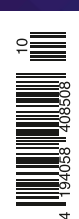


Spektrum

der Wissenschaft

Zufallsmatrizen und die Ordnung der Welt

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



KLIMAWANDEL Rekordverdächtige Erwärmung der Arktis

RELIGION Streitgespräch zum Verhältnis von Glaube und Vernunft

REPRODUKTIONSMEDIZIN Eizellen aus Hautzellen

Spektrum PLUS+

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

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

- Download des Monats im Oktober: **Spektrum** KOMPAKT »Chronobiologie«
- Führung für Abonnenten durch die Sonderausstellung »MUMIEN – Geheimnisse des Lebens« in den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim am 23. November 2018
- Ermäßigter Preis für die Hurtigruten-Reise »Zauber des Nordlichts« im März 2019 sowie auf ausgewählte Reisen aus dem Programm von birdingtours
- Im Rahmen des zweitägigen Stuttgarter Zukunftssymposiums (23./24. November 2018) wird unter dem Motto »Mensch bleiben im Maschinenraum« über die Möglichkeiten und Herausforderungen von KI diskutiert. Abonnenten erhalten 20 Prozent Rabatt auf den regulären Ticketpreis.
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum** LIVE zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM 40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES
VERLAGS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der Ursprung des Lebens auf der Erde

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

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

Vom Neandertal zum Konzertsaal

Wann? 9. November 2018 | **Wo?** Hannover

Professor Eckart Altenmüller erläutert in einem Gesprächskonzert, wie Musik im Gehirn verarbeitet wird und wie sie ihre emotionale Kraft entfaltet. Dabei greift er selbst zur Flöte, um anhand von Musikstücken aus verschiedenen Epochen die Wirkungen hörbar zu machen. Diese Veranstaltung findet im Rahmen des »November der Wissenschaft« in Hannover statt.

Tickets und Anmeldungen:
Spektrum.de/live



EDITORIAL GOTTESFRAGE IN KASSEL

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Die Positionen waren von Beginn an klar. Auf der einen Seite die bekennende Christin, auf der anderen der skeptische Agnostiker. Sie theoretische Physikerin, er evolutionärer Anthropologe. Zur Debatte an einem bewölkten Junitag in einem Kasseler Restaurant standen die ganz großen Fragen: Warum gibt es etwas und nicht nichts? Weisen die Naturgesetze auf die Existenz Gottes hin? Schließen Vernunft und Glaube einander aus?

Vor 18 Jahren hatte ich erstmals – im Hintergrund – an einem Dialog über das Verhältnis von Wissenschaft und Religion mitgewirkt. Als Fingerübung für den Newcomer in der **Spektrum**-Redaktion drückte mir der damalige Chefredakteur Reinhard Breuer den Kassettenmitschnitt eines Streitgesprächs in die Hand, das er gemeinsam mit unserem Kolumnisten Michael Springer moderiert hatte. Transkribieren bitte, Redundanzen rausfischen, Erklärungen für Fachbegriffe einfügen, so lautete der Auftrag. Die Protagonisten damals waren der Wissenschaftsphilosoph Bernulf Kanitscheider und der Theologe Ulrich Lüke und die Leserzuschriften nach Publikation ihres Disputats Legion – was diesen Beitrag in der Redaktion unvergessen machte (**Spektrum** Juni 2000, S. 82). »Ihr wollt im Ernst wieder so ein Streitgespräch führen? Na, viel Spaß mit den Leserkommentaren!«, schallte es meinem Kollegen Frank Schubert und mir dann auch entgegen, als wir in diesem Frühjahr begannen, erneut zum Thema zu recherchieren. So unterschiedlich unsere eigenen Positionen in der Gottesfrage sind, in dem Punkt waren wir beide uns einig: Sie muss gestellt werden, und ein Wissenschaftsmagazin wie **Spektrum** ist ein angemessener Ort dafür. Schon das werden einzelne Leserinnen und Leser freilich anders sehen, was bereits einen Teil der Zuschriften und Kommentare nach sich ziehen dürfte, die uns auch diesmal ereilen könnten.

Anders als vor 18 Jahren haben wir außer dem Gespräch, das Sie ab S. 70 lesen, noch vier Videostatements unserer beiden Gesprächspartner mitgeschnitten, nämlich zu den Fragen, ob Vernunft und Glaube einander widersprechen und warum es vernünftig ist, (nicht) an Gott zu glauben. Diese Videos finden Sie auf spektrum.de/artikel/1587770.

Eine gute Lektüre wünscht
Ihr



NEU AM KIOSK!

Aktuelle technische Entwicklungen von Quantencomputern bis zu autonomen Autos analysiert unser **Spektrum** SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 3.18.

AUTOREN DIESER AUSGABE



BERTRAND EYNARD

Der theoretische Physiker findet im Zufall universelle Ordnung, und zwar mit Hilfe eines Standardwerkzeugs der Mathematik: Matrizen (S. 12).



JENNIFER A. FRANCIS

Warum das Klima am Nordpol auch unser Leben in den gemäßigten Breiten massiv beeinflusst, erklärt die Meeresforscherin ab S. 52.



STEPHANIE ZESCH

Welches Verhältnis hatten Eltern im alten Ägypten zu ihren Kindern? Mumien geben der Anthropologin neue Antworten (S. 80).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Hoch aufgelöstes Fliegenhirn

Spektakulärer Test der Relativitätstheorie

Unzufriedene Fische fressen ihre Kinder

Natürlicher Kernreaktor ummantelte Atommüll

Lösung von legendärem Spagetti-Rätsel

Dunkle Seite der Probiotika

Negativ gekrümmter Kohlenstoff

Halb Neandertaler, halb Denisovaner

22 FORSCHUNG AKTUELL

Mit Natron zum luftigsten Feststoff

Neue Verfahren erleichtern die Aerogel-Produktion.

Diagnostik mit CRISPR/Cas

Bakterielle Genscheren erlauben den hochempfindlichen Nachweis von Viren.

Ein See unter dem Marsgletscher

Gibt es am Marssüdpol flüssiges Wasser?

Fields-Medaillen 2018

Die Preisträger der diesjährigen Mathematiker-Ehrung.

31 IMPRESSUM

44 ZEITREISE

Vom Bernstein zur Verbrecherdatenbank

59 FREISTETTERS FORMELWELT

Mathematisches Tischerücken

Die zauberhafte Wirkung des Zwischenwertsatzes.

12 ZUFALLSMATRIZEN **NEUE UNIVERSELLE GESETZE**

Auf den verschiedensten Gebieten, von der Wirtschaft über die Geometrie bis hin zur Stringtheorie, entdecken Wissenschaftler verblüffende Gesetzmäßigkeiten in scheinbar zufälligen Ereignissen.

Von Bertrand Eynard

32 BIOLOGIE **BITTE EINMAL KRÄFTIG ZUBEISSEN!**

Wie errangen Krokodile auf der ganzen Welt die Vorherrschaft in ihren Lebensräumen? Kühne Vermessungen ihrer Beißkraft liefern die Antwort.

Von Gregory M. Erickson

38 MEDIZIN **FORTPFLANZUNG MIT ANDEREN MITTELN**

Forscher haben ausgereifte Körperzellen in Keimzellen umgewandelt. Kündigt sich hier ein Durchbruch in der Reproduktionsmedizin an?

Von Karen Weintraub

46 EVOLUTION **AUF DEN SPUREN DER ÄLTESTEN FOSSILIEN**

Serie: Die junge Erde (Teil 3) Laut neuesten Funden existierten primitive Einzeller bereits vor mehr als vier Milliarden Jahren. Doch die versteinerten Ablagerungen sind umstritten.

Von Rebecca Boyle

52 ARKTIS **AUF DÜNNEM EIS**

Hohe Temperaturen, schmelzendes Eis, steigende Luftfeuchtigkeit: Das Klima der Arktis stellt einen Extremwert nach dem anderen auf – mit erheblichen Folgen für das Wetter rund um den Globus.

Von Jennifer A. Francis

60 ASTROPHYSIK **AM PULS DER RAUMZEIT**

Wissenschaftler bereiten sich auf das nächste Kapitel bei der Jagd nach Gravitationswellen vor – und hoffen auf reiche Beute.

Von Davide Castelvecchi

70 STREITGESPRÄCH **»DIE DATEN SPRECHEN NICHT FÜR SICH«**

Was haben Glaube und Vernunft gemein? Die Physikerin Barbara Drossel und der Primatenforscher Volker Sommer debattieren über das Verhältnis zwischen Wissenschaft und Religion.

Von Carsten Könneker und Frank Schubert

76 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **DAS 120-ZELL**

Ein vierdimensionaler Körper soll in unsere gewöhnliche dreidimensionale Welt geholt werden: mit Holz, Papier und Klebstoff.

Von Christoph Pöppe

80 ARCHÄOLOGIE **KINDERMUMIEN**

Serie: Mumien (Teil 2) Wie ging man im alten Ägypten sowie im Reich der Inka mit dem Nachwuchs um? Galt Kindheit damals überhaupt als eine besondere Lebensphase? Sterbliche Überreste geben Aufschluss.

Von Stephanie Zesch

ELIAS WEGERT, WWW.VISUAL.WEGERT.COM



12

TITELTHEMA
ZUFALLSMATRIZEN

D. PHILLIPS / SCIENCE PHOTO LIBRARY



38

MEDIZIN
FORTPFLANZUNG MIT
ANDEREN MITTELN

NUTMAN, A.P. ET AL., NATURE 537, S. 535-538, 2016, FIG. 1A



46

EVOLUTION
DIE ÄLTESTEN FOSSILIEN

KENICANING / GETTY IMAGES / STOCK



52

ARKTIS
AUF DÜNNEM EIS

80

ARCHÄOLOGIE
KINDERMUMIEN



SANDRA STEISS, MIT FROL. GEN. DER SMB, ÄGYPTISCHES MUSEUM UND PAPYRUSAMMLUNG

68 SCHLICHTING!

**Wie Laub sich
abwärtswiegt**

Blätter tanzen auf charakteristische Weise zu Boden.

88 REZENSIONEN

- Christophe Galfard,**
Danielle George: Expedition
New Earth
- Dorlis Blume et al. (Hg.):**
Europa und das Meer
- David Christian:** Big History
- Davidson Black:** Schädelfall
- Jaron Lanier:** Zehn Gründe,
warum du deine Social
Media Accounts sofort
löschen musst
- E. Christiana Köhler:**
Vor den Pyramiden

95 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Kurz vor Pi
Chat mit einer Börsen-
kontrolleurin.

98 VORSCHAU

Titelbild:
Elias Wegert, www.visual.wegert.
com; Bearbeitung: Spektrum
der Wissenschaft



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

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

SPEKTROGRAMM



HOCH AUFGELÖSTES FLIEGENHIRN

▶ 100 000 Nervenzellen mit jeweils unzähligen Verbindungen zu anderen Neuronen: Diese 3-D-Rekonstruktion von Forschern des Howard Hughes Medical Institute in Ashburn (USA) zeigt das Gehirn der Taufliege *Drosophila melanogaster* als Geflecht aus verästelten Linien. Die Neurobiologen wollen anhand der Aufnahme lernen, wie bestimmte Strukturen das Verhalten des 2,5 Millimeter

großen Tiers beeinflussen. Dazu haben sie mit großem technischem Geschick erstmals einzelne Nervenzellen seines Gehirns dargestellt – ein Pixel der Aufnahme entspricht gerade einmal vier milliardstel Metern



3D RECONSTRUCTION OF DROSOPHILA NEURONS BY THE FULL ADULT FLY
PHILIPP SCHLEGEL, DROSOPHILA CONNECTOMICS GROUP, CAMBRIDGE

(Nanometern). Dadurch lassen sich Verbindungen, die im so genannten Pilzkörper des Zentralhirns starten, bis zu ihrem Endpunkt verfolgen.

Für die Aufnahme injizierte das Team eine kontrastverstärkende, metallhaltige Flüssigkeit in das konservierte Gehirn einer Fliege und schnitt es in 7062 je 40 Nanometer dicke Scheiben. Anschließend machten sie mit zwei

Elektronenmikroskopen insgesamt 21 Millionen Bilder, die sie am Computer zusammenfügten. Die Farben auf dem Bild veranschaulichen Nervenbahnen verschiedener Typen von Sensillen; das sind kleine Sinnesorgane von Gliederfüßern. Bei lila Linien ist hingegen unklar, zu welchem Wahrnehmungssystem die Neurone gehören.

Cell 10.1016/j.cell.2018.06.019, 2018

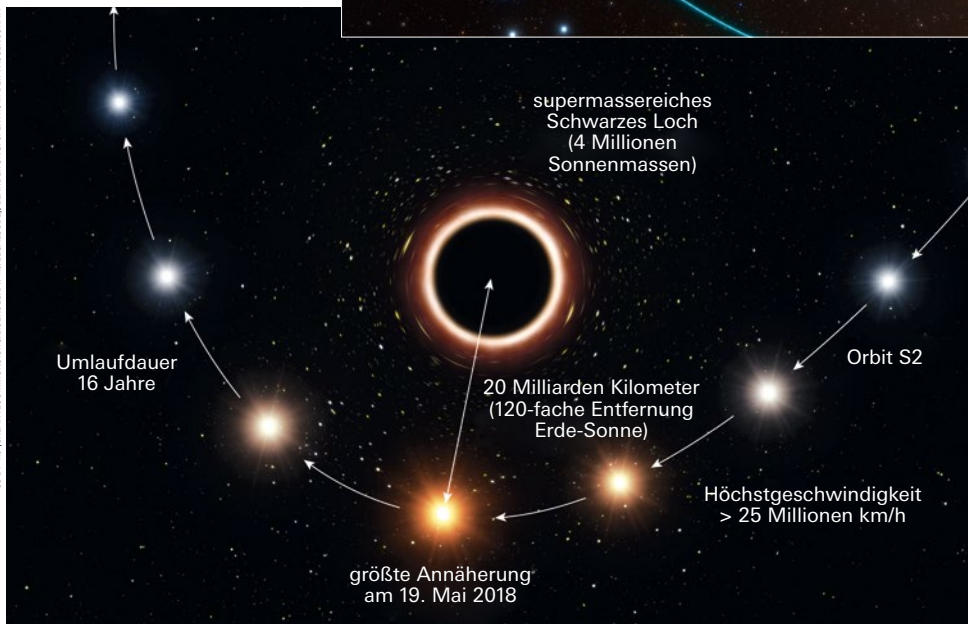
ASTRONOMIE SPEKTAKULÄRER TEST DER RELATIVITÄTS- THEORIE

► Astronomen der Europäischen Südsternwarte ESO haben in den vergangenen 26 Jahren immer wieder einen Stern namens »S2« beobachtet, der das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie auf einer elliptischen Bahn umrundet. Dieses Gravitationsmonster bringt vier Millionen Mal so viel Masse auf die Waage wie unsere Sonne. Am Punkt der größten Annäherung trennen Stern und Schwarzes

ESO/L. CALÇADA/SPACEENGINE.ORG (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/IMAGES/ESO18259/1) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)



Dutzende Sterne umrunden das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße. Die Computersimulation zeigt ihre Bahnen (oberes Bild). Der Stern S2 kommt dem Massezentrum dabei besonders nahe, wodurch er rötter erscheint als normalerweise (Schaubild unten).



nachzuweisen: Das Licht von S2 wurde deutlich rötter, als die Wissenschaftler die jüngste Annäherung zwischen Stern und Schwarzem Loch im Mai 2018 mit einem Hochleistungsinterferometer namens Gravity am Very Large Telescope in Chile verfolgten.

Der Großteil der Rotverschiebung ging dabei auf den gewöhnlichen Dopplereffekt zurück, bei dem das Licht gestreckt wird, weil sich der Stern von uns fortbewegt. Aber die vollständige Wellenlängenänderung ließe sich nur erklären, wenn man auch den von der Relativitätstheorie vorhergesagten Sog des Schwarzen Lochs berücksichtigt, argumentieren die Forscher nach einer detaillierten Auswertung der Beobachtungsdaten.

Astronomy & Astrophysics 615, L15, 2018

Loch nur rund 20 Milliarden Kilometer, die 4,5-fache Distanz zwischen Sonne und Neptun.

Durch die enorme Schwereanziehung legt S2 in dieser Phase 7650 Kilometer pro Sekunde zurück, rund 2,5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. In solchen Extremsituationen treten Ef-

fekte aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie zu Tage. So verlieren Lichtteilchen etwas Energie, wenn sie aus einem starken Gravitationsfeld entkommen. Dadurch vergrößert sich ihre Wellenlänge, Physiker sprechen von »gravitativer Rotverschiebung«. Astronomen haben

das Phänomen im Lauf der vergangenen Jahrzehnte im Umfeld vieler Sterne beobachtet.

Nun ist es Wissenschaftlern um Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching gelungen, den bizarren Effekt auch im Zentrum der Milchstraße

BIOLOGIE UNZUFRIEDENE FISCHE FRESSEN IHRE KINDER

► Bei einigen Fischen kümmern sich die Väter um den ungeschlüpften Nachwuchs. Zu dieser Gruppe gehört auch der Schleimfisch *Rhabdoblennius nitidus*. Nachdem das Männchen ein Weibchen durch intensive Balzbemühungen von sich überzeugt hat, darf es die abgelaichten Eier befruchten. Es übernimmt dann die Aufgabe, das Gelege zu umsorgen, bis die Larven schlüpfen.

Gelegentlich läuft in dieser Phase allerdings

einiges schief: Statt die Eier zu bewachen, frisst der Jungvater den Nachwuchs auf – wahrscheinlich aus Hunger, so die bisherige Theorie.

Stimmt nicht, meinen nun japanische Wissenschaftler. Den Forschern um Yukio Matsumoto von der Universität Nagasaki war aufgefallen, dass durchaus auch gut genährte Fischmännchen den ihnen anvertrauten Nachwuchs fraßen. Doch die Tiere verspeisten die Eier nicht immer, sondern schafften diese oft auch mit dem Maul aus dem Nest und spuckten sie einfach ins Abseits. Beide Verhaltensweisen kamen vor allem dann vor, wenn die

Zahl der Eier im Gelege recht klein war.

Ein wesentlicher Faktor für dieses Verhalten scheint der Hormonspiegel im Blut der Männchen zu sein, so das Forscherteam. In Gegenwart von befruchteten Fischeiern sank der Testosteronwert der Tiere auf einen extrem niedrigen Wert. Dies gewährleistet, dass die Männchen in die Brutpflege einsteigen, beendet aber auch alle weiteren Balzbemühungen. Bei einer unbefriedigend niedrigen Zahl von Eiern scheinen die Fische dann einen drastischen Ausweg aus dem hormonellen Dilemma zu suchen: Sie entfernen die Eier, die ihren Hormonspiegel

senken, um erneut, womöglich mit größerem Erfolg, ins Paarungsverhalten einzusteigen.

Das Schleimfischverhalten stellt somit keinen Kannibalismus zur optimierten Energiegewinnung dar, sondern eine besondere Variante des Infantizids, bei dem Männchen Kinder ihrer Partnerinnen töten, um dadurch eine für die Weitergabe ihres Erbguts günstigere weitere Paarung zu forcieren. Derartige Kindstötungen kommen ebenfalls bei anderen Fischen vor, aber auch bei vielen Säugetieren wie etwa Schimpansen und anderen Affen.

Curr. Biol. 10.1016/j.cub.2018.06.056, 2018

GEOLOGIE NATÜRLICHER KERNREAKTOR UMMANTELTE ATOMMÜLL

► In ferner Vergangenheit enthielten Uranvorkommen noch deutlich mehr radioaktives Uran-235 als heute. Das Isotop hat eine Halbwertszeit von 700 Millionen Jahren und zerfällt damit viel schneller als das weit häufigere Uran-238. Heutiges Natururan enthält nur noch 0,7 Prozent Uran-235. Für den Einsatz in Kernkraftwerken muss das Spaltmaterial daher angereichert werden.

Vor zwei Milliarden Jahren wäre das nicht nötig gewesen, und auf dem Gebiet des zentralafrikanischen Staats Gabun kamen sogar natürliche Kernreaktionen in Gang, wie Wissenschaftler schon seit den 1970er Jahren wissen. In dieser Oklo-Region sickerte Grundwasser in Uranvorkommen ein und bremste die beim Zerfall von Uran-235 frei werdenden Neutronen

hinreichend ab. Diese konnten dadurch andere Atomkerne des Isotops spalten. Letztlich bildeten sich immer wieder nukleare Kettenreaktionen aus. Schätzungen zufolge wurden so im Lauf zehntausender Jahre mehrere Tonnen Plutonium erbrütet sowie große Mengen radioaktiven Zäsiums hergestellt (siehe **Spektrum** Juni 2006, S. 84). Die radioaktiven Stoffe sind heute längst zerfallen, wobei sich das Zäsium größtenteils in stabile Bariumisotope umgewandelt hat.

Nun hat ein Team um Evan E. Groopman vom US Naval Research Laboratory in Washington D. C. eine Oklo-Gesteinsprobe mit einem speziellen Massenspektrometer genauer als bisher analysiert. Dabei stießen die Forscher auf Barium-Hotspots, die wenige Jahre

nach Erliegen der Kettenreaktion von Ruthenium ummantelt wurden – dafür sprechen jedenfalls Datierungen des Materials und eine genaue Analyse der Isotopenhäufigkeit.

Das reaktionsträge Ruthenium, das ebenfalls bei der Kernspaltung entsteht, hat die radioaktiven Reaktionsprodukte offenbar rasch an sich gebunden. Auch hat es das Zäsium und Barium sehr effektiv von der Umgebung isoliert, die im Lauf der Zeit immer wieder von vulkanischer Aktivität erschüttert wurde. Möglicherweise könne man mit Ruthenium auch das Zäsium aus Kernkraftwerken besser verwahren, spekulieren die Autoren. Offen ist allerdings, ob das in Anbetracht des hohen Rutheniumpreises wirklich realistisch ist.

PNAS 10.1073/pnas.1807267115, 2018

PHYSIK LÖSUNG EINES LEGENDÄREN SPAGETTI-RÄTSELS

► Angeblich soll sich schon die Physikerlegende Richard Feynman darüber gewundert haben: Wenn man eine einzelne Spagetti biegt, bricht sie nicht etwa in zwei Teile, sondern zersplittert meist in mindestens drei Segmente. Das Verhalten ist von vielen anderen elastischen Stäben bekannt, beispielsweise von Knochen und Bäumen – oder von Hochsprungstäben, wie ein missglückter Sprung des Kubaners Lazaro Borges bei den Olympischen Spielen 2012 in London zeigte.

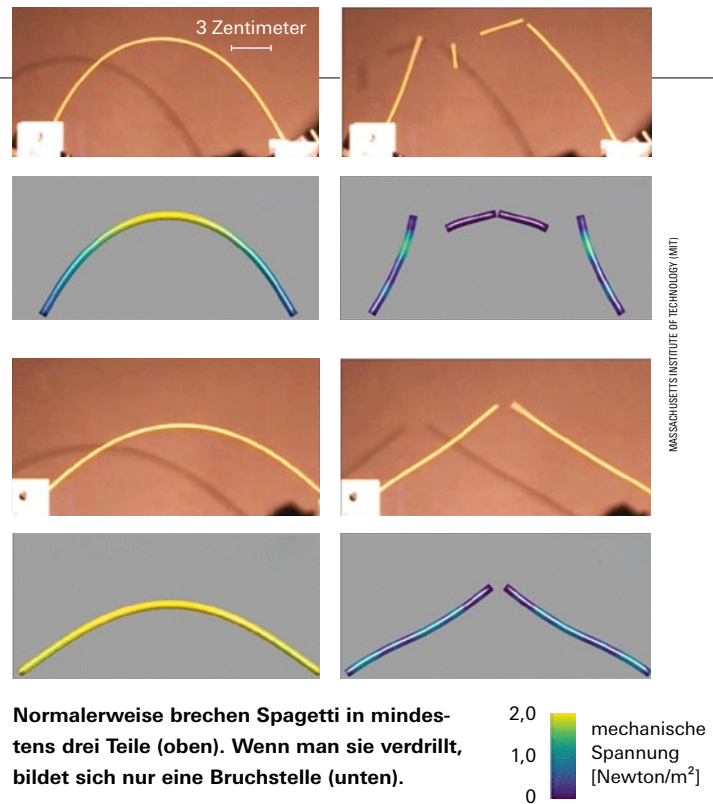
Nun hat ein US-amerikanisches Forscherteam eine detaillierte Erklärung für das Phänomen erarbeitet. Demnach steigt bei der Dehnung einer trockenen Spagetti mit rundem Querschnitt zunächst die me-

chanische Spannung. Sobald die Teigware an einer Stelle bricht, wandelt sich die Spannung schlagartig in Schwingungsenergie um. In Folge rasen starke Vibrationen durch den länglichen Körper und schütteln ihn an mehreren Stellen so heftig hin und her, dass sich weitere Bruchstellen bilden.

Lässt sich das verhindern? Die Ingenieure um Ronald H. Heisser vom Massachusetts Institute of Technology haben 240 Testläufe gemacht und glauben eine Lösung gefunden zu haben: Wenn man beide Enden einer dünnen Nudel in Klemmen einspannt und diese um knapp 360 Grad gegeneinander verdreht, bildet sich beim Biegen häufig nur eine Bruchstelle. Die Erklärung: Die Verdre-

Dabei stießen sie auf riesige Kolonien an *Lactobacillus*-Bakterien im Dünndarm der Betroffenen, die große Mengen an D-Milchsäure produzierten. Bei acht Vergleichspersonen ohne mentale Symptome war das nicht der Fall.

Manche der Probanden wiesen zwei- bis dreimal so viel D-Milchsäure im Blut auf wie bei gesunden Menschen üblich. Die Bewusstseinsstrübung trat bei ihnen rasch nach einem Essen auf und dauerte eine halbe bis hin zu mehreren Stunden an. Einer Befragung zufolge nahmen die Personen regelmäßig Probiotika zu sich – teilweise in exzessiven Mengen.



Normalerweise brechen Spagetti in mindestens drei Teile (oben). Wenn man sie verdreht, bildet sich nur eine Bruchstelle (unten).

2,0
1,0
0
mechanische Spannung [Newton/m²]

hung der Spagetti federt die zerstörerischen Vibrationen nach dem Bruch ab, die normalerweise zu weiteren Frakturen führen. Bei der verdrehten Teigware entlädt sich ein Teil der freigesetzten Spannungsenergie

zunächst in das Geradedrehen, wodurch die lateralen Schwingungen nicht mehr genügend Kraft aufbringen, die Nudel erneut zu brechen.

PNAS doi.org/10.1073/pnas.1802831115, 2018

Im Gegensatz zum Dickdarm leben im Dünndarm normalerweise nur wenige Bakterien. Gerät das Gleichgewicht der Darmflora durch Probiotika durcheinander, setzen die zugeführten *Lactobacillus*-Bakterien Zucker aus der Nahrung um und erzeugen dabei D-Milchsäure. Die Substanz dringt durch die Darmwand ins Blut ein und gelangt darüber auch ins Gehirn, vermuten die Forscher. Hier wirkt D-Milchsäure toxisch auf Neurone und beeinflusst dadurch Gedächtnis, Zeitgefühl und grundlegende Denkprozesse. Bei Probanden, die anschließend Antibiotika einnahmen und auf einen

weiteren Probiotikakonsum verzichteten, ließen die Beschwerden schließlich nach.

Probiotika sollten als Arznei betrachtet werden, nicht als Nahrungsergänzungsmittel, betont Studienautor Rao. Viele Menschen konsumieren die damit angereicherten Lebensmittel, weil sie sich davon eine bessere Verdauung und prinzipiell einen gesünderen Körper versprechen. Die Mittel seien nützlich, um die Darmflora nach einer Antibiotikabehandlung neu aufzubauen, doch sollte der Konsum sonst eher zurückhaltend stattfinden.

Clin. Transl. Gastroenterol. 9, 162, 2018

ERNÄHRUNG DIE DUNKLE SEITE DER PROBIOTIKA

► Um ihrer Darmgesundheit und ihrem Körper etwas Gutes zu tun, schlucken viele Menschen probiotische Nahrungsmittel. Doch das könnte unerwünschte Nebenwirkungen haben, warnt eine Gruppe von Wissenschaftlern um Satish Rao von der Augusta University in Georgia. Die Mediziner haben 30 Personen untersucht, die unter Verwirrtheit und Konzentrationschwierigkeiten in Kombination mit geblähtem Bauch, Magenschmerzen sowie Flatulenzen leiden.

MATERIAL- WISSENSCHAFT NEGATIV GEKRÜMMTER KOHLENSTOFF

► Eine internationale Arbeitsgruppe um Efreem Braun von der University of California in Berkeley hat erstmals negativ gekrümmte Kohlenstoffgitter aufgespürt. Bei diesen »Schwarziten« handelt es sich um dreidimensionale Strukturen, deren Außenflächen aus einlagigem Graphen bestehen, das aber an jedem Punkt der Oberfläche sattelförmig nach innen gewölbt ist. Bisher waren nur Kohlenstoffvarianten bekannt, die entweder positiv, also nach außen gekrümmt sind (Fullerene und Kohlenstoffnanoröhren) oder die keinerlei Krümmung aufweisen.

Materialwissenschaftler gehen schon länger davon aus, dass es negativ gekrümmte Kohlenstoffstrukturen geben müsste. Darauf deutet unter anderem die Theorie der »Minimalflächen« hin, die der deutsche Mathematiker Hermann Schwarz (1843–1921) bereits im 19. Jahrhundert entwickelte.

Von sich aus bilden sich Schwarzite allerdings nicht. Braun und seine Kollegen haben nun jedoch einen

Weg gefunden, wie man sie gezielt herstellen kann. Der Schlüssel sind so genannte Zeolithe. Die Atomgitter der mineralischen Stoffe bilden ein regelmäßiges Netzwerk aus Tunneln, Zeolithe weisen also eine große innere Oberfläche auf.

Die Wissenschaftler simulierten am Computer, was passiert, wenn man die Kristalle einem kohlenstoffhaltigen Gas aussetzt, das in die Struktur eindringt und sich dort zersetzt. Dabei scheint sich bei manchen Zeolithen eine Graphenschicht auf der Innenseite der Tunnel abzulagern. Die einlagige Kohlenstoffschicht folgt dabei nicht exakt der Oberfläche, sondern bildet eine gekrümmte topologische Minimalfläche, die an eine Seifenhaut erinnert.

Das Zeolith-Gerüst lässt sich anschließend entfernen, so dass nur das negativ gekrümmte Kohlenstoffgitter übrig bleibt. Von den rund 200 bekannten Zeolithen eignen sich wohl 15 dazu, Schwarzite herzustellen. Bei dreien ist die Synthese bereits gelungen. Die Experten hoffen, dass die neue Kohlenstoffart einzigartige Eigenschaften aufweist und beispielsweise große Mengen elektrischer Ladung aufnehmen kann.

PNAS 10.1073/pnas.1805062115, 2018

Zeolith (rot-gelb) dient als Gerüst für Schwarzit (schwarz).

PALÄOANTHROPOLOGIE HALB NEANDERTALER, HALB DENISOVNER

► Bis vor etwa 40 000 Jahren bevölkerten zwei nahe Verwandte des heutigen Menschen den eurasischen Kontinent: die Neandertaler im Westen und die Denisovaner im Osten. Schon länger ist bekannt, dass die beiden Gruppen zumindest vereinzelt Nachwuchs zeugten. Nun haben Forscher um Viviane Slon vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig möglicherweise erstmals Überreste solch eines Neandertaler-Denisovaner-Kindes aufgespürt.

Darauf deutet ein mehr als 50 000 Jahre altes Knochenfragment namens »Denisova 11« hin, das russische Archäologen bereits 2012 in der Denisova-Höhle 550 Kilometer südöstlich von Novosibirsk entdeckt haben. Die Knochenstruktur des Splitters lässt darauf schließen, dass er wohl zu einem mindestens 13 Jahre alten Mädchen gehörte.

Die nur mütterlich übertragene mitochondriale DNA des Knochens hatten britische Forscher 2016 analysiert. Ergebnis: Die Mutter der Jugendlichen war eine Neandertalerin. Nun gelang es dem Leipziger Team, auch Teile des in den Chromosomen gespeicherten Erbguts mit anderen Homininen zu vergleichen. Hierbei passten etwa 40 Prozent der DNA-Fragmente zu Neandertaler-DNA, ein etwa gleich großer Anteil aber zum Erbgut von Denisova-Menschen. Als Vater



THOMAS HIGGINS, UNIVERSITY OF OXFORD; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

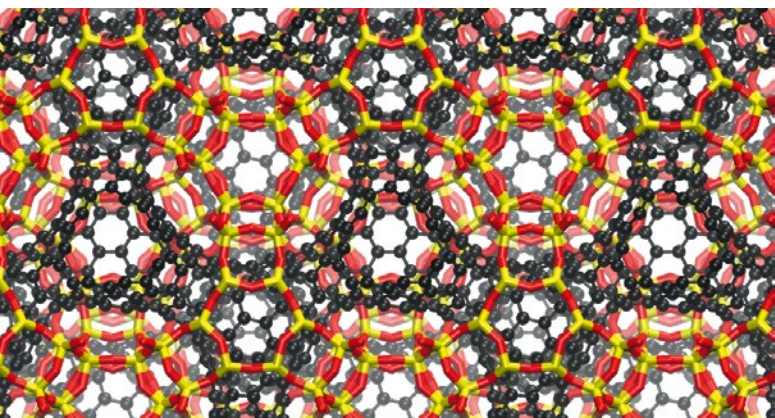
1 Zentimeter

Das Knochenfragment »Denisova 11« aus verschiedenen Blickwinkeln.

kristallisierte sich somit ein Denisovaner heraus. Der Erbgutvergleich zeigte außerdem, dass hier nicht die erste Vermischung der beiden Menschengruppen vorliegt: Einer der Vorfahren des Denisovaner-Vaters war ebenfalls Neandertaler.

Zur Überraschung der Forscher stimmt die von der Mutter übermittelte DNA besser mit den 55 000 Jahre alten Knochenfunden aus Kroatien überein als mit den Überresten von Neandertalern, die schon vor 120 000 Jahren in der Denisova-Höhle lebten. Offenbar sind Neandertaler aus Europa immer wieder in den Osten des eurasischen Kontinents eingewandert. Die deutlichen Unterschiede im Erbgut beider Homininen sprechen jedoch dafür, dass Begegnungen mit Denisova-Menschen eher selten stattfanden.

Nature 10.1038/s41586-018-0455-x, 2018



ZUFALLSMATRIZEN NEUE UNIVERSELLE GESETZE

Die Theorie der Zufallsmatrizen knüpft immer wieder Verbindungen zu Teilgebieten der Mathematik, die mit dem Zufall eigentlich nichts zu tun haben. Wenn die Einträge einer Zufallsmatrix keine reellen oder komplexen Zahlen sind, sondern Elemente eines endlichen Körpers, dann führt die Frage nach ihren statistischen Eigenschaften unversehens auf eine berühmte Kettenbruchfunktion des indischen Mathematikers Srinivasa Ramanujan. Das Bild zeigt ein (genähertes) Phasenporträt dieser Funktion.

In den verschiedensten Bereichen, von der Wirtschaft über die Geometrie bis hin zur Stringtheorie, haben Wissenschaftler in scheinbar zufälligen Ereignissen verblüffende Gesetzmäßigkeiten entdeckt.



Bertrand Eynard arbeitet am Institut für theoretische Physik des französischen Energieforschungszentrums CEA in Gif-sur-Yvette und am mathematischen Forschungszentrum der Université de Montréal (Kanada).

» spektrum.de/artikel/1587610

ELIAS WIEGERT, WWW.VISUALWIEGERT.COM

AUF EINEN BLICK REGELN HINTER DEM ZUFALL

- 1** Matrizen sind mit Zahlen gefüllte Tabellen. Mit den zugehörigen Rechenregeln finden sie rege Anwendung in den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen, insbesondere in der Quantenmechanik.
- 2** Viele Eigenschaften von Matrizen mit zufällig ausgewählten Einträgen hängen erstaunlicherweise nicht von dem speziellen Phänomen ab, für das sie ursprünglich konstruiert wurden.
- 3** Zufallsmatrizen tauchen in überraschend vielfältigen Situationen auf. Ihre Erforschung hat zu weit reichenden Erkenntnissen in der Mathematik und der theoretischen Physik geführt.

Was haben die Wartezeiten zwischen zwei U-Bahnen, die Energieniveaus schwerer Atomkerne, die Verteilung der Primzahlen, die Stringtheorie, Tsunamis, Börsenkurse, Mobilfunkantennen, die Anordnung der Bäume in Urwäldern, die Boardingzeit von Flugreisenden, geometrische Flächen, Kristalle und elektrische Leitfähigkeit gemeinsam? Als Wissenschaftler diese und weitere vollkommen unterschiedliche Phänomene untersuchten, stießen sie auf überraschende Parallelen, die mit so genannten Zufallsmatrizen zusammenhängen.

Diese Objekte vereinen ein weit verbreitetes mathematisches Werkzeug, die Matrizen, mit dem allgegenwärtigen Element des Zufalls. Obwohl man Letzteren häufig mit Unregelmäßigkeit und Unvorhersehbarkeit assoziiert, bergen Zufallsmatrizen eine unerwartete Ordnung: Unabhängig von dem speziellen Phänomen, das sie beschreiben sollen, legen sie ein universelles Verhalten an den Tag.

Erste Hinweise auf Zufallsmatrizen reichen bis in das Jahr 1928 zurück, als der schottische Mathematiker John Wishart mit ihrer Hilfe statistische Daten untersuchte. Doch erst die Arbeiten des ungarisch-US-amerikanischen Physikers Eugene Wigner, in denen er die Energieniveaus schwerer Atomkerne analysierte, weckten Mitte der 1950er Jahre das allgemeine wissenschaftliche Interesse.

In der Folge stellten theoretische Physiker fest, dass Zufallsmatrizen mit mehreren anderen Problemen zusammenhängen. Die Durchbrüche, die sie in den 1970er bis



Aukosh Jagannath von der University of Toronto und Thomas Trogdon von der University of California in Irvine haben 2017 eine Studie über die Wartezeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden U-Bahnen in New York veröffentlicht. Sie fanden heraus, dass Zufallsmatrizen diese Zeitabstände gut beschreiben.

1990er Jahren erzielten, erregten die Aufmerksamkeit etlicher Mathematiker und Experten anderer Bereiche. Bald stellte sich heraus, dass Zufallsmatrizen faszinierende Eigenschaften besitzen und in den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen auftauchen. Mittlerweile sind sie intensiv bearbeitete Forschungsgegenstände geworden.

Quadratische, symmetrische und hermitesche Matrizen

Eine quadratische Matrix verwandelt einen Vektor in einen anderen Vektor desselben Raums. Eine solche »lineare Transformation« in einem zweidimensionalen Raum, das heißt einer Ebene (Beispiel rechts), entspricht der Zusammensetzung aus einer – möglicherweise verzerrenden – Streckung, einer Drehung und einer Spiegelung, wobei der Nullpunkt stets auf sich abgebildet wird.

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & -1 \\ -2 & 0 & 5 \\ -1 & 5 & 2 \end{pmatrix}$$

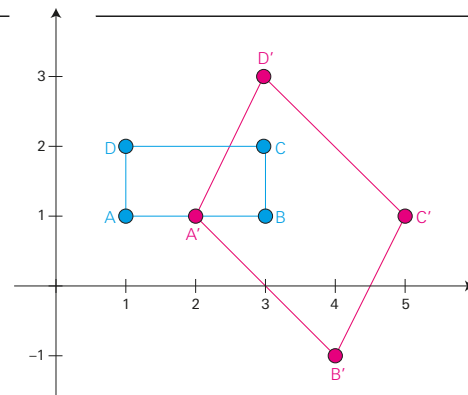
Beispiel einer symmetrischen (3-3)-Matrix

Bei einer symmetrischen Matrix ist jeder Eintrag gleich seinem Spiegelbild bezüglich der (von links oben nach rechts unten verlaufenden) Hauptdiagonale.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2+i & 5 \\ 2-i & 3 & 1-i \\ 5 & 1+i & 2 \end{pmatrix}$$

Beispiel einer hermiteschen (3-3)-Matrix

Die Einträge einer hermiteschen Matrix sind komplexe Zahlen, das heißt, sie haben die Form $a + bi$, wobei a und b reelle Zahlen sind und i (die »imaginäre Einheit«) eine Wurzel aus -1 . Hermitesche Matrizen gleichen ihren symmetrischen Artgenossen, allerdings muss man beim Spiegeln zusätzlich i durch $-i$ ersetzen.



Die Matrix $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}$ dreht und verzerrt das blaue Rechteck und bildet es auf ein Parallelogramm (pink) ab.

Symmetrische und hermitesche Matrizen spielen vor allem in der Physik eine wichtige Rolle.

Um die erstaunlichen Ergebnisse zu verstehen, muss man zunächst wissen, was eine Matrix ist. Das erfordert einige Erklärungen, wird sich aber lohnen. Schon im 17. Jahrhundert verwendeten einige Mathematiker Matrizen und vereinfachten dadurch ihre aufwändigen Berechnungen. Zwei Jahrhunderte später untersuchten schließlich die zwei englischen Mathematiker Arthur Cayley und James Sylvester ihre genaue Struktur und bildeten das Fundament der linearen Algebra. Eine Matrix der Dimension $m \cdot n$, kurz eine $(m \cdot n)$ -Matrix, ist eine Tabelle mit Zahlen, die in m Zeilen und n Spalten angeordnet sind. Inzwischen sind diese Objekte in der Mathematik und ihren Anwendungen allgegenwärtig, weil sie das klassische Mittel sind, um »lineare Abbildungen« darzustellen.

