also gar nichts; aber wenn ein Böser auf einen Guten trifft, ist er hinterher um fette b Einheiten reicher und der andere um c Einheiten ärmer.

Das Leben jedes Wesens besteht in einer einzigen Begegnung – mit wem, das entscheidet der Zufall. Beide Partner gehen daraus mit den oben beschriebenen Gewinnen und Verlusten hervor; insoweit entspricht das Modell dem klassischen Gefangenendilemma. Zusätzlich ist aber die Begegnung so intensiv, dass mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit T_α die Mikroben von einem Guten auf seinen Interaktionspartner überspringen und dessen Darm komplett erobern. Das können die Mikroben eines Bösen auch, mit der Wahrscheinlichkeit T_β , und es

kann durchaus sein – biologisch absurd, aber einfacher zu rechnen –, dass nach einer Begegnung jeder die Mikroben des anderen in sich trägt und die bisher eigenen keine Rolle mehr spielen.

Nach dieser entscheidenden Begegnung erzeugen alle Wesen Nachkommen, asexuell, also ohne jeden weiteren Kontakt miteinander, und vererben ihnen ihre aktuelle Mikrobenausstattung. Die Anzahl der Kinder ist proportional der Fitness. Ein Guter, der an einen Guten geraten ist, hat hinterher eine nette Kleinfamilie; ein Böser, der einen Guten ausgenutzt hat, stellt ihn mit seiner Kinderschar weit in den Schatten. Dagegen gehen aus den anderen beiden Begegnungstypen (Guter wird von Bösem ausgenommen, und zwei Böse trennen sich ergebnislos) nur relativ wenige Nachkommen hervor. Schließlich

wir durch Zuwanderung oder durch Mutation – ein Zeitgenosse mit unfreundlicherer Disposition auftaucht. Auch die Theorie vom reziproken Altruismus bleibt also hinter der Realität zurück.

Nun hat eine dreiköpfige Forschungsgruppe aus Tel Aviv (Israel) eine neue Erklärung vorgelegt. Vielleicht sind es nicht ausschließlich die Gene, die das Verhalten der Individuen bestimmen, sondern Parasiten, die in ihrem Blut kreisen, oder Bakterien, die ihren Darm besiedeln.

So abwegig, wie sie auf den ersten Blick aussieht, ist die Idee gar nicht. Mikroben können durchaus das Verhalten ihrer Wirtsorganismen verändern, und eine solche Fähigkeit wird sich durchsetzen, wenn sie für die Mikroben von Vorteil ist. Mäuse, die mit dem Toxoplasmose-Erreger *Toxoplasma gondii* infiziert sind, verlieren ihre natürliche Scheu vor Katzen – schlecht für die Mäuse, aber gut für die Parasiten, die dadurch ihre Chance, in den Endwirt Katze zu gelangen, erheblich erhöhen. Der Saugwurm *Dicrocoelium dendriticum* (»Kleiner Leberegel«) veranlasst die von ihm befallenen Ameisen, sich am oberen Ende eines Grashalms festzubeißen und sich so Kühen oder Schafen zum Fraß darzubieten. In deren Gallengängen nistet der Saugwurm sich ein und produziert zahlreiche Eier. Und der Saitenwurm *Spiniochordodes tellinii* greift so in das Nervensystem der Grille ein, in der er herangewachsen ist, dass sie sich ins Wasser stürzt; das braucht der Wurm für sein nächstes Lebensstadium.

Anders als diese Beispiele nahelegen mögen, muss ein Parasit seinen Wirt im Prinzip nicht umbringen – im Gegenteil: Wenn der Wirt sich vermehrt und sein Schmarotzer mit ihm, ist das möglicherweise ein noch größerer Fortpflanzungserfolg für den Letzteren. Es wäre also immerhin denkbar, dass ein Darmbakterium, zum Beispiel über die Produktion irgendwelcher Hormone, den Besitzer des Darms zu altruistischem Verhalten motiviert.

Ist der Mensch edel, hilfreich und gut, weil sein Innerstes ihn dazu veranlasst? Oder weil er die richtigen Bakterien im Darm beherbergt?

Das allein ginge allerdings, vom abstrakten Standpunkt aus gesehen, noch nicht über ein iteriertes Gefangenendilemma hinaus. Dass die Vererbung nun nicht mehr über die Gene, sondern über die Darmbakterien verläuft, ist für die Spieltheorie irrelevant. Vielmehr bringen die Mikroben ein neues Element ins Spiel. Was bei Genen höherer Organismen praktisch nicht möglich ist, dass nämlich Eigenschaften nicht nur vererbt, sondern auch von einem ausgewachsenen Individuum auf ein anderes übertragen

Das Modell von Hadany, Lewin-Epstein und Aharonov

ersetzen die Kinder ihre Eltern, und eine neue Generation spielt die nächste Runde in diesem Zufallsspiel.

Im klassischen Modell können sich die Guten niemals durchsetzen, denn sie helfen der Vermehrung der Bösen stets mehr als der eigenen. Nun aber kann ein Böser sich bei der Begegnung mit einem Guten mit α -Mikroben anstecken und dadurch zu einem Guten konvertieren. Da er bei derselben Begegnung an Fitness zugelegt hat, zeugt er zahlreiche Kinder und vererbt jedem von ihnen seine altruistische Grundhaltung. Dieser Effekt lässt unter geeigneten Umständen die Waagschale zu Gunsten der Guten kippen.

Im Einzelnen: Wenn p der Anteil der Guten und $q = 1 - p$ der Anteil der Bösen in der ursprünglichen Population ist, dann ist nach der Begegnung der Anteil \hat{p} der Guten gleich $p^2 + pq(1 + T_\alpha - T_\beta)$. Der erste Term

entstammt den Begegnungen Gut mit Gut, der zweite den Begegnungen Gut mit Böse, darin sind enthalten der Zuwachs und die Abwanderung durch Ansteckung mit guten (α) beziehungsweise bösen (β) Mikroben.

Die Fitness der Guten liegt zwischen $1 - c$ (Begegnung Gut mit Böse) und $1 + b$ (ehemals Böse mit Gut). Am Ende einer längeren Rechnung steht das Ergebnis, dass der Anteil p' der Guten unter den Kindern dann größer ist als der entsprechende Anteil unter den Eltern, wenn $T_\alpha b > c(1 - T_\beta) + (T_\beta - T_\alpha)$ ist.

Bemerkenswerterweise kommt p selbst in dieser Ungleichung gar nicht vor. Das heißt, wenn die »Umweltbedingungen« b , c , T_α und T_β sich nicht verändern, wächst der Anteil der Guten von Generation zu Generation, bis zur Sättigung. Für den Spezialfall $T_\alpha = T_\beta = 1/2$ läuft die

Bedingung auf $b > c$ hinaus, was nach Voraussetzung immer gilt. Wenn es keine Ansteckung gibt ($T_\alpha = 0$), kann die Bedingung nicht erfüllt sein; aber ein kleines T_α genügt, wenn $b - c$ (der Nutzen der guten Tat für die Allgemeinheit) hinreichend groß ist.

In weiteren, deutlich komplizierteren Rechnungen und Computersimulationen zeigen die Autoren, dass der Effekt erhalten bleibt, wenn man die Bedingungen schrittweise der Realität annähert: Es darf mehr als eine Begegnung geben; dass die Kinder sämtlich zu einem einheitlichen Zeitpunkt die Eltern ablösen, ist nicht erforderlich; man muss seine Mikrobenausstattung nicht unbedingt von den Eltern erben, sondern darf sie sich am Anfang seines Lebens mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bei einem Zufallspartner einfangen.

werden (»horizontaler Gentransfer«), das geht mit Bakterien ganz einfach: Sowie ein neuer Wirt in Kontakt zu einem bereits befallenen tritt, infizieren ihn die Bakterien und verwandeln ihn damit in einen Altruisten. Nicht immer, aber mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit.

Lilach Hadany, Professorin für Biologie an der Universität Tel Aviv, ihr Doktorand Ohad Lewin-Epstein sowie Ranit Aharonov, KI-Forscherin bei IBM Israel, haben diese Ideen in eine große Anzahl von Computersimulationen umgesetzt. Neben vielen unübersichtlichen Einzelheiten ergibt sich ein konsistentes Gesamtbild: Die Mikroben, die ihre Wirte zur Wohltätigkeit motivieren, breiten sich unaufhaltsam in der Population aus, wenn nur der Nettoeffekt der guten Tat (Nutzen für den Begünstigten minus Kosten für den Wohltäter) hinreichend groß ist. In einem extrem reduzierten Modellszenario kann man das sogar mit Papier und Bleistift durchrechnen (siehe »Altruismus dank Mikroben, vereinfacht: Das Modell von Hadany, Lewin-Epstein und Aharonov«, oben). Vor allem müssen die Mikroben, die solches Verhalten hervorrufen, nicht durchsetzungsfähiger sein als ihre ethisch eher neutralen Artgenossen.

So weit das mathematische Modell. Was sagt uns das über die Realität? Wenn der Mensch edel, hilfreich und gut ist: Liegt das vielleicht nicht an hochgeistigen Ursachen, sondern an irgendwelchen schmutzigen Darmbakterien?

Solche Spekulationen kommen den Forschern rasch in den Sinn. Manche suchen bereits nach dem konkreten

Stoff, dessen Produktion die Bakterien befördern und der unser Verhalten beeinflussen könnte, und gehen so weit, einen Namen zu nennen: Serotonin. Eine Forschergruppe um John Bienenstock von der McMaster University in Hamilton (Ontario, Kanada) verabreichte – im Rahmen einer Untersuchung mit anderer Zielrichtung – Mäusen unmittelbar vor und nach der Geburt ein Antibiotikum in niedrigen Dosen und fand bei den Tieren mangelhaftes Sozialverhalten und erhöhte Aggressivität vor. Na ja – wenn meine Darmflora ruiniert ist, habe ich Durchfall und bin schon deswegen weniger sozialverträglich ...

Das mathematische Modell zeigt uns lediglich einen Weg auf, wie ein Wesenzug auch zu Stande gekommen sein könnte. Die Realität ist wahrscheinlich, wie üblich, noch viel komplizierter. ◀

QUELLEN

Leclercq, S. et al.: Low-Dose Penicillin in Early Life Induces Long-term Changes in Murine Gut Microbiota, Brain Cytokines and Behavior. In: Nature Communications 8:15062, 2017. Online unter www.nature.com/articles/ncomms15062

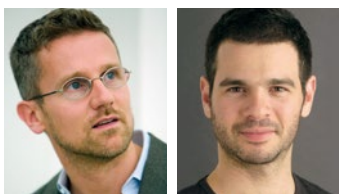
Lewin-Epstein, O. et al.: Microbes Can Help Explain the Evolution of Host Altruism. In: Nature Communications 8:14040, 2017. Online unter www.nature.com/articles/ncomms14040

Svoboda, E.: Can Microbes Encourage Altruism? In: Quanta Magazine, 29. Juni 2017. www.quantamagazine.org/can-microbes-encourage-altruism-20170629/

STRASSENVERKEHR

WIE WERDEN AUTONOME AUTOS DIE STÄDTE VERÄNDERN?

Selbstfahrende Fahrzeuge versprechen zahlreiche Probleme des innerstädtischen Verkehrs zu lösen – wenn sie geschickt eingesetzt werden.



Carlo Ratti (links) ist Direktor des Senseable City Lab am Massachusetts Institute of Technology (MIT) und Gründer des Designstudios Carlo Ratti Associati. **Assaf Biderman** ist Erfinder, stellvertretender Direktor des Senseable City Lab und Gründer von »Superpedestrian«, einer Firma, die auf die Entwicklung von robotischen Fahrzeugen für bis zu zwei Passagiere spezialisiert ist.

» spektrum.de/artikel/1531367

Die Beziehung zwischen Autos und Städten ist schwierig. Heutzutage, in Zeiten anwachsender Verstopfung der Straßen und steigender Luftverschmutzung, halten wir die beiden zunehmend für unvereinbar. Aber das ganze 20. Jahrhundert lang haben die Autos einen enormen Einfluss auf die Stadtplanung ausgeübt. Der schweizerisch-französische Architekt Le Corbusier (1887–1965) erklärte 1925 in seinem bahnbrechenden Werk »Urbanisme« (deutsch: »Städtebau«, Leipzig 1929): »Das Automobil ... hat all unsere alten Ideen über Stadtplanung völlig über den Haufen geworfen.«

Fast 100 Jahre später befinden wir uns an einem ähnlichen Wendepunkt. Erstens wird sich voraussichtlich der innerstädtische Transportbedarf bis 2050 verdoppeln; unsere Straßen müssten bis dahin also mindestens das doppelte Verkehrsaufkommen bewältigen, um auch nur

das gegenwärtige Niveau mit all seinem Staus zu halten. Zweitens werden neue Informations- und Kommunikationstechnologien, Robotik und künstliche Intelligenz den öffentlichen wie den privaten Verkehr ebenso grundlegend verändern wie alle anderen Lebensbereiche. Abermals steht der urbane Raum vor einer radikalen Umgestaltung.

Deren stärkste Triebkraft sind zurzeit die selbstfahrenden (autonomen) Fahrzeuge. In den letzten Jahrzehnten haben sich unsere Autos von den mechanischen Systemen, die im Prinzip schon im »Patent-Motorwagen« von Carl Benz realisiert waren, zu Computern auf Rädern entwickelt. Heute erfasst in einem durchschnittlichen Neuwagen eine ganze Armada von Sensoren Daten von innen wie außen, um den Betrieb sicher und effizient zu machen. Zahlreiche Firmen, darunter Schwergewichte wie Google, General Motors und Uber, experimentieren mit zusätzlichen Sensoren, die über ein Sehvermögen ähnlich dem des Menschen verfügen sollen (siehe auch **Spektrum** Dezember 2013, S. 88). Stehen solche Informationen erst einmal einem eingebauten System mit künstlicher Intelligenz zur Verfügung, dann ist der Weg frei für ein vollständig autonomes Fahrzeug, das sich im dichten Verkehr ohne jedes menschliche Zutun bewegt.