Eine lineare Abbildung verwandelt eine Liste von Zahlen – einen so genannten Vektor – in einen anderen Vektor, indem sie die Einträge der Eingangsliste mit gewissen Faktoren multipliziert und anschließend aufsummiert. Wenn beispielsweise die Eingangsvektoren aus vier Werten und die Ausgangslisten aus zwei Zahlen bestehen, dann ist die lineare Abbildung durch $2 \cdot 4 = 8$ Koeffizienten festgelegt. Sie lässt sich durch eine $(2 \cdot 4)$ -Matrix darstellen, deren Einträge den acht Koeffizienten entsprechen. Der erste Eintrag des Ausgangsvektors ergibt sich, indem man jeden der vier Eingangswerte mit dem entsprechenden Faktor aus der ersten Zeile der Matrix multipliziert und die Ergebnisse anschließend aufsummiert. Die zweite Komponente des Ausgangsvektors berechnet sich analog, wenn man die Prozedur mit der zweiten Zeile der Matrix wiederholt (siehe »Preisvergleich«, rechts).

Matrizen: Ein weit verbreitetes, vielseitiges mathematisches Werkzeug

So kann beispielsweise ein Börsenmakler, der m Portfolios mit jeweils n Aktien verwaltet, seine Gewinne und Verluste im Blick behalten: Indem er die Anzahl der Aktien in eine $(m \cdot n)$ -Matrix einträgt und die Veränderungen der Aktienwerte im Eingangsvektor notiert, kann er im Ausgangsvektor die Gewinne der Portfolios ablesen.

Üblicherweise stellt man Matrizen als Tabellen dar, die durch runde Klammern eingeschlossen sind. Die Anwendung einer zugehörigen linearen Abbildung auf einen Vektor nennt man auch Multiplikation der Matrix mit dem Vektor. In der Tat hat diese Operation gewisse Eigenschaften einer Multiplikation: So gilt für eine Matrix M und zwei Vektoren u und v die Regel $M \cdot (u + v) = M \cdot u + M \cdot v$. Das ist sogar die wesentliche Eigenschaft, die eine lineare Abbildung definiert.

Matrizen spielen auch in der Quantenmechanik, die das Verhalten mikroskopischer Teilchen beschreibt, eine so große Rolle, dass der deutsche Physiker Werner Heisenberg seine Version dieser Theorie 1925 unter dem Namen »Matrizenmechanik« veröffentlichte.

Die Welt der Quanten unterscheidet sich grundlegend von dem, was wir in unserem alltäglichen Leben beobachten. Die physikalischen Objekte haben verschiedene Basiszustände, die beispielsweise für ein Elektron unter anderem durch seinen Aufenthaltsort, sein Orbital in der Atomhülle und seine Geschwindigkeit definiert sein können.

Preisvergleich

Um den Preis von vier Lebensmitteln in zwei Geschäften zu vergleichen, kann man eine $(2 \cdot 4)$ -Matrix nutzen. In der oberen Zeile stehen die Preise der vier Lebensmittel im ersten Laden und in der zweiten die des anderen Geschäfts, zum Beispiel:

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 & 5 \\ 3 & 2 & 1 & 4 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Die Einkaufsliste} \\ \text{setzt sich aus der} \\ \text{Anzahl gewünschter} \\ \text{Lebensmittel} \\ \text{zusammen:} \end{array} \quad \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Multipliziert man die Matrix mit der Einkaufsliste, erhält man den zweidimensionalen Vektor, dessen Einträge dem Gesamtpreis der Einkäufe im jeweiligen Geschäft entsprechen. Dazu muss man zuerst die Einträge der ersten Zeile der Matrix mit der jeweiligen Anzahl der Lebensmittel multiplizieren und die Ergebnisse aufsummieren, also:

$$3 \cdot 2 + 1 \cdot 3 + 2 \cdot 1 + 5 \cdot 1 = 16$$

Dieser obere Eintrag des Ausgangsvektors entspricht dem Gesamtpreis im ersten Laden. Den Preis für den Einkauf im zweiten Laden erhält man analog durch die zweite Zeile der Matrix:

$$3 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 1 \cdot 1 + 4 \cdot 1 = 17$$

Der Einkauf im ersten Laden ist also günstiger.

nen. Das Besondere ist nun, dass sich ein quantenmechanisches Objekt gleichzeitig in mehreren Basiszuständen befinden kann, etwa an mehreren Orten zugleich. Erst eine Messung zerstört diese Überlagerung; das Elektron ist dann an einer einzigen Position.

Physiker beschreiben die Überlagerungen mehrerer Zustände durch Vektoren. Jeder Eintrag eines solchen Zustandsvektors gehört zu einem Basiszustand – und ist im Allgemeinen eine komplexe Zahl (siehe »Quadratische, symmetrische und hermitesche Matrizen«, S. 14). Das Betragsquadrat eines Eintrags ist gleich der Wahrscheinlichkeit, das System nach einer Messung in diesem Basiszustand vorzufinden. Im Allgemeinen hat ein physikalisches Objekt enorm viele solcher Zustände – oftmals sogar unendlich viele.

Der Zustand eines quantenmechanischen Systems verändert sich mit der Zeit. Schwirrt beispielsweise ein Elektron durch ein Magnetfeld, ändert sich seine Flugbahn zu jedem Zeitpunkt. Eine berühmte lineare Abbildung diktiert diese Zeitentwicklung: der »Hamilton-Operator«. Die zeitliche Änderung des Zustandsvektors ergibt sich durch die Anwendung des Hamilton-Operators auf diesen Vektor.

Spektrum, Eigenwerte und Eigenvektoren

Multipliziert man eine quadratische Matrix mit einem beliebigen Vektor, bildet sie diesen im Allgemeinen auf einen völlig anderen ab. Beispiel:

$$\begin{pmatrix} 7 & -1 & -5 \\ 6 & 2 & -7 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -11 \\ -12 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Auf bestimmte Vektoren dagegen wirkt sie wie eine einfache Multiplikation, was geometrisch einer Streckung entspricht:

$$\begin{pmatrix} 7 & -1 & -5 \\ 6 & 2 & -7 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix} = 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Ein solcher Vektor heißt Eigenvektor der Matrix, und den Streckungsfaktor, in diesem Fall die Zahl 3, nennt man den zugehörigen Eigenwert.

Die Matrix besitzt noch zwei weitere Eigenvektoren: $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$

mit den Eigenwerten 1 beziehungsweise 5. Das Spektrum dieser Matrix ist also die Menge $\{1, 3, 5\}$.

Eigenvektoren sind stets nur bis auf einen konstanten Faktor bestimmt. Mit Ausnahme gewisser Sonderfälle hat jede Matrix so viele Eigenwerte, wie ihre Dimension angibt. Bei symmetrischen und hermiteschen Matrizen gibt es diese Sonderfälle nicht.

Die vielleicht bedeutendste Eigenschaft des Hamilton-Operators besteht aber darin, dass sich die Energien eines physikalischen Systems in ihm verstecken. Möchte man beispielsweise die verschiedenen Energieniveaus eines Atoms berechnen, genügt es, einige charakteristische Zahlen des entsprechenden Hamilton-Operators zu betrachten, die so genannten Eigenwerte.

Aber nicht jede lineare Abbildung besitzt Eigenwerte, sondern nur, wenn sie Vektoren von einem Raum in denselben überführt. Wenn es zu der Abbildung eine Matrix gibt – das ist immer dann der Fall, wenn der Raum nur endlich viele Dimensionen hat –, muss diese Matrix quadratisch sein, das heißt gleich viele Spalten wie Zeilen haben (siehe »Quadratische, symmetrische und hermitesche Matrizen«, S. 14). Im zwei- oder dreidimensionalen Fall kann man sich die Einträge eines Vektors dann als räumliche Koordinaten vorstellen, so dass er einen Punkt in der Ebene oder im Raum darstellt. Eine Matrix verschiebt diesen Punkt lediglich an eine andere Stelle. Sie entspricht insgesamt einer geometrischen Transformation, unter der gerade Linien erhalten bleiben. Diese geometrische Anschauung lässt sich auch auf höhere Dimensionen verallgemeinern.

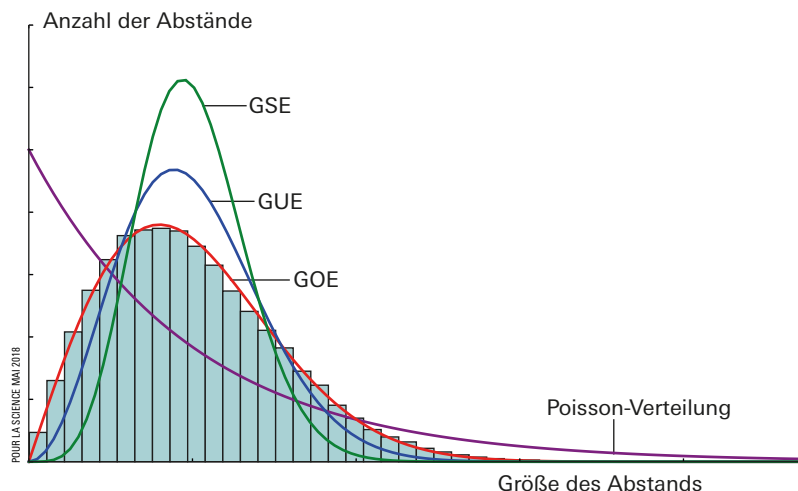
Wenn eine Matrix einen bestimmten Vektor einfach nur streckt, wirkt es, als habe man den entsprechenden Punkt lediglich mit einer gewöhnlichen Zahl λ multipliziert. Dann nennt man diesen Vektor einen Eigenvektor und die Zahl λ einen Eigenwert dieser quadratischen Matrix (siehe »Spektrum, Eigenwerte und Eigenvektoren«, oben). Die gesamte Menge dieser Eigenwerte heißt »Spektrum« in Anlehnung an den gleichnamigen Begriff aus der Physik, der alle Energien bezeichnet, bei denen die Elektronenhülle eines chemischen Elements ein Photon absorbieren oder emittieren kann (siehe »Spektrum einer Welle«, S. 17).

Im Allgemeinen beschreibt der Hamilton-Operator also nicht bloß die zeitliche Entwicklung eines quantenmecha-

nischen Objekts; seine Eigenwerte entsprechen außerdem den Energien des Systems, und die dazugehörigen Eigenvektoren sind die Basiszustände. Das macht den Hamilton-Operator zu einem der wichtigsten physikalischen Werkzeuge.

Wie sieht aber das Spektrum einer Matrix aus? Allgemein kann es auch komplexe Zahlen enthalten, selbst wenn die Matrix nur reelle Einträge besitzt. Falls eine reelle ($n \cdot n$)-Matrix allerdings symmetrisch ist, das heißt unter einer Spiegelung an der Hauptdiagonalen unverändert bleibt, hat sie genau n reelle Eigenwerte (siehe »Quadratische, symmetrische und hermitesche Matrizen«, S. 14).

Für einige schwere Atomkerne folgt das Histogramm ihrer Energieabstände der Verteilung orthogonaler Ensembles (GOE). Zum Vergleich zeigt das Bild auch die Verteilung unitärer (GUE) und symplektischer (GSE) Ensembles sowie die Poisson-Verteilung, die unabhängige Zufallsergebnisse charakterisiert.



Doch auch Matrizen mit komplexen Einträgen können ein reelles Spektrum haben. Falls die Realteile der Einträge entlang der Hauptdiagonalen gespiegelt gleich sind, die imaginären Anteile dabei aber ihr Vorzeichen wechseln, dann handelt es sich um eine so genannte hermitesche Matrix; deren Eigenwerte sind ebenfalls alle reell.

Der Hamilton-Operator eines physikalischen Systems ist stets symmetrisch oder hermitesch und besitzt daher ausschließlich reelle Eigenwerte, so dass dessen Energien auch immer reell ausfallen.

Zu Beginn der 1950er Jahre interessierten sich nicht nur Wissenschaftler für die Spektren bestimmter Matrizen; gerade das Militär wollte mehr über die Hamilton-Operatoren schwerer Atomkerne erfahren. Diesmal ging es nicht darum, bei welchen Energien die Atomhülle Photonen emittiert oder absorbiert, sondern wann der Atomkern Neutronen einfängt oder aussendet. Ein aufgenommenes Neutron kann einen Uranatomkern dazu veranlassen, sich in zwei kleinere Kerne aufzuspalten und dabei weitere Neutronen auszustoßen – der Prozess, der am Anfang einer Kernwaffenexplosion steht.

Kerne leichter Atome, wie von Deuterium, das aus einem Proton und einem Neutron besteht, haben einen einfachen Hamilton-Operator. Physiker können deren Spektrum zumindest näherungsweise ohne größere Schwierigkeiten berechnen.

Doch für schwere Kerne wie den von Uran-238, der aus 92 Protonen und 146 Neutronen besteht, war diese Aufgabe nicht mehr lösbar. Nur durch Experimente gelang es Physikern damals, die komplizierten Energieniveaus aufzuschlüsseln.

Dazu beschossen sie die Atomkerne mit extrem schnellen Neutronen. Die neutralen Teilchen schwirren gewöhnlich ungehindert an den Hindernissen vorbei. Entspricht ihre Geschwindigkeit aber gerade der Energiedifferenz, die einen Atomkern anregt, fängt dieser das blitzschnelle Neutron ein und verleibt es sich mitsamt dessen Bewegungsenergie ein. Wenig später geht der Kern wieder in den Zustand niedrigster Energie über und spuckt das Neutron in eine zufällige Richtung aus. Die gesuchten Energieniveaus stimmen also mit den Energien überein, bei denen die Neutronenstrahlen am stärksten abgelenkt werden.

Von schweren Kernen zu Zufallsmatrizen

Die vielen Anregungsenergien der schweren Kerne, die Physiker in den 1950er Jahren untersucht hatten, stellten sich als äußerst kompliziert heraus. Wigner verzichtete deshalb darauf, die genauen Werte nachzuvollziehen, und widmete sich stattdessen ihrer Verteilung. Als er die Abstände zwischen den Energieniveaus in Histogrammen auftrug, fiel ihm etwas Außergewöhnliches auf: Für einige Atome (wie Uran-238, Thorium-232, Cadmium-110 und Erbium-166) sahen die Histogramme fast gleich aus. Insgesamt fand Wigner drei unterschiedliche Klassen schwerer Kerne, bei denen die Abstände zwischen den Energieniveaus jeweils die gleiche Verteilung aufwiesen.

Das brachte ihn auf eine Idee: Vielleicht hängt das Spektrum einer großen Matrix gar nicht so sehr von der

Spektrum einer Welle

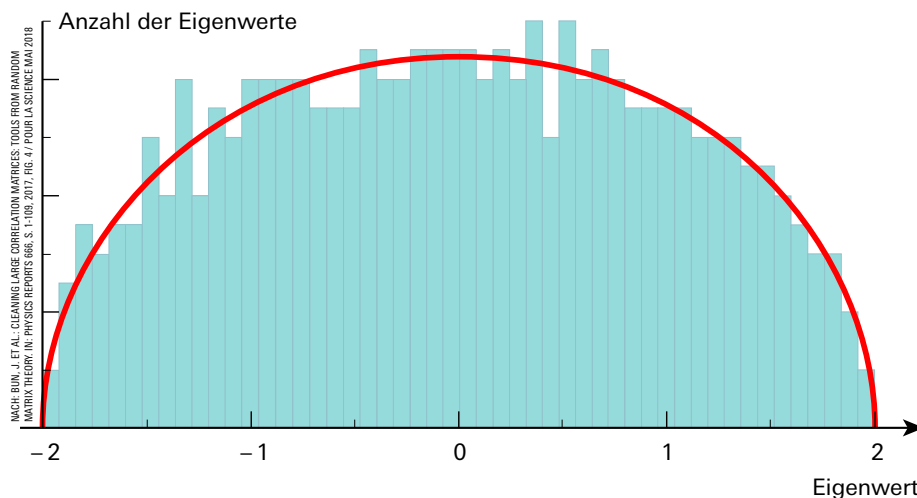
Eigenwerte und Eigenvektoren spielen in der Physik und den Ingenieurwissenschaften eine herausragende Rolle. Lässt sich ein System durch Wellen beschreiben, die aus mehreren Komponenten bestehen – wie in der Quantenmechanik oder in der Telekommunikation –, kann man sie durch Vektoren darstellen.

Eine Lichtwelle zeichnet sich beispielsweise durch ihre Farben aus. Der entsprechende Vektor beschreibt, mit welcher Intensität die einzelnen Farbanteile (Frequenzen) vertreten sind. Die zeitliche Entwicklung der Welle unterliegt dem linearen Hamilton-Operator. Trifft eine solche Welle auf ein Atom, wirkt dieses wie ein linearer Operator: Es verändert den Wellenvektor des einfallenden Lichts zu jedem Zeitpunkt. Falls der Wellenvektor kein Eigenvektor der dazugehörigen Matrix ist, werden seine Komponenten durcheinandergemischt. Die Eigenvektoren verstärken sich dagegen in jedem Moment selbst und dominieren letztlich das Ausgangssignal. Am Ende überleben nur die Farben, die Teil des Spektrums der Wechselwirkungsmatrix sind. So trifft das Wort Spektrum wieder seinen Ursprung, als Wissenschaftler wie Newton oder Goethe damit optische »Illusionen« beschrieben, bei denen sich zum Beispiel in einem Prisma das Licht in seine einzelnen Farbanteile zerlegt.

Physik ab, die in ihren Einträgen steckt; die merkwürdige Regelmäßigkeit in den Eigenwertabständen könnte stattdessen bei so ziemlich allen solchen Matrizen auftreten, selbst wenn ihre Einträge zufällig bestimmt sind. Wigner begann daraufhin, das durchschnittliche Spektrum aus einer Stichprobe großer Zufallsmatrizen zu berechnen, und ermittelte den Abstand zwischen den Eigenwerten.

Allerdings gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, die Einträge einer Matrix zufällig festzulegen. Wigner entschied sich zunächst dafür, die Einträge oberhalb der Hauptdiagonale unabhängig voneinander gemäß einer Normalverteilung (siehe Bild S. 21 oben) auszuwählen und sie an der Hauptdiagonalen zu spiegeln, so dass die Zufallsmatrix insgesamt symmetrisch ist.

Darauf bauten der US-amerikanische Physiker Freeman Dyson sowie Madan Lal Mehta und Michel Gaudin vom französischen Energieforschungszentrum CEA auf und ermittelten die Eigenwertabstände für den Grenzfall einer unendlich großen symmetrischen Zufallsmatrix. Die drei Physiker fanden dabei eine Kurve, die Wigner zuvor schon in seinen Histogrammen beobachtet hatte. Dyson bezeichnete fortan die Klasse der Zufallsmatrizen, deren Eigenwertabstände dieser Kurve folgen, als gaußsches orthogonales Ensemble (GOE, siehe Bild S. 16 unten).



Die blaugrünen Balken geben an, wie viele Eigenwerte einer bestimmten symmetrischen, normalverteilten Zufallsmatrix der Dimension $500 \cdot 500$ in jedes der kleinen Intervalle fallen. Wenn die Dimension gegen unendlich geht, strebt dieses Histogramm gegen eine Kurve – die im Fall normalverteilter Matrixeinträge ein Halbkreis ist.

Wigner und Dyson untersuchten daraufhin neben den symmetrischen auch noch hermitesche und quaternionische Zufallsmatrizen. Die Einträge der Letzteren sind weder reelle noch komplexe Zahlen, sondern so genannte Quaternionen, zahlenähnliche Gebilde mit vier reellen Komponenten, deren Rechenregeln von den Symmetrien des Elektromagnetismus hergeleitet sind.

Die Histogramme der hermiteschen und quaternionischen Zufallsmatrizen führen auf zwei Kurven, die Wigner bei seinen Studien zu schweren Atomkernen ausgemacht hatte. Die erste definiert das »gaußsche unitäre Ensemble« (GUE) und die quaternionischen Zufallsmatrizen führen auf das »gaußsche symplektische Ensemble« (GSE). Diese drei Kurven heißen inzwischen Wigner-Verteilungen.

Die bemerkenswerte Ähnlichkeit im Spektrum verschiedener Zufallsmatrizen beförderte das bisher kaum beachtete Gebiet in die aktive Forschung. Neben den symmetrischen, hermiteschen und quaternionischen haben Wissenschaftler inzwischen auch Zufallsmatrizen mit weiteren Symmetrien untersucht und entdeckten so neue Ensembles, deren Eigenwertabstände anderen Kurven folgen. Dadurch konnten sie Zufallsmatrizen auf verschiedenste Probleme – beispielsweise aus der Chemie und Biologie, der Wirtschaft oder der Telekommunikation – anwenden.

Die Forscher stießen dabei auf eine überraschende Gesetzmäßigkeit. Unabhängig davon, ob die Einträge einer Matrix normalverteilt sind oder einer anderen Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen: Ihre Eigenwertabstände haben immer die gleiche Form! Nur die Symmetrien der Zufallsmatrix wirken sich auf die Verteilung ihrer Eigenwerte aus.

Doch wie lässt sich diese bemerkenswerte Universalität erklären? Ein Eigenwert ist schließlich eine komplizierte Funktion, die von allen Matrixeinträgen abhängt. Wenn eine Matrix aber extrem groß ist, heben sich die verwirrenden Effekte im Mittel auf, und die Funktion strebt gegen einen Durchschnittswert.

In der Mathematik genügt es allerdings nicht, ein Phänomen intuitiv zu begreifen, sondern man muss es auch beweisen. Noch heute kämpfen viele Mathematiker damit, formal zu überprüfen, ob bestimmte Klassen von Zufallsmatrizen universell sind. Diese Aufgabe ist nämlich

alles andere als einfach. Bisher stellten sich jedoch alle Ensembles, für die Wissenschaftler einen solchen Beweis fanden, als universell heraus.

Überraschenderweise hängen die verschiedensten zufälligen Phänomene mit Zufallsmatrizen zusammen. Ein Beispiel dafür sind die Wartezeiten zwischen zwei Bussen an einer Haltestelle der Stadt Cuernavaca in Mexiko, welche die tschechischen Physiker Milan Krbálek und Petr Šeba im Jahr 2000 untersucht haben. In diesem Ort gibt es kein offizielles Transportunternehmen – jeder Fahrer ist auch der Besitzer seines Busses. Üblicherweise hat er an wichtigen Kreuzungen einen Helfer stehen, der ihm signalisiert, wann der letzte Bus vorbeigefahren ist. So kann der Fahrer entscheiden, ob er schneller oder langsamer fährt, um so viele Gäste wie möglich aufzunehmen. Als Krbálek und Šeba diese Zeitabstände in einem Histogramm darstellten, erhielten sie ein überraschendes Ergebnis: Die Verteilung gehörte zu Wigners unitärem Ensemble!

Von diesem Fund fasziniert, gewöhnte Šeba es sich 2007 an, die Abstände parkender Autos auf seinem Arbeitsweg in der tschechischen Stadt Hradec Králové zu messen. Sein theoretisches Modell und die gesammelten Daten haben gezeigt, dass die Parkabstände ebenfalls einer Wigner-Verteilung folgen.

Eine Spur zum Beweis der riemannschen Vermutung?

Viele andere Wissenschaftler fanden ein ähnliches universelles Verhalten unter anderem in der Statistik ankommender U-Bahnen in New York (siehe Bild S. 14 oben), den Abständen von Bäumen in Urwäldern (siehe Bild S. 19 unten), den Fluktuationen von Börsenkursen und den Verbindungen von Neuronen im Gehirn. Warum jedoch statistische Verteilungen aus Zufallsmatrizen diese unterschiedlichen Phänomene so passend beschreiben, bleibt meist ein Rätsel. Und dass sich mit denselben Mitteln sogar eine prominente Funktion aus der Zahlentheorie beschreiben lässt, die eigentlich gar nichts mit Zufall zu tun hat, leuchtet noch weniger ein.

Der deutsche Mathematiker Bernhard Riemann führte 1859 diese Funktion ein, die ihm zu Ehren inzwischen riemannsche Zetafunktion heißt (**Spektrum** September 2008,

S. 86). Sie bildet komplexe Zahlen auf komplexe Zahlen ab. Interessant sind die Punkte in der komplexen Zahlenebene, in denen die Zetafunktion den Wert null annimmt (siehe Bild S. 20 links). Sie hängen nämlich eng mit der Verteilung der Primzahlen zusammen. Wüsste man, wo die Nullstellen der riemannschen Zetafunktion in der Ebene liegen, wüsste man auch mehr über die rätselhaften Primzahlen.

Riemann formulierte die berühmt gewordene Vermutung, dass alle Nullstellen (bis auf die geraden negativen Zahlen) auf der Geraden $\text{Re}(z) = \frac{1}{2}$ in der komplexen Ebene liegen. Das vermochte aber weder er noch irgendjemand sonst bisher zu beweisen. Inzwischen hat man mehrere Milliarden dieser Nullstellen mit enormem Computeraufwand berechnet – und alle haben seine Vermutung bestätigt.

Als der Primzahlexperte Hugh Lowell Montgomery 1972 im Institute for Advanced Study in Princeton auf Dyson traf, begann er sich angeregt mit diesem über die riemannsche Zetafunktion zu unterhalten. Nachdem sie sich die Verteilung ihrer Nullstellen angesehen hatten, stellten die beiden Forscher überrascht fest, dass ihre Anordnung der Verteilung unitärer Ensembles folgt (**Spektrum** Januar 2014, S. 60).

Bis heute haben Wissenschaftler keine Erklärung für diese unerwartete Übereinstimmung gefunden. Einige Spezialisten gehen aber davon aus, dass Zufallsmatrizen den vielversprechendsten Ansatz liefern, um die riemann-

Die Abstände zwischen den Bäumen in Urwäldern folgen derselben Verteilung wie die Eigenwertabstände gewisser Zufallsmatrizen. Das stellte der französische Physiker Gérard Le Caër 1989 fest.



PHIDALGI / GETTY IMAGES / ISTOCK

sche Vermutung zu beweisen. Womöglich gibt es eine Matrix, deren Eigenwerte den Nullstellen der Zetafunktion entsprechen. Forscher haben dieser hypothetischen Matrix den Namen Riemannium gegeben – analog zu der Benennung schwerer Atomkerne.

Als Wissenschaftler Zufallsmatrizen weiter untersuchten, deckten sie neben den Eigenwertverteilungen noch andere universelle Eigenschaften auf. Trägt man beispielsweise die jeweils größten Eigenwerte verschiedener Zufallsmatrizen in ein Histogramm ein, dann ist auch diese Verteilung universell: Sie hängt nicht von der genauen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einträge ab, sondern nur von den Symmetrien der Zufallsmatrizen.

Nicht alle Eigenschaften sind universell

Die Histogramme folgen den so genannten Tracy-Widom-Kurven, welche die beiden US-amerikanischen Mathematiker Craig Tracy und Harold Widom 1993 entdeckten. Diese Verteilungen tauchen ebenfalls in den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen auf, ohne dass Forscher verstehen, warum.

Allerdings bergen Zufallsmatrizen auch Eigenschaften, die nicht universell sind. Die Dichte ihrer Eigenwerte, die so genannte Spektraldichte, ist ein Beispiel dafür. Anschaulich gesprochen gibt der Wert dieser Funktion in einem Punkt an, wie häufig Eigenwerte der Matrix in seiner Nähe vorkommen.

Als Wigner die Spektraldichte symmetrischer Zufallsmatrizen mit normalverteilten Einträgen studierte, bemerkte er, dass sie – bei geeigneter Skalierung – einem auf null zentrierten Halbkreis mit Radius zwei glich (siehe Bild S. 18). Die meisten Eigenwerte haben also nur sehr kleine Beträge. Je größer der Betrag einer Zahl ist, desto unwahrscheinlicher ist sie Eigenwert der Zufallsmatrix. Übersteigt ihr Betrag den Radius des Halbkreises, verschwindet die Spektraldichte für sehr große Zufallsmatrizen sogar ganz. Je größer die Matrix, desto besser nähert sich die Spektraldichte der halbkreisförmigen Kurve an.

Im Gegensatz zu den Wigner-Verteilungen ist der »Wigner-Halbkreis« nicht universell: Die Spektraldichte im Grenzwert großer Matrizen (die »Spektralkurve«) ändert sich, wenn ihre Einträge nicht normalverteilt sind. Doch eines haben alle Spektralkurven gemeinsam: Sie sind algebraisch, das heißt durch eine Polynomgleichung beschreibbar.

Möchte man die genaue Verteilung der Eigenwerte verstehen, genügt die Spektraldichte allein aber nicht. Sie sagt zum Beispiel nichts darüber aus, wie wahrscheinlich es ist, dass zwei, drei oder mehr gegebene Zahlen gleichzeitig im Spektrum einer Matrix liegen. Diese Wahrscheinlichkeiten heißen Dichtekorrelationen. Im Allgemeinen hängen die Eigenwerte einer Matrix nämlich voneinander ab. Das Wissen, dass x ein Eigenwert ist, beeinflusst die Wahrscheinlichkeit, dass auch y einer ist.

Dieses Phänomen trifft man auch im Alltag an: Hat eine Person an einem bestimmten Tag Eis gegessen, dann ist es wahrscheinlich, dass es sich um einen Sommertag handelte. Woher wissen Mathematiker aber, wie stark zwei Eigenwerte korrelieren? Ein Maß dafür liefert die

Phasenporträt der riemannschen Zetafunktion $\zeta(z)$ in einem Rechteck der komplexen Zahlenebene. Der Imaginärteil von z liegt zwischen 5000 und 5020. Am rechten Rand ist der Realteil von z ($\text{Re } z$) gleich 1, der weiße Strich ist die »kritische Gerade« $\text{Re } z = 1/2$, auf der alle bekannten Nullstellen der Zetafunktion liegen; das sind die Punkte, in denen alle Farben zusammentreffen. (Näheres über Phasenporträts findet sich in Spektrum August 2018, S. 74.)

»Kovarianz«. Je näher sie an null liegt, desto unabhängiger sind die Eigenwerte; ist ihr Betrag jedoch groß, dann sind sie stark gekoppelt.

Während nun die Spektraldichte von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Matrixeinträge abhängt, versteckt sich in den Kovarianzen eine Art Universalität, die mit der Geometrie der Spektralkurve zusammenhängt. Das stellten Wissenschaftler fest, als sie anfangen, Spektralkurven großer Zufallsmatrizen genauer zu untersuchen. Indem sie die Polynomgleichungen mit komplexen statt den üblichen reellen Zahlen speisten, verwandelten sie die Kurven in zweidimensionale Flächen. Die Spektralkurve wird dann zu einer »Spektralfläche«, welche die komplexe Ebene auf eine Höhe abbildet. Für symmetrische Zufallsmatrizen mit normalverteilten Einträgen verwandelt sich der Wigner-Halbkreis dann in die Oberfläche einer Halbkugel.

Eine Verbindungen zur Stringtheorie

Und hier kommt die versteckte Universalität ins Spiel: Die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen führen zwar zu verschiedenen Spektralflächen; wenn man jedoch eine von ihnen so in eine andere verformen kann, dass alle Winkel erhalten bleiben (»konforme Transformation«), dann unterscheiden sich die entsprechenden Kovarianzen nur durch eine einfache Koordinatentransformation. Bis auf diesen Koordinatenwechsel sind die Kovarianzen also gleich – und in diesem Sinn universell. Allerdings ist diese Universalität schwächer als die vorangehenden, denn innerhalb eines Ensembles von Zufallsmatrizen stimmen nicht alle Kovarianzen auf diese Art überein.

Diese Erkenntnis hat zu wichtigen Entdeckungen in der Geometrie und der theoretischen Physik geführt, als meine Kollegen und ich um die Jahrtausendwende feststellten, dass das geometrische Prinzip auch umgekehrt funktioniert. Ausgehend von einer beliebigen algebraischen Fläche können wir die dazugehörige Spektraldichte sowie alle Kovarianzen der entsprechenden Zufallsmatrix bestimmen. Von diesem Ergebnis hat besonders die Stringtheorie profitiert, welche die Prinzipien der Quantenphysik mit der von Albert Einstein entwickelten allgemeinen Relativitätstheorie vereinen möchte.

Stringtheoretiker gehen davon aus, dass sich alle bekannten Teilchen aus fundamentalen Objekten ergeben, die nicht punktförmig, sondern fadenförmig sind, so genannte Strings. Allerdings funktioniert diese Theorie nur in einer Raumzeit mit zehn Dimensionen. Um diese Bedingung mit unserer vierdimensionalen Wahrnehmung der Raumzeit in Einklang zu bringen, nehmen Stringtheoretiker an, dass

die sechs überschüssigen Dimensionen extrem klein aufgerollt sind, auf einer Skala von etwa 10^{-35} Metern, und wir sie deshalb nicht wahrnehmen.

Das macht es allerdings extrem schwer, die Eigenschaften der winzigen Fäden zu berechnen. Die Ergebnisse hängen davon ab, wie genau die sechs Raumdimensionen aufgerollt sind. Aus jeder möglichen sechsdimensionalen Geometrie ergibt sich eine dazu passende Stringtheorie. Um zu überprüfen, ob eine von ihnen (und wenn ja, welche) unsere Welt beschreibt, muss man verstehen, wie sich die Fäden in der komplizierten Raumzeit bewegen, also wie wahrscheinlich es ist, dass ein String innerhalb eines bestimmten Zeitraums von einem Punkt zum nächsten wandert.

Physiker suchten fortan eine einfache Methode, um diese Zeitentwicklung für jede einzelne Geometrie zu berechnen. Zwischen 2002 und 2012 enthüllten mehrere Forschungsarbeiten, darunter die von Nicolas Orantin und mir, einen überraschenden Fund: Wenn sich die sechs Raumdimensionen um eine zweidimensionale Oberfläche wickeln, kann diese als Spektralfläche gesehen werden, und die Wahrscheinlichkeiten für die Bewegungen der Strings entsprechen der dazugehörigen Spektraldichte.

Für viele Stringtheorien ist das bis heute der einzige Ansatz, um erfolgreich eine Zeitentwicklung zu berechnen. Die Fälle, für die das bisher gelingt, sind allerdings vereinfachte Versionen der Modelle, die tatsächlich irgendwann unser Universum beschreiben könnten. Wir hoffen, dass Zufallsmatrizen auch mit allgemeineren Stringtheorien zusammenhängen, doch das ist Gegenstand aktueller Forschung; die Antwort darauf kennen wir noch nicht.

Die Zufallsmatrizen haben sich als faszinierende Objekte herausgestellt. Ihre charakteristischen Eigenschaften findet man in vielen scheinbar unzusammenhängenden Phänomenen. Ihre Erforschung hat in der Mathematik und der theoretischen Physik zu unerwarteten und bemerkenswerten Ergebnissen geführt (siehe »Zufallsmatrizen und integrable Systeme«, S. 21). Noch immer versuchen Wissenschaftler zu verstehen, warum Zufallsmatrizen so allgegenwärtig sind – sei es in banalen Alltagsphänomenen wie den Abständen parkender Autos oder in einem der wichtigsten ungelösten Probleme der Mathematik, der riemannschen Vermutung. ◀

QUELLEN

Anderson, G. W. et al.: An Introduction to Random Matrices. Cambridge University Press, 2009

Eynard, B. et al.: Lecture on Random Matrices. arXiv 1510.04430, 2015

Eynard, B., Orantin, N.: Algebraic Methods in Random Matrices and Enumerative Geometry. arXiv 0811.3531, 2008

Mehta, M. L.: Random Matrices. Elsevier/Academic Press, 2004

WEBTIPP

<https://www.spektrum.de/video/komplexe-korrelierte-systeme-und-zufallsmatrizen/1587070>

Das englischsprachige Video erklärt anschaulich, wie Zufallsmatrizen scheinbar unzusammenhängende Phänomene beschreiben, und stellt neue Erkenntnisse in diesem Forschungsgebiet vor.

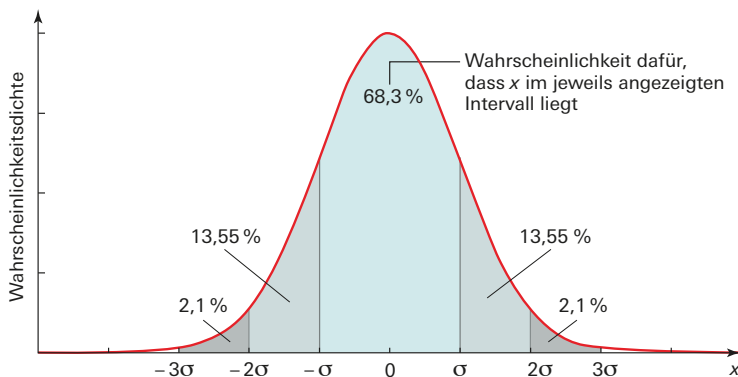
Zufallsmatrizen und integrable Systeme

Zufallsmatrizen dienen auch der Erforschung von »Integrabilität«, einer Eigenschaft, die häufig als das Gegenteil von Chaos bezeichnet wird. Integrable physikalische Systeme sind geordnet und vorhersehbar. Beispiele dafür sind ein harmonischer Oszillator (schwingende Masse an Schraubenfeder), ein symmetrischer Kreisel, ein Planet, der allein einen Stern umläuft, oder eine Flachwasserwelle, die sich entlang eines Kanals ausbreitet. Diese einfachen Modelle wurden inzwischen häufig und intensiv untersucht.

Kompliziertere Systeme (beispielsweise mehrere Planeten, die einen Stern umkreisen) können dagegen chaotisch sein. In der Praxis ist ihr Verhalten dann nicht mehr vorhersehbar. Man würde erwarten, dass integrable Systeme in der Natur selten auftauchen, doch das Gegenteil ist der Fall – man trifft sie häufig an, oder sie beschreiben zumindest die realen Systeme hinreichend gut. Die Erklärung dafür gleicht dem Grund, warum die Eigenwertabstände von Zufallsmatrizen universell sind: Der chaotische Anteil hebt sich im Mittel auf, und wir nehmen insgesamt nur ihre regelmäßigen Eigenschaften wahr.

Als Dyson, Mehta und Gaudin über diese Erkenntnis stolperten, stellten sie fest, dass Zufallsmatrizen ebenfalls zu den integrablen Systemen zählen. Genauer: Die so genannte Zweipunktfunktion für die Verteilung der Eigenwerte von Zufallsmatrizen ist ein integrables System.

Kennt man die Wahrscheinlichkeitsverteilung zufälliger Variablen, kann man auch ihren Mittelwert berechnen. Zieht man beispielsweise häufig hintereinander eine zufällige Zahl x , ergibt sich ihr Mittelwert aus der Summe der Ergebnisse geteilt durch ihre



Die Dichte der gaußschen Normalverteilung (mit Erwartungswert null) entspricht der Funktion $\exp(-x^2/(2\sigma^2))$, wobei die Standardabweichung σ die Breite der Glockenkurve charakterisiert. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreibt viele natürlich auftretende Zufallsereignisse.

Anzahl. Analog kann man auch die Mittelwerte von x^2 oder etwa x^3 bestimmen.

Sind die Zahlen um null herum zentriert normalverteilt (siehe Bild oben), dann ist die Wahrscheinlichkeit, eine Zahl x oder ihr Negatives $-x$ zu ziehen, die gleiche. Deshalb ist der Mittelwert von x gleich null, ebenso wie von jeder anderen ungeraden Potenz von x . Das Quadrat von x hat dagegen im Mittel einen positiven Wert, ebenso wie die anderen geraden Potenzen, da ihre Summe lediglich aus positiven Zahlen besteht.

Aus dem Mittelwert M von x^2 lassen sich für die Normalverteilung alle anderen Mittelwerte geradzahlgiger Potenzen berechnen. x^4 ist beispielsweise im Mittel $3 \cdot M^2$. Allgemein kann man den Mittelwert von x^{2k} berechnen, indem man M^k mit dem Produkt aller ungeraden Zahlen, die kleiner als $2k$ sind, multipliziert. Damit legt eine einzige Zahl, nämlich M , alle möglichen Mittelwerte der Normalverteilung durch eine einfache Formel fest.

Die Zweipunktfunktion für die Normalverteilung ist einfach die Funktion x^2 . Im Allgemeinen ist die Zweipunktfunktion, also die Funktion, die alle Mittelwerte und Korrelationen einer Wahrscheinlichkeits-

verteilung vollständig charakterisiert, von komplizierterer Gestalt. So entspricht die Zweipunktfunktion $K(x, y)$ eines Ensembles von Zufallsmatrizen der Größe $n \cdot n$ mit den Eigenwerten a_1, a_2, \dots, a_n dem Mittelwert der folgenden Funktion:

$$\frac{(x - a_1) \cdot (x - a_2) \cdot \dots \cdot (x - a_n)}{(y - a_1) \cdot (y - a_2) \cdot \dots \cdot (y - a_n)}$$

Sie hängt von den zwei Zahlen x und y ab und erzeugt alle anderen Korrelationen. Zum Beispiel kann man die Kovarianz durch die Formel $[K(x, y) \cdot K(y, x) - 1]/(x - y)^2$ berechnen.

Es stellt sich heraus, dass diese Zweipunktfunktion selbst ein integrables System ist. In manchen Fällen gehorcht sie sogar einer Differenzialgleichung, die aus der Theorie der Flachwasserwellen bekannt ist.

Wissenschaftler, die allgemeine integrable Systeme erforschen, testen ihre Ideen häufig zuerst an Zufallsmatrizen. Sie hoffen, dass sich die Zusammenhänge, die sich für diesen einfachen Spezialfall ergeben, auf alle anderen integrablen Systeme erweitern lassen – und sie liegen damit häufig richtig. Auf diese Weise haben Forscher schon einige universelle Eigenschaften enthüllt. B.E.

MATERIALFORSCHUNG MIT NATRON ZUM LUFTIGSTEN FESTSTOFF

Aerogele sind wegen ihres schwammartigen Inneren zugleich stabil und extrem leicht. Aufwändige Herstellungsverfahren machen das Material aber teuer. Nun haben sich Forscher bei Libellen einen chemischen Trick abgeschaut, der die Produktion deutlich vereinfacht.

Wer Luftschlösser bauen will, sollte es mit Aerogel versuchen. Das Material besteht aus fast nichts und ist dennoch fest: Luftgefüllte Hohlräume machen bis zu 99,99 Prozent seines Volumens aus, während ein Netzwerk die schwammartige Struktur zusammenhält. Ein Stück Aerogel mit dem Volumen eines Liters liegt mit 50 Gramm deutlich leichter in der Hand als jeder natürliche Feststoff. Wegen seiner zahlreichen mikroskopisch kleinen Poren ist das Material ein hervorragender Wärmeisoliator.

Ingenieure nutzen Aerogele wegen dieser Eigenschaften beispielsweise in der Raumfahrt. Allerdings ist der Stoff keine Massenware und kommt nicht aus der Nische für besondere Anwendungen heraus, da die Herstellung bislang sehr teuer ist. Aus einem feuchten Gel muss die Flüssigkeit so entfernt werden, dass ein Gerüst stehen

bleibt, aber die Poren nicht zusammenfallen. Der gebräuchlichste Weg funktioniert mit so genanntem überkritischem Kohlendioxid, ist jedoch aufwändig. Alternative Methoden wie die Gefriertrocknung und die Sublimation der Lösungsmittel erfordern Vakuum und niedrige Temperaturen. Neuere Verfahren mit organischen Lösungsmitteln, die bei Umgebungsdruck trocknen, haben sich nicht durchgesetzt. Sie sind zwar weniger energieintensiv, verbrauchen aber große Mengen dieser Substanzen.

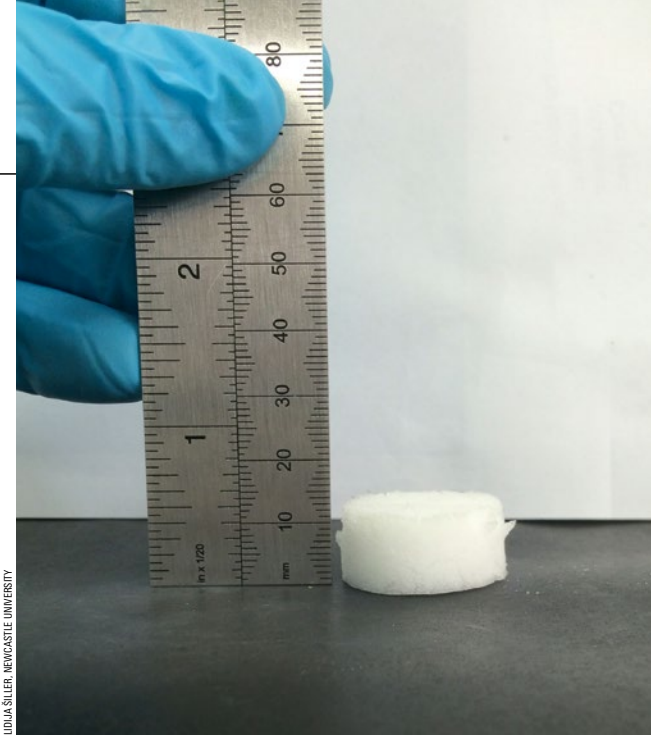
Jetzt hat die Physikerin Lidija Šiller von der Newcastle University zusammen mit ihrem Team ein neues und preiswertes chemisches Verfahren entwickelt, um Aerogelen das Lösungsmittel auszutreiben. Sie holte sich dazu Inspiration von Libellen, die nach dem Schlüpfen ihre anfangs nassen Flügel trocknen. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen hatten zuvor bereits gezeigt, dass der Flügelaufbau einer Kleinlibelle namens Kleine Binsenjungfer der porösen Struktur eines Aerogels sehr ähnelt. Die hauchdünnen Tragflächen der schnellen und wendigen Fluginsekten sind extrem stabil. Sie bestehen aus superleichten Verbundstoffen, bei denen in einer Matrix aus Resilin – einem gummiartigen Protein – Chitinfasern eingebettet sind.

Metamorphose der Insekten als Vorbild

Šillers Ansatz war, die natürliche Trockentechnik auf eine Aerogelproduktion aus üblichen Rohstoffen zu übertragen. Wenn das Insekt als Larve das Wasser verlässt und sich an einem Kiesel oder im Buschwerk aus ihrer alten Haut schält (siehe Foto unten), sind die Flügel noch feucht und



Nach dem Schlüpfen müssen Libellen in kurzer Zeit ihre Flügel trocknen. Um das Wasser zu entfernen und die Leichtbaustruktur gleichzeitig stabil zu halten, nutzt das Insekt eine chemische Reaktion.



LUDJA ŠILLER, NEWCASTLE UNIVERSITY

Im Labor entstehen die von der Libelle inspirierten Aerogele noch langsamer als in der Natur – es braucht mehrere, jeweils einige Tage dauernde Schritte.

gelartig. Sie entfalten sich in wenigen Stunden bei Umgebungstemperaturen und -drücken. Die Libellen nutzen dabei einen chemischen Trick: Sie produzieren aus in ihren Gelflügeln eingelagertem Natriumhydrogenkarbonat (bekannt als Natron) Kohlendioxid. Das Gas baut in dem Flügelnetzwerk Druck auf, mit dem es die Flüssigkeit durch die Porengänge des Gels nach außen bläst und gleichzeitig das filigrane Gerüst während der Trocknung stabil hält.

Šiller hat das Verfahren mit Natron kopiert, um ein Aerogel aus den gängigen Silikatgrundsubstanzen Tetraethoxysilan (TEOS) und Trimethylchlorosilan (TMCS) herzustellen. Die Stoffe vernetzen sich im Verlauf einiger Tage und bauen so die Grundstruktur im Gel auf. Statt dieses konventionell mit überkritischem Kohlendioxid zu spülen, haben die Wissenschaftler das Gel nach einer Woche in einer Natronlösung getränkt. Der entstehende Gasdruck stabilisierte das Gerüst und trieb einen Teil der Feuchtigkeit aus.

Anschließend trockneten die Forscher das Gel schrittweise bei bis zu 100 Grad Celsius vollständig. In ihren Versuchen variierten sie die Zusammensetzungen der Rohstoffe und stellten letztlich Silikataerogele als Blöcke von knapp zehn Kubikzentimeter Volumen sowie als mehrschichtige Filme her. Der Prozess dauerte für die kleinen Blöcke drei Tage, für die Schichten genügten zwölf Stunden. Die erzeugten Strukturen lagen mit einer Dichte von 50 bis 60 Milligramm pro Kubikzentimeter und einer Porosität von mehr als 98 Prozent im Bereich guter herkömmlicher Aerogele.

Lidja Šiller hofft auf den Einsatz der neuen Technik insbesondere in alltäglichen Anwendungsfeldern, in denen sich Aerogele auf Grund der Kosten bislang nicht lohnen. Die Physikerin glaubt, die Materialkosten könnten mit ihrer

Methode drastisch von derzeit 100 auf 4 US-Dollar pro Kilogramm Aerogel sinken. Praktischen Nutzen versprechen die Strukturen wegen der enorm großen inneren Oberflächen etwa als Katalysator, als Speichermedium oder als Material zur Schall- und Wärmedämmung im Bauwesen. Dort werden Aerogele bislang nur in geringen Mengen als Isolierstoffe eingesetzt, meist in Form von Granulaten. Ein großer Vorteil des neuen Verfahrens ist, dass es nicht nur mit den getesteten Ausgangsstoffen funktionieren sollte, sondern auch mit anderen Grundmaterialien.

Auf dem Weg zu Biopolymeraerogelen aus nachwachsenden Rohstoffen

Neben den hohen Kosten gibt es noch einen Grund, warum die heutigen Silikataerogele für viele kommerzielle Anwendungen nicht ideal sind: ihre Brüchigkeit. Darum suchen Materialwissenschaftler auch nach neuen Verbindungen für das Gerüst der Aerogele.

Beispielsweise will Matthias Koebel von der schweizerischen Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt mit seinem Team organische Silikatpolymeraerogele herstellen, gewissermaßen ein Bioaerogel mit nachwachsenden Rohstoffen. Eine höhere Festigkeit erzielt der Chemiker, in dem er Kieselsäure und Pektin miteinander kombiniert. Letzteres wirkt nicht nur in Pflanzen verfestigend, sondern wird auch in der Industrie eingesetzt. In dem neuartigen Aerogel bauen verknüpfte Polysaccharide das Gerüst auf.

Die Forscher haben für ihre Tests Pektin mit einem hohem Methoxylgehalt eingesetzt, das sich stark vernetzen kann. Nachdem es sich mit Kieselsäure verknüpfte, trockneten die Forscher das Gel auf klassische Weise mit überkritischem Kohlendioxid. Um die Festigkeit zu verbessern, testeten sie verschiedene Mischungsverhältnisse und pH-Werte. Ein saurer pH-Wert von 1,5 resultierte in den mechanisch stabilsten Proben, die auch die Festigkeit marktüblicher Silikataerogele übertreffen. Die Methode sollte sich auf weitere Polysaccharide wie Zellulose, Stärke oder Chitin übertragen lassen. Koebel sieht gerade in diesen Biopolymeren großes Potenzial für die Zukunft der Aerogele. Dafür hat sein Team bereits eine Datenbank mit 3800 Stoffeigenschaften zusammengetragen und ausgewertet – eine gute Grundlage für die weitere Forschungsarbeit. ◀

Katja Maria Engel ist promovierte Materialwissenschaftlerin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

QUELLEN

Han, X. et al.: Bioinspired Synthesis of Monolithic and Layered Aerogels. In: *Advanced Materials* 30, 1706294, 2018

Zhao, S. et al.: Strong, Thermally Superinsulating Biopolymer-Silica Aerogel Hybrids by Cogelation of Silicic Acid with Pectin. In: *Angewandte Chemie* 54, S. 14282–14286, 2015

Zhao, S. et al.: Biopolymer Aerogels: Chemistry, Properties and Applications. In: *Angewandte Chemie* 57, S. 7580–7608, 2018

MOLEKULARBIOLOGIE DIAGNOSTIK MIT CRISPR/CAS

Bakterielle Genscheren helfen, Viren hochempfindlich nachzuweisen.

► Viele virale Infektionskrankheiten sind äußerst ansteckend. Ein Beispiel hierfür ist das Ebolavirus, das in Afrika immer wieder monatelange, grenzüberschreitende Epidemien hervorruft. Traurige Berühmtheit erlangte auch das Zika-Virus, das 2015/2016 in Mittel- und Südamerika eine Pandemie auslöste. In deren Verlauf wurden zahlreiche Säuglinge mit zu kleinem Kopf (Mikrozephalie) und einem unterentwickelten Gehirn geboren, weil Zika-Viren die Plazenta überwinden und den Embryo im Mutterleib infizieren können.

Um die Ausbreitung einer Virusepidemie zu stoppen, müssen Mediziner die infizierten Personen so schnell wie möglich identifizieren. Dies ist schwierig, da gerade in der Frühphase einer Infektion die Symptome oft unspezifisch sind und zudem nur sehr wenige Viruspartikel im Blut auftreten. So auch bei der Zika-Pandemie 2015: Bei manchen Patienten fand sich in einem Mikroliter (millionstel Liter) Blutserum nur ein einziges Viruspartikel. Gute Diagnostika sollten deshalb bereits bei sehr niedrigen Viruskonzentrationen anschlagen, die Erreger zugleich aber auch hochspezifisch erkennen und überdies günstig und leicht anzuwenden sein. Letzteres ist vor allem in Entwicklungsländern wichtig, da dort oft technische Geräte, Knowhow und eine durchgehende Kühlkette fehlen. Eine Diagnosemethode, die all das leistet, steht für zahlreiche Viruserkrankungen bislang nicht zur Verfügung. Um diese Lücke zu schließen, nutzen zwei US-Forscherteams das bakterielle DNA-Erkennungssystem CRISPR/Cas. Es dient diversen Bakterien und Archaeen zur Virenabwehr (siehe **Spektrum** Oktober 2017, S. 50).

Das Gedächtnis der Mikroben

Als CRISPR wird eine Region im Bakterienchromosom bezeichnet, in der die Zelle nach einer überstandenen Virusinfektion einen Teil der viralen DNA hinterlegt. Diese Gensequenzen stellen eine Art immunologisches Gedächtnis der Zelle dar und erlauben es ihr künftig, mit den entsprechenden Erregern schneller fertigzuwerden, sollten diese noch einmal attackieren. Bei Cas handelt es sich um Proteine, die sowohl die fremde Viren-DNA ins bakterielle Erbgut einfügen als auch eindringende Erreger zerstören, sofern deren Erbgut in der CRISPR-Region vorkommt. Man kann sie sich wie programmierbare Scheren vorstellen, die virale Genome an bestimmten Stellen zerschneiden.

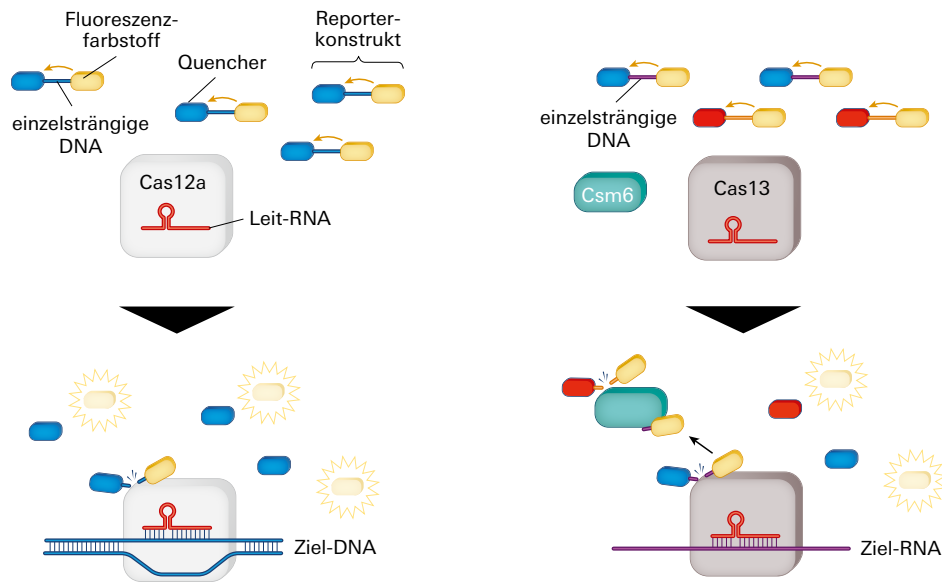
Die CRISPR/Cas-vermittelte Abwehrreaktion ist ein dreistufiger Prozess. Im ersten Schritt baut die Zelle, nachdem sie von Viren attackiert wurde, einen Teil von deren Erbgut in ihre CRISPR-Region ein. Als Zweites fertigt sie RNA-Abschriften der viralen Sequenz an. Diese Abschriften, die so

genannten Leit-RNAs, verbinden sich im dritten Schritt mit den Cas-Proteinen und erlauben ihnen, sich gezielt an sequenzgleiche Moleküle zu heften – sprich, an die Erbmoleküle eindringender Viren –, um sie zu zerschneiden. Weil CRISPR/Cas-Systeme außergewöhnlich spezifisch arbeiten und sich leicht manipulieren lassen, konnten Wissenschaftler sie in den zurückliegenden Jahren zu einem mächtigen Werkzeug für die Veränderung des Genoms (Genome Editing) weiterentwickeln.

Vor allem die Genschere Cas9 aus dem Scharlacherreger *Streptococcus pyogenes* hat breite Anwendung in der biomedizinischen Forschung gefunden. Daneben gibt es zahlreiche andere Cas-Proteine mit verschiedenen Eigenschaften, die sich für unterschiedliche Zwecke nutzen lassen. Kürzlich sind drei Studien erschienen, in denen Wissenschaftler das bakterielle Immunsystem umfunktioniert haben, um damit Virusinfektionen hochspezifisch nachzuweisen. Alle drei Ansätze nutzen programmierbare Genscheren, die nicht nur ihre eigentliche Zielsequenz abbauen (welche von der Leit-RNA vorgegeben wird), sondern zusätzlich – und unspezifisch – noch andere Nukleinsäuren attackieren. Fachleute bezeichnen dies als kollaterale Aktivität. Entscheidend dabei ist, dass die unspezifische Aktivität ausschließlich dann auftritt, wenn gleichzeitig die spezifische Zielsequenz erkannt wurde. In der Natur kann eine Mikrobe damit mehrere Viren zugleich bekämpfen, die unterschiedliche Moleküle als Träger der Erbinformation nutzen – etwa Einzel- und Doppelstrang-DNA. Denn die unspezifische Genscheren-Aktivität greift zusätzlich DNA-Abschnitte an, bei denen während der Vermehrung (Replikation) oder dem Umschreiben in Boten-RNA (Transkription) Einzelstränge freigelegt werden. Beides findet bei einer Infektion verstärkt statt, wenn sich das Virus vermehrt.

Die Autoren der drei Studien haben alle ein ähnliches Nachweisprinzip genutzt. Für eine bestimmte Gensequenz jenes Virus, das sie nachweisen wollten, konstruierten sie eine spezifische Leit-RNA. Diese führte das Cas-Protein gezielt zur passenden viralen Nukleinsäure, sofern diese in der Patientenprobe anwesend war. Die Zielsequenz wurde dann vom Cas-Protein zerstört. Der eigentliche Clou war aber, dass die Cas-Proteine nun zusätzlich dazu übergingen, unspezifisch andere Nukleinsäuren zu schneiden – entweder einzelsträngige DNA oder RNA, je nach Cas-Enzym. Die Forscher nutzten dies aus, indem sie ein molekulares Gebilde (ein »Reporterkonstrukt«) hinzufügten, das ein Fluoreszenzsignal freisetzte, sobald es vom jeweiligen Cas-Protein gespalten wurde. Da dies immer nur geschah, sofern die spezifische Virus-Nukleinsäure in der Probe

Wenn Cas-Proteine mit Leit-RNAs spezifisch Nukleinsäuren erkennen, zerschneiden sie molekulare »Reporterkonstrukte«. Das erzeugt ein Fluoreszenzsignal, welches sich mit anderen Cas-Proteinen (rechts, türkis) verstärken lässt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH DEVIRAN KODAK
 D. GERSBACH, C.A. SCISSORS BECOME SENSORS IN:
 NATURE 557, S. 118-123, 2018, FIG. 1

vorhanden war, bedeutete ein Fluoreszenzsignal immer die Anwesenheit des gesuchten Erregers.

Die erste Studie stammt von einem Team um Jennifer Doudna von der University of California in Berkeley. Sie und ihre Kollegen verwendeten als Schneidwerkzeug das Enzym Cas12a, das doppelsträngige DNA spezifisch und einzelsträngige DNA unspezifisch (»kollateral«) spaltet. Als Reporterkonstrukt nutzten sie ein molekulares Gebilde aus einem DNA-Einzelstrang, einem Fluoreszenzfarbstoff und einem so genannten Quencher. Letzterer unterdrückt die Fluoreszenz des Farbstoffs (»to quench«, zu Deutsch: auslöchen) – aber nur, wenn er sich in direkter Nähe befindet. Stößt nun ein Cas12a-Molekül, das eine spezifische virale Nukleinsäure zerstört hat und infolgedessen aktiviert worden ist, auf dieses Konstrukt, dann zerteilt es den

DNA-Strang, was Farbstoff und Quencher voneinander trennt. Als Ergebnis dessen lässt sich der Fluoreszenzfarbstoff mit einem geeigneten Gerät zum Leuchten bringen und zeigt an, dass die gesuchte Virussequenz in der Probe vorhanden ist.

Bei sehr geringer Erregerkonzentration muss allerdings erst die virale DNA in der Probe vervielfältigt werden. Dies gelang den Wissenschaftlern mit einer Methode namens Rekombinase-Polymerase-Amplifikation (RPA), die der Polymerase-Kettenreaktion (PCR) ähnelt. Im Unterschied zur PCR kann sie jedoch bei gleich bleibender Temperatur ablaufen, was die Nachweisprozedur stark vereinfacht.

Das so entstandene diagnostische Werkzeug nennen Doudna und ihr Team DETECTR (von DNA Endonuclease TargEted CRISPR Trans Reporter). Es gelang ihnen damit

ANZEIGE

Die Wissenschaftslandschaft in Ihrer ganzen Vielfalt – bunt, innovativ und immer wieder überraschend

Schauen Sie vorbei:

www.forschungskosmos.de

Ein Portal von:

DIE ZEIT
VERLAGSGRUPPE

sogar der Nachweis eines einzelnen Viruspartikels innerhalb eines Mikroliters der Ausgangsprobe. Der Test erlaubt es zudem, in Patientenproben zwischen verschiedenen Stämmen humaner Papillomviren (HPV) zu unterscheiden. Das ist deshalb wichtig, weil einzelne Stämme wie HPV16 und HPV18 ein hohes Risiko für Gebärmutterhalskrebs bergen und deshalb für Infizierte besonders gefährlich sind. Somit besteht ein großer Bedarf nach einem Verfahren, das gezielt diese Stämme erkennen kann.

Nicht DNA, sondern RNA im Fokus

In der zweiten Studie haben Forscher um Feng Zhang vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge ein Werkzeug namens SHERLOCKv2 vorgestellt. Die Abkürzung leitet sich von Specific High sensitivity Enzymatic Reporter unLOCKing Version 2 ab. Das Vorgängersystem SHERLOCK, das die Gruppe im Vorjahr beschrieben hatte, funktioniert ähnlich wie DETECTR: Auch hier wird das nachzuweisende Erbgut mit Hilfe einer Rekombinase-Polymerase-Amplifikation vervielfacht. Allerdings setzt SHERLOCK auf eine Cas13-Variante, die RNA statt DNA schneidet – und zwar sowohl spezifisch als auch unspezifisch. DNA lässt sich trotzdem detektieren, indem man diese zuvor mittels Transkription in RNA umschreibt. Für SHERLOCKv2 haben Zhang und seine Kollegen das Verfahren so verbessert, dass sie damit vier verschiedene Virenarten gleichzeitig nachweisen können – und ähnlich empfindlich wie bei DETECTR. Zu diesem Zweck haben sie vier verschiedene Cas13-Varianten und auf diese abgestimmte Reporterstrukturen in einem Ansatz kombiniert. Da jedes Konstrukt einen anderen Fluoreszenzfarbstoff trägt, lässt sich eine eindeutige Aussage treffen, welches Virus in der Probe enthalten ist. Das SHERLOCKv2-Verfahren kann sogar Dengue- und Zika-Viren, die beide zu den Flaviviren gehören und bei einer Infektion recht ähnliche Symptome hervorrufen, sicher voneinander unterscheiden.

Zusätzlich haben Zhang und sein Team ihr Verfahren empfindlicher gemacht, indem sie das Messsignal verstärkten. Dazu fügten sie dem Testansatz ein weiteres Cas-Protein (Csm6) bei. Dieses schneidet einzelsträngige DNA, aber nur, wenn zugleich auch Cas13 aktiv ist. Da ein einziges Cas13-Protein mehrere Csm6-Proteine anschaltet, kommt hier eine Signalkaskade mit Verstärkungseffekt in Gang. Voraussetzung dafür ist lediglich, dass die Reporterstrukturen für beide Genschere den gleichen Fluoreszenzfarbstoff tragen: Falls die virale Zielsequenz anwesend ist, werden nun insgesamt mehr Reporterstrukturen geschnitten, was mehr Fluoreszenz erzeugt.

Schließlich vereinfachten Zhang und seine Kollegen die Technik noch so weit, dass ein positives Testergebnis nicht mehr mittels Fluoreszenz, sondern über eine einfache Farbreaktion auf einem Papierstreifen angezeigt wird. Das bietet den Vorteil, nicht mehr auf teure Fluoreszenzmessgeräte angewiesen zu sein – für den Testvorgang genügt es, einen Tropfen der Probe auf das entsprechend präparierte Papier zu geben.

Das System kann übrigens nicht nur virale Nukleinsäuren nachweisen, sondern auch bestimmte Gendefekte in Krebsgewebe anzeigen. Dazu muss lediglich die Leit-RNA so konstruiert werden, dass sie statt einer Virusnukleinsäure spezifische Mutationen in entarteten Zellen erkennt. Möglicherweise lässt sich SHERLOCKv2 sogar so weiterentwickeln, dass es einen Gendefekt nicht bloß identifiziert, sondern gleich auch ausmerzt. Das ist aber noch Zukunftsmusik.

Ein Nachteil der vorgestellten Methoden liegt darin, dass die von den Patienten gewonnen Proben zuvor aufwändig vorbereitet werden müssen, etwa um zu verhindern, dass körpereigene Enzyme virales Erbgut in den Körperflüssigkeiten abbauen. Die Wissenschaftler modifizierten deshalb für die dritte Studie ihre SHERLOCK-Methode, indem sie die entsprechenden Abbauenzyme mittels Erhitzen ausschalteten. Anschließend ließen sich die Viren ohne weiteren Aufbereitungsschritt direkt im Urin, Speichel, Blut oder Serum nachweisen. Das funktioniert spezifisch genug, um damit zwischen einzelnen Zika-Stämmen zu unterscheiden und gezielt jene aufzuspüren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Mikrozephalie verursachen. Auch bei Infektionen mit weiteren Flaviviren wie dem Dengue-, Westnil- und Gelbfiebervirus schlägt der Test an. Zugleich ist er vergleichsweise billig und einfach durchzuführen. Entsprechende Leit-RNAs, die die Genschere zum Ziel führen, lassen sich in weniger als einer Woche herstellen, und die Nachweisprozedur dauert nicht einmal zwei Stunden bei minimalem Materialeinsatz. Da die einzelnen Reagenzien darüber hinaus gefriertrocknet werden können und dann sehr haltbar und temperaturbeständig sind, eignet sich das Verfahren auch für den Einsatz in ärmeren Ländern, in denen eine durchgängige Kühlkette schwer einzuhalten ist.

Schon jetzt sind viele weitere Einsatzgebiete der neuen Techniken vorstellbar. Man könnte damit Gendefekte in Tumorgewebe nachweisen oder nicht erwünschte Organismen in landwirtschaftlichen oder biotechnologischen Prozessen identifizieren. Zunächst aber bleibt abzuwarten, ob die Diagnostika für den Einsatz am Menschen zugelassen werden und sich in der Praxis bewähren. ◀

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

QUELLEN

Chen, J. S. et al.: CRISPR-Cas12a Target Binding Unleashes Indiscriminate Single-Stranded DNase Activity. In: *Science* 360, S. 436–439, 2018

Dewran Kocak, D., Gersbach, C. A.: Scissors Become Sensors. In: *Nature* 557, S. 168–169, 2018

Gootenberg, J. S. et al.: Multiplexed and Portable Nucleic Acid Detection Platform with Cas13, Cas12a, and Csm6. In: *Science* 360, S. 439–444, 2018

Myhrvold, C. et al.: Field-Deployable Viral Diagnostics Using CRISPR-Cas13. In: *Science* 360, S. 444–448, 2018

RADARSIGNALE EIN SEE UNTER DEM MARSGLETSCHER

Unter dem Eis des Marssüdpols könnte es dauerhaft flüssiges Wasser geben. Die Bedingungen für Leben wären dort allerdings vermutlich höchst unwirtlich.

► Viele Male haben Planetenforscher bereits Hinweise darauf gefunden, dass es das Element des irdischen Lebens auch auf dem Mars vorhanden ist. Vor mehr als drei Milliarden Jahren existierten wohl reißende Flüsse und vermutlich sogar ein Ozean auf dem Roten Planeten (siehe »Ein Roboter-Geologe für Mars«, **Spektrum** Juli 2018, S. 56). Heute sind davon immerhin noch große Mengen Wassereis übrig. Während die Fachwelt darüber diskutiert, ob während des Marssommers hier und da feuchte Schlammlawinen Sanddünen herunterrutschen, präsentieren italienische Planetologen nun einen Befund, der solche Beobachtungen in den Schatten stellen dürfte. Das Team um Roberto Orosei vom Nationalinstitut für Astrophysik in Bologna berichtet: Unter dem Eispanzer des

Marssüdpols, in 1,5 Kilometer Tiefe, könnte es ein gut 20 Kilometer großes Reservoir flüssigen Wassers geben. Einen waschechten Marssee also. Ist das der Ort, auf den ESA, NASA und andere Raumfahrtagenturen zukünftig ihre Suche nach lebensfreundlichen Orten auf dem Mars richten sollten?

Auf den ersten Blick erscheint das durchaus sinnvoll. Auf der Erde liegen tief unter der Antarktis hunderte große und kleine subglaziale Seen, von denen manche tatsächlich von Mikroorganismen bevölkert sind, und das trotz völliger Dunkelheit und eiskalter Temperaturen. Planetologen vermuten schon lange, dass es auch unter den Polkappen des Mars flüssiges Wasser geben könnte. Das zu überprüfen, war allerdings nicht ganz einfach. Die italienischen Forscher verwendeten dafür das Radarinstrument MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding) an Bord der europäischen Raumsonde Mars Express, die immerhin schon seit fast 15 Jahren um den Planeten kreist.

Schon recht früh entdeckten die Forscher in den Messdaten auffällige Radarechos aus Richtung der südlichen Polkappe, die aber bei genaueren Analysen immer wieder verschwanden. Erst als die Wissenschaftler vor einigen Jahren die Datenverarbeitung an Bord der Sonde verbesserten, blieben die Signale erhalten. »Danach mussten wir nur noch zeigen, dass das Echo wirklich durch Wasser

Unsere Neuerscheinungen!



Tutanchamun: Vaterschaftstest nach 3300 Jahren • Friedhöfe: Wenn Körper nicht zu Staub zerfallen • Inka: Opfer für die Götter der Anden • Chirurgie: Ärztliche Kunst in Ägypten • Germanien: Tod im Moor • € 8,90



Von der Milchstraße zum Sternsystem • Zwerggalaxien: Trabanten der Milchstraße • Wie aus Gas und Staub Sterne entstehen • Offene Sternhaufen • Projekt Gaia: Die sechsdimensionale Milchstraße • € 9,90



Kreatives Erbgutchaos im Gehirn • Kaffeejunkie dank Genvariante? • CRISPR/Cas9: Unsere Kinder von morgen • Unsere genetische Grundausstattung • Genomsequenzierung: Am Ende einer diagnostischen Odyssee • € 5,90

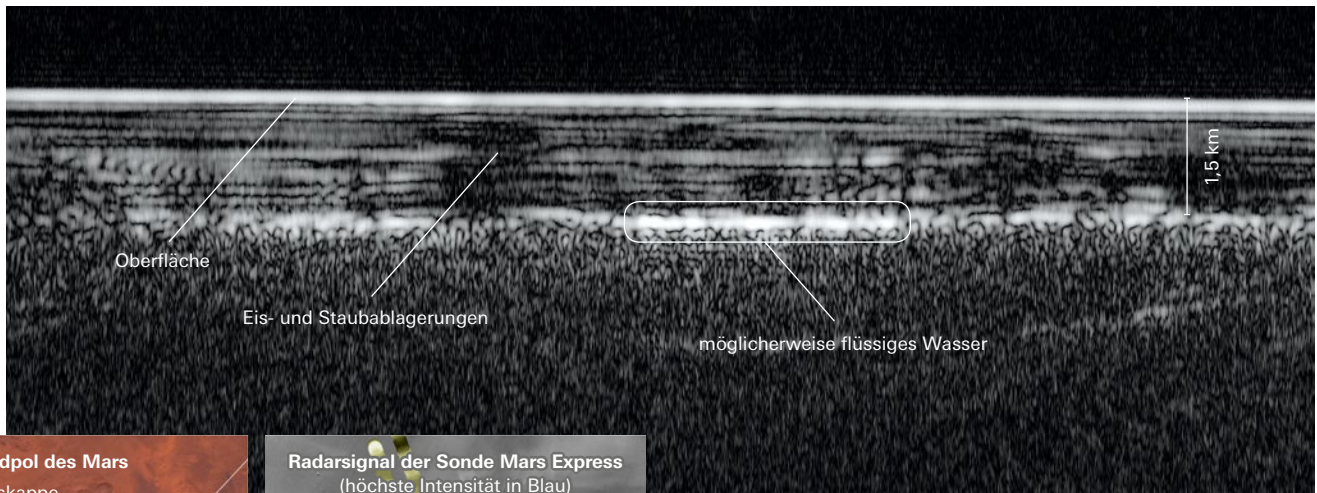
Ausgewählte
Sonderhefte
auch im
PDF-Format

Hier bestellen:

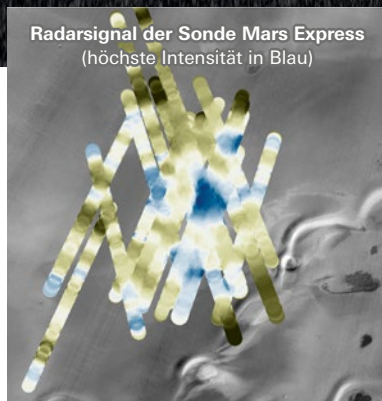
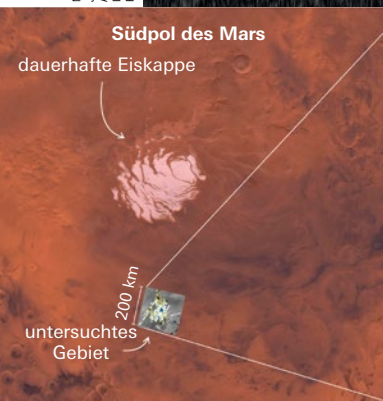
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/shop

MARSKARTE LINKS: NASA/KING; RECHTS: THEMIS HINTERGRUND: NASA/JPL-CALTECH/ARIZONA STATE UNIVERSITY; MARIS RADAR DATEN: ESA/NASA/JPL/ASI/UMW. ROSE ET AL. 2018 (WWW.ESA.INT/SPACE/IMAGES/IMAGES/2018/07/MARS_EXPRESS_DETECTS_WATER_BURIED_UNDER_THE_SOUTH_POLE_OF_MARS_BEARBITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



ESA/NASA/JPL/ASI/UMW. ROSE ET AL. 2018 (WWW.ESA.INT/SPACE/IMAGES/IMAGES/2018/07/DETECTING_BURIED_WATER_UNDER_THE_SOUTH_POLE)



Mit Radarwellen haben Astronomen eine etwa 200 Kilometer große Region in der Nähe des Marssüdpols abgetastet (links unten). Die Reflexionen erlauben Rückschlüsse auf das Material unterhalb der Oberfläche. In einem etwa 20 Kilometer großen Bereich zeigen die Messdaten eine ungewöhnlich hohe Intensität (rechtes Bild unten, blaue Bereiche stehen für starke Signale). In dieser Region könnte sich in 1500 Meter Tiefe Wasser verbergen, das Radarwellen besonders gut reflektiert (oberes Bild).

entsteht«, sagt Roberto Orosei. Mittlerweile ist sich das Forscherteam sicher, nicht etwa nur auf besonders gut reflektierendes Kohlendioxideis zu blicken, sondern auf flüssiges Wasser. Ob es ein richtiger See ist, eine Art Schlamm oder wassergesättigtes Sediment, können die Wissenschaftler allerdings noch nicht sagen. Auch warum das Wasser hier in diesem Zustand bleibt, während es überall sonst auf dem Mars verdunsten oder zu Eis erstarren würde, ist bisher offen. Denn während auf der Erde allein der Druck von mächtigen Gletschern ausreicht, um Wasser in der Tiefe flüssig zu halten, sind die Eismassen auf dem Mars dafür zu leicht.

Die Wissenschaftler schlagen daher eine auf dem Mars omnipräsente Chemikalie vor, die als potentes Frostschutzmittel wirken dürfte: Diese so genannten Perchlorate haben bislang alle gelandeten Raumsonden nachweisen können, die Instrumente zur chemischen Analyse mit an Bord hatten. Der 2008 in kalten nördlichen Breiten

gelandete Phoenix der NASA fotografierte sogar einige Wassertröpfchen an seinen Landebeinen, die vermutlich dank des darin gelösten Perchlorats nicht sofort verdampften. Auch unter der südlichen Polkappe dürfte es die chemischen Verbindungen geben. Sie würden einen subglazialen See bis zu einer Temperatur von minus 75 Grad Celsius flüssig halten. Roberto Orosei hält diesen Wert auf Grund des Klimas rund um den Südpol für eine plausible Minimaltemperatur für die Unterseite des Gletschers und somit den Rand des Gewässers.

Die hohe Konzentration der reaktionsfreudigen Perchlorate ist allerdings nicht unbedingt eine gute Nachricht für Exobiologen, welche die Möglichkeiten für außerirdisches Leben erforschen. Roberto Orosei verweist zwar auf bekannte Organismen auf der Erde, die in stark salzhaltigem Wasser überleben und die Perchlorate sogar für ihren Stoffwechsel verwenden können. Jennifer Wadsworth von der University of Edinburgh ist dagegen skeptisch. Sie untersuchte 2017, wie hoch konzentrierte Perchlorate gemeinsam mit UV-Strahlung auf salztolerante irdische Mikroorganismen wirken. Dabei zeigte sich, dass die Strahlung die Perchlorate offenbar in noch reaktionsfreudigere Bestandteile zersetzt, die ihrerseits innerhalb kurzer Zeit jede biologische Zelle zerstören. Das Gemisch auf dem Mars ist also ein potentes Desinfektionsmittel, das laut Jennifer Wadsworth auch tief unter einem Gletscher erhalten bliebe: »Dort herrscht eine sehr ungastliche Umwelt.« Für irdische Mikroorganismen wäre das Gewässer bei minus 75 Grad Celsius viel zu kalt.

Roberto Orosei hofft nun erst einmal, dass andere Instrumente das Ergebnis seines Teams bestätigen. Das zweite derzeit im Marsorbit arbeitende Radargerät namens SHARAD an Bord des Mars Reconnaissance Orbiter der NASA hat nämlich bislang keine Hinweise auf diesen See entdeckt. Erst wenn ein unabhängiger Nachweis gelingt, wäre die Zeit gekommen, die Suche nach Leben auf dem Mars stärker auf die Polkappen zu fokussieren. ◀

Karl Urban studierte Geowissenschaften und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Tübingen.

MATHEMATIK FIELDS-MEDAILLEN 2018

Neben Peter Scholze sind auf dem Internationalen Mathematikerkongress in Rio de Janeiro drei weitere junge Mathematiker mit der Auszeichnung geehrt worden, die in ihrem Renommee dem Nobelpreis ähnlich ist.

► Caucher Birkar ist die Medaille sicher nicht in die Wiege gelegt worden – im Gegenteil. Geboren 1978 als kurdischer Bauernsohn im Westen des Iran, wächst er auf, während um ihn herum der Krieg zwischen Iran und Irak tobt. Seine mathematische Begabung findet zu Hause wenig Förderung, verschafft ihm aber immerhin einen Studienplatz an der Universität Teheran. Auf einer Reise nach England beantragt er Asyl – und erhält es ein Jahr später –, promoviert in Nottingham und trifft auf einer Tagung den russischen Mathematiker Wjatscheslaw Wladimirowitsch Schokurow, der an der Johns Hopkins University in Baltimore algebraische Geometrie betreibt.

Schokurow hat eine Forschungsrichtung wiederbelebt, die mangels Erfolg in einen Dornröschenschlaf verfallen war: die Klassifizierung »algebraischer Varietäten«. Im Verein mit Schokurow treibt Birkar nun das Gebiet zu neuer Blüte und lässt dabei seinen Lehrer weit hinter sich.

Algebraische Varietäten sind zunächst nichts weiter als die Nullstellenmengen von Polynomen, zum Beispiel die Menge aller Punkte im dreidimensionalen Raum, in denen eine Funktion wie $f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 1$ den Wert null annimmt. Hier handelt es sich einfach um die Oberfläche einer Kugel; allerdings können algebraische Varietäten die wildesten Formen annehmen (wie der **Spektrum**-Wettbewerb zum Thema 2008 anschaulich gezeigt hat, siehe www.spektrum.de/mathekunst).