Autonome Autos werden einen großen Teil der Zeit, die wir bisher hinterm Lenkrad zubringen, wieder für andere Tätigkeiten nutzbar und unsere Straßen sicherer machen. Sie werden die Spielregeln in unseren Städten verändern – es ist nur noch nicht ausgemacht, wie. Auf der einen Seite steht die Vision, dass ein und dasselbe Auto über den Tag hinweg viele Menschen nacheinander befördert, so dass eine Stadt mit einem Bruchteil der heute vorhandenen Fahrzeuge auskommt. Auf der anderen Seite malt beispielsweise Robin Chase, Mitbegründerin und frühere Geschäftsführerin des Car-Sharing-Unternehmens Zipcar,

AUF EINEN BLICK PARKPLÄTZE ZU PARKS UND PLÄTZEN

- 1 Der innerstädtische Straßenverkehr steht vor einer radikalen Umgestaltung, allein schon weil er an seine Kapazitätsgrenze gerät.
- 2 Stärkste Triebkraft dieses Wandels ist das selbstfahrende Auto. Es hat das Potenzial, die Anzahl der Fahrzeuge auf den Straßen um mehr als die Hälfte zu verringern.
- 3 Zu den erfreulichen Folgen zählt, dass ein großer Teil der Parkplatzflächen für andere Zwecke frei wird.

ein Horrorszenario von leer fahrenden »Zombie-Autos«, die unsere Straßen verstopfen, arbeitslosen Berufskraftfahrern sowie entgangenen Gewinnen aus der Transportinfrastruktur. Chase sieht einen »Alptraum aus Verschmutzung, Straßenverstopfung und sozialer Unruhe«.

Was wird uns die Zukunft bringen? Versuchen wir der Frage auf den Grund zu gehen, wie autonome Fahrzeuge unser Stadtbild verändern und wie wir sie nutzen könnten.

Die Sharing Economy – moderne Form der Nachbarschaftshilfe

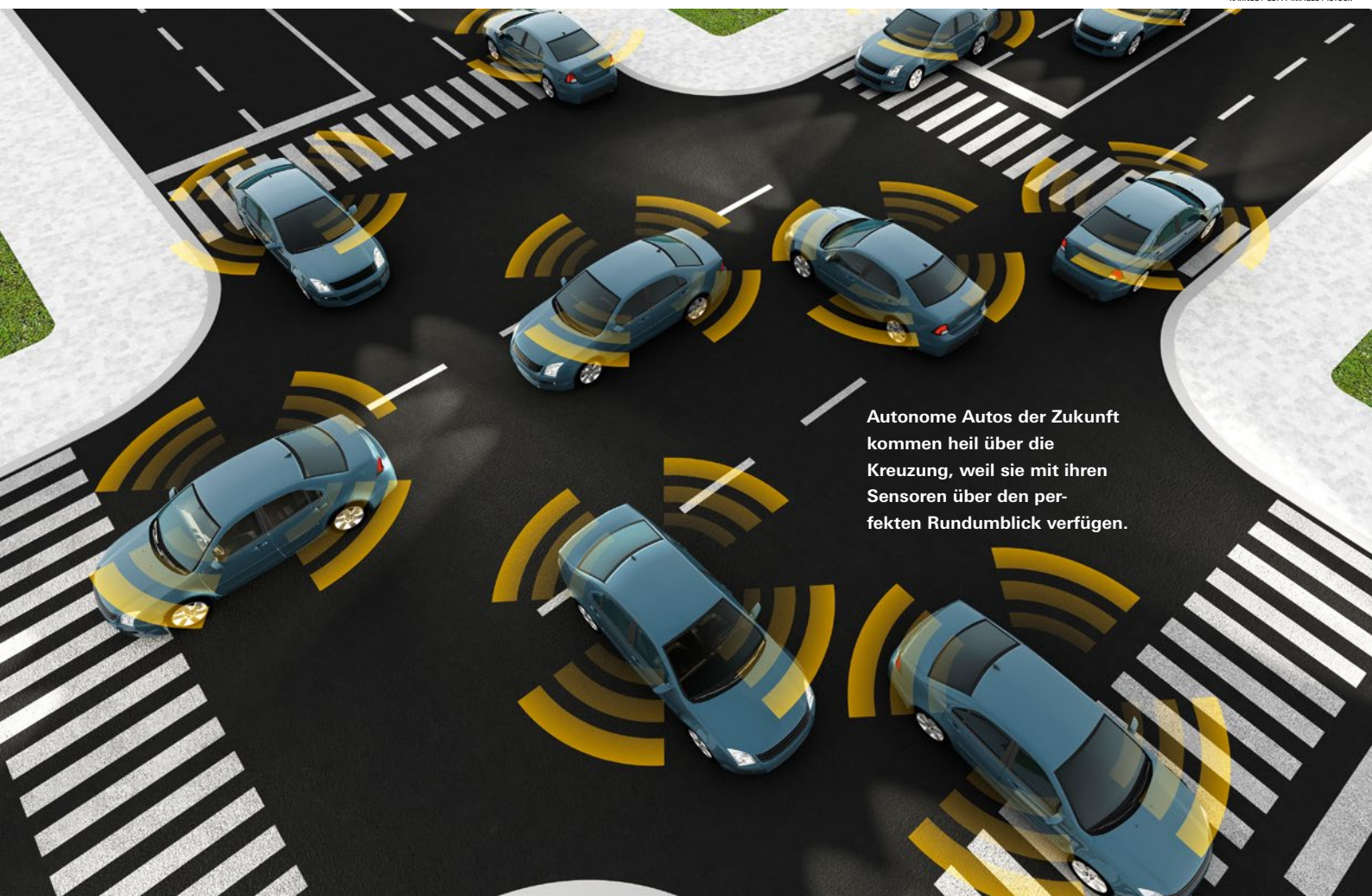
Im Durchschnitt ist ein Auto nur eine Stunde pro Tag unterwegs. Das macht es zu einem idealen Kandidaten für die »Sharing Economy«, das heißt ein Wirtschaftsprinzip, das auf der gemeinschaftlichen statt der exklusiven Nutzung von Gütern beruht. Hier bieten sich enorme Möglichkeiten, die Verstopfung der Städte zu reduzieren. Das macht sich bereits heute dort bemerkbar, wo große Car-Sharing-Unternehmen etabliert sind, wie der weltweite Marktführer Zipcar oder car2go, das die Spitzenrolle im vollflexiblen Car-Sharing einnimmt. Wissenschaftler schätzen, dass für jedes geteilte Auto 9 bis 13 Privatfahrzeuge von den Straßen verschwinden.

Wenn die autonomen Autos erst etabliert sind, würden die Grenzen zwischen privatem und öffentlichem Nahverkehr verschwimmen. Statt auf einem Parkplatz herumzustehen, könnte »Ihr« Auto jemand anders aus Ihrer Familie, Ihrer Nachbarschaft oder gar Ihrem Freundeskreis in sozialen Netzwerken durch die Gegend fahren, nachdem es Sie bei der Arbeit abgeliefert hat.

Im Endeffekt wäre ein Fahrzeug nicht nur eine Stunde in Bewegung, sondern den größten Teil des Tages. Nach einer Studie unserer Kollegen vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) wäre der Mobilitätsbedarf einer Stadt wie Singapur – die eine der ersten öffentlich zugänglichen Flotten von selbstfahrenden Autos besitzt – mit 30 Prozent der heute vorhandenen Fahrzeuge zu decken.

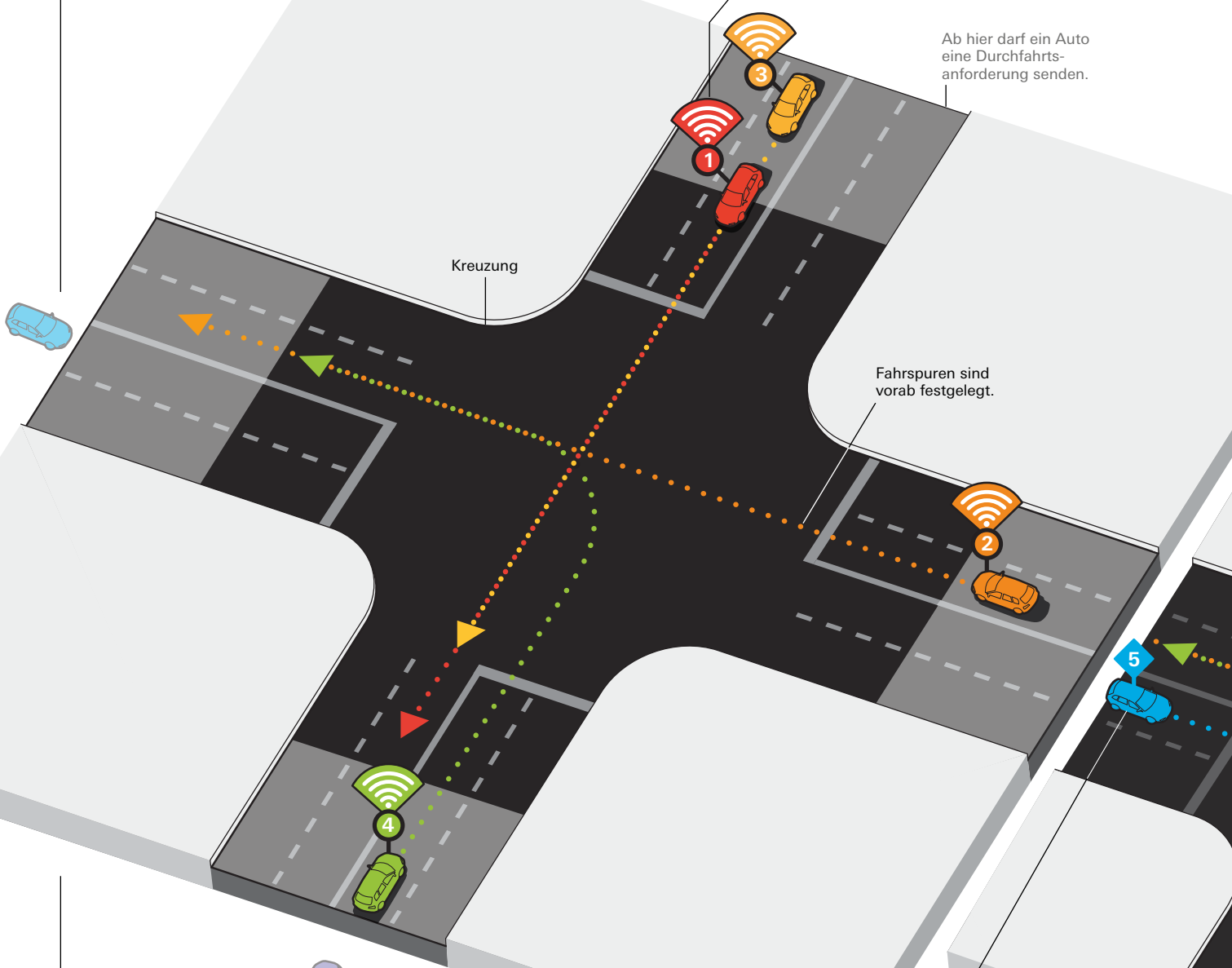
Darüber hinaus können mehrere Leute sich nicht nur ein Auto, sondern sogar eine Fahrt in ein und demselben Fahrzeug teilen und damit die Fahrtkosten pro Person reduzieren. Was bisher als Mitfahrgelegenheit so umständlich zu verabreden ist, dass es eigentlich nur im Fernverkehr funktioniert, wird inzwischen von Apps wie uberPOOL und Lyft Line online angeboten. Autonome Fahrzeuge würden dem Konzept einen zusätzlichen Schub geben, da sie einen online vereinbarten Parcours mit vielen Abhol- und Absetz-

KARNEG / GETTY IMAGES / ISTOCK



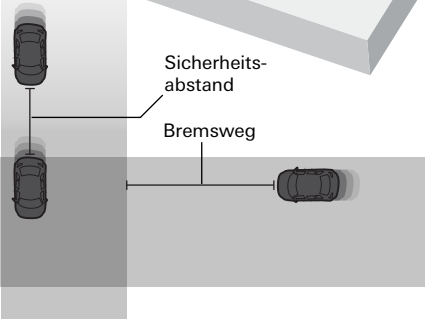
Autonome Autos der Zukunft
kommen heil über die
Kreuzung, weil sie mit ihren
Sensoren über den per-
fekten Rundumblick verfügen.

Sowie sich ein Auto der Kreuzung nähert, sendet es per WLAN einen Antrag auf Durchfahrt. Dieser enthält die genaue Angabe der Sendezeit und des Fahrziels. Hier fährt das rote Auto 1 als erstes in den Kreuzungsbereich, dann das braune Fahrzeug 2, dann das gelbe 3 und am Schluss das grüne Auto 4.



Weitere Autos nähern sich dem Kreuzungsbereich.

Innerhalb eines Pulks müssen Fahrzeuge einen bestimmten Sicherheitsabstand einhalten. Für Fahrzeuge, deren Wege sich kreuzen, ist anstelle des Sicherheitsabstands der (längere) Bremsweg maßgebend.



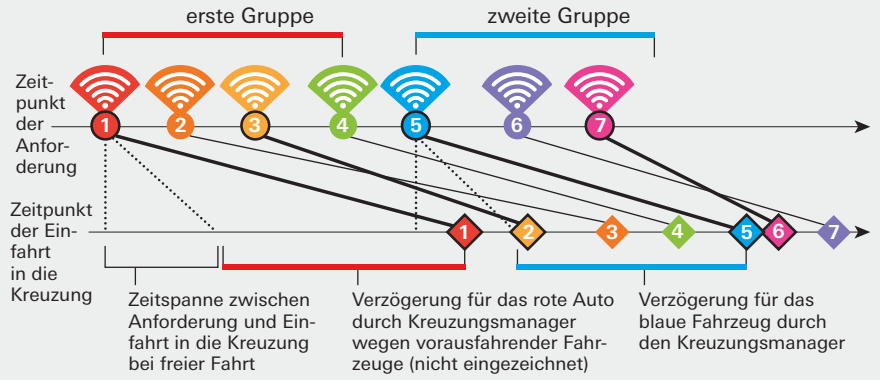
Eine zweite Gruppe von Autos nähert sich der Kreuzung, mit dem blauen Auto 5 an erster Stelle.