In ihrem Streben nach Allgemeinheit beschränken sich die algebraischen Geometer nicht auf zweidimensionale Flächen, sondern arbeiten mit Varietäten beliebig hoher Dimension. Obendrein legen sie nicht die gewohnten reellen Zahlen zu Grunde, sondern die komplexen Zahlen, deren jede ein Paar aus zwei reellen ist. Schon eine zweidimensionale komplexe algebraische Varietät hat also vier reelle Dimensionen und übersteigt damit unser räumliches Vorstellungsvermögen.

Da erwacht das Bedürfnis, Ordnung in die unüberschaubare Vielfalt zu bringen, zum Beispiel indem man Varietäten, die »im Wesentlichen gleich« sind, in ein und dieselbe Kiste packt und am Ende mit einer überschaubaren Anzahl von Kisten dasteht. Obendrein wäre es hilfreich, wenn man in jeder Kiste das einfachste, symmetrischste oder in irgendeinem Sinn schönste Exemplar ausmachen könnte – zum Beispiel die perfekte Kugeloberfläche als Vorzeigebeispiel für alle deformierten, aber irgendwie noch kugelhähnlichen Flächen.

Was aber bedeutet »im Wesentlichen gleich«? Unter verschiedenen denkbaren Kriterien konzentrieren sich die algebraischen Geometer auf eines, das nicht unbedingt

das einleuchtendste, aber gut zu handhaben ist: die birationale Äquivalenz. Zwei Varietäten heißen birational äquivalent, wenn es eine rationale Funktion gibt, die jeden Punkt der einen Varietät auf genau einen Punkt der anderen abbildet und deren Umkehrung ebenfalls eine rationale Funktion ist. Da eine rationale Funktion ein Bruch ist, dessen Zähler und Nenner Polynome sind, kann für gewisse Punkte der Nenner null werden mit dem Effekt, dass die Funktion dort nicht definiert ist. Solche Ausnahmepunkte nimmt man bei der Definition der birationalen Äquivalenz in Kauf, solange sie selten genug vorkommen.

Chirurgie auf Flächen

Eindimensionale komplexe Varietäten, über den reellen Zahlen betrachtet, sind nichts weiter als zweidimensionale Flächen, und ihre Klassifikation nach birationaler Äquivalenz läuft auf das topologische Geschlecht hinaus, das ist in diesem Fall die Anzahl der Löcher. In jeder Kiste stecken Flächen gleichen Geschlechts. Vorzeigeobjekt in der nullten Kiste ist die Kugel, in der ersten der Torus, in der zweiten die achtförmige Brezel und so weiter.

Mit steigender Dimension wird die Klassifizierungsaufgabe rasch komplizierter. Für zweidimensionale komplexe Varietäten gibt es ein Verfahren namens »blowup«, um einen Punkt durch eine ganze Gerade zu ersetzen und sie dadurch, unter Erhalt der birationalen Äquivalenz, komplizierter zu machen. Für eine gegebene Varietät besteht nun die Kunst darin, eine Umkehrung dieser Aktion (»blow-down«) zu finden und dadurch das Objekt zu vereinfachen, bis schließlich das einfachste Exemplar aus der entsprechenden Kiste, das »minimal model«, zu Tage tritt.

Für drei- und höherdimensionale Varietäten sind noch weiter gehende chirurgische Eingriffe erforderlich, so genannte Flips. Dies ist die Stelle, an der Birkar, auf den Vorarbeiten von Schokurow aufbauend, bahnbrechende Fortschritte erzielte.



CAUCHER BIKAR, MIT FRODL. GEN. DER INTERNATIONAL MATHEMATICAL UNION (IMU)

Caucher Birkar erhält die Fields-Medaille »für den Beweis der Beschränktheit von Fano-Varietäten und für Beiträge zum »minimal model program««.

Der Preisträger hatte nicht lange Freude an seiner Fields-Medaille. Kaum eine Stunde nach der Verleihung wurde sie ihm mitsamt der Tasche, in die er sie gesteckt hatte, gestohlen – aus dem von der Eröffnungszeremonie voll besetzten Auditorium und unter den Augen der Sicherheitskameras. Aber die International Mathematical Union hatte ein Einsehen, ließ eine Ersatzmedaille prägen und händigte sie noch während des Kongresses dem rechtmäßigen Preisträger aus.

Optimaler Transport: Erde, Seife, Luft und Atome

Im Gegensatz zu Caucher Birkar kann sich Alessio Figalli, Akademikerkind aus Rom, über mangelnde Förderung während seiner Jugendzeit nur sehr verhalten beklagen. Ja, seine Eltern schickten ihn entgegen seiner – damals schon erkennbaren – Neigung zur Mathematik aufs klassische Gymnasium statt aufs naturwissenschaftliche; aber Alessio widersetzte sich nicht, denn »normalerweise sind in der klassischen Schule mehr Mädchen«, was die Wahl insgesamt optimal erscheinen ließ. Die Lücken bei Studienbeginn hat er rasch aufgeholt.

Optimierung ist auch das Gebiet, auf dem er seine preiswürdigen Leistungen erzielte. Im Zentrum steht ein Problem namens »optimaler Transport«. Erste Untersuchungen unternahm der vielseitige Wissenschaftler und Politiker Gaspard Monge (1746–1818) aus konkretem Anlass: Sein oberster Dienstherr Napoleon Bonaparte hatte ihn beauftragt, zum Bau von Festungswällen große Mengen Erde aus verschiedenen Gruben zu unterschiedlichen Baustellen zu schaffen – unter minimalem Aufwand.

Das mathematische Problem, das Monge daraus machte und zu dem wenig später André-Marie Ampère (1775–1836) Wesentliches beitrug, hat mit der ursprünglichen Aufgabe nur noch sehr entfernt zu tun. Aus einer Massenverteilung (Erde in Gruben) soll mit minimalen Energieaufwand eine andere (Erde in Festungswällen) gemacht werden; aber jedes Erdkrümelchen darf unabhängig von den anderen seinen Weg gehen. So unrealistisch dieses Szenario ist, es liefert immerhin eine untere Abschätzung für den Energieaufwand. Denn da jeder praktikable Transport den Krümeln weniger Freiheit lässt, kann er in Bezug auf den Energieverbrauch nicht besser sein als die sehr theoretische optimale Lösung.

Allgemein fasst man den bewegten Stoff als Kontinuum auf: Erde im Grenzwert unendlich kleiner Krümel, Flüssig-

keiten und Gase ohne Rücksicht darauf, dass sie aus Molekülen bestehen, mathematisch dargestellt nur durch eine orts- und zeitabhängige Massendichte. Das so formulierte Problem des optimalen Transports liefert auch für ein Kontinuum, das gar nicht nach einem Plan bewegt wird, neue Einsichten: Luft in der Atmosphäre, Seifenlösung in Seifenblasen und sogar Atome in Kristallen.

Die Membran, die sich einstellt, wenn man eine Drahtschlinge aus einer Seifenlösung zieht, ist eine Minimalfläche, das heißt, sie hat unter allen ähnlich aussehenden Flächen die geringste Energie. Diese Bedingung kann man mathematisch formulieren und daraus Eigenschaften der Minimalfläche herleiten – vorausgesetzt, die optimale Lösung ist stabil. Wenn man die Fläche ein bisschen stört, indem man ihr Energie zuführt, darf sie sich auch nur ein bisschen deformieren. Diese physikalisch offensichtliche Tatsache will mathematisch bewiesen werden.

Zu diesem Zweck stellte Figalli in einer Arbeit von 2010 gemeinsam mit Francesco Maggi und Aldo Pratelli die Ungleichung mit dem optimalen Transport auf geniale Weise auf den Kopf. Jede Bewegung verbraucht mindestens so viel Energie wie der optimale Transport. Daraus folgt im Umkehrschluss: Wenn die Energie vorgegeben ist, kann die Seife (oder welches Kontinuum auch immer) sich nicht weiter von der Position minimaler Energie wegbewegen, als sie es bei optimalem Transport könnte. Aus diesem Grundgedanken machten Figalli und seine Kollegen unter erheblichem theoretischem Aufwand eine Abschätzung der Art »Deformation ist höchstens gleich einer Konstante mal Wurzel aus der Energie der Störung«.

Das liefert die gesuchte Stabilität für die optimale Lösung nicht nur des Minimalflächenproblems, sondern gleich einer ganzen Problemklasse. Zu ihr zählen die Probleme mit freiem Rand, zum Beispiel: Welche Form nimmt die Grenze zwischen Wasser und Eis in einem nur teilweise zugefrorenen See an? Kann man die Beobachtung, dass diese Grenze frei von scharfen Kanten ist, mathematisch beweisen?

Für andere Probleme, darunter die »semi-geostrophischen Gleichungen«, mit denen die Meteorologen großräumige Wetterphänomene modellieren, liefern Figallis Ergebnisse ebenfalls Stabilitätsaussagen – unentbehrlich für die Berechnung mit dem Computer, denn man muss sicher sein, dass kleine Störungen wie die unweigerlich auftretenden Approximationsfehler die Lösung der Gleichung auch nur geringfügig verfälschen.

Von der Zahlentheorie zur Dynamik

Das Leben von Akshay Venkatesh verläuft äußerlich eher unauffällig: Geboren 1981 in Neu-Delhi, wächst er in Australien nach seinen eigenen Worten »unter ziemlich normalen Verhältnissen« auf. Den ob seiner früh zu Tage tretenden Hochbegabung ausbrechenden Wunderkindrummel kann er nur mühsam nachvollziehen. Als Doktorand am Institute for Advanced Study in Princeton entdeckt er, dass er mit seiner Genialität nicht allein ist, was ihn sogar zu weiteren Selbstzweifeln veranlasst. Inzwi-



Alessio Figalli wird geehrt
»für Beiträge zur Theorie des optimalen Transports und deren Anwendungen in partiellen Differenzialgleichungen, metrischer Geometrie und Wahrscheinlichkeitstheorie«.

ETH ZÜRICH / GIULIA MARTHALER, MIT FELD. GEN. DER INTERNATIONAL MATHEMATICAL UNION (IMU)



RÖD SEARCHCY, MIT FÖHL, GEN. DER INTERNATIONAL MATHEMATICAL UNION (IMU)

Akshay Venkatesh erhält die Auszeichnung »für seine Synthese von analytischer Zahlentheorie, homogener Dynamik, Topologie und Darstellungstheorie, die seit Langem offene Probleme in Gebieten wie der Gleichverteilung arithmetischer Objekte gelöst hat«.

schen Professor an dem traditionsreichen Institut, genießt er die Ruhe und Beschaulichkeit seiner Arbeitsumgebung.

In krassem Kontrast zu seinem überschaubaren Lebensumfeld steht die Vielfalt der Gebiete, auf denen er gearbeitet – und überraschende Verbindungen gezogen – hat. Es beginnt mit einer Frage, die schon Carl Friedrich Gauß 1801 in seinen »Disquisitiones Arithmeticae« behandelt hatte: Gegeben sei eine quadratische Form wie zum Beispiel $x^2 + 2xz + 3yz + z^2$, also eine Summe aus Termen, bei denen sich die Exponenten der Variablen zu 2 summieren, mit ganzzahligen Vorfaktoren. Welche Zahlen können sich ergeben, wenn man für die Variablen ganze Zahlen einsetzt? Bei der quadratischen Form x^2 sind es nur die Quadratzahlen; bei $w^2 + x^2 + y^2 + z^2$ sind es alle natürlichen Zahlen, denn nach einem Satz von Joseph-Louis Lagrange ist jede natürliche Zahl Summe von vier Quadraten.

Zu der Frage, wie die Wertemengen verschiedener quadratischer Formen zusammenhängen, fand Venkatesh

gemeinsam mit Jordan Ellenberg Antworten auf einem Weg, der nicht nur die Fachkollegen, sondern auch die Autoren selbst verblüffte. Die Punkte, auf denen eine quadratische Form definiert ist, bilden ein so genanntes Gitter. Wenn man sich den gewöhnlichen Raum mit Würfeln vollgestapelt denkt, besteht es aus deren Eckpunkten. Unter gewissen Umständen ist es sinnvoll, alle Würfel mit einem einzigen zu identifizieren. Dann dringt ein Punkt, der sich durch den Raum bewegt und dabei den Würfel nach rechts verlässt, von links in den rechten Nachbarwürfel ein – und damit, wegen der Identifizierung, in den Würfel selbst. Dessen gegenüberliegende Seiten sind also gewissermaßen jeweils dieselbe Seite, was dem Würfel die Struktur eines (verallgemeinerten) Torus verschafft.

Auf seinem Weg durch den Raum stößt der Punkt immer wieder aufs Neue in den Würfel vor. Die Menge aller seiner Spuren gibt Auskunft über den Zusammenhang unter quadratischen Formen auf dem Gitter. Um diesen zu finden, muss man allerdings die vorkommenden Größen über verschiedenen Zahlkörpern interpretieren, ein Verfahren, das auch Peter Scholze mit großem Erfolg genutzt hat (**Spektrum** September 2018, S. 74).

Dieser neue und überraschende Zusammenhang zwischen der Zahlentheorie und der Theorie der dynamischen Systeme verschaffte den Vertretern der Letzteren ein neues theoretisches Werkzeug, das sie eifrig aufgriffen. Dies ist nur eine unter den zahlreichen bahnbrechenden Leistungen, die Venkatesh bereits jetzt vorzuweisen hat. ◀

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

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M. A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser
Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff (Volontärin), Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: 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: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L) sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachfrage. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart,

IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1.1. 2018.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nächstehenden Form berechtigt den Verlag zum

Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.





BIOLOGIE BITTE EINMAL KRÄFTIG ZUBEISSEN!

Weshalb dominieren Krokodile auf der ganzen Welt ihre Lebensräume, und wie haben sie einst ihre Vorherrschaft errungen? Kühne Vermessungen liefern Antworten – und erlauben sogar Einblicke in die Beißkraft des *Tyrannosaurus rex*.



ANTISARACHING / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die schmalen Schnauzen von Krokodilen wie diesem sind eher für die Jagd auf Fische optimiert; Arten mit breiterem Kiefer haben einen abwechslungsreicheren Speiseplan. Die Reptilien schnappen druckvoller zu als jedes Säugetier.

FLORIDA STATE UNIVERSITY, BRUCE W. PALMER



Gregory M. Erickson ist Professor für Anatomie und Paläobiologie der Wirbeltiere an der Florida State University. Er untersucht die Biomechanik heute lebender sowie ausgestorbener Reptilien.

» [spektrum.de/artikel/1587612](https://www.spektrum.de/artikel/1587612)

▶ An einem brütend heißen Sommertag stand ich im australischen Darwin neben einem etwa fünf Meter langen und mehr als 500 Kilogramm schweren ausgewachsenen männlichen Leistenkrokodil – der weltweit größten Krokodilart. Es starrte mich mit seinen unheimlichen, katzenähnlichen Augen an, während durch die Nasenlöcher immer wieder geräuschvoll Luft entwich wie Dampf bei einer Lokomotive. Mir lief es mir eiskalt den Rücken herunter. Gingen meine Kollegen und ich mit unserem Forscherdrang nicht vielleicht doch etwas zu weit?

Mit Krokodilen hatte ich schon häufig gearbeitet, aber noch nie mit einem solch riesigen Exemplar. Schwitzend rückte ich näher. Dabei trug ich keinerlei Waffen zu meinem Schutz, nur eine Hand voll Elektronik am Ende einer gut einen Meter langen Plastikstange: eine Sonde zur Messung der Beißkraft des Tiers.

Als ich seitlich bis auf eine Entfernung von knapp einem halben Meter an seinen Schädel herangekommen war, öffnete das Krokodil sein Maul. Ein erregtes Fauchen und 64 enorme Zähne waren eine unmissverständliche Warnung, nicht noch näher zu kommen. Das war meine Gelegenheit – ich packte die Stange und schob die Beißkraftsonde entschlossen zwischen seine Kiefer. Augenblicklich schlugen sie mit einem dumpfen, kanonengleichen Knall auf das Gerät. Der Aufprall riss es mir fast aus den Händen. Dann war alles still.

Ich sammelte mich und versuchte, das soeben Geschehene zu verarbeiten. Das Reptil bewegte sich nicht, ich war unverletzt, und meine Ausrüstung schien intakt. Zu meiner Freude steckte das Messgerät an einer perfekten Position zwischen den hinteren Zähnen des Krokodils. »Guter Biss!«, rief ich meinem Kollegen Kent A. Vliet von der University of Florida zu. Er stand hinter mir und hielt den Verstärker für die Messwerte. »Wie war die Beißkraft?«

»3690 Pfund«, antwortete er. Das entspricht einer Kraft von mehr als 16400 Newton. Die umstehenden Teammitglieder und einige interessierte Zuschauer kommentierten den Wert aufgeregt, während ich weiter die Kunststoffstange festhielt und darauf wartete, dass das Krokodil wieder losließ. Als sich mein Adrenalinpiegel normalisierte, begriff ich: Das war die höchste jemals bei einem lebenden Tier gemessene Beißkraft.

Dieser heiße Tag in Australien markierte den Höhepunkt einer Reihe von Experimenten, die meine Kollegen und ich im Verlauf der vergangenen fast zwei Jahrzehnte durchgeführt haben. Wir untersuchten die Biomechanik

der Nahrungsaufnahme bei Echten Krokodilen, Gavialen und Alligatoren, die zusammen die Ordnung der Crocodylia bilden. Diese stehen in Flussmündungen und warmen Süßgewässern seit mehr als 85 Millionen Jahren unangefochten an der Spitze der Nahrungskette. Wissenschaftler rätseln seit Langem, welche Faktoren Krokodile so erfolgreich werden ließen. Unsere Forschungsergebnisse helfen nun bei einer Erklärung.

Die reichen Fossilfunde urweltlicher Crocodylia zeigen, dass ihre Körperform abgesehen vom Kopf über Jahrmillionen praktisch unverändert geblieben ist. Die Körpergröße jedoch war höchst variabel und reichte vom Zwergwuchs mit nur einem Meter Länge bis zum Gigantismus mit mehr als neun Meter messenden Exemplaren. Dazu kamen Veränderungen der Gestalt von Schnauze und Zähnen. Die Form und Funktion dieser Attribute und ihre Bedeutung für die Ernährung scheinen der Schlüssel zum Verständnis des evolutionären Erfolgs der Tiergruppe zu sein.

Uralte Jäger mit bewährten Waffen

Glücklicherweise zeigen die 24 lebenden Krokodilspezies ein ähnlich breites Spektrum an Körpermaßen wie ihre Vorfahren sowie ein vergleichbares Arsenal an Schnauzenformen. Forscher haben ermittelt, welche Ernährungsweisen jeweils dazugehören. Sie unterscheiden mittel- bis breitschnauzige Nahrungsgeneralisten, schmalschnauzige Arten mit nadelspitzen Zähnen, die kleinere Beutetiere wie Fische jagen, breitschnauzige Spezies mit eher knollenförmigen Zähnen, die sich für hartschalige Mollusken eignen, und teils an Land jagende Krokodile mit hundeähnlicher Schnauze. Untersuchungen zur Biomechanik der Nahrungsaufnahme könnten nicht nur mehr darüber verraten, wie sich die bemerkenswerten Raubtiere heutzutage behaupten, sondern darüber hinaus, wie ihre längst ausgestorbenen Verwandten womöglich lebten.

Als wir mit unseren Studien begannen, gab es zur Bedeutung des Schnauzenbaus und der Körpermaße der Krokodile lediglich Spekulationen und Modellrechnungen. Eine belastbare empirische Grundlage fehlte. Für den Mangel an Daten gab es verschiedene Gründe: Da fast alle der weltweit lebenden Krokodile wegen Überjagung vom Aussterben bedroht sind, kommen Wissenschaftler zunächst gar nicht so leicht an sie heran. Selbst wenn es ihnen gelingt, ist diese Arbeit gefährlich. Zudem existierten lange keine Techniken zur Messung der für die Biomechanik besonders relevanten Kräfte und Zahndrücke.

Letzterer Umstand sollte sich ändern, als mich 2001 ein Filmproduzent der National Geographic Society anrief. Er fragte, ob ich die Beißkraft des urweltlichen, zwölf Meter langen ausgestorbenen »Superkrokodils« (*Sarcosuchus*) bestimmen könne, das der Paläontologe Paul Sereno von der University of Chicago in Niger gefunden hatte. Ich bot an, das auf Grundlage von Messungen an heutigen Krokodilen hochzurechnen. Die Voraussetzung dafür war freilich der Zugang zu lebenden Forschungsobjekten. Ich kontaktierte meinen Kollegen Vliet, der auch wissenschaftlicher Berater des St. Augustine Alligator Farm Zoological Park (SAAF) in Florida ist. Dabei handelte es sich um die weltweit einzige Einrichtung, die alle da-

mals bekannten Krokodilspezies beherbergte. Ich erläuterte Vliet meine anvisierten Versuchsreihen: Zunächst hatte ich vor, die Beißkraft bei ausgewachsenen Exemplaren einer jeden heute lebenden Krokodilart zu messen. Dann wollte ich die Daten von Alligatoren in Gefangenschaft mit denen wild lebender vergleichen, die als Problemtiere oder zu Forschungszwecken von den Biologen der Florida Fish and Wildlife Conservation Commission eingefangen worden waren. Schließlich plante ich anatomische Studien und Muskelstimulationsexperimente, um ein Modell zur Extrapolation der Beißkraftwerte auf fossile Krokodile zu entwerfen. Das sollte Einblicke in die Leistungsfähigkeit der Kiefer ausgestorbener Crocodylia und ihrer Verwandten, der Dinosaurier, ermöglichen. David Drysdale, der Besitzer des SAAF, erteilte die Genehmigung für unsere Studien, die National Geographic Society übernahm die Finanzierung – und wir beeilten uns mit der Entwicklung passender Messmethoden, um die gewünschten Daten vor Beginn der Filmaufnahmen parat zu haben.

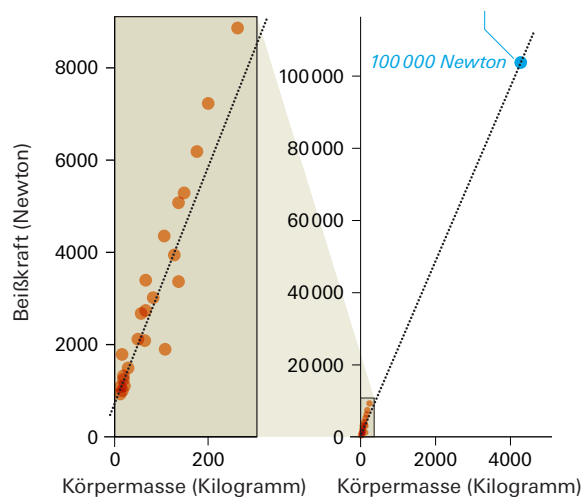
Wie misst man die Beißkraft eines Krokodils? Ich war ratlos. Nie zuvor hatte das jemand bei so großen Tieren auf direkte Weise versucht, schon gar nicht bei den gigantischen Fleisch fressenden Reptilien. Ich selbst hatte so

Kaukraft-Champions

Obwohl die unterschiedlichen Krokodilspezies diverse Körpergrößen und Schnauzenformen aufweisen, erreichen alle praktisch dieselbe relative Beißkraft – bezogen auf ihre Körpermasse. Diese enge Korrelation ermöglicht auch Aussagen über längst ausgestorbene Spezies, etwa das zwölf Meter lange *Sarcosuchus*, eines der größten jemals beschriebenen Krokodile.

mittlere Körpermasse und Beißkraft bei lebenden Krokodilarten

errechnete Beißkraft des ausgestorbenen *Sarcosuchus*



JER CHRISTENSEN, NACH ERICKSON, G. M. ET AL.: INSIGHTS INTO THE ECOLOGY AND EVOLUTIONARY SUCCESS OF CROCODYLIANS REVEALED THROUGH BITE FORCE AND BITE-PRESSURE EXPERIMENTATION. IN PLOS ONE 7, E1791. DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0017911. SCIENTIFIC AMERICAN MARCH 2016

etwas als Doktorand lediglich bei winzigen Eidechsen getan. Dazu hatte ich pinzettenartig federnde Metallplatten benutzt, an denen sich die zum Zusammendrücken nötige Kraft ablesen ließ.

Um die Frage in entsprechend größeren Dimensionen anzugehen, nahm ich die Hilfe eines Ingenieurs in Anspruch, mit dem ich schon früher an der Stanford University zusammengearbeitet hatte. Zusätzlich holte ich einen Entwicklungsingenieur einer Firma ins Team, die mechanische Sensoren für Industriematerialien herstellt. Gemeinsam entwarfen wir tragbare, wasserfeste Sonden zur Messung der Beißkraft von Krokodilen. Sie sehen aus wie verkleinerte Körperwaagen, sind jedoch viel genauer und kosten bis zu 11 000 US-Dollar. Wir befestigten an jedem Gerät eine Haltestange aus PVC-Rohr und verkabelten es mit einem tragbaren Ladungsverstärker, der die Werte in Echtzeit aufzeichnete. Schichten aus Rinderhaut ummanteln die Stahlplatten des Kraftsensors, um dem Tier das Gefühl richtiger Beute zu vermitteln und gleichzeitig seine Zähne zu schonen. Diese Maßnahme erwies sich als noch wichtiger als ursprünglich angenommen: Einer meiner Kollegen zeigte später, dass ein Krokodil nicht mit voller Kraft zubeißt, wenn seine Zähne mit sehr festem Material in Kontakt kommen – ähnlich einem Menschen, der auf einem harten Bonbon herumkaut.

Als wir die Technik im Griff hatten, erstellten wir ein Protokoll für ihren Einsatz. Gemeinsam mit dem Biologen Vliet und dem SAAF-Direktor John Brueggen entwarf ich ein tierschutzgerechtes Verfahren zur Beißkraftmessung unter geringstmöglichem Stress für die Krokodile. Erfreulicherweise funktionierte es von Anfang an wie geplant: Wir fangen das Krokodil mit Lasso in der Gehege ein und ziehen es heran (was eine kleine Armee erfordert). Dann fixieren wir das Tier sicher und geben seine Kiefer frei, worauf es zuverlässig das Maul öffnet. Anschließend platzieren wir die Messsonde im Bereich der besonders starken hinteren Backenzähne, um einen maximal kraftvollen Biss auszulösen und aufzuzeichnen. Es ist außerdem sinnvoll, wenn ein Helfer auf dem Rücken des Krokodils sitzt und dessen Kopf festhält, so dass es sich nicht herumrollen kann. Außerdem vermessen und wiegen wir es. Eigentlich wird das Gewicht großer, nicht domestizierter Tiere selten dokumentiert. Wir fanden das jedoch wichtig für den Vergleich der Beißkraft unter den verschiedenen Krokodilspesies und um die Messwerte auch zu denen ganz anderer Tiere mit abweichender Körperform in Bezug zu setzen.

Man könnte das Einfangen und Wiegen mit einem Bullenritt für Forscher vergleichen – hätte mir nicht einmal ein professioneller Rodeoreiter erzählt, er wolle dabei um keinen Preis mitmachen: »Bullen drehen sich wenigstens nicht um und fressen dich.« Ähnlich äußerte sich Georges St-Pierre, der wohl erfolgreichste Mixed-Martial-Arts-Kämpfer. Einmal fing ich mit ihm zusammen einen vier Meter langen Alligator ein und führte meine Messungen durch. Er meinte, das sei das Beängstigendste gewesen, was er je getan hätte, und dass meine Kollegen und ich verrückt seien. Offen gestanden halten wir die Tiere gar nicht für besonders gefährlich. Vor den größten Krokodilen haben wir allerdings schon Respekt, und selbst die kleine-

AUF EINEN BLICK UNGEHEUERLICHE KIEFERKRAFT

- 1** In den Uferzonen von Gewässern auf der ganzen Welt stehen Krokodile seit vielen Jahrmillionen unangefochten an der Spitze der Nahrungskette.
- 2** Riskante Untersuchungen der Beißmuskulatur sowie der Zähne von frei und in Gefangenschaft lebenden Exemplaren enthüllen außergewöhnlich hohe Kräfte und Drücke.
- 3** Auf Grundlage der Messdaten entwickelte Modelle erlauben außerdem Rückschlüsse auf die Jagdfähigkeiten ausgestorbener Krokodilarten sowie Dinosaurier.

ren können einem unvorsichtigen Menschen ohne Weiteres den Arm abtrennen. Wie ein Tierarzt, der Hunde behandelt, haben wir gelernt, das Verhalten der Krokodile zu deuten und so mit ihnen umzugehen, dass weder sie noch wir Schaden nehmen. Ich bringe meinen Studenten zwei Grundregeln bei: Meidet die spitzen Enden – also Nase und Schwanz –, und bleibt der Uferzone fern. Krokodile sind Meister im Anschleichen. Selbst fünf Meter lange Exemplare sind im seichten, trüben Wasser kaum auszumachen und schießen raketenartig hervor, um einem den Tag zu verderben.

Es ist nicht allein die Kraft, die zählt – entscheidend ist, wie sie sich verteilt

Einen wichtigen Aspekt hatten wir bei unseren Untersuchungen allerdings nicht berücksichtigt. Die Beißkraft wird gemeinhin als verlässliches Maß für die Fressfähigkeiten gesehen. Doch sie ist eigentlich nur eine Ersatzgröße. Letztlich entscheidet nämlich nicht die Kraft, sondern der Druck der Zähne, ob die Jäger das Gewebe ihrer Beute durchdringen. Der Druck der Zahnkronen auf Fell, Haut, Panzer, Schalen, Knochen und dergleichen erzeugt lokale Scherkräfte. Das verursacht Risse oder Löcher, die sich unter dem Einfluss der Beißkraft weiter öffnen. So stirbt das Beutetier entweder sofort, oder das Krokodil hat es sicher zwischen seinen Kiefern fixiert und kann es ertränken.

Um also nach der Messung der Beißkraft eines Tiers jeweils auch den Beißdruck zu bestimmen, hielten wir die Kiefer des Krokodils mit einem dazwischengestellten Brett offen und fixierten das Maul mit Klebeband. Ich fasste dann hinein und erstellte mit kieferorthopädischem Spezialmaterial Abdrücke der Zähne – sozusagen die reale Version des bei Kindern beliebten Spiels »Kroko Doc«. Das Brett zwischen den Kiefern hindert das Tier zwar daran, reflexhaft zubeißen, wenn es an den Zähnen oder im Inneren des Mauls berührt wird. Aber selbst nach Hunderten derart vermessener Krokodilkiefer muss ich mich immer neu dazu überwinden. Es läuft den Selbst-

schutzinstinkten des Menschen schlicht zuwider, die Hand in das Maul eines Krokodils zu stecken. Mit den Abdrücken produzierten wir im Labor Modelle der Zähne und vermaßen daran die Kontaktflächen der Zahnspitzen. Dann teilten wir die Beißkraft durch die Flächensumme und erhielten so den Beißdruck.

Die Erkenntnisse, die wir im Lauf unserer Untersuchungen bei mehr als 500 Individuen aller heute lebenden Krokodilspezies gewonnen haben, stellt das bisherige Wissen teilweise in Frage. Vor unseren Studien hatten die Experten angenommen, es gebe erhebliche Unterschiede bei den relativen Beißkräften der verschiedenen Krokodilarten: Fisch fressende Spezies mit schlanken Schnauzen und nadelspitzen Zähnen sollten nur geringe Kräfte brauchen, während andere mit robusten Schädeln und stumpferen Zähnen einen größeren Kraftaufwand benötigen sollten, um Knochen und Schalen zu zerbeißen. Doch unsere Daten enthüllten eine enorme Beißkraft bei allen Crocodylia. Die Statistik ergab, dass mit Ausnahme des Fische jagenden Gangesgavials alle Spezies auf das Körpergewicht bezogen die gleiche Beißkraft aufbringen – unabhängig davon, ob ihre Beutetiere hart oder weich sind und ob sie selbst schlankere oder massive Schnauzen haben. Die höheren der gemessenen Absolutwerte (bis 16400 Newton) stellen die Leistungen Fleisch fressender Säuger deutlich in den Schatten, etwa Tüpfelhyänen mit zirka 6200 Newton oder Löwen und Tiger mit 4400 Newton. Wir Menschen schaffen übrigens nicht einmal 900 Newton. Gelegentlich werde ich gefragt, ob ein Mensch den Fängen eines Krokodils oder eines Alligators entkommen könnte. Die Beißkraft eines großen Krokodils entspricht etwa dem Gewicht eines Autos. Wer also beim Bankdrücken einen Mittelklassewagen schafft, hätte gewisse Chancen.

Interessanterweise meinten alle Krokodilexperten, mit denen ich vor Beginn unseres Projekts gesprochen hatte, wilde Alligatoren – beutegierig und gestählt vom Existenzkampf in ihrer natürlichen Umgebung – dürften wesentlich fester zuschnappen als ihre oft verfetteten und lethargischen Artgenossen in Gefangenschaft. Unseren Studienergebnissen zufolge beißen hingegen beide relativ zu ihrem Körpergewicht mit derselben Gewalt zu. Diese wichtige Beobachtung bewies, dass wir unsere bei gefangenen Tieren gewonnenen Daten verwenden können, um die Fähigkeiten wild lebender Reptilien abzuschätzen – und außerdem die von fossilen Crocodylia. Für *Sarcosuchus* und andere ausgestorbene Riesenkrokodile berechneten wir Kräfte um 100000 Newton, was etwa dem Gewicht eines Zweiachs-Lkw entspricht. Am anderen Ende des Größenspektrums kalkulierten wir Werte für die kleinste bekannte Gattung, die kaum 80 Zentimeter langen *Procaimanoidea*, die vor etwa 40 Millionen Jahren lebten. Sie bissen wohl nur mit einer Kraft von rund 600 Newton zu. Mein ehemaliger Doktorand Paul Gignac, inzwischen Assistenzprofessor an der Oklahoma State University, berechnete mit unserem Datensatz die Entwicklung der Werte in der Evolutionsgeschichte der Krokodile.

Offenbar blieb die Anatomie der Kiefermuskulatur über die gesamten 85 Millionen Jahre, in denen die Crocodylia



Autor Gregory Erickson misst die Beißkraft eines Alligators.

bereits die Uferzonen beherrschen, praktisch unverändert. Dennoch haben sie im Verlauf der Evolution mehrmals dieselben fünf Schnauzen- und Gebisstypen entwickelt und die zugehörigen ökologischen Nischen besetzt. Laut unserer Hypothese ähnelt das Prinzip dieser Variabilität dem von modularen motorbetriebenen Gartengeräten. Braucht der Gärtner mehr Kraft bei der Arbeit, wählt er eine stärkere Antriebseinheit. Die Crocodylia erreichten das immer wieder mit der Vergrößerung ihrer Körpermasse. Um vom einfachen Schneiden zu spezielleren Anwendungen zu wechseln, tauscht der Gärtner den Werkzeugkopf aus. Entsprechend spezialisierten sich die Crocodylia auf unterschiedliche Beutetiere, indem sie gewissermaßen Vorsätze mit verschiedenen Zahn- und Kieferformen entwickelten.

Wo rohe Kräfte sinnvoll walten

Die Daten zu den Beißdrücken erzählen eine dazu passende Geschichte. Crocodylia schließen ihre Zähne mit einem Druck, den kein anderes heute lebendes Tier erreicht. Die Werte nehmen mit der Größe der Individuen zu und liegen zwischen 140 Megapascal und 2,5 Gigapascal. Das ist wesentlich höher als die bis dahin rekordverdächtigen geschätzten 147 Megapascal des gigantischen fossilen Fisches *Dunkleosteus*. Die flexible Ernährung, mit der die Krokodile so erfolgreich wurden, beruht anscheinend vor allem darauf, dass sie mit ihren Zähnen jede in ihrem Lebensraum häufig vorkommende Beute mühelos durchdringen. Verschiedene Formen ermöglichen bei stärkerer Spezialisierung höhere oder niedrigere Drücke – bei spitzer Gestalt etwa effektiveres Eindringen in Beutetiere mit weicherem Körper oder andererseits höhere Stabilität beim Aufprall auf harte Knochen oder Schalen.

Auf Basis dieser Informationen untersuchten meine Studenten und ich genauer, welche Faktoren zur Beißkraft beitragen. Gignac befasste sich 2010 mit der Anatomie der Kaumuskulatur von Mississippi-Alligatoren, um den Anteil

jedes einzelnen Muskels möglichst genau zu ermitteln. Alle Krokodile verfügen auf den ersten Blick über voluminöse Halsmuskeln. Genauer betrachtet handelt es sich um den *Musculus pterygoideus medialis* (»innerer Flügelmuskel«), der am Schließen (der Adduktion) des Kiefers beteiligt ist. Bei den meisten Wirbeltieren sind die medialen Pterygoidmuskeln vergleichsweise schwach entwickelt. Anders bei Krokodilen: Dort erzeugen sie 60 Prozent der Gesamtbeißkraft.

Andere Tiere mit kraftvollem Biss verfügen meist über gut entwickelte Schläfenmuskeln (*M. temporalis*) oberhalb des Kiefers. Bei uns Menschen wölben sie sich sichtbar auf, wenn wir die Zähne aufeinanderdrücken. Warum also haben sich bei Krokodilen gerade die inneren Flügel-muskeln so enorm vergrößert, die unter dem Kiefer sitzen? Der Grund ist vermutlich die Jagdtechnik: Krokodile pirschen sich im ufernahen Flachwasser nah an ihre Beute heran und schlagen dann plötzlich zu. Normalerweise ragen während dieser Schleichfahrt nur Nasenlöcher, Augen und Ohröffnungen aus dem Wasser. Der Rest des riesigen Körpers bleibt untergetaucht, bis das Raubtier auf sein ahnungsloses Opfer zuschießt. Krokodile können sich besser nähern, wenn ihre stärksten Kiefermuskeln unter der Wasserlinie verborgen bleiben und nicht heraus-schauen, wie es der weiter oben und somit an deutlich auffälliger Stelle gelegene Schläfenmuskel täte.

Gignacs Untersuchungen zu den beteiligten Muskeln brachten auch Licht in ein weiteres Rätsel. Bei unseren anfänglichen Tests lag die relative Beißkraft des schmalschnauzigen, mit nadelspitzen Zähnen bewaffneten Gangesgavials um 50 Prozent unter dem Durchschnitt der übrigen Krokodile. Als Gignac eines der Tiere sezier-te, fand er relativ schmale Pterygoidmuskeln und für ein Krokodil ausgesprochen starke Schläfenmuskeln. Diese Konfiguration ermöglicht einen besonders schnellen, wenngleich weniger kraftvollen Biss. Da der Gangesgavial die Krokodilspezies mit der größten Vorliebe für Fisch ist, vermuten wir, dass es für ihn weniger wichtig ist, stark zubeißen, als vielmehr seine flinken Beutetiere möglichst schnell zu fassen.

Diese Studien erklärten eine Beobachtung, die wir bei unseren Versuchen mit dem Leistenkrokodil gemacht hatten. Das gewaltige Tier hielt die Beißkraftsonde regelmäßig mehr als zehn Minuten lang fest zwischen den Zähnen. Eine Bewegung der Sonde während dieser Phase provozierte den Anstieg der Beißkraft auf Werte, die dem ersten starken Zuschnappen nahekommen. Ich habe selbst insgesamt 22 solcher Langzeitaltebisse aufgezeichnet und manchmal bis zu 25 Minuten gewartet, bis das Krokodil das Messgerät frei gab. Wir fragten uns, welchen Sinn das Verhalten hat und wodurch es provoziert wird.

Als wir den Kraftverlauf bei Tests mit wilden Alligatoren protokollierten, zeigte sich, dass die dauernde Haltekraft nur etwa zehn Prozent der maximalen Beißkraft beträgt. Dieses Verhalten hängt vermutlich damit zusammen, wie die Reptilien ihre Beute töten. Sie schlagen ihre Zähne kräftig hinein und ziehen das sicher erfasste Tier zum Ertränken ins tiefere Wasser. Wenn es sich wehrt, pressen die Alligatoren ihre Zähne erneut mit voller Gewalt in das

Fleisch. Gignac fand bei seinen anatomischen Studien eine bemerkenswert spezialisierte Kiefermuskulatur. Die Muskeln, die den Hauptteil der maximalen Beißkraft erzeugen, sind weiß gefärbt. Sie können blitzartig und kraftvoll kontrahieren, ermüden aber recht schnell, da sie nur gering durchblutet werden. Daneben fand mein Kollege rot bis rosa gefärbte Muskeln mit einem dichten Gefäß-netz und viel Sauerstoff bindendem Myoglobin, die ge-nügend Ausdauer für lange Haltebisse aufbringen. Diese zuvor so nicht beschriebenen roten Muskeln des Alligators könnten etwa jene zehn Prozent seiner maximalen Beißkraft aufbringen, gerade genug, um die Beute mit den Zähnen festzuhalten.

Von den Herrschern heutiger Gewässer zum König der Dinosaurier

Unsere Studienergebnisse liefern nicht nur zum Fressverhalten der Krokodile Erkenntnisse. Gignac und ich haben die Daten dazu verwendet, das erste plausible Modell zur Beißkraft des *Tyrannosaurus rex* zu entwickeln. Frühere Schätzungen beruhten auf diversen Daten von Alligatoren, Eidechsen und sogar Säugern. Es ist daher kaum erstaunlich, dass die ermittelten Werte für die Beißkraft dieses Raubsauriers stark variierten. Unser Modell hingegen beruht ausschließlich auf Daten von Archosauriern, also Krokodilen, Vögeln und ihren ausgestorbenen Verwandten. Wir kamen auf einen Wert von 35 000 Newton, etwa das Doppelte dessen, was die größten heute lebenden Krokodile erreichen. Zudem war der Zahnschlussdruck mit bis zu drei Gigapascal der höchste, der jemals für irgendein Tier ermittelt wurde. Auf der Basis dieser 2017 veröffentlichten neuen Schätzwerte konnten wir erklären, weshalb der Dinosaurier Fossilfunden zufolge in der Lage war, die Knochen seiner Beutetiere praktisch zu zerbröseln. Unter den heute lebenden Fleischfressern gelingt so ein Kunststück nur denjenigen, deren Zähne während des Kauens präzise aufeinanderpassen.

Krokodile sind höchst leistungsfähige Raubtiere. Zwar wissen wir heute mehr über die Gründe dafür, doch bleiben viele Fragen offen. Zum Beispiel könnte es sein, dass die Schnauzenform die Beißkraft der Tiere unter Wasser anders beeinflusst. Wir sollten unsere Experimente also dort wiederholen. Dazu müssen wir Beißkraftsonden entwickeln, die untergetaucht funktionieren, und mit Ingenieuren zusammenarbeiten, um zu erklären, wie die Viskosität des Wassers die Geschwindigkeit und die Kraft des Zuschnappens beeinflusst. Zusätzlich brauchen wir spezielle Sicherheitsvorkehrungen, denn Krokodile sind uns in ihrem angestammten Lebensraum klar überlegen. Wir sind optimistisch, all dies zu bewältigen – auch wenn uns der Weg dorthin noch reichlich Nerven kosten dürfte. ◀

QUELLEN

Erickson, G. M. et al.: Insights into the Ecology and Evolutionary Success of Crocodylians Revealed through Bite-Force and Tooth-Pressure Experimentation. In: *PloS One* 7, e31781, 2012

Gignac, P. M., Erickson, G. M.: The Biomechanics behind Extreme Osteophagy in *Tyrannosaurus rex*. In: *Scientific Reports* 7, 2012, 2017

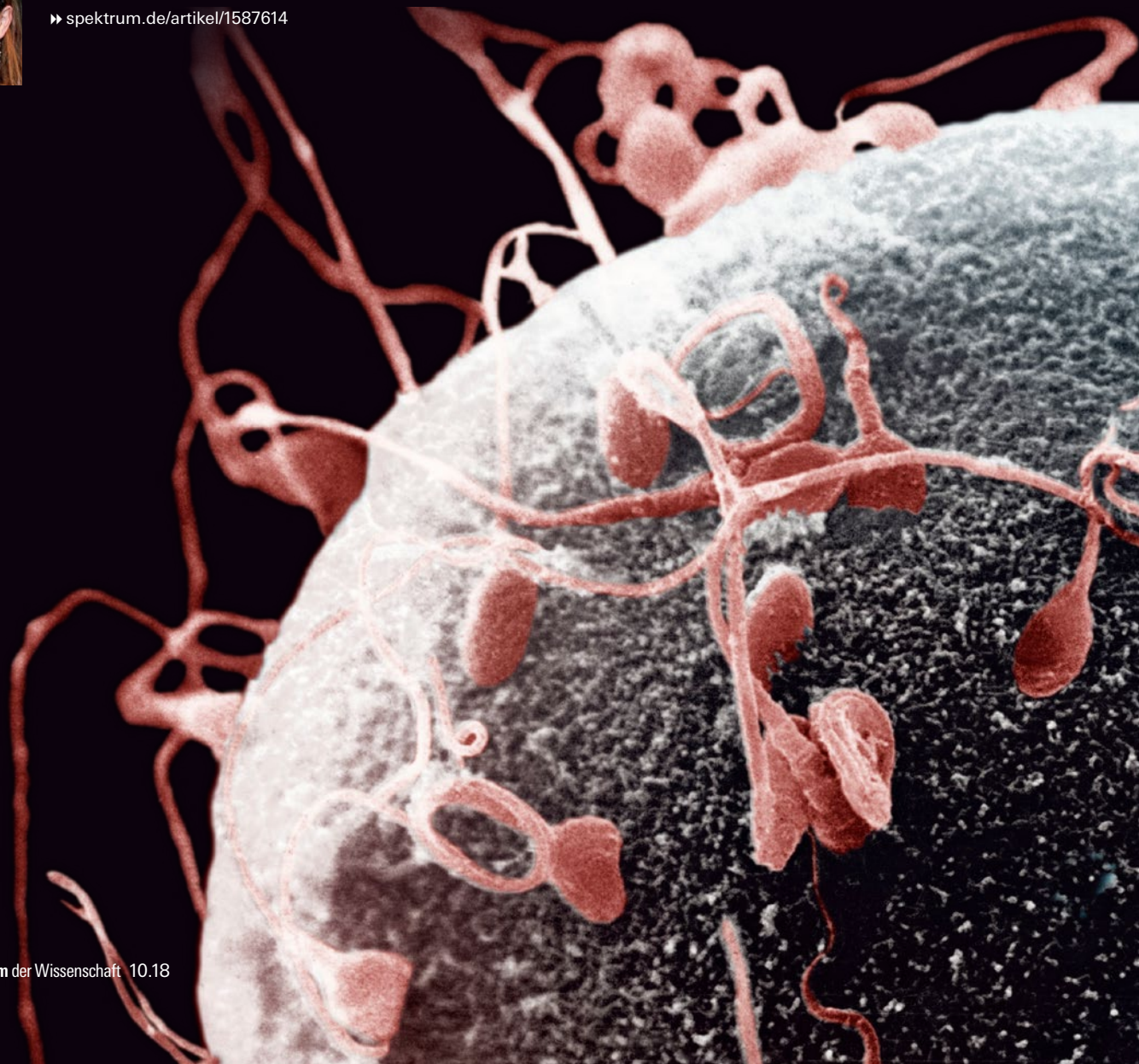
MEDIZIN FORTPFLANZUNG MIT ANDEREN MITTELN

Ausgereifte Körperzellen, etwa aus der Haut, lassen sich in Keimzellen umwandeln. Diese können nach der Befruchtung einen Embryo hervorbringen. Kündigt sich hier ein Durchbruch in der Reproduktionsmedizin an?



Karen Weintraub ist Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in den USA.

► spektrum.de/artikel/1587614



▶ An den Mäusen, die in den Käfigen von Katsuhiko Hayashis Labor umherhuschen, ist auf den ersten Blick nichts Ungewöhnliches: Sie verhalten sich genauso wie andere Mäuse auch. Doch die Herkunft der Nager ist äußerst bemerkenswert. Hayashi, Reproduktionsbiologe an der Kyushu-Universität in Japan, berichtete 2016 in der Fachzeitschrift »Nature« darüber. Wie seine Kollegen und er beschrieben, entstanden die Tiere nicht aus der Vereinigung von Spermien und Eizellen, sondern ihre Vorläuferzelle mütterlicherseits war eine umprogrammierte Hautzelle.

Diese wissenschaftliche Leistung rief weithin Erstaunen hervor und bestätigte eine Beobachtung aus dem Jahr 1996, als britische Embryologen das Klonrschaf »Dolly« erschaffen hatten. Jene Arbeit, ebenso wie noch frühere Klonierungsexperimente an Fröschen in den 1970er Jahren, hatte Belege dafür geliefert, dass sämtliche Körperzellen eines Tiers über die gleiche Erbinformation verfügen. Indem die Forscher Dolly aus Euterzellen eines Spender-tiers und Eizellen erzeugten, demonstrierten sie, dass diese Zellen die gleichen Gene besitzen – und dass die Unterschiede zwischen ihnen lediglich darin bestehen, welche Erbanlagen jeweils aktiv sind.

Für Hayashi und andere Wissenschaftler eröffneten sich damit neue Perspektiven in der Zellbiologie. Es erschien nun grundsätzlich möglich, beliebige Körperzellen von Säugetieren so umzuprogram-

AUF EINEN BLICK LEBEN AUS DEM REAGENZGLAS

- 1** Reproduktionsbiologen haben Hautzellen der Maus in Stamm- und diese wiederum in Keimzellen umgewandelt. Aus deren Befruchtung gingen einige gesunde Tiere hervor.
- 2** Wissenschaftler hoffen, dass solche Erfolge dazu beitragen werden, neue Verfahren der Reproduktionsmedizin zu entwickeln.
- 3** Die Möglichkeiten, die sich daraus ergeben, werfen allerdings schwierige ethische Fragen auf.

mieren, dass sie sich in ein Neuron, eine Eizelle oder irgendeinen anderen Zelltyp verwandeln. Hayashi und weitere Forscher nahmen das als Ansporn, sich der so genannten In-vitro-Gametogenese zuzuwenden, also dem Konzept, Ei- und Spermienzellen aus Körperzellen erwachsener Tiere herzustellen – im Reagenzglas.

Reproduktionsbiologen verfolgen die Fortschritte auf diesem Gebiet sehr aufmerksam, Paare mit unerfülltem Kinderwunsch schöpfen Hoffnung. Auf großes Interesse stoßen auch Ansätze, aus Stammzellen, die sich in jeden Zelltyp ausdifferenzieren können, Spermien-Vorläuferzellen zu erzeugen. Falls es gelänge, diese Techniken so weiterzuentwickeln, dass sie beim Menschen anwendbar sind, könnten Mediziner womöglich schadhafte Keimzellen durch solche ersetzen, die aus Blut- oder Hautzellen gewonnen werden. Dann wäre ein Mangel an gesunden

Diese eingefärbte Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zeigt Spermien auf der Oberfläche einer menschlichen Eizelle. Sie versuchen, in die Eizelle einzudringen, was während einer natürlichen Befruchtung nur einem von vielen Millionen Spermien gelingt.



Spermien, der heute die Fruchtbarkeit vieler Männer beeinträchtigt, kein Problem mehr. Und statt mit Ende dreißig ihre Chance auf Mutterschaft schwinden zu sehen, könnten sich Frauen praktisch jeden Alters etwas Blut abnehmen lassen, aus dessen Zellen dann im Labor funktionsfähige Eizellen entstünden. Selbst homosexuelle Paare könnten Kinder haben, deren biologische Eltern sie wären.

Noch allerdings liegen diese Möglichkeiten in ferner Zukunft. Die jahrelangen Forschungen am Tiermodell lassen sich bislang nicht in eine hinreichend robuste Methodik umsetzen. Zudem werfen sie eine Fülle ethischer Fragen auf, die sich auf die Anwendung beim Menschen beziehen. Das gilt auch für die Arbeiten von Hayashi und seinem Team.

Zurück in Richtung Stammzelle

Bei ihren Reproduktionsversuchen an Mäusen verknüpften die Forscher um Hayashi diverse frühere Entdeckungen. Im Jahr 2010 testeten sie, wie sich der »Reset-Knopf« von Körperzellen betätigen lässt, so dass diese in einen Zustand vor der Ausdifferenzierung zurückversetzt werden. Sie begannen mit einem Verfahren, das der Stammzellenforscher Shinya Yamanaka von der Universität Kyoto in den frühen 2000er Jahren entwickelt hatte und wofür er 2012 den Nobelpreis erhielt – nämlich der Erzeugung induzierter pluripotenter Stammzellen (iPS). Zunächst schabten Hayashi und seine Mitarbeiter Hautzellen vom Schwanz einer ausgewachsenen Maus ab. Diese behandelten sie mit einem chemischen Cocktail, der vier spezifische Gene enthielt und die Zellen ins iPS-Stadium zurückversetzte, so dass sie den frühesten Zellen eines Embryos ähnlich wurden.

Weiterhin nutzte die Forschergruppe genetische Studien des Entwicklungsbiologen Azim Surani (heute Leiter der Keimbahn- und Epigenomikforschung am Gurdon Institute der University of Cambridge) aus den frühen 2000er Jahren. Die Erkenntnisse daraus halfen, die iPS-Zellen zu Urkeimzellen umzuprogrammieren, aus denen männliche oder weibliche Keimzellen hervorgehen.

Doch an dieser Stelle trat ein Problem auf. Urkeimzellen verfügen – genau wie typische Körperzellen – über zwei vollständige Chromosomensätze, eine Eigenschaft, die man als »diploid« bezeichnet. Keimzellen hingegen besitzen nur einen einfachen Chromosomensatz und sind somit »haploid«. Damit eine Urkeimzelle eine Keimzelle hervorbringen kann, muss sie zweimal eine spezielle Form der Zellteilung durchlaufen, die Meiose, bei der die Anzahl der Chromosomen halbiert wird. Bei weiblichen Tieren beginnt die erste der beiden Teilungen noch vor der Geburt; die zweite vollzieht sich während der Geschlechtsreife, wenn die Eizellen unter dem Einfluss verschiedener Hormone ausreifen.

Nachdem Hayashi und seine Mitarbeiter die Urkeimzellen erzeugt hatten, mussten sie diese in lebende Mäuse zurückverpflanzen, damit dort deren Entwicklung fortschreitet. Mehr war zunächst nicht möglich. Denn befruchtungsfähige Eizellen im Reagenzglas zu erzeugen, ohne den Umweg über die Rückverpflanzung zu nehmen, erfordert es, sämtliche Reifungsschritte von der Urkeimzel-

le bis zur Eizelle zu verstehen und in Zellkultur nachzuvollziehen. Das gelang nicht – bis vor einigen Jahren.

Der Schlüssel, um dies zu erreichen, lag darin, die natürlichen Prozesse möglichst genau zu imitieren. Die Forscher um Hayashi verbrachten mehrere Jahre damit, das Kulturmedium zu optimieren, in dem sie die künstlich erzeugten Urkeimzellen reifen ließen. Einen Durchbruch erreichten sie, als sie Zellen aus dem Eierstockgewebe anderer Mäuseföten hinzufügten. Diese Zellen setzen verschiedene Hormone frei und schaffen so ein eierstockähnliches Milieu. Zusätzlich stellte das Team die Zähflüssigkeit des Mediums so ein, dass sie den Verhältnissen im Körperinnern glich. Beides führte dazu, dass sich die Urkeimzellen im Körper einer Maus »wähnten« und den Reifungsprozess durchliefen.

Die nächsten Schritte entsprachen dem üblichen Prozess einer In-vitro-Fertilisation (IVF). Zunächst befruchteten die Forscher die reifen Eizellen mit natürlichen Mäusespermien. Einige Tage später wählten sie einen geeigneten Embryo aus, entnahmen ihn mit einer winzigen Pipette und brachten ihn in die Gebärmutter einer Maus ein, die den heranwachsenden Fötus 20 Tage lang austrug. Es gab zahlreiche Fehlversuche infolge einer missglückten Einbettung des Embryos oder auf Grund von Fehl- oder Totgeburten, aber dann kamen nach und nach elf gesunde Jungtiere auf die Welt.

Das Verfahren ist bei Weitem noch nicht perfekt. Nur wenige Prozent jener stammzellähnlichen Zellen, die Hayashis Team erzeugte, überstanden den fünfwöchigen Reifungsprozess bis zur befruchtungsfähigen Eizelle. Der darauf folgende Schritt war ähnlich verlustreich. Nur aus einem Prozent der künstlich hergestellten Eizellen ging schließlich eine gesunde Maus hervor. Zum Vergleich: Wenn die Forscher erwachsenen Tieren Eizellen entnahmen und im Reagenzglas befruchteten, lag die Erfolgsquote bei 62 Prozent. Trotz dieses krassen Unterschieds ist klar geworden, dass die Methode grundsätzlich funktioniert. Die elf Jungtiere wuchsen zu ganz normalen Mäusen heran. Sie pflanzten sich sogar fort und brachten ihrerseits gesunden Nachwuchs auf die Welt.

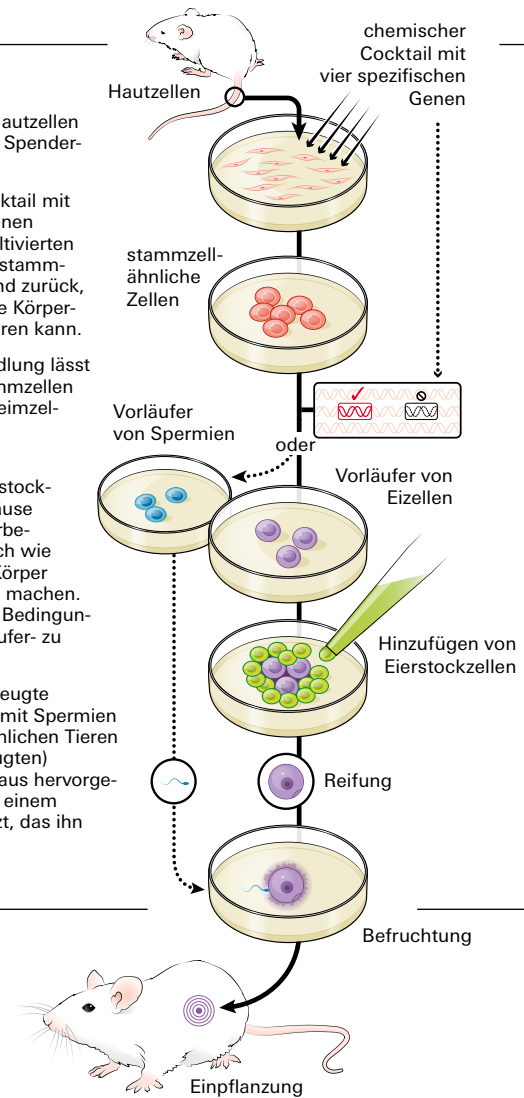
Ungewollte Kinderlosigkeit: Ein sehr weit verbreitetes Problem

Viele Menschen benötigen medizinische Hilfe, um sich ihren Kinderwunsch zu erfüllen. In den USA sind mehr als zehn Prozent der Männer und ein ähnlich hoher Anteil der Frauen unfruchtbar. In Deutschland bleibt etwa jede siebte Partnerschaft jahrelang ungewollt kinderlos. Die Methoden der künstlichen Befruchtung sind belastend und führen oft nicht zum Erfolg. Bei der In-vitro-Fertilisation (IVF) beispielsweise müssen die Frauen eine ein- bis zweiwöchige Hormonbehandlung über sich ergehen lassen, die dazu dient, mehrere Eizellen zu gewinnen. Einige davon werden im Labor mit Spermien des Partners befruchtet. Üblicherweise zwei der entstandenen frühen Embryonen setzt der Arzt dann in die Gebärmutter ein. Die Kosten können in den USA leicht 20 000 Dollar übersteigen und müssen überwiegend von den Paaren selbst getragen werden. In Deutschland übernehmen die Krankenkassen unter be-

Von der Hautzelle zum Jungtier

Ein Team um den Reproduktionsbiologen Katsuhiko Hayashi von der Kyushu University in Japan hat eine Methode entwickelt, um Hautzellen in befruchtungsfähige Eizellen umzuwandeln. Gelänge das auch beim Menschen, könnte es vielen ungewollt kinderlosen Paaren zu eigenem Nachwuchs verhelfen. Nach jahrelangem Experimentieren fanden die Forscher heraus, welche Bedingungen der Zellkultur erforderlich sind, um Hautzellen von Mäusen zunächst in einen stammzellähnlichen Zustand zurückzusetzen und aus diesem funktionsfähige Keimzellen hervorgehen zu lassen. Mit Techniken der In-vitro-Fertilisation ließen sich die so erzeugten Eizellen mit Spermien befruchten. Die entstehenden Embryonen wurden in Muttertiere verpflanzt, die den Nachwuchs austragen. Elf gesunde Jungtiere kamen auf diese Weise auf die Welt.

1. Forscher schaben Hautzellen vom Schwanz einer Spendermaus ab.
2. Ein chemischer Cocktail mit vier spezifischen Genen transformiert die kultivierten Hautzellen in einen stammzellähnlichen Zustand zurück, der sich in sämtliche Körpertypen differenzieren kann.
3. Eine weitere Behandlung lässt die induzierten Stammzellen zu Vorläufern von Keimzellen werden.
4. Die Forscher geben Zellen aus dem Eierstockgewebe anderer Mäuse hinzu, um die Kulturbedingungen so ähnlich wie möglich denen im Körper eines Muttertiers zu machen. Unter den richtigen Bedingungen reifen die Vorläufer- zu Keimzellen heran.
5. Auf diese Weise erzeugte Eizellen lassen sich mit Spermien (entweder von männlichen Tieren oder künstlich erzeugten) befruchten. Der daraus hervorgehende Embryo wird einem Muttertier eingesetzt, das ihn austrägt.



TAMI TOLPA / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2018

stimmten Voraussetzungen einen Teil der Kosten, doch auch hier müssen sich die Paare meist mit mehreren tausend Euro beteiligen. Die Erfolgsquote der so herbeigeführten Schwangerschaften liegt bei lediglich rund einem Drittel – oft wegen mangelhafter Qualität der Eizellen. Generell ist die IVF als Methode ungeeignet, wenn einer der Partner keine gesunden Keimzellen produziert.

Vor diesem Hintergrund ist verständlich, warum sich mit der Aussicht, Embryonen aus Blut- oder Hautzellen zu erzeugen, große Hoffnungen verbinden. Die leicht zu entnehmenden Körperzellen würden dabei zunächst in ein stammzellähnliches Stadium zurückversetzt und anschließend zu Keimzellen umgewandelt. Diese würden befruchtet und die entstehenden Keimlinge – wie bei der IVF – der Mutter eingesetzt. Das Kind hätte dann je zur Hälfte Erbanlagen von beiden Partnern, genau wie bei einer natürlichen Zeugung.

Hayashi betont allerdings, dass das Verfahren derzeit noch zu riskant ist, um beim Menschen angewendet zu werden. Erst wenn aus den künstlich erzeugten Eizellen genauso oft gesunde Embryonen hervorgehen wie aus natürlichen, seien die Risiken als akzeptabel anzusehen. Die Forscher müssen unter anderem belegen, dass sie die künstlich erzeugten Eizellen lange genug kultivieren können, um die Bedingungen der natürlichen Keimzellreifung hinreichend genau nachzuahmen. Das ist nicht trivial: Eizellen der Maus reifen in fünf Tagen, die des Menschen hingegen in rund 30. Zunächst aber müssen die Wissenschaftler überhaupt erst einmal nachweisen, dass die

Methode bei größeren Tieren funktioniert, die dem Menschen ähnlicher sind als Mäuse.

Um diese Hürde zu überwinden, arbeiten Hayashi und sein Team bereits mit Primaten, und zwar mit Krallenaffen. Doch das wirft verschiedene Probleme auf. Mäuse eignen sich sehr gut als Tiermodell, da die Eisprungperiode bei ihnen nur fünf Tage beträgt und die Trächtigkeitsdauer lediglich 20. Bei den Krallenaffen dauert die Tragzeit mehr als 140 Tage – entsprechend länger müssen die Wissenschaftler warten, um den Erfolg der Schwangerschaft beurteilen zu können. Zudem nimmt es bei Primaten viel mehr Zeit in Anspruch als bei Mäusen, bis die Urkeimzellen zu Eizellen herangereift sind. Dem Team ist es noch nicht gelungen, Kulturbedingungen zu entwickeln, unter denen die Zellen lange genug am Leben bleiben.

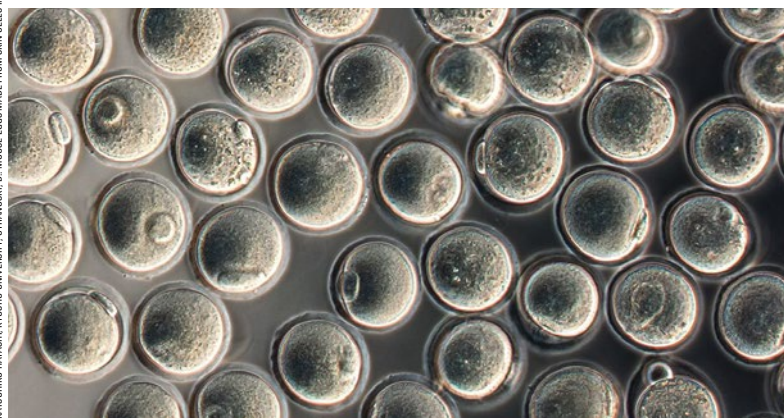
Bei ihren Versuchen mit Nagern benötigen die Forscher Eierstockzellen aus Mäuseföten, um die Urkeimzellen im Reagenzglas reifen zu lassen. Damit dies auch bei den Affen gelingt, wird wohl weit mehr Aufwand nötig sein, davon ist Hayashi überzeugt. Möglicherweise ist es erforderlich, die spezifischen Eierstockzellen zu identifizieren, welche die richtigen Reifungssignale aussenden, und diese dann gezielt aus Stammzellen zu erzeugen.

Der Entwicklungsbiologe Azim Surani hat mit verschiedenen Kombinationen solcher Zellen experimentiert, mit denen man das Milieu der Zellkultur positiv beeinflussen möchte. »Die heranreifenden Keimzellen entwickeln sich bis zu einem bestimmten Punkt, doch um diesen dann zu überwinden, benötigen sie ein sehr spezifisches Signal – einen Wechsel der Umgebungsbedingungen«, erklärt er. Seine Mitarbeiter und er haben zwar begründete Vermutungen, welche Zelltypen hier besonders wichtig sein könnten, aber der Erkenntnisprozess ist langsam und beschwerlich. Derzeit untersuchen sie abgetriebene menschliche Föten, um tiefere Einblicke darein zu bekommen, wie Eizellen während der Fetalperiode reifen. Sie nutzen auch keine Mäuse mehr als Tiermodelle, sondern Schweine, da deren Entwicklung jener des Menschen stärker ähnelt – und da Untersuchungen an Schweinen billiger sind als solche an Affen.

Die natürliche Qualitätskontrolle nutzen

Labormethoden zu optimieren, ist aber wohl nicht der einzige Weg, auf dem sich Fortschritte erzielen lassen. Manche Forscher meinen, es sei erfolgversprechender, die im Reagenzglas produzierten Zellen so früh wie möglich in den tierischen Organismus zurückzupflanzen. So ließen sich seine natürlichen Mechanismen der Qualitätskontrolle nutzen, um schadhafte Keimzellen zu eliminieren, so dass mehr Ressourcen für die verbleibenden gesunden zur Verfügung stehen. Renee Reijo Pera, Stammzellforscherin an der Montana State University, verfolgt diesen Ansatz bei ihren Versuchen mit Spermatozoen. In der Natur gelinge es nur besonders leistungsfähigen Spermien, eine Eizelle zu befruchten, erklärt die Wissenschaftlerin. Spermien in Zellkultur zu erzeugen, eliminiere diesen Selektionsprozess und erhöhe daher das Risiko, dass ein schadhafte Spermium zum Zug kommt. Weil der männliche Organismus sehr gut darin ist, minderwertige Spermatozoen auszusortieren, konzentriert sich Pera darauf, Spermienvorläuferzellen herzustellen und diese in Hoden von Versuchstieren ausreifen zu lassen. »Meiner Meinung nach sollte der Körper selbst die Selektion der Keimzellen übernehmen«, sagt sie, »in der Zellkultur treiben wir die Dinge möglicherweise in eine unnatürliche Richtung.«

Manche Kritiker meinen, künstlich generierte Eizellen oder Spermien sollten grundsätzlich nicht für die menschliche Fortpflanzung genutzt werden. Marcy Darnovsky beispielsweise etwa ist der Auffassung, im Labor erzeugte Keimzellen könnten niemals sicher genug sein, dass ihre Verwendung in der Humanmedizin gerechtfertigt wäre. Darnovsky ist geschäftsführende Direktorin des Center for Genetics and Society, einer Interessenvereinigung, die dem Einsatz gentechnischer Verfahren beim Menschen kritisch gegenübersteht. Zwar unterstützt sie nach eigenem Bekunden voll und ganz Forschungsarbeiten, die zu einem besseren Verständnis der Entwicklungsprozesse bei Mensch und Tier führen. Doch die reproduktionsmedizinische Anwendung künstlich hergestellter Keimzellen überschreitet für sie eine rote Linie. »Aus meiner Sicht gehen damit extreme biologische Risiken für die Kinder einher«, sagt sie und verweist auf Klonierungsexperimente an



Diese gesunden Mäuse sind aus im Labor erzeugten Eizellen und natürlichen Mäusespermien hervorgegangen (oben). Dabei war es besonders knifflig, stammzellähnliche Zellen (unten) zu Urkeim- und schließlich zu Keimzellen umzuwandeln.

verschiedenen Säugetieren, bei denen sich zahlreiche Embryonen fehlerhaft entwickelten und Nachkommen mit massiven Gesundheitsproblemen auf die Welt kamen. Darnovsky ist davon überzeugt, dass es politischer Anstrengungen bedarf, die sicherstellen, dass die einschlägige Forschung nicht zu weit geht.

Auch gibt es Bedenken dahingehend, wie sich die Fortschritte in der Keimzelltechnologie auf das Verständnis von Elternschaft auswirken könnten. Wenn sich die Zellen jedes Menschen in Spermien oder Eizellen umwandeln lassen, könnte man dann nicht beides zugleich tun und die entstehenden Zellen sich gegenseitig befruchten lassen, so dass der Spender der einzige »Elter« des Nachwuchses ist? Wird es dadurch möglich, abgeschilferte Hautzellen aus der Bettwäsche oder dem Taschentuch eines Menschen zu benutzen, um ein Kind von ihm zu erzeugen, ohne dass er davon weiß? George Daley, Dekan an der Harvard Medical School, veröffentlichte zusammen mit anderen im Jahr 2017 einen Artikel in der Zeitschrift »Science Translational Medicine«, in dem es hieß, mit dieser Technologie ließen sich Embryonen in bisher nicht gekannter Zahl herstellen, was zur Entwertung menschlichen Lebens und riesigen politischen Problemen führen könnte.

Ethische Bedenken gab es bislang noch immer, wenn es um die Erzeugung menschlicher Keimzellen im Reagenzglas (»In-vitro-Gametogenese«) ging – und sie haben dafür gesorgt, dass die finanzielle Förderung entsprechender Arbeiten sehr beschränkt blieb. Während die Obama-

Regierung sich der Stammzellforschung gegenüber aufgeschlossen zeigte als ihre Vorgängeradministration, erwarten viele, dass das Pendel unter Donald Trump wieder zurückschwingt. Auch in anderen Ländern behindern knappe Fördermittel und der erschwerte Zugang zu Gewebeprobe natürlicher Embryonen den Fortschritt, berichten Azim Surani und die Reproduktionsbiologin Helen Picton, die an der University of Leeds (Großbritannien) entsprechende Studien betreibt. Hayashi sagt ebenfalls, es sei in seinem Heimatland Japan ausgesprochen schwierig, Studien mit menschlichen Keimzellen durchzuführen, denn die japanischen Gesetze schränken die künstliche Befruchtung solcher Zellen stark ein, selbst in der Forschung. Hingegen berichtet Jacob Hanna, Stammzellforscher am israelischen Weizmann Institute of Science, dort seien die Regelungen weniger restriktiv, weil gesellschaftlich ein stärkeres Interesse daran bestehe, Reproduktionstechniken weiterzuentwickeln.

Selbst wenn aus den Arbeiten zur In-vitro-Gametogenese niemals ein menschliches Baby hervorgehen sollte, liefern sie nach Aussage vieler Wissenschaftler dennoch wichtige Erkenntnisse, die bei der Behandlung der Unfruchtbarkeit helfen können, das Verständnis der frühen Embryonalentwicklung vertiefen und Rückschlüsse darauf erlauben, wie Giftstoffe auf die Weitergabe des Erbguts einwirken. Neue Erkenntnisse darüber, wie sich qualitativ hochwertige Eizellen und Spermien identifizieren lassen, könnten beispielsweise die Erfolgsquote der IVF verbessern. Und die Weiterentwicklung der Methoden, um Keimzellen zu erzeugen, wird mehr Einblick darin liefern, woran deren Reifungsprozess im Organismus scheitern kann und wie dies zu Krankheiten oder Fehlbildungen führt.

Veränderte phänotypische Merkmale bei gleichem Informationsgehalt der Gene

Haut- und Blutzellen zu Keimzellen umzuprogrammieren, könnte zudem dazu beitragen, epigenetische Prozesse besser zu verstehen – also solche, die nicht die Nukleotidsequenz der Gene betreffen, aber deren Aktivität. Wenn wir im Detail wissen, wie sich Spermien und Eizellen entwickeln, sollte es uns leichter fallen, sie auf epigenetische Veränderungen hin zu untersuchen, etwa auf die Menge der Methylgruppen am DNA-Strang. Immer mehr Forscher fragen sich, warum bestimmte Merkmalsänderungen an die Nachkommen vererbt werden, ohne dass sich der Informationsgehalt der Gene verändert. In einer 2016 veröffentlichten Studie fanden Forscher beispielsweise heraus: Nachkommen von Holocaust-Überlebenden, die viele Jahre nach den traumatischen Erlebnissen ihrer Eltern geboren wurden, wiesen epigenetische Modifikationen im Bereich von Genen auf, die an der Regulation von Stresshormonen beteiligt sind. Auch Alterskrankheiten gehen oft mit epigenetischen Veränderungen einher, die im Lauf des Lebens fortschreiten. In sich entwickelnden Keimzellen wiederum werden epigenetische Markierungen großteils aus dem Genom entfernt; wäre genauer bekannt, wie, ließen sich vielleicht neue Therapieverfahren gegen altersbedingte Erkrankungen entwickeln.

Surani untersucht derzeit, wie Mitochondrien, die »Kraftwerke« der Zelle, die Reifung der Eizellen beeinflussen. Diese Zellorganellen durchlaufen im Fortpflanzungsprozess eine Selektion, bei welcher der Embryo nur das mitochondriale Genmaterial der Mutter erbt. Surani erforscht, wie dabei Defekte im mitochondrialen Erbgut korrigiert werden, und hofft, auf diesem Weg einiges über Fehlfunktionen des Energiestoffwechsels und damit zusammenhängende Erkrankungen zu erfahren.

In-vitro-Gametogenese könnte weiterhin dazu beitragen, Bestände von bedrohten Tierarten zu erhalten. Zurzeit testet Hayashi sein an Mäusen erprobtes Verfahren mit Zellen des Breitmaulnashorns, doch Fortschritte stellen sich nur langsam ein. Ein Grund dafür ist die viel längere Trächtigkeitsdauer von 16 Monaten, verglichen mit 20 Tagen bei den Mäusen.

Hayashi versteht die Bedenken dahingehend, dass Untersuchungen noch an sehr vielen menschlichen Keimzellen und Embryonen nötig sein werden, bis es gelingt, (induzierte) Stammzellen in funktionsfähige Eizellen und Spermien umzuwandeln. Und natürlich lässt sich das Risiko von Fehlbildungen beim Nachwuchs nie ganz ausschließen, wie er betont. Renee Reijo Pera hingegen ist der Auffassung, die ethischen Voraussetzungen dafür, mit menschlichen Keimzellen zu arbeiten, seien bereits gegeben. Sobald ein hinreichendes Maß an Sicherheit gewährleistet ist, meint sie, sei auch der praktische Einsatz in der assistierten Reproduktion vertretbar. Sie selbst ist nach einer Krebstherapie unfruchtbar und hält es für gerechtfertigt, zu untersuchen, ob Paaren mit unerfülltem Kinderwunsch auf diese Weise geholfen werden könnte.

Doch bleibt unklar, welche Prozeduren als sicher anzusehen sind und wer darüber befinden sollte. Als Wissenschaftler andere umstrittene Technologien wie die In-vitro-Fertilisation und das Genome-Editing-System CRISPR/Cas entwickelten, hat der Austausch zwischen Wissenschaftlern, Ethikern und Vertretern der Öffentlichkeit dazu beigetragen, Empfehlungen und Leitlinien für deren mögliche Anwendung zu entwickeln. Dasselbe wäre wohl auch bei der In-vitro-Gametogenese sinnvoll – möglichst, bevor die Anwendung am Menschen in greifbare Nähe rückt. »Die Gesellschaft wäre gut beraten, einen engagierten öffentlichen Diskurs über die ethischen Herausforderungen der In-vitro-Gametogenese zu führen«, schrieben Daley und seine Kollegen 2017 in »Science Translational Medicine«. »Wissenschaft und Medizin entwickeln sich heute enorm schnell, und wir können jederzeit mit überraschenden Durchbrüchen konfrontiert sein.« ◀

Karen Weintraub ist Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in den USA und schreibt regelmäßig für den »Scientific American«.

QUELLEN

Hayashi, K. et al.: Offspring from Oocytes Derived from in Vitro Primordial Germ Cell-Like Cells in Mice. In: Science 338, S. 971–975, 2012

Hikabe, O. et al.: Reconstitution in Vitro of the Entire Cycle of the Mouse Female Germ Line. In: Nature 539, S. 299–303, 2016

Hübner, K. et al.: Derivation of Oocytes from Mouse Embryonic Stem Cells. In: Science 300, S. 1251–1256, 2003

1918

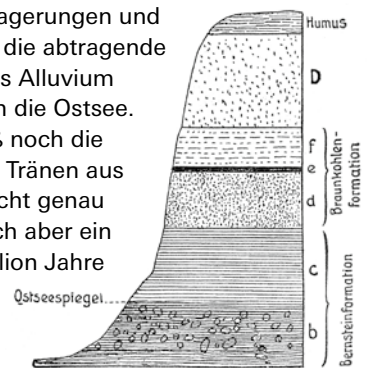
ALKOHOL IN DEN TANK

»Im Ausland müht man sich, Ersatzmittel für Benzin als Brennstoff für Benzinmotoren zu beschaffen. In Frankreich gilt als neues Mittel das ›Karburok‹ aus Steinkohle. [Dieses hat] einen widerlichen Geruch und greift die Metallteile an! In Norwegen und Schweden werden fast alle Kraftwagen mit Alkohol betrieben. In den Papierstofffabriken der Vereinigten Staaten [kann er] zum augenblicklichen Preise von 15 bis 20 Cent für eine Gallone gewonnen werden. Auch Pflanzenabfälle und Abflüsse der Zuckerfabriken dienen zur Bereitung von Alkohol. Da auch in Deutschland die Benzinerzeugung nach dem Kriege für unseren starken Bedarf als Treibmitteln für Motoren bei weitem nicht ausreichen wird, wäre auch für uns eine energischere Förderung der Sulfitspritzgewinnung erforderlich.« *Die Umschau 41, S. 516*

DIE LANGE REISE DES BERNSTEINS

»Die Nadelhölzer, aus deren Stämmen viele Jahrtausende hindurch das flüssig abgesonderte Harz niederträufelte, gehörten zu den Waldungen einer jener Epochen, die wir unter dem Namen der Tertiärformation zusammenfassen. Da aber der Bernstein nicht an primärer Lagerstätte ruht und die in ihm eingeschlossenen Organismen einen altertümlichen Charakter tragen, so dürfte er wohl dem ältesten Tertiär, dem Eozän, entstammen. Als dann in der Eiszeit nordische Gletscher sich weit nach Süden hin ausdehnten, unter sich den Boden mit fortreißend, kam auch der Bernstein in die diluvialen Ablagerungen und nach Schluß der Eiszeit durch die abtragende Tätigkeit des Wassers in die als Alluvium bezeichneten Schichten und in die Ostsee. Wie lange es wohl her ist, daß noch die Bernsteinkiefern ihre goldigen Tränen aus den Augen fallen ließen, ist nicht genau anzugeben. Immerhin lässt sich aber ein Zeitraum von einer halben Million Jahre annehmen.« *Kosmos 10, S. 244*

Aufbau einer Bernsteinformation.



1968

STEINZEITKUNST AM RHEIN

»Am Ende der letzten Eiszeit scheint Mitteleuropa nur ein Randgebiet der damaligen Kulturwelt gewesen zu sein. Dennoch war die Eiszeitkunst nicht unbekannt. Dr. Gerhard Bosinski [fand bei Gönnersdorf am Rhein] einen vor 13000 bis 15000 Jahren angelegten Platz, der dicht mit Schieferplatten wenig sorgsam bedeckt war. Gravierungen zeigen Menschen und Tiere, die mit demselben Naturalismus dargestellt sind wie die besten französischen Höhlenbilder. Noch sind die meisten Steine nicht untersucht, doch viele Mammute und andere große Säugetiere sind schon auf den ersten Blick zu erkennen, samt kreisförmigen Zielpunkten und fliegenden Pfeilen. Ebenso einwandfrei zu sehen sind mehrere mit knappem Realismus gezeichnete Liebespaare.« *Kosmos 10, S. 332–334*

Mammut-Ritzzeichnung in Schiefer.