JEN CHRISTIANSEN, NACH: MIT SENSEABLE CITY LABORATORY UND TACHET, R. ET AL.: REVISITING STREET INTERSECTIONS USING SLOT-BASED SYSTEMS. IN: PLOS ONE 11, E0149607, 2016 (JOURNALS.PLOS.ORG/PLOSONE/ARTICLE?ID=10.1371/JOURNAL.PONE.0149607) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Verkehrsregelung der Zukunft

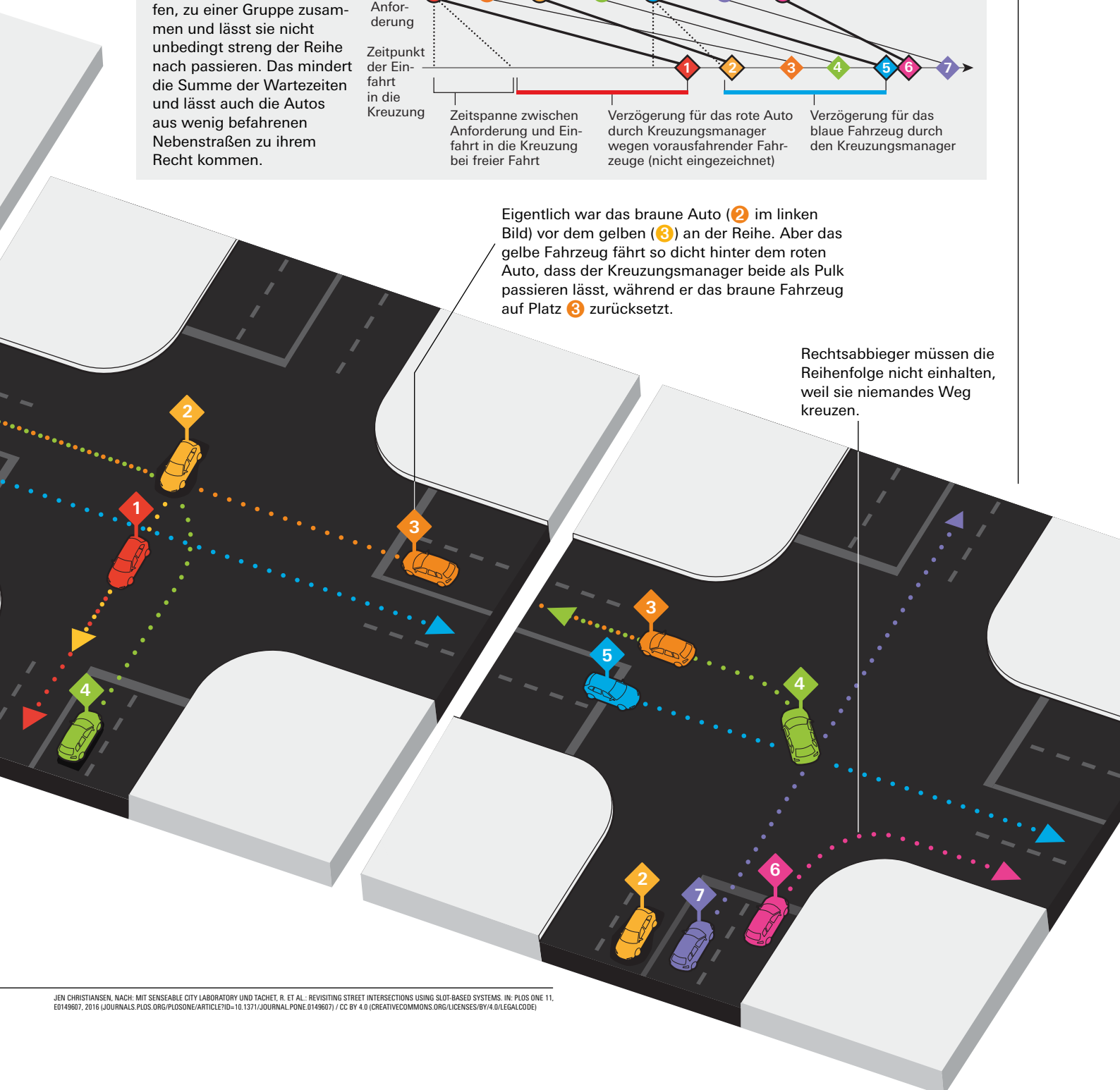
Selbstfahrende Autos würden es den Stadtplanern ermöglichen, ampelgesteuerte Kreuzungen durch solche zu ersetzen, in denen jedes sich nähernde Fahrzeug ein Zeitintervall (»Slot«) für die Durchfahrt zugewiesen bekommt. Nach Meinung von Wissenschaftlern könnten damit doppelt so viele Autos pro Zeiteinheit passieren wie in Ampelsystemen.

Das Verkehrsregelungsprogramm für diese Kreuzung (der »Kreuzungsmanager«) fasst alle Fahrzeuge, die ungefähr gleichzeitig eintreffen, zu einer Gruppe zusammen und lässt sie nicht unbedingt streng der Reihe nach passieren. Das mindert die Summe der Wartezeiten und lässt auch die Autos aus wenig befahrenen Nebenstraßen zu ihrem Recht kommen.



Eigentlich war das braune Auto (2) im linken Bild) vor dem gelben (3) an der Reihe. Aber das gelbe Fahrzeug fährt so dicht hinter dem roten Auto, dass der Kreuzungsmanager beide als Pulk passieren lässt, während er das braune Fahrzeug auf Platz 3 zurücksetzt.

Rechtsabbieger müssen die Reihenfolge nicht einhalten, weil sie niemandes Weg kreuzen.



punkten mühelos realisieren könnten. Nach Analysen unseres Labors, des Senseable City Lab am MIT, ist das Potenzial für ein solches »Ride Sharing« beträchtlich.

Für die Stadt New York haben wir das mit konkreten Daten durchgerechnet. Im Rahmen eines Projekts namens HubCab verarbeiteten wir die Daten von 170 Millionen Fahrten, die etwa 13 500 städtisch lizenzierte Taxis durchgeführt hatten; das waren im Wesentlichen die GPS-Koordinaten aller Ein- und Ausstiegspunkte sowie die dazwischenliegenden Zeiten. Wir entwickelten eine Software, die mehreren Kunden mit annähernd derselben Fahrstrecke und -zeit ein Gemeinschaftstaxi zuweist. Dieses Programm, auf die echten Daten aus der Vergangenheit angewandt, hätte die Anzahl der benötigten Fahrzeuge um 40 Prozent reduziert, bei nur geringer Fahrtzeitverlängerung für die einzelnen Passagiere. Weitere Untersuchungen in Städten wie San Francisco, Wien und Singapur führten zu vergleichbaren Ergebnissen.

Mit Car Sharing und Ride Sharing zusammen würden die Leute vielleicht sogar mit einem Fünftel der heute genutzten Fahrzeuge auskommen und dennoch ihre Ziele und Abfahrtszeiten so frei wählen können wie mit dem eigenen Auto. Natürlich sind das nur theoretische Zahlen. In der Realität würde es darauf ankommen, wie weit die Menschen tatsächlich bereit wären, sich zu einem Fremden und dann auch noch in ein fahrerloses Auto zu setzen. Aber jede Reduzierung der Fahrzeuganzahl hätte segensreiche Effekte: weniger Aufwand für den Bau und die Instandhaltung von Straßen, weniger Staus, kürzere Fahrzeiten, weniger Umweltverschmutzung und weniger Flächenverbrauch durch Parkplätze.

In den USA gibt es etwas über 20 000 Quadratkilometer Parkplatzfläche. Das entspricht in etwa der Größe des Bundesstaates New Jersey. Wenn ein Großteil dieser Fläche auf einmal entbehrlich wäre, würden neue Nutzungen nicht lange auf sich warten lassen. Einen ersten Eindruck von den Möglichkeiten gibt der »Park(ing) Day« – ein jährliches Event, das erstmals 2005 in San Francisco zelebriert wurde und sich mittlerweile über die Welt ausgebreitet hat. Künstler, Designer und gewöhnliche Bürger werden – üblicherweise am dritten Freitag im September – aufgefordert, gebührenpflichtige Parkplätze in öffentliche Räume zu verwandeln. Daraufhin legen sie Rollrasen aus und stellen Bäume sowie Sitzbänke an der Bordsteinkante auf. Durch autonomen Verkehr dauerhaft frei werdende Parkplätze ließen sich entsprechend in Einrichtungen für die Allgemeinheit umwandeln: Spielplätze, Cafés, Fitnessparks und Fahrradwege.

Anderes gewohnte Zubehör auf und neben unseren Straßen würde dagegen verschwinden, wie zum Beispiel die gute alte Verkehrsampel. Wenn erst alle Autos autonom sind und miteinander und mit der Straßeninfrastruktur kommunizieren können, muss man den Verkehr an einer Kreuzung nicht mehr derart schematisch regeln. Stattdessen würde nach dem Vorbild des Flugverkehrs ein Verkehrsmanagementsystem an einer Kreuzung jedem Auto auf Anfrage ein Zeitintervall (einen »Slot«) zuweisen, innerhalb dessen es die Kreuzung queren darf (siehe »Verkehrsregelung der Zukunft«, S. 80/81).

Unser Projekt »Light Traffic« hat gezeigt, dass ein solches System doppelt so viele Autos pro Zeiteinheit über eine Kreuzung bringt wie eine übliche Ampel und dadurch Staus und Verspätungen erheblich vermindert. In der Folge würden sich Reise- und Wartezeiten ebenso verringern wie der Treibstoffverbrauch und die Luftverschmutzung. Auch Fußgänger und Radfahrer wären in dem System unterzubringen.

Zur Nutzung der autonomen Fahrzeuge braucht es eine firmenübergreifende Plattform

Aber solch verheißungsvolle Visionen hängen an mehr als nur autonomen Autos und intelligenten Verkehrsmanagementsystemen. Sie erfordern auch eine viel bessere Koordination des Markts. Die heutigen Car-Sharing-Firmen betreiben eigenständige Plattformen, die untereinander keine Informationen austauschen. Die Kunden können die verfügbaren Optionen nicht einfach vergleichen, und es ist unmöglich, zum Beispiel Kunden zweier Firmen in dasselbe Auto zu vermitteln, selbst wenn Fahrzeit und -ziel das attraktiv machen würden. Die Situation entspricht in etwa derjenigen der Luftfahrt, bevor das Internet kam. Inzwischen haben die Fluggesellschaften ihre Daten in eine standardisierte Form gebracht und stellen sie verschiedenen globalen Buchungssystemen zur Verfügung, so dass der Kunde viele Flugalternativen vergleichen kann und damit von zunehmender Transparenz und wachsendem Wettbewerb profitiert.

Im Stadtverkehr wäre ein solcher »gemeinsamer Markt« auf zwei Wegen zu erreichen. Entweder von unten nach oben (»bottom-up«), indem Firmen sich untereinander auf Standards einigen, denen auf die Dauer alle beitreten. Da die Firma, deren Standard sich durchsetzt, einen erheblichen Wettbewerbsvorteil hat, ist dieses Verfahren konfliktreich. So ist jüngst der Versuch mehrerer asiatischer Anbieter gescheitert, eine gemeinsame Plattform einzurichten, mit der sie die Dominanz von Uber eindämmen wollten.

Oder von oben nach unten (»top-down«): Eine Regierung oder eine globale Organisation wie das World Wide Web Consortium setzt den Standard und drückt ihn allen Beteiligten auf. Da der Straßenverkehr in den meisten Ländern sowieso stark staatlich reguliert wird, ist dies gar nicht weit hergeholt. Jeder dieser beiden Wege würde eine äußerst mächtige und transparente Plattform für Transport- und Logistikleistungen hervorbringen.

Autonome Fahrzeuge und Ride Sharing bieten Aussicht auf eine überaus positive Zukunft. Aber der Übergang zur »fahrerlosen Stadt« kann auch schiefgehen.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Wir alle wissen, wie es ist, wenn ein Virus einen Computer befällt. Was ist, wenn dies mit einem Auto passiert? Gegen bössartige Hacker-Angriffe sind selbst offizielle Stellen und Experten der Industrie häufig machtlos, und in diesem Fall würde nicht nur ein Computersystem zusammenbrechen, sondern der gesamte Straßenverkehr einer Stadt, mit vermutlich tödlichen Folgen.

Vielleicht wird das autonome Fahren sogar zu attraktiv, mit der Folge, dass die öffentlichen Verkehrsmittel mangels Nachfrage abgeschafft würden. Der paradoxe und unerwünschte Effekt wäre eine Steigerung des Autoverkehrs statt einer Verminderung.

Oder es kommt zu einer weiteren städtischen Zersiedelung. Es wäre nicht das erste Mal, dass technischer Fortschritt auf dem Gebiet der Mobilität sich in diese Richtung auswirkt. In seinem Buch »Sur les quatre routes« schrieb Le Corbusier 1941 über diese Entwicklung während der ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts: »Die Eisenbahn verwandelte die Städte in regelrechte Magnete, sie füllten sich und wuchsen an ohne Kontrolle, und die ländlichen Siedlungen wurden immer verlässener. Es war eine Katastrophe. Glücklicherweise werden die Automobile, durch die Einrichtung der Straßen, dieses zerstörte Gleichgewicht wieder in Ordnung bringen.« Was würde geschehen, wenn zukünftig die Menschen – nun in der Lage, während des Pendelns zu schlafen oder zu arbeiten – wieder aufs Land ziehen und sich Schlafstädte ausbreiten?

Es drohen noch einige andere Änderungen. Einnahmen aus Bußgeldern, Parkgebühren und Kraftfahrzeugsteuern würden einbrechen. Millionen von angestellten Fahrern auf der ganzen Welt müssten sich eine neue Beschäftigung suchen. Und alle Autohersteller stünden vor gewaltigen Herausforderungen durch reduzierte Nachfrage.

In den Worten von Robin Chase: »Einfach die Fahrer aus den Autos entfernen und alles andere so lassen, wie es ist, wird in die Katastrophe führen.« Es ist zwingend geboten, die Folgen der neuen Technologien in eine gesellschaftlich erwünschte Richtung zu lenken. Dabei werden Irrtümer nicht ausbleiben. Aber die Aufgabe ist erfüllbar – und lohnend. Immerhin geht es darum, dass die Städte ihre eigentliche Funktion wieder erfüllen: die Menschen zusammenzubringen, unabhängig vom Transportmittel. ◀

QUELLEN

Santi, P. et al.: Quantifying the Benefits of Vehicle Pooling with Shareability Networks. In: PNAS 111, S. 13290–13294, 2014. Online unter <http://www.pnas.org/content/111/37/13290>

Spieser, K. et al.: Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility-on-Demand Systems: A Case Study in Singapore. In: Meyer, G., Beiker, S. (Hg.): Road Vehicle Automation. Lecture Notes in Mobility, Springer, Heidelberg 2014. Online unter <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/82904>

LITERATURTIPP

Zapotecatl, J. L. et al.: Deliberative Self-Organizing Traffic Lights with Elementary Cellular Automata. In: Complexity 2017, 7691370. Online unter <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2017/7691370/>

Beschreibt ein sensorgesteuertes Ampelsystem, das ebenfalls zusammenhängende Fahrzeugpuls bevorzugt durchlässt

FLUGREVUE JAHRESABO

12x FLUGREVUE frei Haus zum halben Preis

**50%
PREISVORTEIL**

**+
Überraschungsgeschenk**



Ihre Vorteile im Abo:

- alle Ausgaben pünktlich frei Haus ■ Online-Kundenservice
- exklusiv und nur für Abonnenten: 4x im Jahr Specials zu Flight-Training, Helicopter, Maintenance, Business Aviation
- Heftabo ganz einfach digital erweitern: www.flugrevue.de/upgrade



Anbieter des Abonnements ist Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. Belieferung, Betreuung und Abrechnung erfolgen durch DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH als leistenden Unternehmer.

Online-Bestellung:

www.flugrevue.de/spektrum

DIREKTBESTELLUNG: flugrevue@dpv.de Bitte Bestell-Nr. angeben
Telefon +49 (0)711 3206-8899 · Fax +49 (0)711 182-2550

**Coupon einfach ausfüllen und einsenden an:
 FLUGREVUE AboService 70138 Stuttgart**

Ja, ich möchte FLUG REVUE frei Haus lesen.

Best.-Nr. 1692688

Ich bestelle das Jahresabo (12 Ausgaben) zum Sonderpreis von zzt. nur 33,- € (D) inkl. MwSt. und Versand. Das Überraschungsgeschenk erhalte ich nach Zahlungseingang und solange der Vorrat reicht, Ersatzlieferungen sind vorbehalten. Falls ich danach keine weiteren Hefte wünsche, sage ich umgehend nach Erhalt der vorletzten Ausgabe ab. Andernfalls erhalte ich FLUG REVUE dann weiterhin für jährlich zzt. nur 66,-€ bei 12 Ausgaben im Jahr und mit jederzeitigem Kündigungsrecht. Jahresabopreise Ausland: zzt. 72,90 € (A); 115.00 Sfr. (CH). Alle Preise verstehen sich inkl. MwSt. und Versand.

Meine persönlichen Angaben: (bitte unbedingt ausfüllen)

Name, Vorname	Geburtsdatum
Straße, Nr.	
PLZ	Wohnort
Telefon	E-Mail

Ja, ich möchte auch von weiteren Inhalten, Vorabnachrichten, Themen und Vorteilen profitieren. Deshalb bin ich damit einverstanden, dass mich Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG und ihr zur Verlagsgruppe gehörendes Unternehmen, Rodale-Motor-Presse GmbH & Co. KG Verlags-gesellschaft mit ihren Titeln künftig auch per Telefon und E-Mail über weitere interessante Medienangebote informieren. Dieses Einverständnis kann ich jederzeit per E-Mail an widerruf@dpv.de widerrufen.

Ich bezahle per Bankeinzug.

IBAN	
BIC	Geldinstitut

SEPA-Lastschriftmandat: Ich ermächtige die DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH, Am Sandtorkai 74, 20457 Hamburg, Gläubiger-Identifikationsnummer DE7ZZZ00000004985, wiederkehrende Zahlungen von meinem Konto mittels Lastschrift einzuziehen. Zugleich weise ich mein Kreditinstitut an, die von der DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH auf mein Konto gezogenen Lastschriften einzulösen. Die Mandatsreferenz wird mir separat mitgeteilt. – **Hinweis:** Ich kann innerhalb von acht Wochen, beginnend mit dem Belastungsdatum, die Erstattung des belasteten Betrages verlangen. Es gelten dabei die mit meinem Kreditinstitut vereinbarten Bedingungen. Ich bezahle per Rechnung.

Widerrufsrecht: Sie können die Bestellung binnen 14 Tagen ohne Angabe von Gründen formlos widerrufen. Die Frist beginnt an dem Tag, an dem Sie die erste bestellte Ausgabe erhalten, nicht jedoch vor Erhalt einer Widerrufsbelehrung gemäß den Anforderungen von Art. 246a § 1 Abs. 2 Nr. 1 EGBGB. Zur Wahrung der Frist genügt bereits das rechtzeitige Absenden Ihres eindeutig erklärten Entschlusses, die Bestellung zu widerrufen. Sie können hierzu das Widerrufs-Muster aus Anlage 2 zu Art. 246a EGBGB nutzen. Der Widerruf ist zu richten an: FLUGREVUE AboService, Postfach, 70138 Stuttgart, Telefon: + 49 (0)711 3206-8899, Telefax: +49 (0)711 182-2550, E-Mail: flugrevue@dpv.de

Datum	Unterschrift
-------	--------------



FREISTETTERS FORMELWELT DIE QUADRATUR DES KREISES

Es ist unmöglich, nur mit Zirkel und Lineal ein Quadrat zu konstruieren, das einem gegebenen Kreis flächengleich ist. Der Beweis kam spät und stieß auf Widerspruch.

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

► spektrum.de/artikel/1513369

Haben Sie noch nie vom Satz von Lindemann-Weierstraß gehört? Dann gehören Sie zur überwältigenden Mehrheit im Land. Der Satz handelt von algebraischen Zahlen, und denen begegnet man außerhalb des Mathematikstudiums eher selten.

Mit den rationalen Zahlen (Brüchen) hat man sich in der Schule schon früh einigermaßen arrangiert. Als nächstes musste man sich daran gewöhnen, dass die Quadratwurzeln sich nicht durch Brüche ausdrücken ließen; und noch ein bisschen später gab es die reellen Zahlen, die so wild sind, dass auch die Wurzelzeichen im Allgemeinen nicht helfen. Algebraische Zahlen umfassen Brüche, Wurzeln und noch etliches mehr, sind aber nicht ganz so anarchisch wie der Rest der reellen Zahlen, die zur Abgrenzung »transzendent« genannt werden.

Im Zentrum des Satzes von Lindemann-Weierstraß steht die Formel

$$\beta_1 e^{\alpha_1} + \dots + \beta_n e^{\alpha_n} \neq 0.$$

Dabei sind $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ lauter verschiedene algebraische Zahlen und β_1, \dots, β_n ebenfalls algebraische Zahlen, nicht unbedingt verschieden, aber nicht alle gleich null.

Wenn das gilt, kann auch die obige Summe nicht null sein, sagt der Satz. Und mit seiner Hilfe konnte der deutsche Mathematiker Ferdinand von Lindemann im Jahr 1882 ein jahrtausendealtes, geradezu sprichwörtlich gewordenes Problem lösen: Er zeigte, dass die »Quadratur des Kreises« unmöglich ist.

Im antiken Griechenland sah man nur das Lineal (ohne Markierungen) und den Zirkel als akzeptable Werkzeuge an und versuchte eine Geometrie zu entwickeln, die ausschließlich auf ihnen basierte. Die berühmte Aufgabe besteht darin, aus einem vorgegebenen Kreis in endlich vielen Schritten mit Lineal und Zirkel ein Quadrat mit demselben Flächeninhalt zu konstruieren.

Von der Antike über das Mittelalter bis in die Neuzeit hinein versuchten Mathematiker vergeblich, sie zu lösen. Im 17. Jahrhundert begann man, geometrische Konstruktionen in mathematische Gleichungen zu übersetzen. Dabei stellte sich heraus, dass alle Längen, die man mit Lineal und Zirkel konstruieren kann, algebraischen Zahlen entsprechen.

Damit lief die Quadratur des Kreises auf die Frage hinaus: Ist die Zahl π (also das Verhältnis von Umfang zu Durchmesser eines Kreises) algebraisch oder transzendent? Lindemann fand die Antwort mit dem nach ihm benannten Satz. Nach der berühmten »eulerschen Identität« ist $e^{ix} + 1 = 0$. Setzt man im Satz von Lindemann-Weierstraß $\beta_1 = \beta_2 = 1$, $\alpha_2 = 0$ und nimmt an, dass π eine algebraische Zahl sei, so dass man $\alpha_1 = i\pi$ setzen kann, dann folgt daraus ein Widerspruch. Die Annahme, π sei algebraisch, muss also falsch sein. Die Quadratur des Kreises ist unmöglich.

Hobbymathematiker ignorierten diese Erkenntnis oft und probierten weiterhin das Unmögliche.

Das führte ein paar Jahre nach Lindemanns Erkenntnis auch zu einer der berühmtesten Anekdoten über die Zahl π . 1894 veröffentlichte der amerikanische Arzt Edward Goodwin eine Arbeit, in der er behauptete, die Quadratur des Kreises gefunden zu haben. Aus seinen mathematischen Formeln folgte, dass π nicht nur eine algebraische Zahl, sondern exakt gleich 3,2 sei. Die Arbeit war mathematisch fehlerhaft; trotzdem legte 1897 ein Abgeordneter des Parlaments von Indiana aus Goodwins Wahlkreis einen Gesetzentwurf vor, in dem genau dieser Wert für π offiziell festgelegt werden sollte. Das Repräsentantenhaus stimmte zu – der Senat, die zweite Kammer des Parlaments, wurde allerdings von einem echten Mathematiker auf die Unsinnigkeit dieses Vorhabens hingewiesen und vertagte die Beschlussfassung auf unbestimmte Zeit (**Spektrum** März 2015, S. 66).

Unmöglich bleibt eben unmöglich.

Die Chancen der Zukunft.

Die Erfolgsgeschichte des Jeff Bezos im FOCUS.



Foto: Courtesy of Amazon.com, James Fredwell/KulturFocus/Photo Archive

FOCUS 32/2017



... Bezos ist immer noch schwächling, immer noch schnell, immer noch willensstark. Er selbst sagt, er habe Millionen versenkt – und Milliarden gewonnen

Der Mann, der alle auslacht

Er hat Amazon gegründet, Raketen ins All geschickt, die Cloud vermessen und dem Weihnachtsmann gezeigt, wie man Päckchen packt: Aber wer ist der Mensch **Jeff Bezos**, der vergangene Woche Bill Gates als reichsten Mann der Welt ablöste?

TEXT VON SUSANN REMKE

FOCUS 32/2017

FOCUS 32/2017

Menschen im



REZENSIONEN

SUMM (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:SATIN_BOWERBIRD_NEST.JPG) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/LLEGALCODE)



Laubenvögel bauen prachtvollte Balzplätze. Sie schmücken diese mit allerlei Dingen einer bestimmten Farbe.

ORNITHOLOGIE EIGENHEIME DER TIERE

**Naturgeschichte,
Kunstdarstellung und
Literaturwerk zu-
gleich: ein ungewöhn-
liches Werk über
Vögel und ihre Bauten.**

► Janine Burke – Kunsthistorikerin, Schriftstellerin, Hobbyforscherin und Naturliebhaberin – hat auf ihren Reisen rund um die Welt jahrelang Vögel und ihre Nester studiert. Sie möchte ihre Leser nun dazu anhalten, mehr auf diese Wunder der Natur zu achten. Früher habe das Beobachten von Vögeln und das Suchen von Nestern zur Kindheit gehört. Heute interessierten sich immer weniger Menschen dafür.

Die Autorin rühmt die Kunstfertigkeit der tierischen Nestbauer mit sprachlicher Eleganz, Zuneigung und großem Einfühlungsvermögen. In



Janine Burke
NEST
Kunstwerke der Natur
Oekom, München 2017
192 S., € 20,-

ihrem Buch stellt sie Vögel und ihre Nester auf unorthodoxe Weise vor. Einige Illustrationen dienen der Veranschaulichung, es könnten aber mehr sein. Dennoch kommt die Vielfalt der Nester zum Ausdruck: Singdrosseln (*Turdus philomelos*) etwa bauen filigrane Gebilde; Rauchschwalben (*Hirundo rustica*) sammeln winzige Schlammkügelchen, mischen diese mit langen Grashalmen und kleben sie in Gestalt einer Tasse an die Wand; und die

unscheinbaren Siedelweber (*Philetairus socius*) legen Kolonien in Gestalt von großen mehrstöckigen Wohnhäusern an.

Wie aus dem Werk hervorgeht, ist das Thema »Nest« mitnichten rein weiblich konnotiert, sondern durchaus auch ein männliches. Interessant ist hier besonders der männliche Seidenlaubenvogel (*Ptilonorhynchus violaceus*), der seinen Bau mit allerlei blauem Zierrat auskleidet, um potenziellen Paarungspartnerinnen zu gefallen. Je prächtiger das Ergebnis, desto wahrscheinlicher ist es, dass der Vogel beim anderen Geschlecht Erfolg hat. Die Männchen der Cabanis- (*Ploceus intermedius*) und Maskenweber (*Ploceus velatus*) wiederum bauen frei hängende Nester, die pendelnden Körben ähneln. Während die Männchen daran schaffen, werden sie von den Weibchen beobachtet. Sind sie fertig, inspiziert das Weibchen den Bau. Sagen ihm die

Qualität und Gestaltung des Nests zu, zieht es beim Erbauer ein; andernfalls lehnt es sowohl die Behausung ab als auch den, der sie erschuf.

»Nest« ist kein Fachoder Nachschlagebuch, sondern eher ein erzählendes Werk. Es befasst sich über die Nester hinaus mit der gesamten Welt der Vögel. Die Autorin stellt zahlreiche Verbindungen zu Literatur und Kunst her, wobei ihr eine sehr persönliche, facettenreiche Darstellung gelingt – teils Naturgeschichte, teils Memoiren. Trotz guter Übersetzung lassen die vielen Bezüge zum angelsächsischen Raum erkennen, dass die Originalausgabe englisch ist. Unterm Strich überzeugt der Band dennoch als lesenswertes Werk für alle, die sich für Natur, Literatur und Kunst begeistern.

Die Rezensentin Kristina Vonend ist Germanistin und Ethnologin und arbeitet als Pressereferentin in München.