44

UTOPIE ELEKTRIFIZIERTE STADT

»Ums Jahr 1980 wird nach Ansicht britischer Techniker die zur Zeit gebräuchliche Zentralheizung überholt sein. Wohnräume werden dann gegen jeden Wärmeverlust isoliert sein, so dass die von Glühbirnen, Haushaltsgeräten und dem menschlichen Körper ausgestrahlte Wärme ausreichen wird, um eine angenehme Temperatur zu erhalten. Weiter entwickelte [der technische Berater der Britischen Elektrizitätsgesellschaft] den Plan einer völlig elektrifizierten Stadt, in der Autos, Fabriken und Laufbänder als Trottoirs elektrisch betrieben werden. Die Post werde durch Druckluftrohre direkt zugestellt, und die Hausfrau werde von ausserhalb der Wohnung aus imstande sein, ihren Elektroherd übers Telefonkabel zu bedienen, um die Mahlzeiten vorzubereiten.« *Neuheiten und Erfindungen 383, S. 178*

ERSTE VERBRECHER-DATENBANK EUROPAS

»In Europa entsteht die wohl modernste Kriminaldatenbank zur Zeit in Wien. Zunächst soll das Strafregisteramt der Bundespolizeidirektion auf elektronische Datenverarbeitung umgestellt werden. Im Stadium der Organisationsplanung umgeben sich insbesondere die Übernahme der Meldeamtskartei sowie die Kartei des Paßamtes. In einem fortgeschrittenen Stadium ist on-line-Betrieb geplant.« *Die Umschau 21, S. 668*

Das schönste Gefühl:



im Spiegel der Wissenschaft

DHV-Symposium

07. November

Bonn



EVOLUTION AUF DEN SPUREN DER ÄLTESTEN FOSSILIEN

Neueste Fossilienfunde legen nahe, dass primitive Einzeller bereits vor mehr als vier Milliarden Jahren existierten. Das fordert die bisherige Vorstellung einer lebensfeindlichen frühen Erde heraus. Doch die versteinerten Ablagerungen sind umstritten.



Rebecca Boyle ist Wissenschaftsjournalistin in Saint Louis, Missouri.

► spektrum.de/artikel/1587618

AUF EINEN BLICK VERSTEINERTE URAHMEN

- 1** Lange Zeit glaubten Forscher, das Leben auf der Erde hätte sich frühestens vor 3,8 Milliarden Jahren entwickelt – nachdem Asteroideneinschläge abgenommen hatten und der Planet ausreichend abgekühlt war.
- 2** Jüngste Funde von Gesteinsablagerungen und Einschlüssen in Kristallen lassen jedoch vermuten: Die Vorfahren aller heute lebenden Organismen bevölkerten die Erde bereits kurz nach deren Entstehung.
- 3** Aber manche Forscher bezweifeln, dass die vermeintlichen Fossilien tatsächlich die versteinerten Reste früher Einzeller sind oder das Alter der Gesteine richtig bestimmt wurde.

► In der Region Pilbara im trockenheißen Nordwesten Australiens liegt eines der ältesten Gesteine der Erde. Verwitterungsprozesse haben hier im Lauf der Zeit eine Hügellandschaft geformt. Sie gehört zum so genannten Pilbara-Kraton, einem Teil der frühen kontinentalen Kruste der Erde, der vor rund 3,5 Milliarden Jahren entstand.

An einigen Hügeln tritt eine rot gebänderte Gesteinsablagerung zu Tage, das Apex Chert (lateinisch: apex = Gipfel; Chert: Fachbegriff für Kieselgestein). Unter dem Mikroskop erkennt man darin winzige Röhren. Manche sehen aus wie Felszeichnungen von einem Wirbelsturm, andere erinnern eher an platt gedrückte Würmer. Die Gesteine des Apex Chert gehören zu den umstrittensten, die Geologen jemals gesammelt haben. Möglicherweise enthalten sie Spuren der ältesten irdischen Lebensformen.

Im Dezember 2017 heizte eine Studie die jahrzehntelange Debatte um den Ursprung dieser Strukturen erneut an. Forscher um den Geochemiker John Valley von der University of Wisconsin verkündeten: Es handle sich tatsächlich um fossiles Leben, das vor 3,465 Milliarden Jahren existierte. Sollten sie Recht haben, dann hätte sich das Leben

auf der Erde erstaunlich früh in der turbulenten Jugend des Planeten diversifiziert. Die Einschlüsse im Apex Chert passen zu einer ganzen Reihe von Entdeckungen, welche die Geschichte unseres Planeten neu erzählen. 2017 haben Wissenschaftler unabhängig davon 3,77 bis 4,28 Milliarden Jahre alte Gesteine ausgegraben, in denen sich womöglich Reste der ersten Organismen finden.

Obwohl die Mikrofossilien und die damit verbundenen chemischen Indizien heftig umstritten sind, nähren sie Zweifel am bisherigen Bild der jungen Erde. Dem zufolge glich ihre Oberfläche während der ersten 500 Millionen Jahre nach ihrer Entstehung vor 4,55 Milliarden Jahren einer glühend heißen Hölle, die geprägt war von Vulkanismus und den Einschlägen zahlreicher Planetenbruchstücke. Geologen bezeichnen dieses Erdzeitalter als Hadaikum – in Anlehnung an den griechischen Gott Hades, den Herrscher der Unterwelt. Lange dachten Forscher, Leben sei erst entstanden, als vor etwa 3,8 Milliarden Jahren ein besonders heftiger Asteroidensturm nachließ, das »Große Bombardement« (**Spektrum** August 2018, S. 58).

Doch dieses Szenario bröckelt zusehends. Viele Geologen gehen inzwischen davon aus, dass bereits nach relativ

Die Suche nach den ersten Lebensformen führt Forscher in tektonisch besonders stabile Regionen wie die australische Pilbara. Hier finden sich Gesteine aus der Frühzeit der Erde und darin eingeschlossen fossile Mikroorganismen, die vor Milliarden von Jahren entstanden.

SERIE

Die junge Erde

Teil 1: August 2018

Asteroidenhagel: Streit um die frühe Erde
Adam Mann

Teil 2: September 2018

Zirkone – Zeugen der frühen Erdgeschichte
Donald R. Prothero

Teil 3: Oktober 2018

Auf den Spuren der ältesten Fossilien
Rebecca Boyle

kurzer Zeit gemäßigte Temperaturen auf der Erde herrschten und flüssiges Wasser ihre Oberfläche bedeckte. Das bislang älteste untersuchte Gestein weist darauf hin, dass die Erdkruste bereits vor 4,4 Milliarden Jahren hinreichend abgekühlt war und eine feste Schale bildete und weniger als 100 Millionen Jahre später der erste Ozean entstand. Es gab keinen verheerenden Asteroidenhagel; vielmehr ließen die kosmischen Einschläge vermutlich langsam nach, als die Planeten in unserem Sonnensystem ihre heutige Anordnung einnahmen. »Schon recht früh ähnelte die Erde der uns bekannten. Sie könnte eine bewohnbare Welt gewesen sein, die irgendeine Form von Leben beherbergte«, glaubt Elizabeth Bell, Geochemikerin an der University of California in Los Angeles.

Kurz nach der Geburt der Sonne verdichteten sich kosmischer Staub und Gesteinsbrocken und formten so die Erde. Der noch junge Planet wurde permanent von kleinen Überresten aus dem All getroffen, wodurch er sich aufheizte und mit radioaktiven Elementen anreicherte, die beim Zerfall im Inneren des Planeten zusätzlich Wärme abgaben (und noch heute einen Großteil der Erdwärme erzeugen). Zu jener Zeit war die Erde kein Gesteinsplanet, sondern vielmehr ein glühender Ball, bedeckt von Lavaozeanen.

Wissenschaftler nehmen an, dass die Urerde, etwa 50 Millionen Jahre nachdem sie entstanden war, mit

unvorstellbarer Wucht mit einem Planeten kollidierte, der etwa so groß war wie der Mars. Dabei schmolz ihre Oberfläche vollständig, und aus den Trümmerteilen des Zusammenstoßes entstand vermutlich der Mond. Auch danach fielen immer wieder Meteoriten auf die Erde, einige hinterließen Krater mit bis zu 1000 Kilometer Durchmesser. Nach traditioneller Vorstellung vom Hadaikum erreichten die Einschläge ihren Höhepunkt im Großen Bombardement vor 3,8 Milliarden Jahren, als zahlreiche Asteroiden das innere Sonnensystem passierten. In jener Frühphase der Erde hätte kein Leben Fuß fassen können.

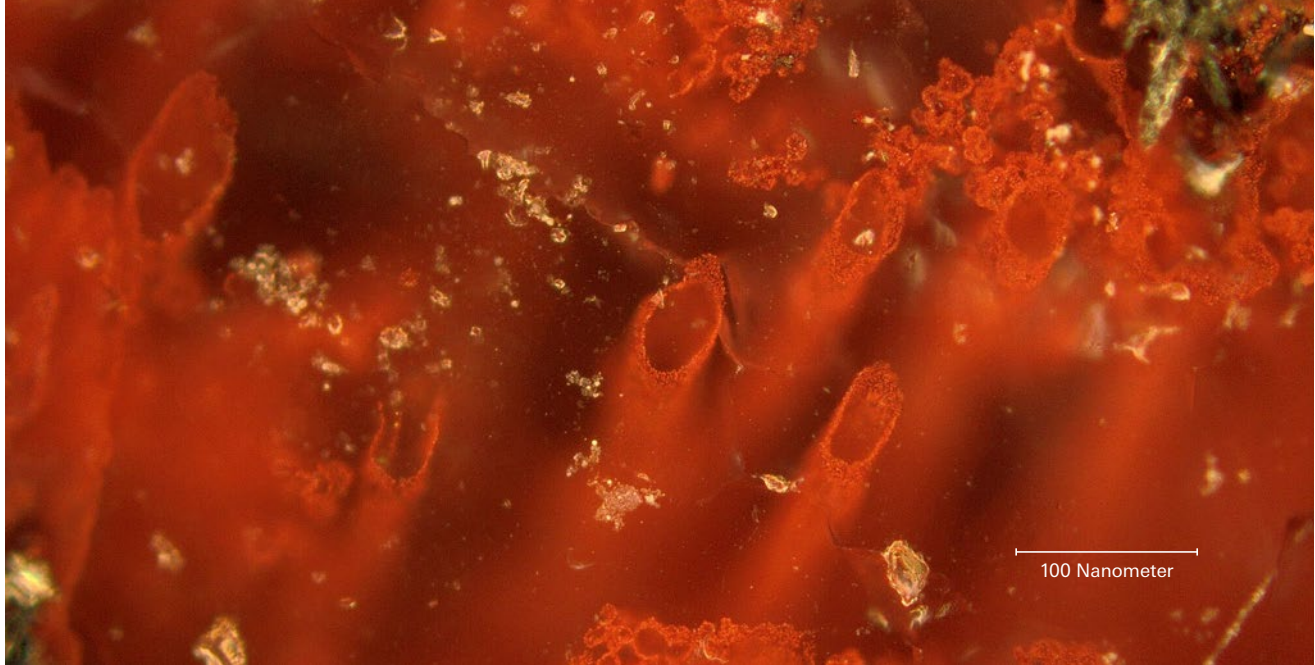
Doch winzige, in Gestein eingeschlossene Kristalle, so genannte Zirkone, wecken immer größere Zweifel an diesem Modell. Sie künden von einer kühleren, feuchteren und damit lebensfreundlicheren Welt – möglicherweise bereits vor 4,3 Milliarden Jahren (**Spektrum** September 2018, S. 56). Jüngste Fossilienfunde wie der in der Pilbara erhärten diese Vermutung.

Die Schätzungen für den bislang ältesten und zugleich höchst umstrittenen Hinweis auf irdisches Leben reichen von 3,77 bis 4,28 Milliarden Jahre vor heute. Im März 2017 beschrieben der Geochemiker Dominic Papineau vom University College London und sein Doktorand Matthew Dodd röhrenförmige Fossilien im Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel – einer Felsformation in der kanadischen Provinz Quebec, die einst Teil des Ozeanbodens war. Die darin



2016 berichteten australische Geologen um Allen Nutman (unten) von einem sensationellen Fund im grönländischen Isua-Grünsteingürtel: Sie waren dort auf schichtartige Ablagerungen gestoßen (links), die typisch für Stromatolithen sind. Bereits recht komplexe Einzeller sollen diese vor 3,7 Milliarden Jahren im Meer erschaffen haben.





Diese Strukturen aus Eisenoxid fanden Forscher in Gesteinen in der kanadischen Provinz Quebec. Sind sie die Überreste von Mikroorganismen, die vor mehr als vier Milliarden Jahren an heißen Quellen in der Tiefsee lebten?

eingeschlossenen Fossilien sind nur etwa halb so dick wie ein menschliches Haar und lediglich 0,5 Millimeter lang. Sie bestehen aus Hämatit, einem Eisenoxid, und könnten die versteinerten Überreste einer Gemeinschaft von Mikroorganismen sein. Sie hätten gallertartige, rostrote Matten um Schlotte herum gebildet, wie man sie heute auch an hydrothermalen Quellen in der Tiefsee findet, glaubt Dodd.

Graphitspuren im Gestein könnten biologischen Ursprungs sein – oder auch nicht

Gleich neben den versteinerten Röhrchen fanden die Forscher Graphit und winzige Ringe aus Karbonat (CO_3^{2-} haltigen Salzen), mit organischen Verbindungen darin. Diese rosettenförmigen Ablagerungen könnten zwar auch durch verschiedene abiotische Prozesse entstanden sein, doch das Vorhandensein des Minerals Apatit (Kalziumphosphat) war ein deutliches Indiz für einen biologischen Ursprung. Ferner deutete das Verhältnis der stabilen Kohlenstoffisotope ^{12}C und ^{13}C im Graphit auf einstiges Leben hin; biologische Prozesse bevorzugen in der Regel das leichtere Isotop ^{12}C . Insgesamt, so Dodd, sprachen die Einschlüsse im Gestein und die chemische Zusammensetzung ihrer Umgebung für die Überreste einer mikrobiellen Kolonie an einer hydrothermalen Quelle.

Obwohl Geologen noch über das genaue Alter des Gesteins streiten, sind sie sich einig, dass die Eisenablagerungen zu den ältesten auf der Erde gehören. Demnach würden auch die Fossilien aus einer Zeit stammen, in der viele Wissenschaftler Leben bislang nicht für möglich hielten.

Im September 2017 veröffentlichten Forscher aus Japan eine Untersuchung von Graphitpartikeln aus 3,95 Milliarden Jahre altem Sedimentgestein im kanadischen Labrador. Yuji Sano und Tsuyoshi Komiya von der Universität Tokio analysierten ebenfalls das Verhältnis der Kohlenstoff-

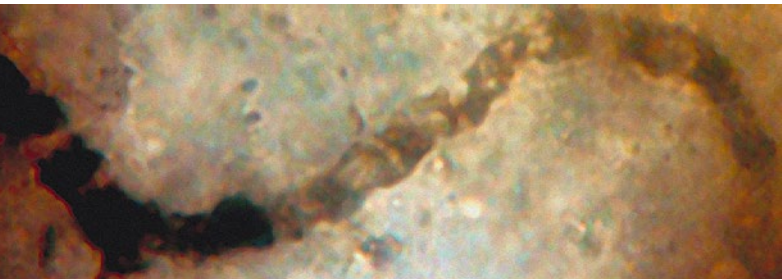
isotope im Graphit und interpretierten sie als Hinweise auf frühes Leben. Aber: In der Umgebung der Graphitpartikel gab es keinerlei Strukturen, die Fossilien ähnelten. Zudem ist der Ursprung des Gesteins unklar, so dass der Kohlenstoff jünger sein könnte als angenommen.

Weiter östlich, im Südwesten Grönlands, war zuvor ein anderes Forscherteam ebenfalls auf Spuren uralter Lebensformen gestoßen. Im August 2016 berichteten Allen Nutman von der University of Wollongong in Australien und seine Kollegen über die Entdeckung von Stromatolithen, versteinerten Bakterienmatten, die vor 3,7 Milliarden Jahren entstanden sein sollen (Foto links).

Nicht wenige Geologen haben diesbezüglich jedoch ihre Zweifel. Nutmans vermeintliche Fossilien stammen aus dem so genannten Isua-Gneis, der zu den ältesten Sedimentgesteinen der Erde zählt, aber schwer zu interpretieren ist. So wie die Karbonatringe im Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel das Resultat abiotischer Reaktionen sein könnten, haben womöglich einfache chemische Prozesse ohne jegliches Zutun von Organismen schichtförmige Strukturen erschaffen, die lediglich so aussehen wie Stromatolithen. Zudem hat sich an beiden Fundorten die mineralogische Zusammensetzung des Gesteins durch Temperatur- und Druckschwankungen im Lauf der Jahrmilliarden verändert.

John Valley glaubt zwar nicht, dass die Studien unsauber durchgeführt wurden. Aber genauso wenig sieht er darin einen Beweis für die Existenz von Leben vor mindestens 3,7 Milliarden Jahren: »Alles, was wir sagen können, ist, dass die Einschlüsse im Isua-Gneis wie Stromatolithen aussehen, was sehr verführerisch ist.« Bei den von ihm untersuchten Mikrofossilien aus dem Pilbara-Kraton zeigt sich Valley dagegen weit weniger zurückhaltend.

3,465 Milliarden Jahre lang ruhten die Fossilien in der Pilbara, ehe Geologen sie aus dem Gestein meißelten und nach Kalifornien verschifften. Der Paläobiologe William Schopf von der University of California in Los Angeles berichtete 1993 von seiner Entdeckung und identifizierte in den Gesteinsproben elf unterschiedliche Gruppen von Mikroorganismen. Kritiker wandten sogleich ein, die Strukturen könnten auch von geochemischen Prozessen



J. WILLIAM SCHOPF, UCLA

1993 entdeckte der Biologe William Schopf Strukturen im Gestein der australischen Region Pilbara, die an Bakterienfilamente erinnern. Jüngste Analysen bestätigen Schopfs strittigen Befund, dass es sich um Mikrofossilien handelt.

herrühren. Seither debattieren Forscher über deren Ursprung. 2017 schickte Schopf eine Probe an Valley, der ein Experte für extrem genaue Isotopenanalysen ist.

In Valleys Labor stellte sich heraus, dass einige der Fossilien dasselbe Kohlenstoffisotopenverhältnis aufweisen wie heute auf der Erde vorkommende phototrophe Bakterien, die wie Pflanzen Sonnenlicht nutzen, um ihren Energiebedarf zu decken. Drei weitere Typen von Fossilien zeigten die gleiche Isotopenzusammensetzung wie Bakterien, die Methan produzieren oder verwerten. Und die Isotopenverhältnisse korrelieren mit bestimmten Gruppen von Bakterien, die Schopf bereits zuvor bestimmt hatte. Damit, so Valley, handle es sich um die ältesten Strukturen, die sowohl chemisch als auch von ihrer Morphologie her versteinerten Lebenwesen gleichen.

Es mögen nicht die ältesten Fossilien sein – sofern man die Interpretationen von Dodd, Komiya und Nutman akzeptiert –, aber die von Schopf und Valley analysierten Gesteine sind auf andere Weise einzigartig: Sie zeugen von Diversität. Derart verschiedene Isotopenverhältnisse deuten auf eine komplexe Gemeinschaft primitiver Einzeller hin, die sich über einen längeren Zeitraum entwickelt haben muss. Sprich, die einzelnen Organismen müssen bereits viel früher als vor 3,465 Milliarden Jahren entstanden sein.

Die ersten Hinweise auf eine vermutlich lebensfreundliche junge Erde stammen keineswegs von Fossilien. Schon 2001 lieferten Gesteine Indizien hierfür. Damals stieß Valley auf Zirkone, die nahelegten, dass unser Planet bereits vor 4,4 Milliarden Jahren eine feste Kruste besaß.

Zirkone sind Mineralien, die Silizium, Sauerstoff, Zirkonium und manchmal noch weitere Elemente enthalten. Sie kristallisieren, wenn Magma abkühlt, und im Gegensatz zu den prominenteren Diamanten sind sie tatsächlich für die Ewigkeit: Sie können das Gestein überleben, in dem sie entstanden sind, und widerstehen gewaltigen Drücken sowie Verwitterung. Als einzige Gesteine, die das Hadaikum überstanden haben, sind Zirkone für Geologen unschätzbar wertvolle Zeitkapseln.

Valley fand einige Zirkone in den Jack Hills in Westaustralien und bestimmte das Isotopenverhältnis der Sauerstoffatome in den Kristallen. Seine Messungen ergaben, dass ein Teil der Erdkruste zu jener Zeit bereits

hinreichend kühl und fest gewesen sein muss, um flüssiges Wasser zu beherbergen – 400 Millionen Jahre bevor sich die frühesten bekannten Sedimentgesteine bildeten. Und wenn es flüssiges Wasser gab, dann vermutlich auch ganze Ozeane. Laut Valley war das Hadaikum nicht so höllisch wie gedacht. Zwar habe es Vulkane gegeben, aber die waren wahrscheinlich von Ozeanen umschlungen, und zumindest stellenweise bestand die Oberfläche aus trockener Landmasse. Zirkone aus anderen Gegenden lieferten ähnliche Ergebnisse.

Einige der Kristalle deuten sogar auf Leben in dieser Frühphase der Erde hin. 2015 fanden Bell und ihre Kollegen Graphit, eingebettet in winzige, 4,1 Milliarden Jahre alte Zirkone aus den Jack Hills. Isotopenmessungen ließen auch hier einen biologischen Ursprung zu – wenngleich das Ergebnis heftig umstritten ist. Es gäbe noch andere Erklärungen für die Kohlenstoffeinschlüsse in den Zirkonen als Leben, so Bell. Sie fügt jedoch hinzu: »Ich würde sie als den eindeutigsten Beweis für irgendeine Art von Fossil oder eine biogene Struktur betrachten.«

Wenn die Hinweise aus den alten Gesteinen korrekt sind, dann gab es schon fast immer und überall Leben. Nahezu an allen Orten, wo Wissenschaftler suchen, stoßen sie auf Anzeichen für Leben und die damit verbundenen chemischen Prozesse. Seine ersten Formen scheinen also keineswegs wählerisch und fragil gewesen zu sein, sondern unter schwierigsten Bedingungen Fuß gefasst zu haben. »Das Leben entwickelte sich bereits, als es die schlimmsten Einschläge auf der Erde in ihrer Geschichte gab«, sagt der Planetenforscher Bill Bottke vom Southwest Research Institute in Boulder, Colorado.

Aber vielleicht war auch alles ganz anders, und diese Einschläge fanden gar nicht so häufig statt wie bislang vermutet. In der Vergangenheit bombardierten Asteroiden die Erde und andere Himmelskörper. Auf Mond, Mars, Venus, Merkur – überall haben sie Krater hinterlassen. Die



Dieser Zirkon stammt aus den Jack Hills in Australien und ist etwa 4,1 Milliarden Jahre alt. Das Röntgenbild offenbart Graphiteinschlüsse in dem winzigen Kristall. Sie könnten ein Beweis dafür sein, dass die Erde schon bald nach ihrer Entstehung belebt war.

CRYSTAL SHI, STANFORD UNIVERSITY SCHOOL OF EARTH, ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCES; BELL, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY; PHOTOGRAPHY COURTESY OF BELL. IN: PNAS 112, S. 14518-14521, 2015. MOVIES Y BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Frage ist: Wann fand dieses Bombardement statt, und wie lange dauerte es an?

Basierend auf Analysen der Gesteinsproben, welche die Astronauten der Apollo-Missionen vom Mond zur Erde brachten, kamen Forscher zunächst zu dem Schluss, dass es während des Hadaikums zwei Phasen gegeben haben muss, die von kosmischen Kollisionen geprägt waren. In der ersten entstanden die Planeten unseres Sonnensystems. Sie schluckten die größten Asteroiden, die übrigen versammelten sich im Asteroidengürtel zwischen Jupiter und Mars. Die zweite Phase setzte zirka 500 Millionen Jahre nach der Geburt des Sonnensystems ein und endete rund 250 Millionen Jahre später, vor 3,8 Milliarden Jahren. Sie wird als Großes Bombardement oder lunare Katastrophe bezeichnet.

Viele Forscher glauben, die Geschichte der frühen Erde müsse neu geschrieben werden

Das Verhältnis von Kalium- und Argonisotopen in Mondgesteinen legt nahe, dass Teile des Erdtrabanten rund 400 Millionen Jahre nach seiner Entstehung plötzlich schmolzen. Wissenschaftler vermuten daher einen gewaltigen Asteroideneinschlag, der den Mond einst um ein Haar gesprengt hätte.

Zirkone liefern ebenfalls mögliche Hinweise auf ein kosmisches Trommelfeuer. Einige von ihnen enthalten »geschockte« Mineralien, die nur bei starker Hitze und unter hohen Drücken entstehen – etwa bei einem Asteroideneinschlag. Viele dieser Zirkone sind jünger als drei Milliarden Jahre. Aber Bell fand einen, der auf eine schnelle, extreme Erhitzung vor 3,9 Milliarden Jahren hindeutet – und damit ein Indiz für das Große Bombardement ist. Um den Zusammenhang zu belegen, müsse man weitere Zirkone von anderen Fundorten untersuchen, meint Bell. Laut Aaron Cavosie von der Curtin University in Australien gibt es bislang jedoch keine weiteren derartigen Hinweise.

2016 untersuchte Patrick Boehnke von der University of Chicago zusammen mit Mark Harrison von der University of California in Los Angeles die Proben der Apollo-Missionen erneut. Jahrzehntlang galten diese als Hauptbeweis für das Große Bombardement. Isotopenmessungen der Forscher ergaben hingegen, dass das Gestein mehrmals »geschockt« worden sein könnte, seit es bei der Geburt des Mondes kristallisiert war. Dadurch würden die Proben jünger erscheinen, als sie tatsächlich sind. Außerdem stammen die Apollo-Gesteine alle aus einem kleinen Bereich. So brachten die sechs Apollo-Missionen möglicherweise allesamt die Trümmer eines einzigen Asteroideneinschlags zur Erde.

Darüber hinaus haben Sonden wie das Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) und der Lunar Reconnaissance Orbiter rund 100 zuvor unbekannte Mondkrater aufgespürt, die unter anderem zeigen, dass es bereits vor 4,3 Milliarden Jahren – und damit lange vor der lunaren Katastrophe – ein Maximum an Einschlägen gab. »Die Daten unterschiedlichster Messungen sprechen gegen das Große Bombardement vor knapp vier Milliarden Jahren«, so die Planetenforscherin Nicolle Zellner vom Albion College in Michigan.

Bottke favorisiert als alternative Erklärung eine langsame Zunahme des Beschusses aus dem All, gefolgt von einem ebenso allmählichen Rückgang. Andere Wissenschaftler glauben, ein spätes Bombardement hätte überhaupt nicht stattgefunden: Ihrer Ansicht nach sind die Mondkrater und jene auf weiteren felsigen Himmelskörpern Narben, die aus der ersten Einschlagsphase stammen, als die Planeten entstanden.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / SCOTTORR

Wenn sich die neusten Erkenntnisse zur Frühgeschichte von Mond und Erde bewahrheiten und vor 3,9 Milliarden Jahren nicht der gesamte Planet durch Asteroideneinschläge sterilisiert wurde und falls es sich bei den jüngsten Funden tatsächlich um fossile Spuren primitiver Einzeller handeln sollte, dann wären die Vorfahren aller Lebensformen sehr viel älter als bislang angenommen. Sie könnten sich entwickelt haben, sobald der Planet weit genug abgekühlt war und sich flüssiges Wasser an seiner Oberfläche sammelte. »In der Schule lernten wir, dass es Milliarden von Jahren dauern würde, bis Leben entsteht«, sagt Valley. »Heute halte ich das innerhalb weniger Millionen Jahre für möglich, nachdem die Erde bewohnbar wurde. Geologisch betrachtet ist das nur ein Wimpernschlag, aus Sicht einer Mikrobe jedoch sehr viel Zeit. Es gibt keinen Grund dafür, dass das Leben nicht bereits vor 4,3 Milliarden Jahren entstanden sein könnte.« ◀

QUELLEN

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

Dodd, M. S. et al.: Evidence for Early Life in Earth's Oldest Hydrothermal Vent Precipitates. In: Nature 453, S. 60–64, 2017

Nutman, A. P. et al.: Rapid Emergence of Life Shown by Discovery of 3,700-Million-Year-Old Microbial Structures. In: Nature 537, S. 535–538, 2016

Schopf, J. W. et al.: SIMS Analyses of the Oldest Known Assemblage of Microfossils Document their Taxon-Related Carbon Isotope Compositions. In: PNAS 115, S. 53–58, 2018

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

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Fossil Discoveries Challenge Ideas About Earth's Start« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

 **Quanta**magazine

ARKTIS AUF DÜNNEM EIS

Hohe Temperaturen, schmelzendes Eis, ansteigende Luftfeuchtigkeit: Das Klima der Arktis stellt einen Extremwert nach dem anderen auf – mit erheblichen Folgen für das Wetter rund um den Globus.



Jennifer A. Francis ist Professorin im Fachbereich Meeres- und Küstenforschung an der Rutgers University im US-Bundesstaat New Jersey. Sie erforscht den Klimawandel in der Arktis und seinen Einfluss auf das globale Wetter.

► spektrum.de/artikel/1587622

► 25 Wissenschaftler, darunter ich, erlebten 2003 eine Offenbarung. Die National Science Foundation hatte uns zu einer Klausurtagung über die Arktis in den Wintersportort Big Sky in Montana eingeladen. Jeder von uns hatte sich in der Polarforschung auf sein eigenes, eng gefasstes Spezialgebiet konzentriert. Als wir uns über unsere verschiedenen Blickwinkel austauschten, kamen wir zu einer beängstigenden Erkenntnis: Alle Veränderungen, die jeder Einzelne von uns beobachtet hatte, hingen miteinander zusammen. Gemeinsam ergaben sie ein stimmiges, alarmierendes Bild – die gesamte Arktis steuert auf einen prekären Zustand zu. Und es schien bereits damals kaum möglich, etwas dagegen zu tun.

Wir veröffentlichten einen Fachartikel mit einer unfassbaren, kontroversen Schlussfolgerung: Bei der Geschwindigkeit, mit der sich der Wandel vollzog, bestand die Möglichkeit, dass das Nordpolarmeer innerhalb der kommenden 100 Jahre im Sommer eisfrei sein würde. Das hatte es seit Jahrtausenden nicht gegeben. Heute mache

Schmelzendes Eis ergießt sich im Sorgfjord auf Spitzbergen in das Nordpolarmeer – ein eindrucksvolles Naturschauspiel mit drastischen Auswirkungen auch in unseren gemäßigten Breiten.

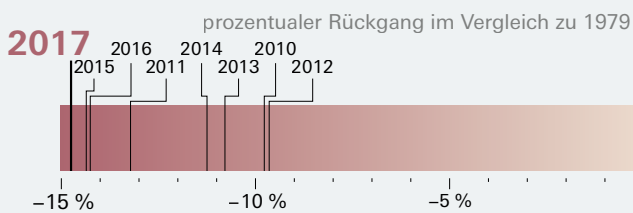
AUF EINEN BLICK KLIMAFAKTOR ARKTIS

- 1** Das Klima der Arktis verändert sich rapide und hat in den letzten Jahren über ein Dutzend neue Extremwerte hervorgebracht.
- 2** Viele Prozesse verstärken sich gegenseitig: Das Meereis schwindet, die Lufttemperatur steigt, die Permafrostböden tauen, und die Gletscher schmelzen.
- 3** Die Erwärmung der Arktis beeinflusst in der Atmosphäre den Jetstream sowie den Polarwirbel und sorgt so rund um den Globus für längere Hitzewellen, aber auch Kälteeinbrüche und Starkregenfälle.

Rekordverdächtige Arktis

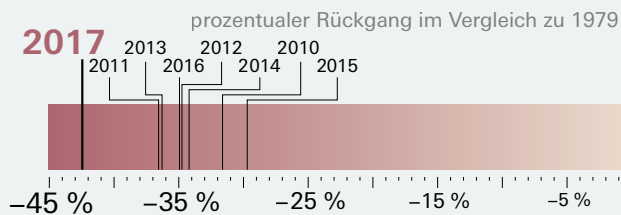
Die Arktis verändert sich dramatisch, und die Auswirkungen werden Millionen von Menschen weltweit betreffen. Allein in den vergangenen drei Jahren wurden im hohen Norden zahlreiche neue Extremwerte gemessen, welche die bisherigen teilweise um Längen übertreffen. Sechs besonders eindrückliche Beispiele zeigen wir hier. Die roten Zahlen über den Balkendiagrammen geben die Jahre mit den höchsten beziehungsweise tiefsten jemals gemessenen Werten an. Die Daten für die Jahre 2010 bis 2017 spiegeln den Trend in Richtung der Rekordwerte wider. Für sich genommen verändert jeder der Effekte das tägliche Leben der Menschen in der jeweiligen Region. Zusammen gestalten sie das Wetter auf der Nordhalbkugel und verursachen die so genannte Arktische Verstärkung, die das Risiko extremer Bedingungen ganzjährig erhöht.

Bezugsjahr 1979



2 Ausdehnung des Wintermeereises

Während des Winters wächst die Eisdecke über dem Arktischen Ozean. Aber die maximale Ausdehnung hat stetig abgenommen, vor allem in der Barentssee und im Beringmeer. Weniger Eis bedeutet, dass mehr Wärme und Feuchtigkeit aus dem Ozean in die Atmosphäre gelangen.



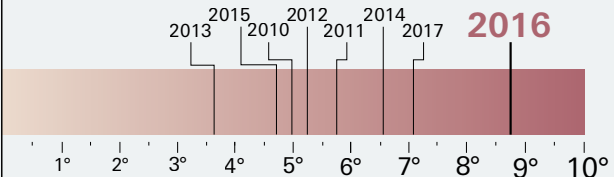
3 Volumen des Wintermeereises

Verglichen zum Bezugsjahr 1979 sank die Eismenge, die 2017 im Arktischen Ozean trieb, um 42,5 Prozent. Winde können das brüchigere Eis leichter vor sich her treiben und so Schiffe und küstennahe Siedlungen einschließen. Dünneres Eis schmilzt zudem schneller in der warmen Jahreszeit – das sommerliche Meereis büßte im gleichen Zeitraum 80 Prozent an Masse ein.

4 Lufttemperatur im Winter

Die Lufttemperatur in der Arktis liegt an manchen Tagen 20 Grad über den Normalwerten und ist inzwischen während des ganzen Winters erhöht. Im Winter 2016 übertraf die Durchschnittstemperatur jene des Jahres 1979 um fast neun Grad. Dieser Trend kann den Jetstream schwächen, so dass es in Amerika, Europa und Asien zu extremen Kälteeinbrüchen und starken Schneefällen kommt.

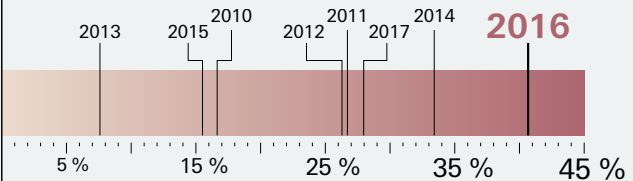
Abweichung der winterlichen Lufttemperatur (Grad Celsius)



5 Luftfeuchtigkeit im Winter

Wegen der schrumpfenden Eisdecke gelangt mehr Wasserdampf aus dem Ozean in die Luft. Selbst ein kleiner Anstieg hat große unerwünschte Folgen: Als Treibhausgas hält Wasserdampf Wärme zurück und gibt bei der Wolkenbildung latente Wärme ab. Wolken können die Erwärmung ebenfalls verstärken.

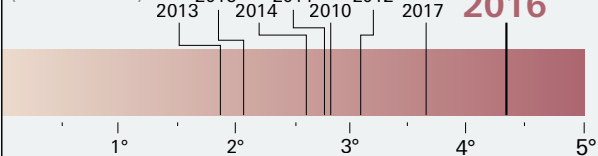
prozentualer Zuwachs im Vergleich zu 1979



6 Arktische Verstärkung

Die Nordpolarregion erwärmt sich schneller als der Rest der Welt, was als Arktische Verstärkung bezeichnet wird. Die Durchschnittstemperaturen in hohen und mittleren Breiten nähern sich somit immer mehr an. Das verringerte Temperaturgefälle verlangsamt den Jetstream und erhöht dadurch auf der Nordhalbkugel das Risiko für anhaltende Extremwetterlagen – darunter Hitze- und Kältewellen, Überschwemmungen und langlebigere Hurrikane.

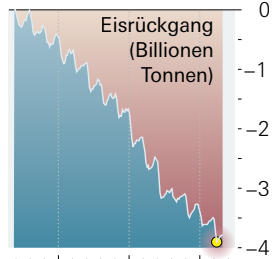
Zunahme der Arktischen Verstärkung im Vergleich zu 1979 (Grad Celsius)



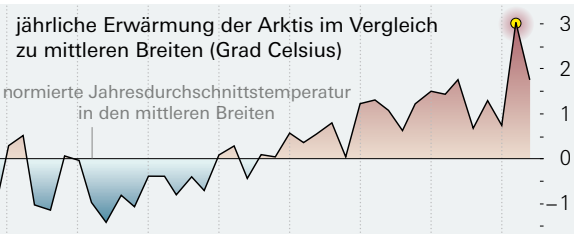
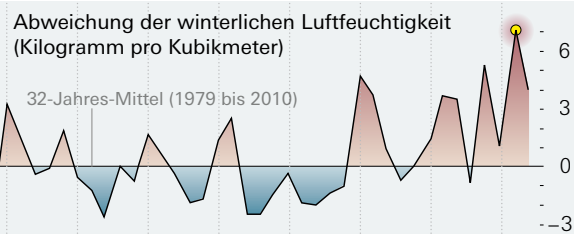
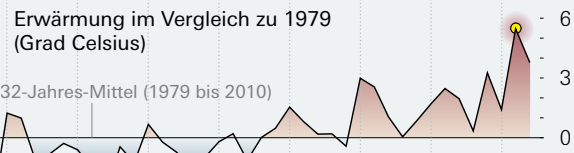
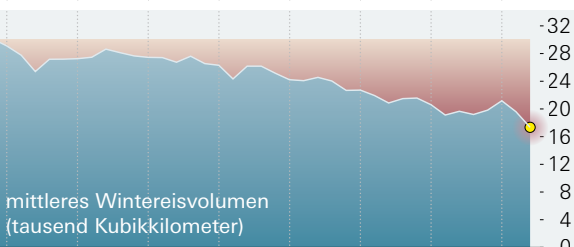
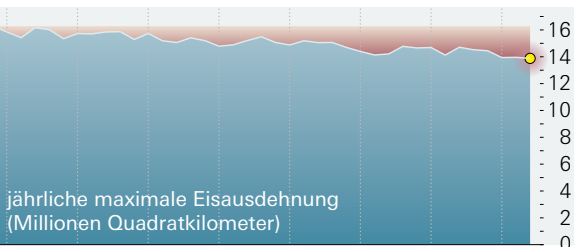
PITCH INTERACTIVE, GRÜNLÄNDER NACH: J.P. GRACE/MASSON OCEAN, ICE AND HYDROLOGY EQUIVALENT WATER HEIGHT (RIGSM), FILTERED VERSION 2 (HTTPS://PDAAC.JPL.MASA.GOV/ARASE7/TELLUS/GRACE_MASSON_CH1_GRID_RIGSM_V2/DATA_ACCESS/14/02/2016/AUSDEHNUNG_WINTERMEERES_NACH_JAPANI_NPR_UND_JAXA_AUS_VOLUMEN_WINTERMEERES_NACH_POMAS, POLAR SCIENCE CENTER, LUFTFEUCHTIGKEIT UND ARKTISCHE VERSTÄRKUNG NACH: NCEP/NCAR REANALYSIS 1 UND NOAA/ESRL AT PSD / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2018

1 Eisrückgang auf Grönland

Die Masse des grönländischen Eisschildes hat drastisch abgenommen, wie Satellitendaten zur Messung des irdischen Schwerefelds seit 2002 belegen. Das Schmelzwasser ist einer der Hauptverantwortlichen für den Anstieg des Meeresspiegels.



1979 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2017



PITCH INTERACTIVE, GRÖNLÄNDES NACH: JPL, GRACE, MASCON OCEAN, ICE, AND HYDROLOGY EQUIVALENT WATER HEIGHT RIGUMI, FILTERED VERSION 2 (HTTPS://PDDAAC.JPL.MASA.GOV/DATASET/TELLUS_GRACE_MASCON_CRL_GRLD_RUBG_V2) DATA ACCESS: 14.02.2018; AUSDEHNUNG WINTEREIS NACH: JAPAN NIPRL UND JANA ADS; VOLUMEN WINTEREIS NACH: PDMAS; POLAR SCIENCE CENTER; LUFTTEMPERATUR, LUFTFEUCHTIGKEIT UND ARKTISCHE VERSTÄRKUNG NACH: NCEP/NCAR REANALYSIS 1 UND NOAA/ESRL AT PSD / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2018

ich mir noch mehr Sorgen, denn inzwischen sieht es so aus, als sollte es in der Arktis vermutlich bereits ab 2040, sprich ganze 60 Jahre früher als von uns damals vorhergesagt, sommers kein Meereis mehr geben.

Die Arktis verändert sich im Prinzip so, wie Wissenschaftler es prognostiziert haben – allerdings wesentlich schneller, als selbst die pessimistischsten Szenarien vermuten ließen. Die jüngsten Messungen sprengen alle bisherigen Daten. In nur drei Jahren wurden mehr als ein Dutzend Extremwerte überschritten, die Jahrzehnte Bestand hatten, darunter beim Schwinden des Meereises im Sommer und beim Rückgang im Winter sowie bei der Zunahme der Boden- und Lufttemperaturen (siehe »Rekordverdächtige Arktis«, links).