Gern dekorieren die Vögel
ihren Laubenbau mit
menschlichen Erzeugnissen.



GESCHICHTE DER DOPPEL- KONFLIKT

Militärhistoriker Klaus-Jürgen Bremm skizziert die globalen Dimensionen des Siebenjährigen Kriegs, der die politische Weltkarte grundlegend veränderte.



Klaus-Jürgen Bremm
PREUSSEN BEWEGT DIE WELT
Der Siebenjährige Krieg
Theiss, Darmstadt 2017
380 S., € 24,95

► In den Wäldern Nordamerikas, nahe dem heutigen Pittsburgh, riefen Franzosen und Indianer im Jahr 1755 britische Kampfverbände auf. Ein Jahr später marschierten die Preußen unter Friedrich II. in Sachsen ein. Beide Ereignisse markierten den Anfang eines globalen Konflikts im 18. Jahrhundert, den der britische Premier Winston Churchill den (wahren) »ersten Weltkrieg« nannte.

In diesem so genannten Siebenjährigen Krieg (1756–1763) kämpften Preußen und Großbritannien auf der einen Seite; Österreich, Frankreich und Russland

auf der anderen. Somit waren alle europäischen Großmächte jener Zeit involviert. Genau genommen handelte es sich um zwei höchst verschiedene Konflikte: einer zwischen Frankreich und Großbritannien, ausgefochten auf einer globalen Arena von Kalkutta bis Quebec; der andere zwischen Preußen, Österreich und Russland, ausgetragen auf dem regionalen Schauplatz Mitteleuropa.

Ausgehend von den europäischen Kräfteverhältnissen zu Beginn des 18. Jahrhunderts stellt der Militärhistoriker Klaus-Jürgen Bremm die verschiedenen Kriegsparteien vor und erläutert ihre jeweiligen Interessen. Hauptsächlich widmet er sich dem Preußen Friedrich II., dem Habsburgerreich Maria Theresias sowie den Kolonialmächten Frankreich und England. Demzufolge strebte Friedrich II. danach, das territorial zersplitterte Preußen durch Eroberung zu arrondieren und sein Königreich als europäische Großmacht zu etablieren. Englands vordringlichstes Ziel lautete hingegen, Frankreichs Kräfte mittels der verbündeten Preußen in Europa zu binden, um als Kolonialmacht in Übersee zu triumphieren – eine globale Strategie, die Englands Premier William Pitt (1708–1778) in die Worte kleidete, man müsse »Kanada an den Ufern der Elbe erobern«.

Kenntnisreich und gut verständlich geht der Autor auf wichtige Kriegereignisse ein. Detailliert, aber ohne das Ganze aus den Augen zu verlieren, schildert er die bedeutsamsten

Schlachten und erläutert die auf den verschiedenen Schauplätzen angewandten Strategien. Das reicht von der asymmetrischen Kriegsführung in Nordamerika und Indien bis zur offenen Feldschlacht (Lineartaktik) in Europa, bei der Feuerkraft, Personalstärke und Drill über den Sieg entschieden.

Neben den militärischen Geschehnissen und den dahinterstehenden Interessenkonflikten widmet sich

Hubertusburg und Paris (1763) verdeutlicht, hatte Preußen sich am Ende als fünfte Großmacht etabliert. Frankreich dagegen büßte seine vorherrschende Stellung in Kontinentaleuropa ein und verlor große Teile seiner amerikanischen und indischen Kolonialgebiete an Großbritannien, das dadurch zur dominierenden Weltmacht aufstieg.

Der Autor beweist historische Weitsicht, indem er über den Tellerrand blickt

Am Ende war Preußen zur fünften Groß- und Großbritannien zur dominierenden Weltmacht aufgestiegen, während Frankreich an Bedeutung verloren hatte

der Autor auch der »Kultur des Kriegs«. Er zeigt anhand von Goethes »Dichtung und Wahrheit«, wie dieser Waffengang nicht nur Nationen, sondern auch Familien spaltete; er liefert mit Hilfe von Augenzeugenberichten die Innenansicht des Kriegs; er beleuchtet am Beispiel von Voltaires Roman »Candide« (1759) die zeitgenössische Kriegswahrnehmung und richtet seinen Blick auf die historische Erinnerungskultur, wie sie in Lessings Lustspiel »Minna von Barnhelm« (1767) Eingang fand.

Bremm weiß Quellen und Literatur souverän miteinander zu verknüpfen. Heraus kommt eine faktenreiche und gut lesbare Gesamtdarstellung jenes globalen Kräftemessens, das die Machtverhältnisse in Europa und Übersee grundlegend veränderte. Wie Bremm anhand der Friedensschlüsse von

und auch die weit reichenden Folgen dieses »doppelten Kriegs« thematisiert. Zu ihnen gehörte, dass die 13 Staaten Neuenglands im »French and Indian War« zu einem neuen Selbstbewusstsein fanden, welches in der Unabhängigkeitserklärung von 1776 seinen beredten Ausdruck fand. Zu ihnen gehörte ferner, dass »vom Pariser Verzichtsfrieden von 1763 ein direkter Weg zum Sturm auf die Bastille 1789 führte«. Und schließlich entstand mit dem Erfolg Friedrichs II. der neue Dualismus beider deutscher Mächte, Preußen und Österreich, der mit Preußens Sieg bei Königgrätz 1866 endete und den Boden für das Wilhelminische Kaiserreich ebnete.

Der Rezensent Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist; er lebt in der Nähe von Mainz.

MATHEMATIK RECHENTRICKS MIT COCKTAIL- REZEPT

Mathematiker und Buchautor Christian Hesse gibt einprägsame Kopfrechentipps.

► Mathematikprofessor Christian Hesse, der bereits mit Büchern wie »Math up your life!« (2016), »Damenopfer« (2015) und »Wer falsch rechnet, den bestraft das Leben« (2014) auf sich aufmerksam gemacht hat, stellt in seinem neuesten Werk verschiedene Methoden zum besseren und schnelleren Kopfrechnen



Christian Hesse
MATHE TO GO
Magische Tricks für schnelles
Kopfrechnen
C.H.Beck, München 2017
188 S., € 12,-

vor. Sein Motto lautet: »Nach der schönen Lösung einer schweren Aufgabe

genehmige dir einen coolen Drink.« Deshalb folgt auf jedes Kapitel ein schmackhaft klingendes Cocktailrezept, etwa für einen Double Rainbow Yamazaki oder einen Tequila Sunrise.

Hesse beginnt mit dem Multiplizieren, geht dann zum Dividieren und Wurzelziehen über und steigert sich bis zu praktischen Tipps zum Berechnen von Logarithmen. Dabei erklärt er die komplizierteren Rechenarten wie das Wurzelziehen und Logarithmieren allgemein verständlich und gibt viele Beispiele, wie sie sich anwenden lassen. In historischen Exkursen erklärt der Autor, wie frühere Kulturen gerechnet haben. Unter

anderem geht er auf das römische Zahlensystem ein und verdeutlicht, wie unhandlich es ist, wenn man damit Produkte und Quotienten ermitteln möchte.

An etlichen Beispielen demonstriert der Mathematiker, welche oft erstaunlich einfachen Tricks das Kopfrechnen erleichtern. Etwa bei der Multiplikation einer zweistelligen Zahl (wie 54) mit 11: Hier genügt es, die hintere (4) und vordere (5) Ziffer der Zahl beizubehalten. Zwischen die beiden fügt man die Summe der vorderen und hinteren Ziffer ein ($4 + 5 = 9$), fertig ist das Ergebnis (594). Viele Aufgaben ermöglichen es den Lesern, das Erlernete zu testen.

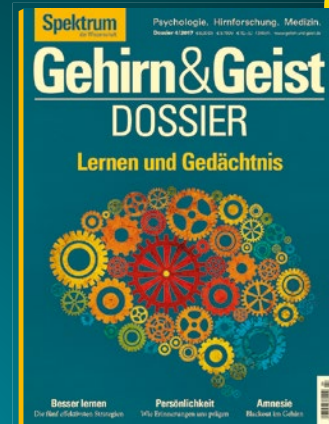
Unsere Neuerscheinungen!



Sonnensystem: Krawall in der Kinderstube • Archäometrie: Archäologie aus der Luft • Antarktis: Ozean in Aufruhr • Energiepolitik: Unsicherheitsfaktor Indien • Fernerkundung: Satellitengestützte Fossilien-suche • € 8,90; ab 24. 11. 2017



PFC: Vorsicht, Trinkwasser! • Arsen: Vergiftete Brunnen • Xenohormone: Störenfriede im Hormonhaushalt • Schwefelwasserstoff: Giftgas mit Heilkraft • Pflanzengifte: Was dich nicht umbringt ... • Biowaffen: Die Milzbrandbedrohung • € 8,90



Merken wir uns von Hand notierte Dinge besser als getippte? • Warum vergessen wir die ersten Lebensjahre? • Zeugen: Dem Gedächtnis-schwindel auf der Spur • Wie wir besser lernen • Der mysteriöse Fall Agatha Christie € 8,90

Ausgewählte
Sonderhefte
auch im
PDF-Format

Hier bestellen:

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

www.spektrum.de/neuerscheinungen

Mehrfach weist Hesse auf Zahlen hin, die sich für einfache Zaubertricks eignen. Dabei geht es in der Regel darum, dass der »Zauberer« auf magisch erscheinende Weise herausfindet, welche Zahlen das Publikum wählen wird beziehungsweise vor sich hat. Dahinter steckt zu-meist einfache Mathematik. Amüsante Karikaturen runden die Buchkapitel humorvoll ab. So sind in einem Abschnitt, der sich der geschichtlichen Entwicklung des Rechnens widmet, ein junger Student und ein betagter Professor abgebildet. Der Professor sagt: »Als ich jung war, hatten wir fürs Schnellrechnen nur unsere zehn Finger.« Der Student antwortet: »Ja, und einen extrem niedrigen Schwellenwert für das, was ›schnell‹ bedeutet.«

Hesse ist ein sowohl verständliches als auch unterhaltsames Buch mit diversen nützlichen Rechen-tricks gelungen. Gelegentlich pflegt er zwar einen gewöhnungsbedürftigen, absichtlich schrägen Erzählstil: »Heute wohnsitz der stark 80-jährige Hippie-Veteran im kalifornischen Santa Barbara.« Das verzeiht man ihm aber gern. Schade allerdings, dass Hesse nicht näher auf die Methoden hinter seinen Tricks eingeht und kaum erklärt, wie und warum sie funktionieren. Leser, die mehr wollen als lediglich schnelle Rechenkniffe, sollten deshalb lieber zu einem anderen Werk greifen.

Die Rezensentin Manon Bischoff hat Physik studiert und absolviert ein redaktionelles Praktikum bei »Spektrum der Wissenschaft«.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ GEFAHR VON UNS SELBST?

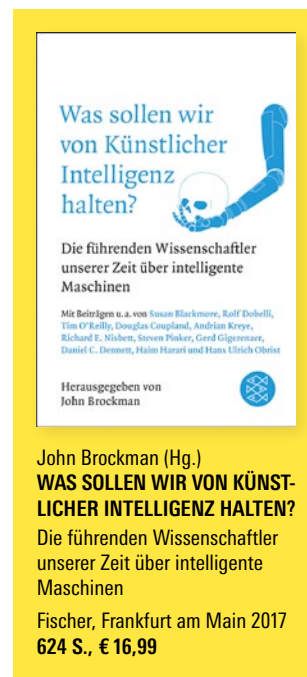
Fürchten müssen wir uns nicht vor den Maschinen, sondern davor, dass wir zu denken aufhören, wie aus diesem Sammelband hervorgeht.

Die Entwicklung der künstlichen Intelligenz schreitet in atemberaubendem Tempo voran. Computer spielen mittlerweile nicht nur Schach besser als der Mensch, sondern auch Go und Poker. Und es gibt Bereiche, in denen Homo sapiens praktisch keine Rolle mehr spielt. Zum Beispiel im Hochfrequenzhandel. Dort führen Algorithmen, so genannte Algo-Trader, in Mikrosekunden Transaktio-

Als Individuen und Gesellschaft hängen wir immer mehr von KI-Algorithmen ab, die wir nicht verstehen

nen aus. Beim Fahrdienstleister Uber schicken nicht Menschen die Fahrer auf Routen und setzen die Preise, sondern Algorithmen.

Können Maschinen denken? Wenn ja, worüber denken sie nach? Können sie ein Bewusstsein entwickeln? Ist das Gehirn auch eine Denkmaschine? Werden Roboter Bürgerrechte einfordern? Welche Art von Regierung würden sie wählen? Was tun, wenn eine Maschine das Gesetz bricht? Das sind nur einige Fragen, die der Sammelband »Was sollen wir von



künstlicher Intelligenz halten?« zu beantworten sucht. In dem Buch finden sich Beiträge renommierter Wissenschaftler wie Haim Harari, Nicholas Carr, Richard Thaler, Nick Bos-

trom und vieler anderer. Der Band ist ein Konvolut aus 186 knappen, meist essayistischen Beiträgen, die drei bis vier Seiten einnehmen.

W. Tecumseh Fitch, Professor für kognitive Biologie an der Universität Wien, betont in seinem Beitrag über Nanointentionalität, dass wir in Zukunft weniger von Denkmaschinen zu befürchten hätten als vielmehr von »immer gedankenloseren Menschen, die sie benutzen«. Siliziumbasierte Informationsverarbeitung

erfordere auch weiterhin eine Interpretation durch menschliche Gehirne. Der Netzkritiker Nicholas Carr stößt, wie bereits zuvor in seinem Buch »The Glass Cage«, ins gleiche Horn. »Als Individuen und Gesellschaft hängen wir immer mehr von KI-Algorithmen ab, die wir nicht verstehen«, konstatiert er. Der damit verbundene Kontrollverlust in ökonomischen, militärischen und privaten Zusammenhängen sowie die »Unsichtbarkeit von Softwarecodes« drohen die Kosten von Pannen, Ausfällen und unvorhersehbaren Effekten zu erhöhen.

Zukunftsforscher Michael Vassar erblickt in der Delegation von Verantwortung sogar einen »sanften Autoritarismus«. »Unsere Chefs wollen uns nicht denken sehen; das würde die Dinge unvorhersagbar machen und ihre Autorität bedrohen. Wenn Maschinen uns überall dort ersetzen, wo wir nicht denken, haben wir ein Problem.« Tom Griffiths, Psychologieprofessor an der University of Berkeley, hebt die positiven Aspekte hervor und argumentiert, durch KI-Forschung könne ein besseres Verständnis der Funktionsweise des Gehirns erreicht werden, weil neuronale Netze nach dem menschlichen Gehirn modelliert seien.

Wenn sich ein Grundtenor aus dem Band herauslesen lässt, dann der, dass wir keine Angst vor Denkmaschinen haben müssen, sondern eher davor, unser eigenes Denken in der Anwendung dieser Systeme abzuschalten. Die Utopie, ab einem bestimmten Punkt in der

Zukunft («Singularität») überflüge die künstliche die menschliche Intelligenz und Maschinen unterjochten dann die Menschheit,

sachlich aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. Der interdisziplinäre Zugang drängt sich bei dieser Thematik, die so verschie-

wichtigen Debattenbeitrag, sondern auch eine Gesamt-schau verschiedener Disziplinen aus Physik, Psychologie, Philosophie, Politikwissenschaft, Rechtswissenschaft und Biologie.

Das Buch verschafft sowohl Einsteigern als auch Fortgeschrittenen durch entsprechende Vertiefungsliteratur einen guten Überblick über den Diskussionsstand. Es ist instruktiv und geistreich, als Zusammenstellung zu verstehen und lässt sich auch noch in ein paar Jahren aus dem Regal ziehen. Enttäuschend nur, dass sich so wenige Wissenschaftler aus dem deutschsprachigen Raum zu Wort melden. Möglicherweise liegt das daran, dass KI-Forschung, vor

allem das interdisziplinäre Feld der Technikfolgenabschätzung, in der hiesigen Forschungslandschaft noch immer ein Nischendasein fristet. Seit dem Tod von Frank Schirrmacher, Herausgeber der »Frankfurter Allgemeinen Zeitung«, der seiner Zeit voraus war und die Digitaldebatte ins Feuilleton seiner Zeitung holte, ist das Thema in der breiteren Öffentlichkeit nicht mehr so präsent. Vielleicht mag das Buch einen Denkanstoß liefern, die Debatte fortzusetzen – sachlich und weniger schrill als unter Schirrmacher.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und betreibt die Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«.

Wir müssen nicht so sehr Angst vor Denkmachines haben als vielmehr davor, unser eigenes Denken in der Anwendung dieser Systeme abzuschalten

halten die meisten Autoren für ein Sciencefiction-Szenario.

Der Vorzug des Bands liegt darin, dass er in seiner Ausgewogenheit weder Technikphobie schürt noch einer Technikeuphorie das Wort redet, sondern das Phänomen fundiert und

dene Punkte wie Maschinenethik oder Roboterrechte berührt, geradezu auf – wird aber von wenigen Publikationen gewählt. Die meisten einschlägigen Bücher verharren in einer recht eindimensionalen Sichtweise. Insofern leistet das Werk nicht nur einen



Ein Geschenk, das ankommt!

Mit einem **Spektrum**-Geschenkgutschein hat der Beschenkte die freie Wahl: ob Abonnement, Einzelhefte oder Kalender, ob Print- oder Digitalprodukte. In unserem Onlineshop www.spektrum.de/shop bieten wir eine große Auswahl an.

spektrum.de/aktion/gutscheine

REZENSIONEN

GESELLSCHAFT MORGENRÖTE ODER ABEND- DÄMMERUNG?

Wissenschaftliche Entwicklungen prägen unser Leben inzwischen umfassend. Die Gesellschaft muss diskutieren, wohin der Fortschritt künftig gehen soll.

► Wissenschaft und der technologische Fortschritt haben unser Leben binnen weniger Jahrzehnte gravierend verändert. Bildgebende Techniken und minimalinvasive Operationen ermöglichen medizinische Behandlungen, von denen die Menschen noch vor wenigen Jahrzehnten nur träumen konnten. Internet und

Smartphones haben unsere Kommunikation revolutioniert und unser Verhältnis zur Welt gleich mit. Sauberes Trinkwasser erscheint in den westlichen Ländern selbstverständlich, ebenso der Zugang zu Bildung und medizinischer Versorgung. All das bringt Lars Jaeger zu der Aussage: »Selbst die ärmsten Mitglieder der westlichen Industriegesellschaft genießen heute einen weit höheren (absoluten) Lebensstandard als der französische Sonnenkönig Ludwig XIV. im 17. Jahrhundert.«

Doch obwohl der wissenschaftlich-technische Fortschritt uns ein Leben ermöglicht, das lang und komfortabel ist wie nie zuvor, glauben viele heute, ebendieser Fortschritt würde uns das Leben künftig zur Hölle machen.



Lars Jaeger
**SUPERMACHT
WISSENSCHAFT**
Unsere Zukunft zwischen
Himmel und Hölle
Gütersloher Verlagshaus,
Gütersloh 2017
416 S., € 22,99

Sciencefiction-Filme zeichnen Dystopien von totaler Überwachung und einer zerstörten ebenso wie zerstörerischen Umwelt. In krassem Kontrast zu diesem Pessimismus vertrauen die meisten Menschen den

neuen Techniken geradezu blindlings. Sie lassen zu, dass ihr Smartphone jeden ihrer Schritte überwacht und unaufgefordert Gesundheitstipps erteilt. Sie geben intimste Details in »sozialen Netzwerken« preis, ihre Daten für ein paar Bonuspunkte im Supermarkt her und freuen sich über individualisierte Kaufempfehlungen.

Ein wesentlicher Grund für diese paradoxe Einstellung dürfte eine verbreitete Unwissenheit, ja geradezu Ignoranz gegenüber wissenschaftlichen Themen sein. Dabei, schreibt Jaeger, sei es heute wichtiger denn je, einen breiten gesellschaftlichen Diskurs darüber zu führen, was Wissenschaft kann, soll und darf. Sein Buch liefert hierfür das nötige Grundlagenwissen.



Reinhard Remfort
**METHODISCH KORREKTES
BIERTRINKEN**
... und weitere Erkenntnisse aus
einer Nacht mit Physik
Ullstein, Berlin 2017
208 S., € 9,99

PHYSIK PIZZA ESSEN AUF GÜTELICH SOLIDER GRUNDLAGE

Ein unterhaltsames Werk über die Wissenschaft der grundlegenden Naturphänomene.

► Einigermaßen klischeehaft erzählt dieses Buch von einer trinkfreudigen Studenten-WG, deren Mitglieder eine eskalierende Silvesterparty feiern, die – Achtung Spoiler – kein freiwilliges Ende nimmt. Lässt sich daraus ein unterhaltsames Werk machen, in dem man etwas über Wissenschaft lernt?

Science-Slam-Sieger Reinhard Remfort beweist, dass es geht, und schafft sogar noch mehr: einen Band, der für Physik begeistert und bei dessen Lektüre man sich in diese Wissenschaft verlieben kann. Denn die Silvesterfeier der durchgeknallt-liebenswerten WG, mit dem Autor mittendrin, strotzt nur so vor physikalischen Herausforderungen: Wie lässt sich Bier am schnellsten kühlen? Wie gelingt es, ohne Hilfsmittel aus lauter (halb-)leeren Batterien die vollste herauszufischen? Warum verbrennt man sich bei Pizza immer nur an den Tomaten die Zunge? Und weshalb ändert sich unmittelbar nach dem Umrühren eines Kaffees der Ton, wenn man mit dem Löffel gegen die Tasse schlägt?

All das beantwortet der Autor und bringt den Lesern dabei unter anderem die Wärmekapazität, Phasendiagramme oder Dipole nahe. Also echte Lehrbuchphysik, nur ansprechender verpackt: als gelungene Mischung nämlich aus Sachbuch und witziger, aber nicht platter Belletristik. Theresa Moebus

Als studierter Physiker, Mathematiker und Philosoph schafft es der Autor, aktuelle Forschung verständlich zu beschreiben und gleichzeitig wichtige ethische Fragen dazu aufzuwerfen. Er fordert einen Mittelweg zwischen unkritischer Wissenschaftseuphorie und ängstlichem Ablehnen jeden Fortschritts.

Unter anderem befasst sich Jaeger mit Quanten-, Nano- und Gentechnologie, mit künstlicher Intelligenz, Neuro-Enhancement und Big Data. Welche Möglichkeiten bietet das 2012 entdeckte gentechnische Werkzeug CRISPR/Cas? Wie könnten Nano-Roboter dabei helfen, Krankheiten zu heilen, und was ist, wenn sie missbraucht werden? Was bedeutet es, wenn künstliche Intelligenzen bald auf die Rechenkapazitäten von Quantencomputern zurückgreifen können? Werden sie uns dann in jeder Hinsicht übertrumpfen?

Jaeger formuliert drastisch und aufrüttelnd – teils zu Lasten wissenschaftlicher Feinheiten. So trifft es zwar zu, dass sich das menschliche Genom inzwischen relativ schnell und billig sequenzieren lässt. Der Schritt, daraus für jeden Menschen ein individuelles Präventions- und Behandlungsprogramm abzuleiten, ist aber immer noch größer als im Buch suggeriert.

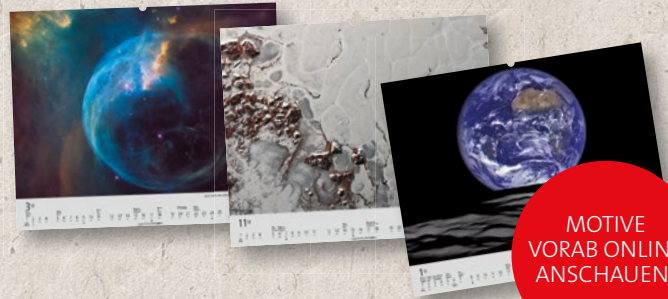
In welcher Welt wollen wir leben, und wie können wir sie gestalten? Der Autor ist überzeugt, dass weder Wissenschaftler noch Politiker, Wirtschaftler oder Philosophen das allein beantworten können. Denn sie alle haben eine jeweils

eigene, vorgeprägte und verzerrte Sicht auf die Welt, bestimmt von Interessenkonflikten, Wissenslücken und speziellen Problemen.

Wie können wir trotzdem die Weichen für eine Zukunft stellen, in der soziale Ungerechtigkeit ab- statt zunimmt; in der Computer Menschen helfen, ohne sie zu bevormunden; in der Gentechnik hilft, Krankheiten zu heilen, statt Design-Menschen zu erschaffen? In der wir also die Möglichkeiten der Wissenschaft nutzen, ohne die Kontrolle zu verlieren? Das ist laut Jaeger nur gemeinsam möglich: Gestützt auf eine solide naturwissenschaftliche Bildung solle jeder bereit sein, sich in den Diskurs einzubringen. Zusammen mit Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Philosophie solle die breite Gesellschaft ihre Zukunft in die Hand nehmen.

Die Möglichkeit einer umfassenden Transparenz, Teilhabe und eines freien Austausches hat die Digitalisierung bereits geschaffen. Wissenschaftler machen ihre Ergebnisse über Open-Access-Journale frei zugänglich und bereiten sie in Blogs verständlich auf. Mit Hilfe von Petitionsplattformen wie change.org kann heute jede(r) politisch Einfluss nehmen. Es liegt in unserer Hand, dies zu nutzen. Jaegers Buch ist jedenfalls ein guter Einstieg hierin und motiviert dazu, sich weiter mit den faszinierenden Möglichkeiten auseinanderzusetzen, welche die »Supermacht Wissenschaft« uns bietet.

Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.



MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!

**STERNE UND
WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2018

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Röntgenlicht. Die Aufnahmen stammen u. a. vom Weltraumteleskop Hubble und der Raumsonde New Horizons. Highlight ist diesmal der Vorbeiflug an Pluto und seinem Mond Charon.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2018 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

Hier können Sie bestellen:

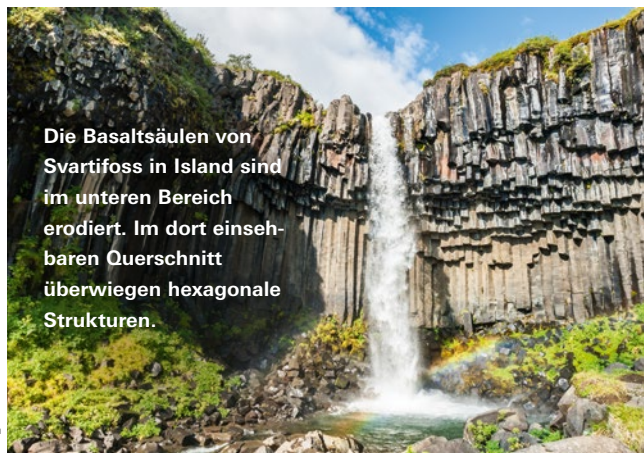
Telefon: 06221 9126-743
sterne-und-weltraum.de/kalender
E-Mail: service@spektrum.de

POLYGONE AUCH BEI KRISTALLISATION

Vulkanisches Basaltgestein zerbricht beim allmählichen Abkühlen oft in charakteristische Vielecke. (»Säulen der Erde«, Schlichting!, *Spektrum* Oktober 2017, S. 68)

Peter Lemmen, Oberschleißheim: Als Chemiker, der langsame Kristallisationen aus unterkühlten Schmelzen beobachtet hat, habe ich immer wieder resultierende hexa- oder pentagonale Strukturen wie bei Basaltsäulen gesehen. Spannungsrisse traten bei konstanter Temperatur dabei nicht auf. Wenn man eine zögerliche Kristallisation beobachtet (in durchsichtigen organischen Schmelzen kann man das ja), sieht man: Von zufällig gebildeten Kristallkeimen in der unterkühlten Schmelze breitet sich ein Konglomerat von Kristallen in alle Richtungen aus.

Wenn diese in der Ebene zunächst kreisförmigen Kristalldomänen aneinanderstoßen, ergeben sich natürlich polygonale Strukturen. Unterstützend ist dabei sicherlich, dass Verunreinigungen nicht in die Kristalle eingebaut



Die Basaltsäulen von Svartifoss in Island sind im unteren Bereich erodiert. Im dort einsehbaren Querschnitt überwiegen hexagonale Strukturen.