Diese Trends kündigen Probleme für Menschen rund um den Globus an. Vor etwa 125 000 Jahren war die Nordpolarregion nur unwesentlich wärmer als heute; der Meeresspiegel lag allerdings vier bis sechs Meter höher. Wenn das Wasser entsprechend steigen sollte, müssten wir uns von zahlreichen Metropolen verabschieden, wie New Orleans, New York, Venedig, London oder Schanghai. Aktuelle Forschungsergebnisse deuten auch darauf hin, dass sich infolge der raschen Erwärmung der Arktis die weltumspannenden Starkwindbänder der Atmosphäre verlagern. Dann könnten Wetterlagen länger als üblich über Nordamerika, Mitteleuropa und Asien verweilen und Millionen Menschen Hitzewellen, Dürren oder heftige Stürme bescheren. Im südlichen Arktischen Ozean nimmt bereits die Menge an Plankton zu, was die Nahrungskette durcheinanderbringen und damit den kommerziellen Fischfang beeinträchtigen dürfte. Und durch den massive Gletscherrückgang fließen südlich von Grönland gewaltige Mengen Süßwasser ins Meer, die möglicherweise den Golfstrom abbremsen und so das Wetter auf den Kontinenten beiderseits des Atlantiks signifikant verändern. Was treibt den Wandel in diesem halsbrecherischen Tempo an?

Der warnende Kanarienvogel in der Kohlemine

Wissenschaftler beobachten die Arktis mit einem so großen Aufwand, weil sie besonders empfindlich auf den Klimawandel reagiert. Für das Klimasystem der Erde stellt sie gewissermaßen den warnenden Kanarienvogel in der Kohlemine dar. Die lange Liste zuletzt gebrochener Rekorde lässt keinen Zweifel daran, dass die Arktis dabei ist, die beunruhigenden Klimamodellierungen der vergangenen Jahrzehnte zu bestätigen. Schlimmer noch: Unsere Prognosen könnten die Veränderungen deutlich unterschätzt haben.

Innerhalb von nur 40 Jahren hat sich die im Sommer von Meereis bedeckte Fläche der Arktis halbiert. Und das durchschnittliche jährliche Eisvolumen nahm seit den frühen 1980er Jahren um etwa ein Viertel ab. Bis vor Kurzem glaubten Forscher noch, es würde mindestens bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts dauern, um solche Extreme zu erreichen.

Das sommerliche Meereis schwindet derart schnell, weil es Rückkopplungsmechanismen gibt, die kleine Veränderungen verstärken (siehe auch **Spektrum** Mai 2018,

S. 50). Schmilzt zum Beispiel durch zusätzliche Wärme weißes, reflektierendes Eis, wird eine größere Oberfläche des dunkleren Ozeans frei, die wiederum Sonnenstrahlung weniger gut zurückwirft. Die vom Meer absorbierte Wärme heizt die Region weiter auf – was den Eisverlust und infolgedessen die Erwärmung verstärkt.

Im dunklen Winter greifen andere Mechanismen: So verhindert etwa das Meereis als Isolierschicht, dass Wärme und Feuchtigkeit aus dem darunterliegenden Wasser in die Atmosphäre entweichen. Je weiter das Meereis zurückgeht, desto mehr kann die Luft sich aufheizen, was wiederum die Eisbildung erschwert. Computermodelle simulieren meist einen zu langsamen Rückgang des Meereises und führen damit zu konservativen Klimaprognosen.

Der Meereisschwund ist nicht die einzige Veränderung der Arktis, die Forschern wie mir Kopfzerbrechen bereitet. An Land tauen die normalerweise ganzjährig gefrorenen Permafrostböden auf, so dass Gebäude einstürzen, Bäume umfallen und Straßen sich wölben. Die aufgeweichten Böden beeinträchtigen nicht nur das Leben der lokalen Bevölkerung, sie geben zudem große Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre ab. Denn das organische Material, das für tausende Jahre im Permafrost gefangen war, ist nun plötzlich für Bakterien verfügbar, die es abbauen und dabei Kohlendioxid (in sauerstoffhaltigen Bodenschichten) oder Methan (in sauerstofffreien Zonen) produzieren (siehe **Spektrum** April 2017, S. 48). Im arktischen Permafrost lagert etwa doppelt so viel Kohlenstoff, wie die Atmosphäre zurzeit enthält, so dass ein großflächiges Auftauen der Böden im hohen Norden die globale Erwärmung verschlimmern dürfte. Heutige Computermodelle erfassen die Auswirkungen des aufweichenden Permafrosts nicht adäquat – ein weiterer Grund, warum Klimaprognosen die zukünftige Erderwärmung vermutlich unterschätzen.



FOTOLIA / BIG-LABEL

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:
[www.spektrum.de/
t/arktis-und-antarktis](http://www.spektrum.de/t/arktis-und-antarktis)

Auf den Landflächen der Arktis liegen ebenfalls große Mengen gefrorenen Wassers – als Gletscher sowie im mächtigen Eisschild Grönlands, der stellenweise mehr als drei Kilometer dick ist. Wenn dieses terrestrische Eis taut, wirkt sich das global verheerend aus, weil es im Gegensatz zu schmelzendem Meereis den Meeresspiegel ansteigen lässt. Mittels Satelliten, die das Schwerefeld der Erde messen, lässt sich die Masse der grönländischen Eisdecke recht genau bestimmen. Im Sommer 2016 fiel diese auf den niedrigsten Stand seit Beginn der satellitengestützten Aufzeichnungen 2002 und unterschritt zudem sämtliche Werte, die seit Ende der 1950er Jahre mit Hilfe anderer Methoden ermittelt wurden. Eine Studie von 2016 legt

nahe, dass das Abtauen des grönländischen Eisschields durch die vom Meereisrückgang verursachte Erwärmung beschleunigt wird.

Weniger Meereis und die schnelle Erwärmung der Arktis haben noch andere weit reichende Folgen: Zusammen könnten sie Höhenwinde so beeinflussen, dass diese zusätzliche Wärme und Feuchtigkeit aus südlicheren Breitengraden Richtung Nordpol transportieren. 2012 verursachte eine ungewöhnlich starke und beständige Hochdruckwetterlage, ein so genanntes blockierendes Hoch, das bis dahin stärkste Abschmelzen Grönlands. Mit der warmfeuchten Luft gelangten Rußpartikel von Waldbränden in die nördliche Hemisphäre. Die Partikel verringern das Rückstrahlvermögen von Eis und Schnee, die somit mehr Sonnenenergie absorbieren und das Abtauen beschleunigen – ein weiterer Teufelskreis.

Blockierende Hochs nahe Grönland scheinen in den letzten Jahrzehnten häufiger aufzutreten, vor allem im Sommer. Der Eisverlust 2016 war nach 2010 und dem Rekordjahr 2012 der dritthöchste. Analysen meiner Kollegen und mir legen nahe, dass die Zunahme der blockierenden Hochs mit der globalen Erwärmung zusammenhängt. Computermodelle tun sich jedoch schwer damit, diese Wetterlagen realistisch zu simulieren, so dass sich kaum vorhersagen lässt, wie sie sich zukünftig auswirken werden.

Hitzewellen im arktischen Winter, die alle vorherigen übertreffen

An anderen Stellen der Arktis beobachten wir ebenfalls außergewöhnliche Veränderungen. Während der Winter 2016 und 2017 traten in der Nähe des Nordpols Hitzewellen auf, die alle vorherigen übertrafen. Das schwindende, immer dünnere Meereis ist Teil der Ursache, da Wärme nun ungehindert aus dem Ozean in die Atmosphäre gelangt. Des Weiteren erreichten rekordverdächtig große Mengen warmer und feuchter Luftmassen den hohen Norden. Die Luftfeuchtigkeit hat eine oft unterschätzte Auswirkung auf das Klima: Als Treibhausgas sorgt bereits ein geringfügig erhöhter Wasserdampfgehalt dafür, dass die trockene Atmosphäre des arktischen Winters deutlich mehr Wärme speichern kann. Zudem setzt die Kondensation von Wassermolekülen bei der Wolkenbildung latente Wärme frei, was die Luft weiter aufheizt. Und mehr Wolken halten mehr warme Luft gefangen – ein weiterer Faktor, der zum Tauwetter in der Arktis beiträgt.

Auch wenn noch manches unklar ist, wird deutlich, dass die Nordpolarregion den dramatischsten Wandel seit Menschengedenken durchläuft. Atmosphärenforscher versuchen deshalb zu analysieren, welchen Einfluss die Veränderungen in der Arktis auf Mensch und Umwelt weltweit ausüben, damit die Gesellschaft entsprechend reagieren und sich vorbereiten kann.

Ein Beispiel für globale Effekte ist die Überschwemmung von Küstenregionen. Beunruhigend klingen die Vorhersagen eines Berichts der US-amerikanischen Union of Concerned Scientists (Vereinigung besorgter Wissenschaftler): Demnach werden 170 US-Gemeinden innerhalb der nächsten 20 Jahre dauerhaft überschwemmt sein. Die meisten küstennahen Metropolen werden bis Ende des

Die alte Arktis war erbar- mungslos, aber stabil. Die neue ist unberechenbar und macht einen unumkehrbaren Wandel durch – mit Aus- wirkungen auf die ganze Welt

21. Jahrhunderts regelmäßig schwere Hochwasser erleben, wenn die Länder der Erde ihre CO₂-Emissionen nicht reduzieren. Dieser Bericht erschien im Juli 2017 – nur wenige Wochen bevor die Hurrikane Harvey, Irma und Maria den USA die zerstörerischste und teuerste Hurrikansaison aller Zeiten bescherte.

Es mehren sich ebenfalls Belege dafür, dass die starke Erwärmung der unteren arktischen Atmosphäre sowohl die als Jetstream bezeichneten Starkwindbänder beeinflusst als auch Luftmassen in der höher gelegenen Stratosphäre, wo der Polarwirbel, ein großräumiges Höhentiefl, beheimatet ist. Die Wellenberge und -täler des von West nach Ost mäandernden Jetstreams erzeugen die von Wetterkarten vertrauten Hoch- beziehungsweise Tiefdruckzentren und steuern unser Wetter auf der Nordhalbkugel. Wenn jedoch besonders große Wellen häufiger auftreten, wird sich das auf Millionen Menschen extrem auswirken. Denn große Ausschläge des Jetstreams gen Nordpol oder gen Äquator bewegen sich langsamer von West nach Ost, so dass Wetterlagen beständiger bleiben. Das heißt: längere Hitzeperioden, Starkregenfälle, festgefahrene tropische Stürme wie der Hurrikan Harvey, der Houston im August 2017 unter Wasser setzte, sowie heftigere Waldbrände.

Große Wellen im Jetstream kombiniert mit einer starken Erwärmung der Arktis können den Polarwirbel unterbrechen und länger andauernde tödliche Kältewellen und Schneestürme auslösen. Die Bewohner der nördlichen USA mussten das im Januar 2018 erdulden. Ein Kollaps des Polarwirbels kann zudem dazu führen, dass sich ausladende Ausschläge des Jetstreams festsetzen, die Alaska und nördlicheren Regionen außergewöhnliche Hitzewellen bescheren – welche die Erwärmung der Arktis ebenfalls beschleunigen. Über die tatsächliche Verbindung zwischen diesen atmosphärischen Wellen und dem Temperaturanstieg in der Arktis sind sich Wissenschaftler allerdings noch uneins.

In der sich rasch erwärmenden Arktis werden sich wahrscheinlich sowohl marine als auch terrestrische Lebensräume verändern. Schon während des aktuellen Meereisrückgangs treten Algenblüten zu anderen Zeiten und in anderen Regionen als bisher auf, so dass Fische von weiter südlich in arktische Gewässer ziehen und die dort heimischen verschwinden. Die früher einsetzende Schneeschmelze am Ende des Winters lässt die Tundra rascher ergrünen und Insekten eher schlüpfen; Zugvögel,

die eine bestimmte Tageslänge als Aufbruchsignal nutzen, erreichen die arktischen Futterplätze so unter Umständen zu spät. Die Ureinwohner der Arktis bekommen die Auswirkungen ebenfalls zu spüren: Schmelzendes Eis verhindert, dass sie ihre traditionellen Jagdgründe erreichen, und vertreibt sie sogar aus ihren Siedlungen, weil Stürme die bislang durch Eis geschützten Küsten bedrohen. Gleichzeitig begehren Länder und große Unternehmen die nun zugänglichen natürlichen Ressourcen und streiten sich um die Frage, wem der reiche Meeresboden gehört.

Die Offenbarung, die wir während der Tagung in Big Sky hatten, erlebe ich jedes Mal aufs Neue, wenn eine länger anhaltende Extremwetterlage verheerende Schäden anrichtet oder die Arktis einen weiteren Negativrekord aufstellt. Langsam entwickeln auch meine Landsleute ein stärkeres Bewusstsein hierfür. Umfragen zufolge glauben die meisten US-Amerikaner, dass der Eisrückgang in der Arktis und der Jetstream – der Begriff gehört inzwischen fast schon zum Allgemeingut – gemeinsam das Wetter durcheinanderwirbeln. Die alte Arktis mag zwar erbar- mungslos gewesen sein, aber sie war stabil. Die neue ist weniger berechenbar und macht womöglich einen nicht umkehrbaren Wandel durch – mit Auswirkungen für das Leben auf der ganzen Welt.

Ausmaß und Geschwindigkeit des Klimawandels lassen sich reduzieren

Sind die Prozesse aufzuhalten? Das globale Klima reagiert mit einer gewissen Verzögerung auf die steigenden Treibhausgaskonzentrationen. Außerdem hat Kohlendioxid eine sehr lange Verweildauer in der Atmosphäre, so dass es in Zukunft unweigerlich zu klimatischen Veränderungen kommen wird. Das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Klimawandels können jedoch reduziert werden, wenn sich die Gesellschaft beeilt, die Emissionen zurückzufahren, und wenn es gelingt, Verfahren zu entwickeln, um große CO₂-Mengen aus der Atmosphäre zu entfernen. An beiden Fronten gibt es Fortschritte. Sie kommen aber vermutlich zu spät und sind zu wenig ambitioniert, um die Arktis und die Erde so zu erhalten, wie wir sie bislang kennen. ◀

QUELLEN

Francis, J. A. et al.: Amplified Arctic Warming and Mid-Latitude Weather: New Perspectives on Emerging Connections. In: WIREs Climate Change 8, e474, 2017

Liu, J. et al.: Has Arctic Sea-Ice Loss Contributed to Increased Surface Melting of the Greenland Ice Sheet? In: Journal of Climate 29, S. 3373–3386, 2016

National Research Council: Arctic Matters: The Global Connection to Changes in the Arctic. The National Academies Press, Washington 2015

Overpeck, J. T. et al.: Arctic System on Trajectory to New, Seasonally Ice-Free State. In: EOS 86, S. 309–313, 2005

LITERATURTIPP

Klimawandel. Strategien gegen die weltweite Bedrohung. Spektrum der Wissenschaft, Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung 3/2018
Artikelsammlung über die Folgen globaler Umweltveränderungen

ERLEBEN SIE DEN ZAUBER DES NORDLICHTS

SEIT JEHER begeistern die eindrucksvollen Nordlichter all jene, die dieses einzigartige Naturphänomen zu sehen bekommen. Wie fantastische Lichtgemälde erhellen zarte Schleier die tiefdunkle Winternacht. Erleben Sie die Faszination des Sternen- und Polarhimmels mit seinen Farben und Lichtern im nordischen Winter. Begleitet wird diese Themenreise von unserem Experten Dr. Beat Fischer. Seine große Leidenschaft ist die Astronomie und deren Sternbilder. Gemeinsame Beobachtungen und Erläuterungen am nächtlichen Himmel gehören zu den Highlights auf dieser Schiffsreise. Lassen Sie sich von den arktischen Nächten verzaubern.

FÜR UNSERE LESERINNEN UND LESER haben wir eine nordwärts gehende und eine südwärts gehende Reise aus dem Hurtigruten-Programm ausgewählt. Diese werden mit Glur Reisen in Basel durchgeführt. **Abonnenten erhalten für sich und eine weitere Person bei der Buchung einen Nachlass auf den Reisepreis.** Die Reise wird ab und bis Zürich begleitet; andere Abflughäfen sind auf Anfrage buchbar.

Termine:

Auf der Jagd nach dem Nordlicht – nordgehend: 2.3.–8.3. 2019

Auf der Jagd nach dem Nordlicht – südgehend: 7.3.–13.3. 2019

Weitere Informationen und Buchung:

Spektrum.de/plus

Spektrum PLUS+

GLUR
REISEN

HURTIGRUTEN



FRANZISKA SCHÄDEL / WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/FILM/ITM/L/CC-BY-SA-4.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/SYSA/4.0/LEGALCODE

FREISTETTERS FORMELWELT MATHEMATISCHES TISCHERÜCKEN

Vermeintlich Offensichtliches ist aus mathematischer Sicht alles andere als trivial – und umgekehrt.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1587638](http://spektrum.de/artikel/1587638)

Ein sehr gutes Beispiel für die rigorose Sorgfalt, die beim mathematischen Denken notwendig ist, liefert der so genannte Zwischenwertsatz aus der elementaren Analysis:

$$\forall u \in [f(a), f(b)] \exists c \in [a, b] : f(c) = u$$

In dieser formalisierten Darstellung geht es um eine mathematische Funktion f , die jeder reellen Zahl x im Intervall $[a, b]$ einen reellen Wert $f(x)$ zuordnet. Die Funktion muss außerdem stetig sein, darf also – vereinfacht gesagt – keine Sprünge aufweisen.

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, dann besagt der Zwischenwertsatz, dass man zu jeder Zahl u , die zwischen $f(a)$ und $f(b)$ liegt, mindestens eine Zahl c finden kann, die beim Einsetzen in die Funktion den Wert u liefert. Anders ausgedrückt: Die Funktion f nimmt jeden Wert zwischen $f(a)$ und $f(b)$ an.

Ist insbesondere $f(a)$ kleiner als null und $f(b)$ größer, dann muss die Funktion f irgendwann den Wert null annehmen. Wenn die Funktion zum Beispiel die Temperatur beschreibt, und es hatte im Januar -10 Grad und im Juli $+30$ Grad, dann muss es irgendwann dazwischen mindestens einmal einen Zeitpunkt gegeben haben, an dem die Temperatur genau null Grad betrug.

Diese Aussage erscheint so offensichtlich, dass man sich fragt, wieso überhaupt jemand auf die Idee kommt, sie in dieser seltsamen Formelsprache aufzuschreiben und dann auch noch streng beweisen zu wollen. Und tatsächlich hat man das lange Zeit nicht getan. Bis zum 19. Jahrhundert hielten viele Mathematiker den Zwischenwertsatz für so offenkundig, dass er keines Beweises bedurfte.

Als aber die Mathematik immer komplexer wurde, stieg der Bedarf nach einer absolut sicheren logischen und formalen Grundlage. Nichts konnte einfach so vorausgesetzt werden, egal wie plausibel es erscheinen mochte. Und auch für den Zwischenwertsatz musste eine vernünftige Formulierung mitsamt Beweis

her, was die Mathematiker Bernard Bolzano und Augustin-Louis Cauchy zu Beginn des 19. Jahrhunderts erledigten.

So bieder und offensichtlich der Satz auch erscheinen mag – man kann durchaus überraschende Aussagen aus ihm ableiten. Wenn zum Beispiel im Biergarten der Tisch auf unebenem Untergrund steht und wackelt, kann man das Problem mit einem Bierdeckel lösen – oder auch mit dem Zwischenwertsatz.

Nehmen wir einen vierbeinigen Tisch, dessen Füße die Ecken eines Quadrats bilden. Drei von ihnen berühren immer den Boden; aber das vierte hängt vielleicht in der Luft. Dreht man den Tisch nun ganz langsam um 90 Grad um seinen Mittelpunkt und zwingt dabei die drei Beine, die anfangs den Boden berühren, das in jedem Moment weiterhin zu tun, dann nimmt am Ende das erste Bein die Anfangsposition des zweiten ein und das zweite die des dritten; das dritte steht jetzt auf dem Boden, und das vierte? Das muss in den Boden eindringen, sonst hätte der Tisch in der Anfangsposition nicht gewackelt.

Also war der Abstand zwischen viertem Tischbein und Boden zuerst positiv, nun ist er negativ, somit muss er nach dem Zwischenwertsatz irgendwann null gewesen sein. Das ist die gesuchte Position, in der alle vier Beine auf dem Boden stehen.

Der streng mathematische Beweis für diese Aussage ist nicht leicht zu führen. So einfach ist es gar nicht, in diesem Fall die Funktion f zu definieren. Nachdem das Problem des wackelnden Tisches in den 1970er Jahren das erste Mal formuliert wurde, hat es bis zu einer Lösung mehr als 30 Jahre gedauert. Und die gilt nur unter der Voraussetzung, dass der Boden nicht um mehr als 35 Grad geneigt ist.

Ob man sich allerdings beim Personal beliebt macht, wenn man die Tische im Biergarten dreht, ist eine ganz andere Frage. Doch dafür ist die Mathematik dann nicht mehr zuständig.

GRAVITATIONSWELLEN AM PULS DER RAUMZEIT

Drei Jahre nach dem ersten Nachweis der Raumzeitschwingungen haben sich Wissenschaftler ehrgeizige Ziele gesetzt: Sie wollen das Innere von Neutronensternen entschlüsseln und die Expansion des Weltalls vermessen – und besser als bisher das Wesen Schwarzer Löcher verstehen.



Davide Castelvecchi arbeitet als Wissenschaftsreporter für das britische Magazin »Nature«.

» spektrum.de/artikel/1587624



Wenn sich zwei Schwarze Löcher auf Kreisbahnen immer näher kommen, versetzen sie die Raumzeit in Schwingung. Die Folge sind Gravitationswellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und Milliarden Lichtjahre überwinden können. Im Computer simulieren Physiker, welche Wellenformen und Frequenzen von den Raumzeitbeben ausgehen.

▶ Mitte der 1980er Jahre fand der US-amerikanische Physiker Bernard Schutz eine neue Lösung für eines der ältesten Probleme der Astronomie: Wie misst man die Entfernung eines Himmelsobjekts von der Erde? Seit Generationen verwenden Forscher die Helligkeit von Sternen als kosmisches Metermaß. Doch das bringt zahlreiche Komplikationen mit sich. So können nahe und schwach leuchtende Sterne vortäuschen, sie seien weit entfernt und deutlich heller.

Gravitationswellen wären eine bessere kosmische Messlatte, erkannte Schutz, der an der Cardiff University in Großbritannien forscht. Diese Schwingungen der Raumzeit waren damals nicht mehr als eine Vorhersage

von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Sie entstehen, wenn massereiche Objekte, beispielsweise Schwarze Löcher, schnell beschleunigt werden. Schutz erkannte: Sollte ein Detektor die Wellen eines Tages auffangen, dann ließe sich leicht ausrechnen, wie stark das Signal bei der Aussendung war und welche Strecke es bis zur Erde zurückgelegt hat. Mit Gravitationswellen müsste sich also sehr genau die Expansion des Kosmos vermessen lassen.

Die Idee des Physikers war zwar elegant, aber leider nicht praktikabel: Zur damaligen Zeit war niemand in der Lage, Erschütterungen der Raumzeit nachzuweisen. Im August 2017 erhielt Schutz schließlich doch noch die Gelegenheit, sein Konzept zu testen. Da fingen die Detektoren des US-amerikanischen Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) den Nachhall der Verschmelzung zweier Neutronensterne auf, die vor 130 Millionen Jahren stattgefunden hatte. Das Ereignis war ein besonderer Glücksfall, da die Gravitationswellen aus einer vergleichsweise nahen Galaxie kamen. Schutz' jahrzehntealte Methode lieferte daher ein viel präziseres Ergebnis als erhofft.

Nun warten Kosmologen gespannt auf ähnliche Beobachtungen. Sie könnten den Durchbruch in einer seit Langem währenden Debatte bringen, in der es darum geht, wie schnell das Universum expandiert (siehe **Spektrum** Juli 2018, S. 12). Auch Wissenschaftler aus anderen Spezialgebieten warten gespannt auf weitere Gravitationswellensignale, für deren erstmalige Entdeckung es im Jahr 2017 den Physiknobelpreis gab.

Tatsächlich haben die Forscher jede Menge Wünsche und Erwartungen. Sie träumen zum Beispiel von neuen Einsichten in den Ursprung Schwarzer Löcher und in die extremen Bedingungen im Inneren von Neutronensternen. Aber auch ein besseres Verständnis der Galaxienentstehung steht hoch im Kurs, ebenso wie die bislang genauesten Tests der allgemeinen Relativitätstheorie. Und vielleicht ermöglichen Gravitationswellen sogar einen Blick in die allerersten Augenblicke nach dem Urknall.

All das könnten die nächsten Jahre und Jahrzehnte bringen. Fest steht, dass die Forscher Anfang 2019 die Suche nach Gravitationswellen wieder aufnehmen wollen. Dabei helfen ihnen nicht nur das LIGO-Observatorium in den USA, das im Lauf des Jahres 2018 gewartet und modernisiert wurde, sondern auch der Virgo-Detektor bei Pisa in Italien. Und bald sollen weitere Gravitationswelleninstrumente zur Jagd hinzustoßen. Beispielsweise der KAGRA-Detektor in Japan, der im Jahr 2019 erstmals in Betrieb gehen soll. Für die 2020er Jahre ist noch ein Observatorium in Indien geplant, für das teilweise Ersatzteile der LIGO-Detektoren zum Einsatz kommen. Auftrieb wird das Forschungsgebiet ferner durch ein Interferometer im Weltall erhalten: In den 2030er Jahren soll das Satellitentrío LISA ins All starten und ein völlig neues Fenster bei der Suche aufstoßen.

Wie finden Schwarze Löcher in den Weiten des Alls überhaupt zusammen?

Für ein gerade einmal drei Jahre altes Forschungsgebiet bewegt sich die Gravitationswellen-Astronomie mit atemberaubendem Tempo voran. Schon jetzt hat sie die Erwartungen vieler Forscher übertroffen. Außer dem Nachweis der Verschmelzung von Neutronensternen hat LIGO seit 2015 die Verschmelzung von fünf Paaren von Schwarzen Löchern beobachtet. Die Entdeckungen sind der bislang deutlichste Beweis dafür, dass es Schwarze Löcher wirklich gibt, sie sich mitunter als Paare umkreisen und dass sie die von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Eigenschaften besitzen.

Jetzt wollen die Forscher herausfinden, wie die Gravitationsmonster in den Weiten des Alls überhaupt zusammenfinden. Bisher steht nur fest, wie sich einzelne Schwarze Löcher bilden: Sie entstehen, wenn massereichen Sternen der nukleare Brennstoff ausgeht. Der Kern der Sterne kollabiert dann unter seiner eigenen Schwerkraft, eine Supernova-Explosion ist die Folge. Zurück bleibt ein Schwarzes Loch, mit einer Masse von einigen wenigen bis einigen Dutzend Sonnenmassen.

Aber wie finden zwei solcher Masseklumpen zueinander? Experten diskutieren hier seit Längerem vor allem zwei Szenarien: Einerseits könnten die Paare aus massereichen Sternduos hervorgehen, die beide in einer Supernova explodieren, aber trotzdem mittels der Schwerkraft aneinander gebunden bleiben. Andererseits könnten sich die Schwarzen Löcher auch unabhängig voneinander bilden und erst später durch gravitative Wechselwirkungen mit anderen Objekten Tuchfühlung aufnehmen – so etwas ist in den Zentralregionen dichter Sternhaufen denkbar.

Unabhängig von seiner Entstehung verliert ein Schwarzes Loch-Paar laufend Energie, da es Gravitationswellen abstrahlt. Mit der Zeit nähern sich die beiden Objekte auf immer enger werdenden Spiralbahnen, bis sie schließlich miteinander verschmelzen und zu einem einzigen größeren Schwarzen Loch werden. LIGO und Virgo können solch einer Verschmelzung nur dann beiwohnen, wenn der ursprüngliche Abstand der beiden Schwarzen Löcher weniger als ein Viertel der Entfernung Erde-Sonne betragen hat. Schwarze Löcher in größerem Abstand ver-

AUF EINEN BLICK GRAVITATIONSWELLEN, KAPITEL 2

- 1** Anfang 2019 nehmen Detektoren rund um den Globus erneut die Suche nach Gravitationswellen auf. Sie können nun weiter ins All hinausschauen als zuvor.
- 2** Langfristig sollen mehrere neue Observatorien zur Jagd dazustoßen, darunter ein Satellitentrío im Weltall und ein großes »Einstein-Teleskop« in Europa.
- 3** Damit wollen die Wissenschaftler große Rätsel rund um Schwarze Löcher und Neutronensterne lösen, aber auch die Entwicklung des Kosmos insgesamt besser verstehen.

Wellen schlagen

Wenn sich zwei Schwarze Löcher oder Neutronensterne einander auf einer Spiralbahn nähern und schließlich miteinander verschmelzen, erzeugen sie charakteristische Schwingungen der Raumzeit – Gravitationswellen. Die beiden LIGO-Detektoren in den USA und die Detektoranlage Virgo in Italien konnten bislang sechs derartige Ereignisse nachweisen.

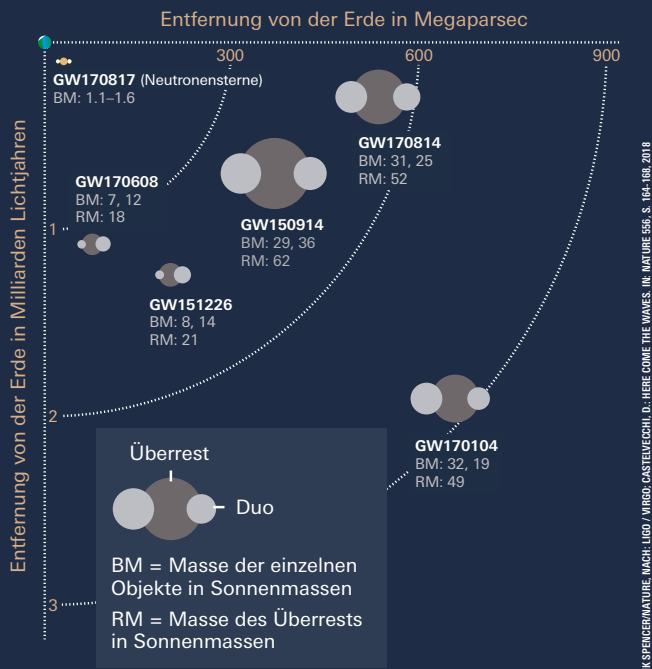
Schlüssel zum Ereignis

Wird ein Signal empfangen, liefern die Frequenz und die Rate, mit der sich die Frequenz ändert, Informationen über die Massen der Objekte in dem verschmelzenden Paar.



Bisherige Entdeckungen

Die Entfernung der Ereignisse von der Erde lässt sich in der Grafik ablesen, indem man die Kreisbögen zu den Achsen verfolgt. Ein Megaparsec entspricht 3,26 Millionen Lichtjahren.



schmelzen wohl erst nach einer Zeitspanne, die das Alter des Universums übertrifft.

Generell reichen die fünf bislang beobachteten Vereinigungen nicht aus, um zu entscheiden, unter welchen Umständen es zu einem Rendezvous kommt. Eine Analyse der ersten drei Entdeckungen durch ein Forscherteam um die Theoretiker Ilya Mandel und Will M. Farr von der University of Birmingham hat allerdings gezeigt, dass gerade einmal zehn weitere Beobachtungen solcher Ereignisse ausreichende Beweise für das eine oder das andere Szenario liefern sollten. Dazu müssen die Forscher die Gravitationswellen insbesondere daraufhin untersuchen, wie die Schwarzen Löcher rotieren. Bei Partnern, die unabhängig voneinander entstanden sind, sollten die Rotationsachsen zufällig orientiert sein, während sie bei gemeinsam entstandenen Schwarzen Löchern parallel zueinander und in etwa senkrecht zu ihrer Bahnebene liegen müssten.

Weitere Signale verschmelzender Schwarzer Löcher könnten darüber hinaus noch andere spannende Einsichten bringen, etwa in die Frage, unter welchen Umständen die dunklen Giganten überhaupt entstehen. So rechnen Experten damit, dass diese vor ihrer Verschmelzung mit Partnern nur bestimmte Massen haben können. »Es sollte einen Mangel an Schwarzen Löchern am unteren Ende der Massenskala geben«, vermutet die LIGO-Forscherin Vicky Kalogera von der Northwestern University im US-Bundesstaat Illinois. Leichtere Sterne ließen nach einer Supernovae nämlich einen Neutronenstern zurück und kein Schwarzes Loch.

Paar-Instabilitäts-Supernovae können einen großen Stern restlos zerreißen

Gleichzeitig sollte es keine Schwarzen Löcher oberhalb von 50 Sonnenmassen geben. Denn im heißen und dichten Kern sehr großer Sterne, die nach einem Kernkollaps derart schwere Objekte hinterlassen könnten, verwandeln sich viele Lichtquanten in Elektron-Positron-Paare. Früher oder später kommt es aber lokal zu besonders vielen dieser Umwandlungen, wodurch der Strahlungsdruck in dieser Region plötzlich abrupt nachlässt. Dadurch sackt Materie nach innen, was eine thermonukleare Explosion zündet. Solche Paar-Instabilitäts-Supernovae haben eine derartige Wucht, dass der Stern ohne jeden Überrest zerrissen wird – es kann sich also kein Schwarzes Loch bilden. Theoretische Überlegungen machen dieses Szenario plausibel, auch wenn es bisher nur wenige Beobachtungen stützen.

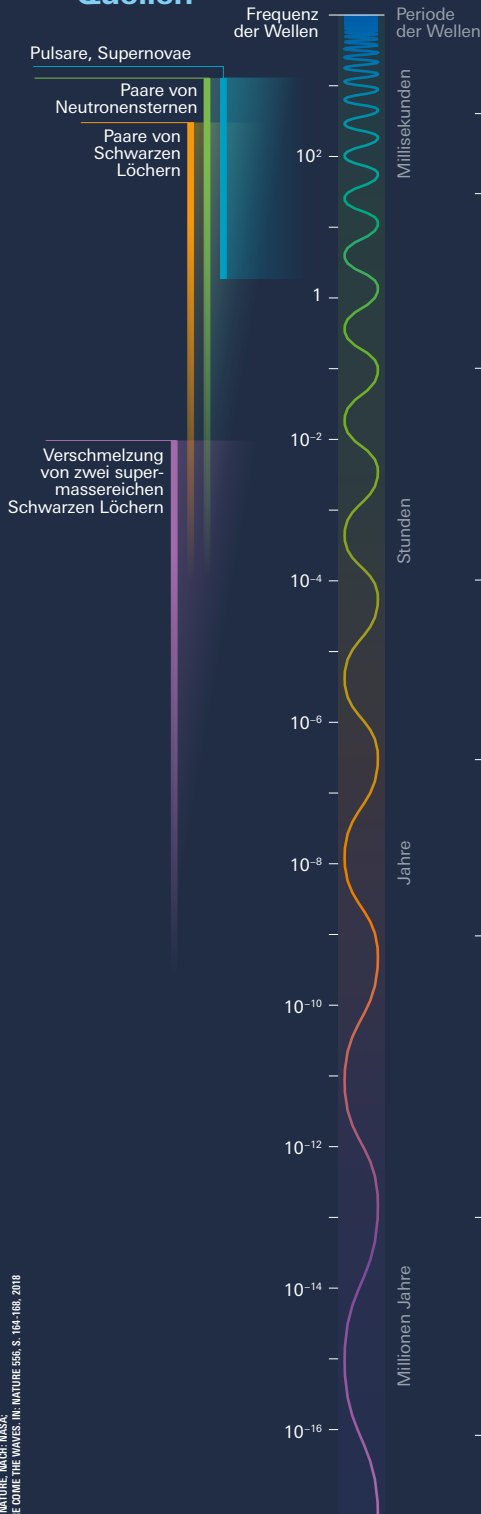
Letztlich wird die Entdeckung immer weiterer Schwarzer Löcher auch eine neue völlig neuartige Karte des Universums liefern, ganz ähnlich, wie Astronomen sie für Galaxien durch groß angelegte Suchkampagnen erhalten haben. LIGO-Chefdesigner Rainer Weiss vom Massachusetts Institute of Technology, einer der drei Physiknobelpreisträger von 2017 (siehe **Spektrum** Dezember 2017, S. 24), formuliert es so: »Dann sehen wir das ganze Universum in Form Schwarzer Löcher.« Und das sei etwas, wovon jeder Bereich der Astrophysik profitieren werde.

Dafür müssen Weiss und seine Kollegen die Empfindlichkeit von LIGO und Virgo in Zukunft noch weiter stei-

Das Gravitationswellen-Spektrum

Ähnlich wie bei elektromagnetischen Wellen senden viele unterschiedliche Objekte Gravitationswellen über einen weiten Bereich von Frequenzen aus. Interferometer auf der Erde wie LIGO und Virgo sind nur für einen kleinen Teil dieses Spektrums empfindlich. Das begrenzt ihre Fähigkeiten, bestimmte kosmische Phänomene zu beobachten. Sie sind beispielsweise blind für die Kollisionen supermassereicher Schwarzer Löcher in den Zentren von Galaxien. Interferometer im Weltall und andere Verfahren zum Nachweis von Gravitationswellen können den für die Physiker erreichbaren Frequenzbereich aber erweitern.

Quellen

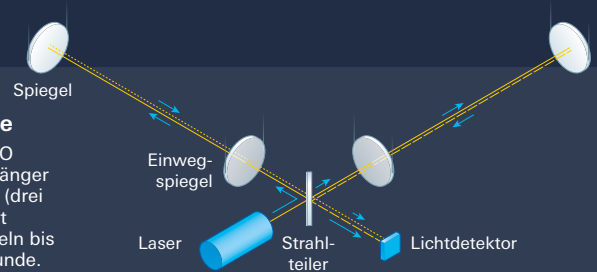


Detektoren

400 bis 30 Hertz

Interferometer auf der Erde

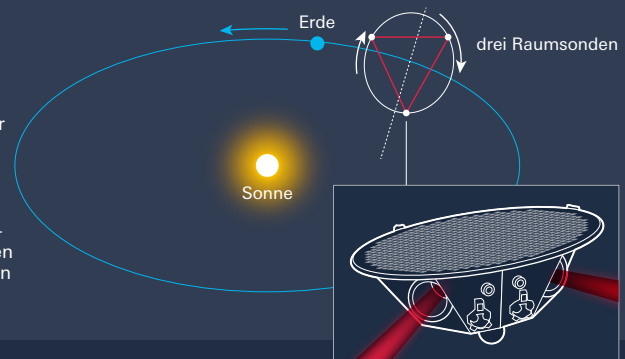
Derzeitige Observatorien wie LIGO können Wellen nachweisen, die länger sind als die Arme der Detektoren (drei bis vier Kilometer). Das entspricht Perioden von wenigen Hundertstel bis wenigen Tausendstel einer Sekunde.



100 bis 0,1 Millihertz

Interferometer im Weltall

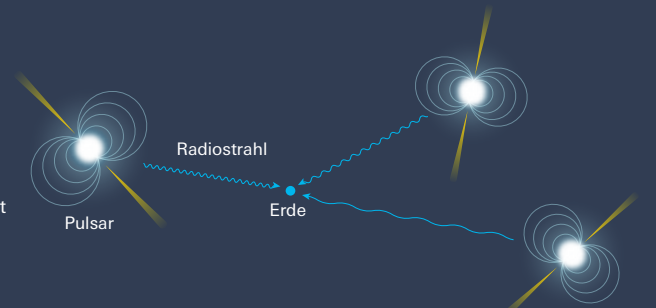
Die virtuellen Arme von LISA, einem für die 2030er Jahre geplanten Trio von Raumsonden, haben eine Länge von mehreren Millionen Kilometern. Dadurch ist LISA empfindlich für Wellen mit Perioden von einigen zehn Sekunden bis zu wenigen Stunden.



320 bis 1 Nanohertz

Pulsar-Timing

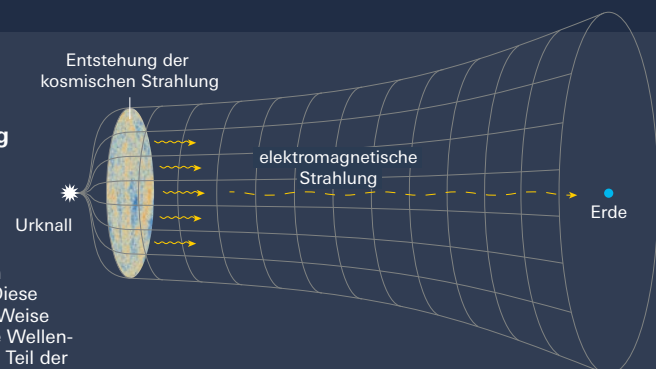
Gravitationswellen aus fernen Galaxien führen zu Schwankungen der Abstände zwischen der Erde und Sternen in der Milchstraße. Die Forscher hoffen deshalb, Wellen mit Perioden von mehreren Jahren nachzuweisen, indem sie Verzögerungen der Radiosignale von Pulsaren (schnell rotierenden Neutronensternen) messen.



$\sim 10^{-13}$ bis 10^{-16} Hertz

Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung

Die älteste messbare Strahlung im Universum, die kosmische Hintergrundstrahlung, könnte Spuren von Gravitationswellen enthalten, die beim Urknall entstanden sind. Diese Wellen wären auf andere Weise nicht nachweisbar, da ihre Wellenlängen einen signifikanten Teil der heutigen Größe des beobachtbaren Kosmos betragen würden.



gern. So sollten sich nicht nur mehr Ereignisse aufspüren lassen, sondern auch zusätzliche Details der Verschmelzungsereignisse sichtbar werden. Konkret möchten die Physiker unter anderem die so genannten Abklingwellen beobachten. Dabei handelt es sich um die Gravitationswellen, die entstehen, wenn ein neu geformtes Schwarzes Loch nach der Verschmelzung zweier kleinerer Exemplare noch nicht zur Ruhe gekommen ist und wild hin und her wabert.