OLGA GAVRILOVA / GETTY IMAGES / ISTOCK

werden und so von der sich bildenden Kristallmasse vor sich her geschoben werden (ein Prozess, der beim Reinigen von Substanzen durch Zonenschmelzen ja auch technisch genutzt wird). So entstehen schmale Bereiche größerer Verunreinigung und Inhomogenität in der zuletzt erstarrenden Restschmelze an den Grenzen der Polygone. Diese sind dann sicherlich auch besonders anfällig für anschließende Spannungsrisse.

Den von Ihnen dargestellten Übergang von rechtwinkligen Spannungsrissen zu diesen polygonalen Säulen würde man in der Sprache der Chemiker als Übergang von einer kinetisch zu einer thermodynamisch kontrollierten Erstarrung beschreiben: Nahe der Oberfläche kühlt die Lava schnell ab und ist bald eine weit unterkühlte Schmelze, in der sich viele Kristallkeime bilden. Das führt zu einem raschen und ziemlich homogenen Erstarren mit den von Ihnen beschriebenen Spannungsrissen. In der Tiefe

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.

jedoch und bei guter Wärmeisolation haben wenige Kristallkeime in der Schicht mit der gerade richtigen Unterkühlung ausreichend Zeit, zu diesen polygonalen Domänen zusammenzuwachsen, die sich bei weiterer Abkühlung nach unten fortsetzen. Ihrem thermodynamischen Argument fügt dieser Gedankengang einen Mechanismus hinzu.

ASTROPHYSIK ALS GLAUBENSFRAGE

Einige Kosmologen halten parallel existierende Universen für möglich. Der Physiker Yasunori Nomura meint, eine alternative Interpretation der Quantenmechanik könnte beim Verständnis der physikalischen Konsequenzen helfen. (»Reise ins Quanten-Multiversum«, *Spektrum* September 2017, S. 12)

Manfred Gehring, Trier: Es ist schon beeindruckend zu erleben, wie sich aus der theoretischen Astrophysik eine Art »Astrotheologie« entwickelt. Ans Multiversum kann man glauben oder es lassen. Dadurch ändert sich nichts. Eigentlich fehlt noch die Diskussion um die Anzahl von Parallelwelten – sind es endlich oder unendlich viele? Das entspräche dann dem Disput um das Geschlecht der Engel im Mittelalter.

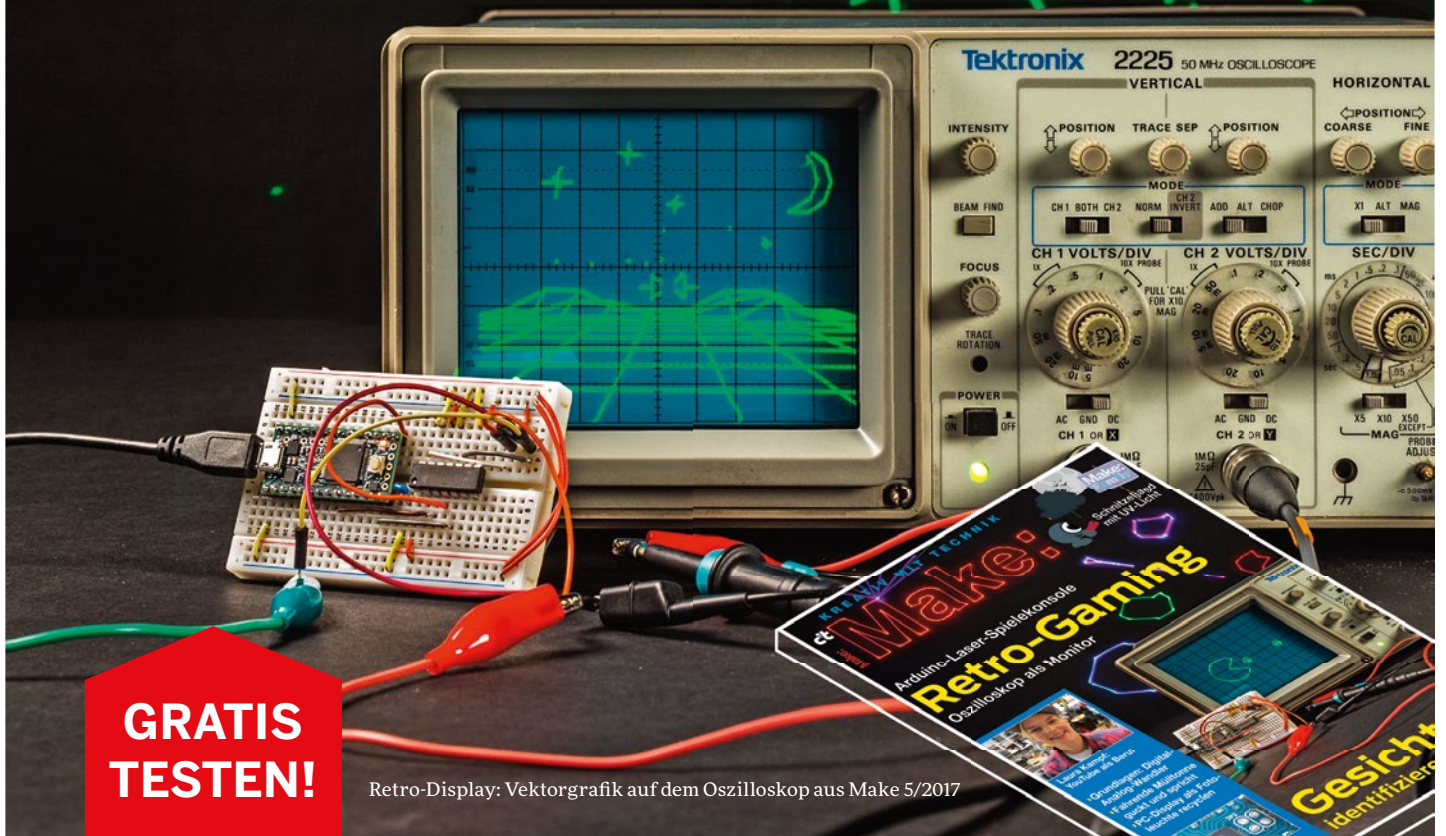
Letztlich geht alles auf eine Beobachtung zurück, die Rotverschiebung. Dazu passt der Artikel »Inflationsmodell in der Kritik« (*Spektrum* Juni 2017, S. 12). Wie in jeder Religion werden, wenn die Beobachtungen nicht zur Theorie passen, neue Postulate zu einer wundersamen neuen Wirklichkeit entwickelt.

Warum nimmt man zum Beispiel nicht an, dass die Dunkle Materie noch weitere Eigenschaften hat, die auch die Rotverschiebung erklären? Dann bräuchte man weder den Urknall, die Inflation noch die Dunkle Energie. Das wäre zwar auch nur eine Annahme, hätte aber den Charme, die Fragwürdigkeit der geltenden Modelle aufzuzeigen. Auch dafür ließe sich sicherlich ein mathematischer Apparat entwickeln, der alles plausibel erscheinen lässt.

Mit der Quantenmechanik ist es sehr ähnlich. Letztlich geht alles auf den Welle-Teilchen-Dualismus zurück. Auch dieser ist ein grundlegendes Axiom, das Folgerungen erzeugt, die genauso gut falsch wie richtig sein können. Selbst die Schrödinger-Gleichung würde eine andere Bedeutung erlangen, wenn die Begriffe »Wellen- und Teilchennatur« aus der Vorstellungswelt verschwänden.

Make:

DAS KANNST DU AUCH!



**GRATIS
TESTEN!**

Retro-Display: Vektorgrafik auf dem Oszilloskop aus Make 5/2017

Make kostenlos kennenlernen!

Das Magazin Make veröffentlicht Bauanleitungen für faszinierende Technik-Projekte, die sowohl Anfänger als auch Fortgeschrittene nachvollziehen können. Die Redaktion informiert zudem über die Maker-Szene, 3D-Drucker, Mikrocontroller und vieles mehr. Make erscheint 6 x pro Jahr + 1 Sonderheft!

Jetzt bestellen: make-magazin.de/probeheft

futur III

Späte Reue

Wenn ein Hirnimplantat das Gewissen ausschaltet. **Eine Kurzgeschichte von Andreas Eschbach**

Beim Anblick des gewaltigen, von Scheinwerfern illuminierten Palazzos wurde mir mulmig. Ich schaute unserem Auto nach, das sich gerade wieder in den abendlichen Verkehr Roms einfädelt. »Wollen Sie da wirklich hinein, Dottore Sandrini?«

»Ein Patient ist ein Patient«, sagte sie und marschierte los.

Da ich ihren Koffer trug, blieb mir nichts anderes übrig, als ihr zu folgen. Es war mir ein Rätsel, wie man jemanden, der durch Waffenhandel, Drogen-geschäfte und den Kauf von Politikern zu einem der reichsten und mächtigsten – und gefürchtetsten – Männer der Welt geworden war, einfach nur als »Patient« betrachten konnte.

Überall standen bewaffnete Sicherheitsleute. Nach Inspektion unseres Koffers durften wir den Kontrollpunkt passieren und den majestätischen Innenhof des Palazzos betreten. Gerüste ragten in die Nacht hinauf. Offenbar waren die Umbauarbeiten, die 2050 begonnen hatten, immer noch im Gange.

Neben einer Holo-Statue von Michelangelos David erwartete uns ein geschleckt wirkender Mann im Abendanzug. »Dottore Sandrini?« Er reichte ihr die Hand. »Holtz. Ich bin der persönliche Assistent von Signore Prokosch.«

»Buona sera«, sagte Beatrice, schüttelte seine Hand und erklärte mit einem Kopfnicken in meine Richtung: »Ludwig Dörr. *Mein* Assistent.«

»Verstehe. Wenn Sie mir folgen wollen?« Er führte uns eine kolossale Treppe hinauf, die Jahrhunderte alt sein musste, durch Flure und Säle voller Statuen, Gemälde und goldener Verzierungen bis in eine Art Wohnzimmer, eine Orgie in Plüsch und Nippes. »Signore Prokosch kommt sofort.«

»Wir bereiten derweil alles vor«, meinte Beatrice und gab mir ein Zeichen, den Koffer zu öffnen und die Instrumente bereitzulegen. Nachdem der Mann das Zimmer verlassen hatte, raunte sie mir zu: »Hast du dir den Weg hinaus gemerkt?«

»Ja, natürlich«, sagte ich, gerade in dem Moment, in dem die Tür aufging und er hereinkam – Reinhold Prokosch, der berüchtigte »Händler des Todes«.

Er war groß und mager, einem Gespenst ähnlicher als einem Menschen und ohne ein einziges Haar auf dem Schädel. Etwas Böses düstete von ihm aus. Man hörte über ihn oft: Wenn nur die Hälfte stimmt von dem, was man ihm nachsagt ... Doch als ich ihn sah, war ich plötzlich davon überzeugt, dass nicht einmal die Hälfte bekannt war von dem, was er getan hatte.

»Doktor Sandrini«, sagte er mit tiefer Stimme. »Ich habe mich über Sie erkundigt. Sie gelten als die führende Expertin für Hirnimplantate, als die Kapazität auf diesem Gebiet. Ist das richtig?«

»Ja«, sagte Beatrice mit jener Gelassenheit, die wohl nur Hirnchirurgen besitzen.

»Wie Sie sich zweifellos schon gedacht haben, möchte ich, dass Sie sich mein Implantat anschauen. Ich habe das Gefühl, dass es demnächst seinen Geist aufgeben will.«

Beatrice nickte. »Wie alt ist Ihr Implantat denn?«

»Vierzig Jahre.«

»Vierzig Jahre?« Beatrice musterte ihn misstrauisch. »Damals gab es solche Geräte noch nicht.«

Prokosch lächelte kühl. »Offiziell nicht, das stimmt. Aber es wurde daran gearbeitet. Ich habe es mir von einem der damaligen Pioniere konstruieren und einpflanzen lassen,

Doktor Karel van Hoegen. In einer, sagen wir ... privaten Sitzung.«

Beatrice deutete auf den Sessel, dessen Kopfteil ich mit dem antibakteriellen Tuch abgedeckt hatte. »Setzen Sie sich bitte. Ich muss mir das erst einmal anschauen.«

Der mächtige alte Mann nahm Platz. Ich sah, dass es ihm schwerfiel, seine Bewegungen zu koordinieren. Beatrice nahm den Handscanner, setzte ihre VR-Brille auf und begann, seinen Kopf zu durchleuchten.

Nach kaum einer Minute schob sie die Brille auf ihre Stirn hoch und meinte: »Das sind absolut ungewöhnliche Verschaltungen. Welcher Defekt soll damit behoben werden?«

»Mein Implantat dient dazu«, erklärte Prokosch, »mein Gewissen auszuschalten.«

Dann erzählte er uns seine Geschichte.

Er habe früh im Leben erkannt, dass man es in der Welt nur zu etwas brachte, wenn man sich nicht von Gewissensbissen behindern ließ. Als er von den Forschungen van Hoegens erfuhr, suchte er ihn in dessen Haus in Amsterdam auf und bedrängte ihn, ihm einen entsprechenden Chip zu konstruieren und einzupflanzen. Zu riskant, wehrte der Forscher ab, so weit sei die Wissenschaft noch nicht. Daraufhin versprach Prokosch ihm, ihn und seine Familie am Leben zu lassen, wenn er ihm diesen Chip baute, und van Hoegen gab nach.

»Er hat einen Chip entwickelt, eigens für mich. Ich war dabei, als er ihn auf einem extrem leistungsfähigen 3-D-Drucker hergestellt hat. Als er ihn mir einsetzte, habe ich sofort gemerkt, wie er wirkt. Und ohne Gewissen war es kein Problem, mein läs-

tiges Ehrenwort zu brechen und van Hoegen auf der Stelle zu erschießen.«
»Warum das?«, fragte Beatrice mit reglosem Gesicht.

»Nun, ich bin nicht dumm. Ich musste verhindern, dass er jemand anderen den gleichen Chip verkauft.« Prokosch hob die Hände an die Schläfen. »Ich habe nicht mehr lange zu leben. Es wäre äußerst unangenehm, wenn dieser einzigartige Chip ausgerechnet jetzt versagen sollte und ich in der mir verbleibenden Zeit von Reue heimgesucht werden würde über die Dinge, die ich in meinem Leben getan habe. Deswegen habe ich Sie rufen lassen. Deswegen das fürstliche Honorar.«

»Verstehe«, sagte Beatrice. »Es ist wirklich fürstlich.« Sie klopfte auf das Kopfteil. »Lehnen Sie sich zurück. Ich werde an der Stelle über dem Chip eine lokale Betäubung anbringen und dann die Haut öffnen.«

Ich zog sterile Handschuhe an und hielt seinen Kopf fest, während Beatrice den Eingriff vornahm. Sie schnitt mit sicherer Hand, stillte die Blutung und klappte dann den Hautlappen beiseite. Darunter kam das Implantat zum Vorschein: eine blassgraue Metallscheibe, so groß wie ein 50-Cent-Stück.

Ich sah zu, wie sie mit einer Pinzette den Deckel abnahm. Ihre Hände zitterten leicht: Das hatte ich bis dahin noch nie bei ihr gesehen.

»Halt ihn gut fest, ja?«, murmelte sie kaum hörbar.

Unter dem Deckel lag das Energiemodul, das aus Körperbewegungen allen Strom gewann, den das Implantat benötigte, und daneben der Chip, eingewickelt in ein haardünnes, ungewöhnlich langes Kabel. Beatrice klemmte sich die Lupe ins Auge, griff nach ihrer kräftigsten Zange, fasste den Chip damit und zog ihn heraus, ganz langsam, um die Leitung nicht zu beschädigen.

Sie hielt ihn so, dass Prokosch ihn sehen konnte. »Das ist also der unersetzliche Chip, der Ihr Gewissen abschaltet?«

»Ja«, stieß er hervor. »Können Sie ihn reparieren?«

Beatrice lächelte auf ihn hinab. »Schauen Sie zu«, sagte sie.

Dann drückte sie die Griffe der Zange mit aller Kraft zusammen, und der Chip zerbröselte in tausend Stücke.

»Was tun Sie da?«, heulte er auf.
»Dennis! Hilf-«

Weiter kam er nicht, denn Beatrice hatte sich auf ihn geworfen und presste ihm die Hand auf den Mund.

»Sie haben Erkundigungen über mich eingezogen, ja?«, zischte sie.
»Leider haben Sie die wichtigste Sache dabei übersehen, nämlich, dass Karel van Hoegen mein Vater war. Nach seinem Tod hatte ich niemanden mehr, nur das Glück, dass mich sein Freund Silvio Sandrini und dessen Frau adoptiert haben. Ich habe Sie nie aus den Augen gelassen, Prokosch. Ich habe immer gewusst, dass Sie es waren, der ihn getötet hat, ich konnte es nur nie beweisen. Und inzwischen ist die Tat verjährt. Selbst wenn Sie alles gestehen sollten, würde kein Richter Sie dafür verurteilen. Dem Gesetz entkommen Sie also. Aber Ihrem Gewissen – dem entkommen Sie nicht!«

Sie klapperte dicht vor seinen Augen mit der Zange. »Für diesen Moment habe ich Medizin studiert. Für diesen Moment habe ich alles gegeben, um genau die Expertin zu werden, die Sie rufen würden, wenn Ihr Chip eines Tages Ausfallerscheinungen zeigt. Für diesen Moment habe ich gelebt – um Rache zu üben dafür, dass Sie mir den Vater genommen haben.«

Sie griff nach einer Injektionspistole, von der ich mich schon gefragt hatte, wofür sie die vorbereitet hatte, und jagte ihm die volle Ladung in die Halsschlagader. »Ein harmloses Mittel zur Entspannung«, erklärte sie. »Es wird Sie lähmen, bis wir Ihren Palast verlassen haben. In einer halben Stunde können Sie sich wieder bewegen und Alarm schlagen. Falls Sie nicht vorher von der Reue eines langen, verfehlten Lebens überwältigt werden.«

»Findest du, dass ich unmoralisch gehandelt habe?«, fragte Beatrice, als wir in dem Auto saßen, das in einer Seitenstraße auf uns gewartet hatte.

»Vor allem finde ich, dass wir endlich losfahren sollten«, erwiderte

ich nervös. Beatrice ließ die Scheiben herabfahren. Der Lärm des nächtlichen Rom drang herein. Doch sie machte keinerlei Anstalten, den Befehl zur Abfahrt zu geben. »Noch nicht. Ich hab mein Leben lang auf diesen Abend gewartet. Lass ihn mich noch eine Weile genießen.«

Damit schloss sie die Augen, hielt den Kopf ins Fenster und lauschte.

»Also, ehrlich gesagt«, erklärte ich, »fand ich es schon ... nun ja, grenzwertig. Ein Implantat vorsätzlich zu zerstören, auf das jemand gesundheitlich angewiesen ist, gilt als Körperverletzung.«

»War Prokosch das denn? Gesundheitlich darauf angewiesen?« Sie hatte die Augen immer noch geschlossen, sah aus, als lausche sie herrlicher Musik. »Horch!«, sagte sie plötzlich.

Und da hörte ich es: Jemand schrie. Es war ein lang gezogener, entsetzlicher Klagelaut aus weiter Ferne, vielfach wiederhallend, als stünde derjenige auf einem Balkon eines großen Innenhofs und schreie sich die Seele aus dem Leib.

»Prokosch«, sagte ich.

»Das will ich doch hoffen«, sagte sie. Er hörte gar nicht mehr auf. Er schrie, als würde er gefoltet oder in der Hölle braten.

»In Wahrheit«, sagte Beatrice, »hat der Chip nie funktioniert. Ich habe die Tagebücher meines Vaters gelesen, die Überlegungen, die er angestellt hat, nachdem Prokosch ihm gedroht hat. Er wusste nicht, wie er ein Gewissen lahmlegen sollte – niemand weiß das –, also hat er ihm ein Placebo implantiert. Prokosch hat sein Gewissen aus eigener Kraft ausgeschaltet, und nun, da er den Tod kommen sieht, hat es sich von selbst wieder gemeldet.«

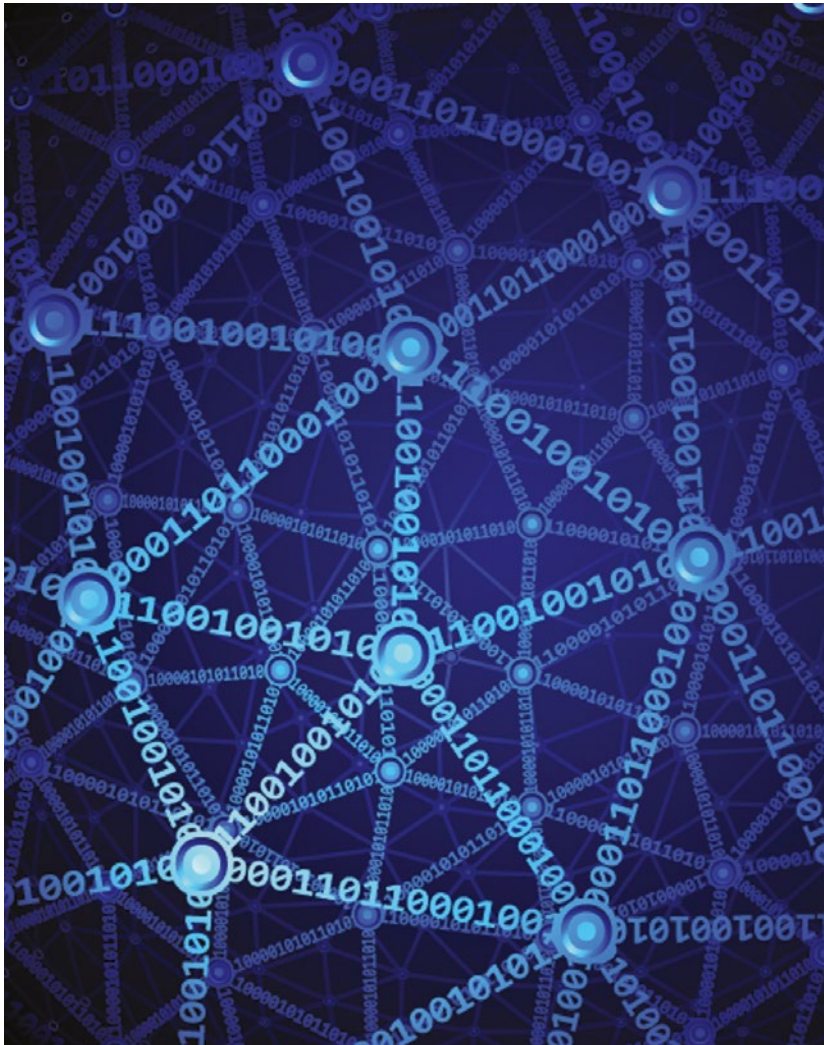
Sie beugte sich vor, tippte eine Adresse ein. Das Auto fuhr los.

»Alles andere war nur Theater.«

DER AUTOR

Andreas Eschbach (*1959) studierte Luft- und Raumfahrttechnik und arbeitete als Softwareentwickler, lebt aber inzwischen als freier Schriftsteller in der Bretagne. Zu seinen bekanntesten Romanen zählen »Das Jesus-Video«, »Die Haarteppichknüpfer«, »Eine Billion Dollar« und »Herr aller Dinge«.

VORSCHAU



POURCAPHUS / GETTY IMAGES / ISTOCK

DER SIEGESZUG DER KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ

Künstliche neuronale Netze sind mittlerweile weit über ihre ursprünglichen Arbeitsgebiete Bilderkennung und Datenanalyse hinausgewachsen. Vielschichtige (»tiefe«) Netze schlagen den Weltmeister im Go, steuern Autos durch den Straßenverkehr, berechnen turbulente Strömungen und gewinnen aus dem Datenmaterial von Teilchenkollisionen vielleicht sogar neue wissenschaftliche Erkenntnisse.



ZETTER / GETTY IMAGES / ISTOCK

AUF ZEITREISE DURCH DAS ALTE VENEDIG

Tausende von Karten und Manuskripten aus dem goldenen Zeitalter Venedigs werden derzeit mit Hilfe künstlicher Intelligenz digitalisiert. Erstmals wird dieser Schatz aus 1000 Jahren Geschichte Forschern nun zugänglich.



GREG ROTH / GREGTHUMS.COM

DINOSAURIER IM BUNTEN FEDERKLEID

Einige der vor 65 Millionen Jahren ausgestorbenen Urzeitreptilien trugen Streifen, andere einen roten Kopfputz. Manche schillerten in der Sonne. In Fossilien erhaltene Pigmente enthüllen eine wahre Farbenpracht.



UNIVERSITY OF WARWICK / MARK GABRIEL / WWW.ESO.ORG / PUBLIC GERMANY / IMAGES / ESO / JESSI / CC BY 4.0 / CREATIVERCOMMONS.ORG / LICENSES / BY / SA / 4.0 / LEGALCODE

RAUMZEITBEBEN FÜR DIE GESCHICHTSBÜCHER

Vor 130 Millionen Jahren kollidierten in der Galaxie NGC 4993 zwei Neutronensterne. Dutzende Forschergruppen haben das Ereignis beobachtet – und hoffen, damit gleich mehrere große Weltraumrätsel zu lösen.

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

Wissen verschenken und Freude bereiten – mit einem Geschenk-Abonnement!

Verschenken Sie DIE WOCHE im Kombipaket als 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)

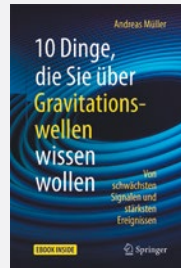


Geschenktipps zum Weihnachtsfest

Ich will es wissen - Springer Sachbücher und Ratgeber



2017, XXIII, 327 S.
Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 |
*sFr 20,50
ISBN 978-3-662-54895-0
(Book + eBook)
€ 14,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-54896-7
(eBook)



2017, XV, 255 S. 57 Abb.
in Farbe. Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 |
*sFr 20,50
ISBN 978-3-662-54408-2
(Book + eBook)
€ 14,99 | *sFr 15,00
ISBN 978-3-662-54409-9
(eBook)



2017, XV, 381 S.
55 Abb. Geb.
€ (D) 29,99 | € (A) 30,83 |
*sFr 31,00
ISBN 978-3-662-54995-7
€ 14,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-54996-4
(eBook)



2017, XIV, 287 S. Brosch.
€ (D) 14,99 | € (A) 15,35 |
*sFr 15,50
ISBN 978-3-662-54890-5
(Book + eBook)
€ 9,99 | *sFr 12,00
ISBN 978-3-662-54891-2
(eBook)



2017, XVI, 460 S. 271
Abb. Brosch.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,58 |
*sFr 25,50
ISBN 978-3-662-53665-0
(Book + eBook)
€ 19,99 | *sFr 20,00
ISBN 978-3-662-53666-7
(eBook)



2017, XX, 287 S. 90 Abb.,
53 Abb. in Farbe.
Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 |
*sFr 20,50
ISBN 978-3-662-53909-5
(Book + eBook)
€ 14,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-53910-1
(eBook)



2018, X, 253 S. 23 Abb.
Geb.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 |
*sFr 20,50
ISBN 978-3-662-54661-1
(Book + eBook)
€ 14,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-54662-8
(eBook)



2018, XVII, 288 S.
14 Abb. Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 |
*sFr 20,50
ISBN 978-3-662-54705-2
(Book + eBook)
€ 14,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-54706-9
(eBook)



2018, XII, 338 S. 2 Abb.
Geb.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 |
*sFr 20,50
ISBN 978-3-662-54798-4
(Book + eBook)
€ 14,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-54799-1
(eBook)



2017, XIV, 334 S. Geb.
€ (D) 39,99 | € (A) 41,11 |
*sFr 50,00
ISBN 978-3-662-53868-5
€ 29,99 | *sFr 40,00
ISBN 978-3-662-53869-2
(eBook)



2018, X, 372 S. 55 Abb.,
35 Abb. in Farbe.
Brosch.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,58 |
*sFr 25,50
ISBN 978-3-662-54772-4
(Book + eBook)
€ 19,99 | *sFr 20,00
ISBN 978-3-662-54773-1
(eBook)



€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7 % für Printprodukte bzw. 19 % MwSt. für elektronische Produkte. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10 % für Printprodukte bzw. 20 % MwSt. für elektronische Produkte. Die mit * gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

Jetzt bestellen auf springer.com/Angebot2 oder in Ihrer Buchhandlung

Part of **SPRINGER NATURE**