Die Forscher wollen auch sobald wie möglich mit weiteren, über den ganzen Erdball verteilten Observatorien nach den Raumzeiterschütterungen suchen. So würde die japanische Detektoranlage KAGRA die bestehenden Instrumente sehr gut ergänzen: Dank ihrer geografischen Lage und Orientierung, die eine andere ist als die von LIGO und Virgo, könnten die Forscher vermutlich die Polarisation einlaufender Gravitationswellen bestimmen. Aus dieser Schwingungsrichtung lassen sich die Orientierung der Bahnebene und der Rotationsachsen der Schwarzen Löcher rekonstruieren – eine entscheidende Information für die Auswahl des Entstehungsszenarios.

Aber nicht nur bei Schwarzen Löchern hoffen die Forscher auf reiche Beute. Mindestens genauso gespannt sind sie auf die Signale von Neutronenstern-Verschmelzungen. Bisher sind die Physiker erst einmal Zeuge solch eines Ereignisses geworden: Am 17. August 2017 registrierten die Instrumente von LIGO ein Gravitationswellensignal namens GW170817 aus der Galaxie NGC 4993, die von einem ganzen Feuerwerk im elektromagnetischen Spektrum begleitet wurde (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 58). Die Beobachtungen klärten mit einem Schlag eine ganze Reihe langjähriger Mysterien auf, so zum Beispiel die Herkunft von Gold und anderen schweren Elementen im Universum sowie die Ursache für kurze Gammablitze, die Wissenschaftler immer wieder in den Tiefen des Alls beobachten.

Spüren Astrophysiker in den kommenden Jahren weitere Neutronensternkollisionen auf, könnten sie unter anderem herausfinden, wie das Innere der bizarren Objekte beschaffen ist. Die Materie innerhalb der extrem kompakten Sternleichen müsste eine enorme Dichte aufweisen – nur ein quantenmechanischer »Entartungsdruck« zwischen den Neutronen bewahrt sie vor dem Kollaps zum Schwarzen Loch. Aber wie hoch die Dichte der kuriosen Gebilde genau ist, weiß bisher niemand. Kein Laborexperiment kann die extremen Bedingungen im Inneren der allenfalls einige Dutzend Kilometer großen Kugeln nachstellen.

Bisher gibt es Dutzende von Vorschlägen, welche Form Materie im Inneren der Neutronensterne annimmt. Einige Theorien sagen beispielsweise voraus, dass Quarks – die subatomaren Teilchen, aus denen Protonen und Neutronen bestehen – ihre gegenseitigen Bindungen auflösen und sich frei bewegen können, möglicherweise in einem supraleitenden und suprafluiden Zustand. Andere Theorien gehen davon aus, dass sich schwerere Quarkvarianten bilden, so genannte Strange-Quarks, die sich dann zu exotischen Verwandten der Neutronen zusammenfügen könnten.

Diesen Theorien könnten Physiker auf den Zahn fühlen, indem sie die Größe von Neutronensternen genauer als bisher bestimmen. Der Radius eines Neutronensterns ist eine wichtige Größe in der »Zustandsgleichung«, die Druck, Temperatur und Materiedichte miteinander verknüpft – und deren genaue Form bisher unbekannt ist. Sie würde Auskunft darüber geben, wie stark sich Materie zusammenpressen lässt, und damit auch, wie groß ein Neutronenstern gegebener Masse sein sollte und welche Höchstmasse diese Objekte erreichen können.

Die Neutronensternkollision vom August 2017 hat leider nicht genügend Daten geliefert, um der Zustandsgleichung auf die Schliche zu kommen. Das 100 Sekunden lange Gravitationswellensignal war in den letzten Zügen der Verschmelzung zu hochfrequent für die Detektoren von LIGO und Virgo. Dabei sind die finalen Augenblicke der Verschmelzung für die Wissenschaftler besonders interessant. Schließlich ist das gerade der Moment, in dem sich die Sterne gegenseitig verformen. Wie stark sie das tun, würde etwas über ihre Größe und Festigkeit verraten und wichtige Informationen für die Zustandsgleichung liefern.

Europäische Forscher träumen von einem riesigen »Einstein-Teleskop« für Gravitationswellen

Immerhin haben die Physiker durch das Ereignis eine erste Ahnung bekommen, wie die Materie im Inneren der Objekte nicht beschaffen sein kann: Die Daten des Ereignisses reichten zumindest bereits aus, um manche Zustandsgleichungen auszuschließen, sagt LIGO-Forscher Bangalore S. Sathyaprakash von der Pennsylvania State University. »Neutronensterne mit einem Radius von mehr als 15 Kilometern sollte es nicht geben.« Insgesamt deuten die Daten in die Richtung, dass Neutronensternmaterie vergleichsweise weich sein könnte.

Künftige Entdeckungen und Detektoren werden sicherlich tiefere Einblicke ermöglichen. Da ist zum Beispiel ein europäisches Projekt namens »Einstein-Teleskop«. Dieses riesige Gravitationswellen-Observatorium könnte dann weit mehr als nur eine Obergrenze für die Größe von Neutronensternen liefern, sagt Sathyaprakash. »Man könnte den Radius mit einer Genauigkeit von 100 Metern bestimmen.« Das wäre höchst beeindruckend, insbesondere wenn man bedenkt, dass es sich um Objekte handelt, die zig Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt sind.

Generell könnten Ereignisse wie GW170817 enorme Auswirkungen auf unser kosmologisches Weltbild haben. So lässt sich aus einem Gravitationswellensignal die Gesamtmasse eines Paares verschmelzender Himmelskörper berechnen, wie Bernard Schutz bereits 1985 erkannte. Ausschlaggebend hierfür sind sowohl die Frequenz der Gravitationswellen als auch deren Änderungsrate, wenn sich die beiden Objekte auf Spiralbahnen immer näher kommen. Aus der Gesamtmasse wiederum lässt sich ableiten, wie stark die Gravitationswellen am Ort der Quelle gewesen sein müssen.

Ein Vergleich mit der Amplitude des auf der Erde registrierten Signals liefert dann die Entfernung, die von der Gra-

itationswelle zurückgelegt wurde. Verdoppelt man beispielsweise die Entfernung einer sonst unveränderten Quelle, so wäre die Amplitude der Gravitationswellen in LIGO nur noch halb so groß. Die Wissenschaftler bezeichnen ein solches Signal als »Standardsirene«, eine Anspielung auf die »Standardkerzen« der Kosmologie. Unter Letzteren versteht man Himmelsobjekte mit bekannter absoluter Helligkeit, etwa Supernovae vom Typ 1a, mit deren Hilfe sich kosmische Entfernungen messen lassen.

Schutz und seine Kollegen haben die Entfernung von GW170817 mit der Rotverschiebung der Galaxien in der Region der Quelle der Gravitationswellen verknüpft. Die kosmologische Rotverschiebung gibt an, um welchen Faktor sich der Kosmos zwischen Aussendung und Empfang des Signals ausgedehnt hat. So erhielten die Forscher einen unabhängigen Wert für die Hubble-Konstante, also die gegenwärtige Expansionsrate des Weltalls.

Sondentrio im Weltall als riesiges Interferometer

Das ist wichtig, denn selbst modernste Methoden, die seit den Arbeiten von Edwin Hubble über nahezu ein Jahrhundert hinweg verbessert wurden, liefern Ergebnisse, die um ein paar Prozent voneinander abweichen. Die erste Messung mit einer Standardsirene löst diese Diskrepanz noch nicht auf: Das Resultat liegt etwa in der Mitte der klassischen Werte, hat aber, da es auf einer einzigen Messung basiert, noch einen großen Fehlerbalken. Die Forscher gehen jedoch davon aus, dass sich mit weiteren Standardsirenen-Messungen die Hubble-Konstante auf ein Prozent genau bestimmen ließe. Die Methode mit Standardkerzen weist dagegen immer noch Fehler von zwei bis drei Prozent auf. Als direktes und unabhängiges Verfahren könnten die Standardsirenen also den Streit um die Hubble-Konstante beenden, glauben einige Forscher.

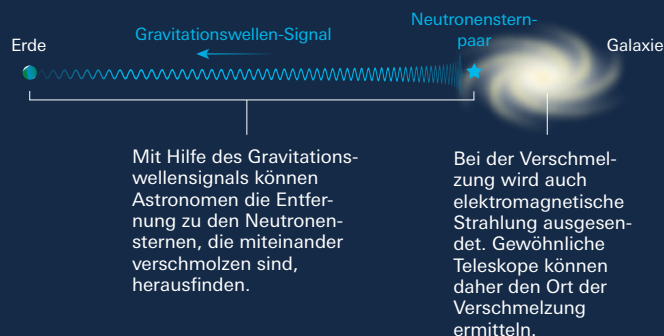
Mit Interferometern im Weltall, wie der unter Federführung der ESA für die 2030er Jahre geplanten Laser Interferometer Space Antenna (LISA) – einem Trio von Raumsonden –, können sich die Standardsirenen sogar zu noch machtvolleren Werkzeugen der Kosmologie entwickeln. LISA soll insbesondere im Bereich niederfrequenter, also langwelliger Gravitationswellen messen, die sich von Detektoren auf der Erde nicht nachweisen lassen. Damit geraten massereichere Systeme ins Visier, die stärkere Gravitationswellen aussenden.

Im Prinzip könnte LISA Sirenen im gesamten beobachtbaren Universum finden und mit der Hilfe konventioneller Teleskope nicht nur die heutige Expansionsrate, sondern auch deren zeitliche Änderung im Verlauf der kosmischen Geschichte bestimmen. Damit würde das Projekt einen Beitrag zur Lösung des wohl größten Rätsels der Kosmologie liefern: die Natur der mysteriösen Dunklen Energie, welche die Expansion des Alls beschleunigt.

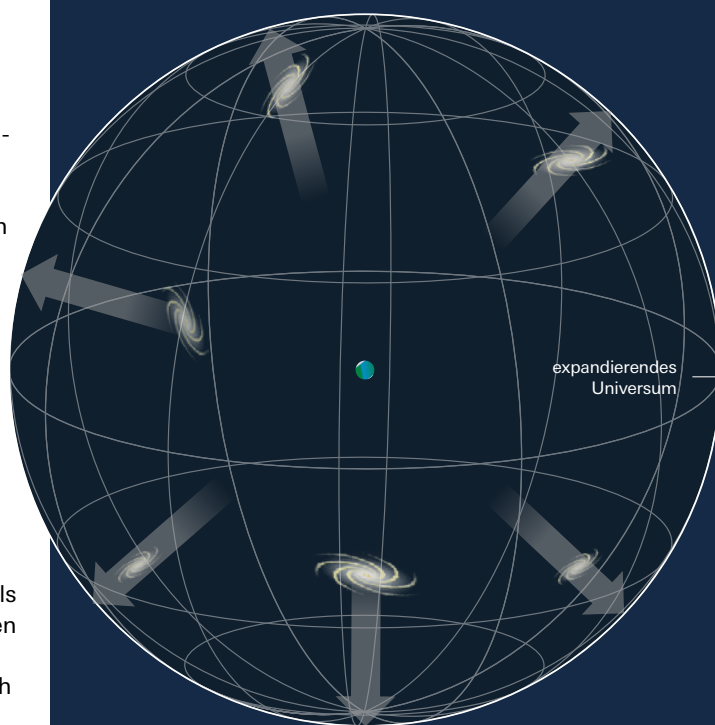
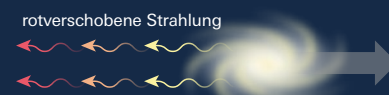
Von dem Satellitentrio erwarten die Forscher aber noch etwas anderes: Während die Interferometer auf der Erde vor allem kurze und seltene Ereignisse aufspüren, soll das Weltraumobservatorium schon bei der ersten Inbetriebnahme eine ganze Kakophonie von Signalen empfangen. Darunter jene eines Chors enger Doppelsterne aus Weißen

Kosmische Sirenen

Verschmelzende Neutronensterne bieten eine neue Methode zur Bestimmung der Hubble-Konstanten – ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der das Weltall expandiert.



Dank astronomischer Standardverfahren lässt sich dann die Rotverschiebung bestimmen und damit, wie stark sich das Universum zwischen Aussendung und Empfang der Strahlung ausgedehnt hat.



Rotverschiebung und Entfernung lassen sich miteinander kombinieren, um die Hubble-Konstante zu berechnen – im Idealfall für viele Verschmelzungen.

Zwergen – den Überbleibseln sonnenähnlicher Sterne – in unserer Milchstraße. »Es wird uns so vorkommen, als lebten wir in einem lauten Wald, in dem wir das Lied eines einzelnen Vogels aus dem Lärm isolieren müssen«, sagt die Astrophysikerin Monica Colpi von Università degli Studi di Milano-Bicocca in Italien, die dem Komitee angehört, das die wissenschaftlichen Ziele der Mission festlegt.

Gelegentlich würde auch LISA Verschmelzungen Schwarzer Löcher sehen, aber auf einer ganz anderen Größenordnung als LIGO: Im Zentrum der allermeisten Galaxien sitzt nach heutigem Verständnis ein supermassereiches Schwarzes Loch mit der millionen- oder gar milliardenfachen Masse unserer Sonne. Im Verlauf von Milliarden Jahren kollidieren immer wieder ganze Galaxien miteinander. Dabei fusionieren dann auch deren zentrale Schwarze Löcher zu noch größeren Exemplaren, was mächtige und langwellige Erschütterungen der Raumzeit auslösen würde. Zwar sind solche Ereignisse extrem selten. Doch im beobachtbaren Kosmos gibt es Schätzungen zufolge hunderte Milliarden von Galaxien. LISA dürfte damit gute Chancen haben, hin und wieder ein solches Signal zu registrieren.

Die Wissenschaftler verfolgen derzeit noch einen anderen Weg, um die Gravitationswellen von Paaren supermassereicher Schwarzer Löcher nachzuweisen, und zwar möglichst lange vor ihrer Verschmelzung. Mit Radioteleskopen überwachen sie Pulsare in der Milchstraße und suchen nach kleinen Schwankungen in ihren Signalen, die durch die Gravitationswellen aus der Annäherung zweier Giganten verursacht werden könnten. Inzwischen gibt es bereits drei »Pulsar Timing Arrays« in Australien, Europa und Nordamerika, ein viertes entsteht derzeit in China.

Künftige Detektoren würden bereits Monate vor der Verschmelzung Schwarzer Löcher Alarm schlagen

Auch LISA würde wohl Monate vor den Signalen der eigentlichen Verschmelzung der gigantischen Massehaufen ausschlagen – dank der enormen Empfindlichkeit und der Stärke der bereits dann ausgesendeten Gravitationswellen. Damit sollten Forscher die heftigen Zusammenstöße ganz genau beobachten können, was ihnen erlauben würde, die Vorhersagen von Einsteins Relativitätstheorie höchst präzise zu überprüfen. Und innerhalb mehrerer Jahre sollte LISA ausreichend Daten solcher Ereignisse gesammelt haben, um eine Rekonstruktion der hierarchischen Entstehung der Galaxien zu ermöglichen, wie sich also im Verlauf der kosmischen Geschichte aus kleinen immer größere Systeme gebildet haben.

Aber auch bei den Interferometern auf der Erde wollen die Forscher aufrüsten. So hat ein Forscherteam in den USA auf dem Reißbrett ein Projekt namens Cosmic Explorer entworfen, ein Interferometer mit einer Armlänge von 40 Kilometern – das Zehnfache der LIGO-Detektoren. Es wäre damit empfindlich genug für Signale aus weit größerer Entfernung, möglicherweise aus dem gesamten beobachtbaren Universum.

Das europäische Konzept für das Einstein-Teleskop sieht hingegen einen unterirdischen Detektor mit zehn Kilometer langen Armen vor, die als gleichseitiges Dreieck ange-

ordnet sind und sich 100 Meter unter der Oberfläche befinden. Die extrem ruhigen Bedingungen dort könnten den Bereich der für das Observatorium erfassbaren Raumzeitbeben erheblich ausweiten. So ließen sich bis zu zehnmal kleinere Frequenzen als mit den derzeitigen Interferometern nachweisen. Auf diese Weise könnten die Wissenschaftler nach Schwarzen Löchern jenseits der verbotenen Zone im Massenspektrum suchen, die von den destruktiven Prozessen bei Paar-Instabilitäts-Supernovae geschaffen wird. Bei extrem schweren Sternen sollte es nämlich wieder zu einer Art von Kollaps kommen, bei dem Schwarze Löcher entstehen, die mehr als 130 Sonnenmassen auf die Waage bringen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



SAKIMESTERKE / STOCK.ADOBE.COM

Mit etwas Glück könnten Gravitationswellen sogar einen Einblick in die Physik des Urknalls liefern, in eine Phase also, die sich mit gewöhnlichen Teleskopen nicht beobachten lässt. Physiker wissen bereits, dass in den ersten Sekundenbruchteilen des Universums zwei der vier fundamentalen Kräfte – die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung – ununterscheidbar waren. Als sich die beiden in die heute bekannten Kräfte aufspalteten, könnten Gravitationswellen freigesetzt worden sein. Diese könnten noch immer als eine Art Hintergrundrauschen mit LISA nachweisbar sein, sagt Schutz.

Auf der Wunschliste von Nobelpreisträger Rainer Weiss steht indes als Nächstes etwas, was LIGO und Virgo mit Glück schon kurz nach Wiederaufnahme des Messbetriebs im Frühjahr 2019 aufspüren könnten: die Gravitationswellen eines kollabierenden Sterns, einer Supernova, die jedoch vergleichsweise nah sein müsste. Aber Weiss hofft auch auf unerwartete Entdeckungen. »Wenn wir nicht irgendetwas sehen, was wir bisher nicht auf dem Schirm haben, wäre ich schon etwas enttäuscht.« ◀

QUELLEN

Farr, W. et al.: Distinguishing Spin-Aligned and Isotropic Black Hole Populations with Gravitational Waves. In: Nature 548, S. 426–429, 2017

Schutz, B. F.: Determining the Hubble Constant from Gravitational Wave Observations. In: Nature 323, S. 310–311, 1986

Smartt, S. J. et al.: A Kilonova as the Electromagnetic Counterpart to a Gravitational-Wave Source. In: Nature 551, S. 75–79, 2017

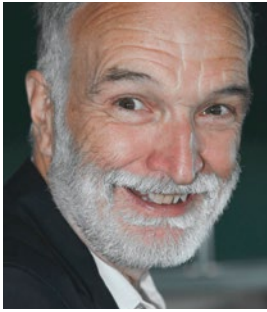
nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 556, S. 164–168, 12. April 2018

SCHLICHTING! WIE LAUB SICH ABWÄRTSWIEGT



Die Luft umströmt fallende Blätter auf charakteristische Weise. Darum wiederholen sich auf dem Weg zum Boden oft einige typische Bewegungsfiguren.

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/1587626

Ein unabsehbar Blättermeer entperlt dem Netz der Zweige

Christian Morgenstern (1871–1914)

► Viele Menschen berührt es emotional, wenn die Bäume im Herbst ihr Laub verlieren. Seit jeher haben Dichter das Naturschauspiel thematisiert. So lässt beispielsweise Edmond Rostand seinen Cyrano de Bergerac über die Blätter sagen: »Wie schön sie fallen! Wie sie es verstehen, in diesen kurzen Weg vom Ast zur Erde eine letzte Schönheit zu legen, und trotz ihres Entsetzens darüber, auf dem Boden zu verfaulen, wollen, dass dieser Fall die Grazie eines Fluges habe.« Das formuliert poetisch die physikalisch interessante Beobachtung, dass die Blätter nicht nur regellos heruntertorkeln, sondern immer wieder regelmäßige Bewegungen offenbaren.

Studiert man das Phänomen etwas aufmerksamer, lassen sich bestimmte Grundformen ausmachen. Sie sind besonders gut bei Windstille zu erkennen. Neben dem chaotischen irregulären Fall trifft man häufig drei besondere Figuren an (siehe Abbildung oben). Das ist erstens der waagerechte Fall, bei dem das flach in der Luft herabschwebende Blatt nur leicht um die horizontale Lage schwankt; zweitens der oszillierende Fall, bei dem sich die Blätter ziemlich gleichmäßig abwechselnd zur einen und zur anderen Seite wiegen; drittens der rotierende Fall, bei dem sich die Blätter stark zur Seite ausgelenkt werden und sich um sich selbst drehen.

Für eine Erklärung kann man sich vereinfachend vorstellen, dass die Schwerkraft im Schwerpunkt des Blatts angreift. Dessen Geschwindigkeit nähme durch die Erdbeschleunigung ständig zu, würde nicht die



Oft bewegen sich Blätter auf eine von drei Arten abwärts: im waagerechten (links), oszillierenden (Mitte) oder rotierenden Fall (rechts).

Luftwiderstandskraft auf den Plan gerufen. Diese wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit und ist proportional zur Querschnittsfläche, die der anströmenden Luft ausgesetzt ist. Auch die dreidimensionale Form des Blatts wirkt sich auf die Strömungen aus. Für Experimente empfiehlt es sich, die Zahl der Einflussfaktoren zu reduzieren und kontrolliert zu variieren. Am einfachsten geht das mit Spielkarten oder Haftnotizblättern. Letztere gibt es in verschiedenen Größen, und ihre Masse lässt sich leicht über die Zahl der zusammengeklebten Notizblätter ändern. Auf Spielkarten geklebt, lässt sich damit auch deren Masse variieren. Unter diversen Startwinkeln beim Loslassen kann man mit etwas Geschick die drei bereits erwähnten Grundformen des Falls reproduzieren.

Für das einfachste Szenario, den waagerechten Fall, wird das Blatt in horizontaler Ausrichtung losgelassen. Es sinkt leicht schwankend zu Boden und landet mit einer gewissen Streuung senkrecht unterhalb des Startpunkts. Die Beschleunigungsstrecke ist sehr kurz, weil

H. JOACHIM SCHLICHTING
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



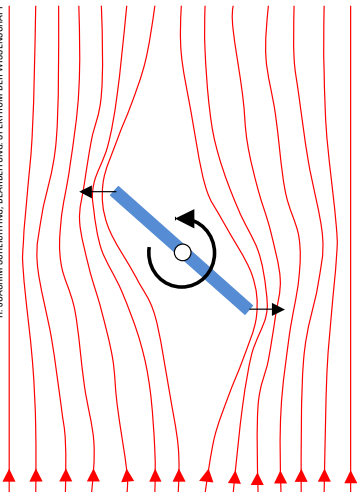
BORICHE / BETTY IMAGES / ISTOCK

der Luftströmung die maximale Querschnittsfläche entgegensteht. Die Luftwiderstandskraft holt also bereits kurz nach dem Start die konstante Schwerkraft ein, und das Blatt sinkt mit gleich bleibender Geschwindigkeit. In der Realität gelingt es aus freier Hand aber kaum, eine Spielkarte völlig waagrecht fallen zu lassen. Außerdem ist die Luft nie ganz ruhig, und es kommt zu Schwankungen, die sich manchmal zum oszillierenden Fall aufschaukeln – dem zweiten Szenario.

Von Luftstrom und Trägheit geschaukelt

Dieses lässt sich mit einem stark vereinfachenden Modell beschreiben. Dazu stellen wir uns den Luftstrom durch einzelne Strömungsfäden visualisiert vor (siehe Illustration unten). Lässt man das Blatt schräg fallen, so gleitet es auf dem Luftpolster seitlich ab. Währenddessen muss die Luft ausweichen, wird also am Blattende beschleunigt. Anschaulich gesprochen werden die Stromfäden zusammengedrückt und die Luftportionen darin auseinandergesogen, so dass ein Unterdruck entsteht. Die entsprechende Kraft wirkt an beiden Enden des Blatts und erzeugt ein resultierendes Drehmoment. Es verschwindet, sobald das Blatt waagrecht ausgerichtet ist. Aus Trägheit dreht es sich jedoch etwas über die horizontale Lage und erfährt daraufhin ein entgegengesetztes Drehmoment. Die Rotationsrichtung kehrt sich um, und der Vorgang wiederholt sich – das Blatt wiegt sich hin und her.

H. JOACHIM SCHLICHTING: BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



Bei einer Auslenkung aus der Horizontalen werden die Stromlinien um das herabsinkende Laub etwas zusammengedrückt. Dadurch entsteht an den Enden des Blatts ein Unterdruck, der es zurück in die Waagrechte dreht.

Beim dritten Szenario stürzt das Blatt zu Beginn fast senkrecht herab. Somit ist die der Luftströmung ausgesetzte Querschnittsfläche minimal. Das Blatt wird also bei kleinster Luftwiderstandskraft maximal beschleunigt. Der Luftwiderstand nimmt allerdings sehr stark mit der Geschwindigkeit zu. Darum erzeugen bereits kleinste Auslenkungen und die damit verbundene wachsende Oberfläche plötzlich eine viel größere Kraft. Nach demselben Mechanismus wie beim schrägen Fall entsteht ein wirkungsvolles Drehmoment. Die Trägheit ist daraufhin so groß, dass sich das Blatt nicht nur einmal über die waagrechte, sondern auch über die vertikale Ausrichtung hinaus dreht. So gelangt es immer wieder in eine ähnliche Situation wie beim Start. Es dreht sich fortlaufend in derselben Richtung weiter und driftet währenddessen zur Seite ab.

Selbst mit rechteckigen Pappkarten sind die Flugbahnen allerdings sehr störanfällig. Daher ist es umso erstaunlicher, dass auch viel komplizierter geformte Laubblätter zumindest phasenweise die drei Figuren vollführen. Doch einerseits könnte die jeweilige Blattgestalt für eine bestimmte Bewegungsart vielleicht sogar besonders gut geeignet sein. Andererseits beobachtet man im Herbst gleichzeitig sehr viele »Versuche« unter den verschiedensten Anfangsbedingungen. Die Wahrscheinlichkeit ist also größer, irgendwann Zeuge einer günstigen Konstellation zu werden, als bei den vergleichsweise wenigen Experimenten, die wir per Hand durchführen können.

Nicht immer sind die Flugbahnen abgeworfener Pflanzenteile dem Zufall überlassen. Ahornsamen beispielsweise zeigen unabhängig vom Startwinkel eine typische Rotationsbewegung. Dadurch sind sie lange in der Luft und werden vom Wind weit fortgetrieben. Laub hingegen bleibt meist bei seinem Spender, schützt die Wurzeln im Winter vor Frost und wird schließlich zu Erde, die das Wachstum neuer Blätter nährt – bis zum nächsten Herbst.

QUELLE

Field, S. B. et al.: Chaotic Dynamics of Falling Disks. In: Nature 388, S. 252–254, 1997



STREITGESPRÄCH

»DIE DATEN SPRECHEN EBEN NICHT FÜR SICH«

Was haben Glaube und Vernunft gemein? Ein Streitgespräch über Wissenschaft und Religion zwischen der Physikerin Barbara Drossel und dem Primatenforscher Volker Sommer.

Diesen Artikel mit vier Videostatements der Gesprächspartner finden Sie unter [» spektrum.de/artikel/1587770](https://www.spektrum.de/artikel/1587770)

Frau Professor Drossel, Herr Professor Sommer – gibt es Gott?

Prof. Dr. Barbara Drossel: Ja. Denn was ist die letzte Realität? Was ist das, was absolut, ewig, aus sich heraus existiert, was ist der Urgrund von allem anderen? Dass die letzte Realität eine geistige ist und dass Materie vergänglich ist und von dieser geistigen Realität erschaffen wurde, finde ich jedenfalls plausibler als die gegenteilige Annahme.

Prof. Dr. Volker Sommer: Schon aus begrifflichen Gründen wäre ich skeptisch, mit einem uralten Dualismus der Philosophie- und Wissenschaftsgeschichte zu argumentieren. Umgangssprachlich mögen wir »Materie« und »Geist« weiter unterscheiden, aber wissenschaftlich gesehen ist die Lage doch extrem unklar. Wenn wir sagen, Gott sei Geist, haben wir also nichts gewonnen.

Drossel: Viele Wissenschaftler vertreten die Auffassung, die Materie und die Naturgesetze seien die letzte Realität, und es gebe keine Absicht, keine Pläne, keinen Sinn dahinter. Für mich ist Gott mit Konzepten wie Absicht, Sinn oder Plan verbunden. Gott ist also eine Person,

hat Bewusstsein, ist jedoch mitnichten an die materielle Welt gebunden.

Sommer: Auf Absicht hindeutende Konzepte wie Zweck, Ziel und Plan sind von uns Menschen gemachte Vorstellungen. Die müssen wir einfach benutzen, weil wir nicht anders denken können. Insofern übertragen wir unsere menschlichen Kategorien auf das, was wir als Realität bezeichnen, und dabei erfinden wir Gott.

Drossel: Die Tatsache, dass wir Pläne, Bewusstsein und Werte haben, weist für mich auf eine größere geistige Realität hin, ebenso wie unsere Sehnsucht nach Ewigkeit.

Sommer: Es sind unsere von der Evolution geprägten Gehirne, die uns in Kategorien wie vorher, heute oder zukünftig denken lassen. Zu meinen, die Wirklichkeit an sich müsse so sein, halte ich nicht für zwingend, auch wenn ich die Schönheit dieses Gedankens sehe.

Drossel: Und dennoch trauen Sie Ihrem Verstand so sehr, dass Sie Ihre Schlussfolgerung, wir hätten Gott erfunden, für gültig halten?

Sommer: Da haben Sie Recht, das ist ein Zirkelschluss. Aber zu meinen, nur weil Denken nicht ohne Vorausset-



Die Spektrum-Redakteure Frank Schubert (ganz links) und Carsten Könneker (ganz rechts) im Gespräch mit Barbara Drossel und Volker Sommer.

zungen auskommt, müsse es Gott geben, halte ich nicht für plausibel.

Sind Glaube und Vernunft echte Antagonisten?

Sommer: Nein. Auch wer vernünftig sein will, setzt vieles voraus und glaubt deshalb manches. Der Unterschied zum religiösen Glauben liegt darin, dass rationaler Glaube sich darüber freut, prinzipiell hinterfragbar und revidierbar zu sein.

Was wären denn Glaubenssätze der Naturwissenschaft?

Sommer: Ob die Naturwissenschaft auf Glaubenssätzen beruht, sei dahingestellt. Aber zumindest haben die Forscher, die sie vorantreiben, für gewöhnlich welche. Zum Beispiel den Glauben daran, dass etwas existiert. Wenn wir ehrlich sind, sind wir darauf angewiesen, das einfach so anzunehmen.

Kann man überhaupt ohne solche Annahmen auskommen, wenn man die Welt verstehen will?

Sommer: Ich hoffe, dass die Mathematiker das können, doch diesbezüglich bin ich kompletter Laie. Jedenfalls, wenn ich einräume, dass auch in den Wissenschaften geglaubt wird, ist das doch etwas gänzlich anderes als die einander wild widersprechenden Formen religiösen Glaubens.

Fallen Naturwissenschaft und Religion also komplett auseinander?

Sommer: Historisch gesehen nicht, weil viele Pioniere der Wissenschaft die Natur untersuchten, um ihr religiöses System zu stützen, sprich: die Gedanken Gottes zu erkennen. Aber heute brauchen wir meines Erachtens die Gotteshypothese nicht mehr und sollten sie aufgeben.

Drossel: Es gibt Fragen, für die die Naturwissenschaft zuständig ist, zum Beispiel: Wie funktioniert die Welt, welchen mathematischen Gesetzmäßigkeiten unterliegt sie, was sind die Regelmäßigkeiten, was sind die Ketten von Ursache und Wirkung? Und es gibt Metafragen, für die die Wissenschaft grundsätzlich nicht zuständig ist. Das sind etwa solche: Wollte jemand diese Welt, hat jemand

sie sich ausgedacht? Was ist der Sinn des Lebens? Gibt es einen Plan, gibt es eine Antwort auf das Leid in der Welt? Diese legitimen Fragen können weder die Physik noch die Biologie beantworten. Die Menschheit ist ja nicht weniger religiös geworden durch den Fortgang der Wissenschaft, eher im Gegenteil. Der Grund dafür ist meines Erachtens, dass die wichtigen Lebensfragen von der Wissenschaft nicht beantwortet werden.

Könnte man sagen, die echte Naturwissenschaft sei reine Empirie, also das Erkennen und Verstehen der Welt, indem man sie beobachtet – während Religionen von einer transzendenten, nicht versteh- und hinterfragbaren Wirklichkeit ausgehen?

Drossel: Reine Empirie gibt es nicht. Die Wissenschaftsphilosophen sagen, dass wir immer Vorannahmen machen müssen. Zudem legen Daten nicht eine Theorie eindeutig nahe, sondern lassen Raum für Interpretationen. Naturwissenschaftler formen aus empirischen Daten Theorien, die sie plausibel finden, aber letztlich ist das immer eine Induktion, die über das hinausgeht, was man streng logisch aus den Daten folgern muss. Nur in der Mathematik arbeitet man strikt deduktiv.

Sommer: In der Tat, es wird zwar oft gesagt, die Daten sprechen für sich selbst. Doch das tun sie eben nicht. Wir brauchen Hermeneutik, um nackte Information in für uns verständliche Form umzusetzen. Dabei entstehen wissenschaftliche Narrative. Die sind wiederum abhängig von sozioökonomischen Verhältnissen, vom Geschlecht, vom politisch gerade Akzeptablen und so weiter. Insofern ist Wissenschaft nicht objektiv.

Drossel: In Bezug auf die Physik sehe ich das differenzierter. Die Formeln, die wir benutzen, um physikalische Phänomene zu beschreiben, sind ein Stück weit zeitlos. Was sich ändert, sind die Weltbilder, die wir um unsere Theorien herum bauen. Nach Newton herrschte das deterministisch-mechanistische Weltbild vor, wonach alles, was in der Welt passiert, durch irgendwelche Kräfte bestimmt wird, die die Objekte bewegen. Damit hatte man ein kausal geschlossenes Weltbild, in dem alles durch die Physik bestimmt wurde. Auf die Theorien setzen also wissenschaftliche Narrative auf, die über die strikte Verifizierbarkeit hinausgehen und die ich heute überall sehe – gerade im populärwissenschaftlichen Bereich.

Was genau verstehen Sie unter einem wissenschaftlichen Narrativ?

Drossel: Um die Quantenphysik etwa rankt sich öfter die Erzählung, dass alles nur noch subjektiv und vom Beobachter abhängig sei und es überhaupt keine objektive Wirklichkeit mehr gebe. Oder nehmen Sie das Paradigma, die fundamentalen Teilchen und ihre Wechselwirkungen würden alles beschreiben und bestimmen, was in der Welt passiert. Oder der Gedanke, dass die Geschichte des Universums wie auch die Evolution blind und zufallsbestimmt ablaufen. Das sind alles toll klingende Narrative.

Der amerikanische Stringtheoretiker Leonard Susskind schlägt vor, wir sollten den Begriff



CHRISTIAN SCHAUERNA

Barbara Drossel ist Professorin für Theoretische Physik an der Technischen Universität Darmstadt. Sie forscht auf dem Gebiet der Theorie komplexer Systeme. Die gläubige Christin engagiert sich in einer evangelischen Freikirche. 2015 publizierte sie den Band »Und Augustinus traute dem Verstand – Warum Naturwissenschaft und Glaube keine Gegensätze sind«.

»Realität« abschaffen und durch »Reproduzierbarkeit« ersetzen.

Drossel: Ich meine, es gibt eine objektive Realität, und unsere Theorien versuchen, sich ihr anzunähern. Manche setzen die Quantenphysik derart absolut, dass sie die absurdesten Schlussfolgerungen akzeptieren, nur weil diese aus den Formeln ableitbar sind – die Vielweltheorie zum Beispiel. Die Quantenphysik hat aber ihre Gültigkeitsgrenzen, und nur wer das erkennt, kommt an den Punkt, die objektive Realität abschaffen zu wollen. Ich bin dazu nicht bereit.

Wie viel Vernunft steckt in der Religion?

Drossel: Aus meiner Sicht viel. Ich finde interessant, wie die Schreiber der Bibel argumentiert haben, dass es gute Gründe für den Glauben gibt – zum Beispiel der Apostel Paulus, als er versucht, die Korinther von der Auferstehung zu überzeugen.

Sommer: Da möchte ich widersprechen. Denken Sie an hinduistische Götter mit vier Armen und Köpfen – dass man die zu groben Himmelsrichtungen in Bezug setzen kann, ist doch genauso wenig eine Übung in Rationalität wie die paulinische Behauptung, von einem verschwundenen Leichnam auf die Auferstehung zu schließen. Für mich wird Religion geradezu ad absurdum geführt, wenn man sie als vernünftig verkaufen will. Denn es geht ja



CHRISTIAN SCHAUERNA

Volker Sommer ist Professor für Evolutionäre Anthropologie am University College London. Der vor allem in Afrika und Asien aktive Primatenforscher war als junger Mann gläubiger Christ, studierte Theologie und textete sogar Kirchenlieder. Heute nimmt er aus akademischem Interesse weiterhin an religiösen Ritualen teil.

gerade um die Unvernunft, um das Irrationale. Das ist ja das Schöne an religiösen Ausdrucksformen, dass man darin so viel wunderbaren Unsinn wiederfindet, die Visionen, die Ekstasen, die Träume, das Grenzenlose.

Drossel: Ich benutze auch in Glaubensdingen meinen Verstand.

Sommer: Dann sind Sie nicht religiös, sondern nur nicht bereit, die Gotteshypothese aufzugeben. Was ist mit Gläubigen, die Voodoo praktizieren oder Genitalien verstümmeln, um Götter zu beschwichtigen? Irren die sich, und nur Christen kennen die Wahrheit? Ich meine: Wer seinen Verstand gebraucht, wird stetig weniger religiös. Das führt die protestantische Kirche Deutschlands vor Augen, die pietistisch-evangelikale Praktiken immer mehr aufgegeben hat zu Gunsten aufgeklärten Denkens.

Meinen Sie, dass vernünftig denkende Wissenschaftler gar nicht darum herumkommen, Atheisten zu sein?

Sommer: Ich bin kein Atheist. Damit würde ich der Gotteshypothese unnötig Gewicht verleihen, weil ich mich ja aus Opposition zu einem scheinbaren Argument definieren würde.

In dem Sinne wäre Atheismus selbst ein Glaube?

Sommer: Nein, aber er räumt der Gotteshypothese zu viel Kredit ein.

Das heißt, Sie halten sich aus der Frage heraus?

Sommer: Bestenfalls würde ich mich als Agnostiker bezeichnen, nach Griechisch »ágnōstos«, nicht erkennbar. Allerdings nicht in dem Sinn, dass Gottes Existenz weder beweisbar noch widerlegbar ist. Sondern dahingehend, dass Fragen für oder gegen die Existenz von übernatürlichen Wesen nicht in wissenschaftliche Diskurse gehören. Ich würde mir auch das Etikett »Naturalist« ankleben.

Wie beurteilen Sie Wissenschaftler wie Richard Dawkins, die quasi für den Atheismus werben?

Sommer: Den Grundgedanken finde ich lobenswert, einschließlich der Theorie, religiöse Vorstellungen könnten zu Viren werden, so genannten Memen, die sich in unseren Gehirnen als Parasiten einnisten. Dawkins jedoch liegt falsch, wenn er meint, Religion sei stets maladaptiv gewesen, also schädlich für ihre Träger. Das Gegenteil trifft zu: Menschen sind von Natur aus religiös. Denn Glaubensmuster sind sozial wirksam, schaffen Identität und Vertrauen innerhalb der eigenen Gruppe. Das macht Kooperation effektiver, wenn wir mit andersgläubigen Nachbarn um Ressourcen konkurrieren, eben bis hin zu Kriegen.

Hängt Religion beim Menschen nicht vielleicht mit unserem selbstreflexiven Bewusstsein zusammen – etwa mit der Erkenntnis, sterben zu müssen?

Sommer: Das ist mir als Erklärung zu singulär. Für mich spiegelt sich Religion bereits in Verhalten wider, für das es keinen praktischen Grund gibt – und das ist nicht auf Menschen beschränkt. Mancherorts etwa meiden Schimpansen geradezu panisch die Berührung mit Wasser, während ihre Artgenossen anderswo in Teichen baden. Die von mir untersuchten Schimpansen in Nigeria wiederum verzehren regelmäßig Ameisen, aber nie Termiten, während es bei denen in Ostafrika genau umgekehrt ist – die essen Termiten, aber nie Ameisen. Wären es Menschen, würden wir ihnen ein Wasser- oder Nahrungstabu zuschreiben. Ich vermute, solche kulturellen Variationen signalisieren Zugehörigkeit zu einer lokalen Gruppe. Das stärkt die Binnenmoral, wenn, was bei Schimpansen regelmäßig vorkommt, mit Nachbarn blutige Verteilungskämpfe ausgefochten werden. Darin sehe ich einen adaptiven Vorteil der Religion.

Gibt es bei Menschenaffen auch Hinweise auf rituelles Verhalten und ein Todesbewusstsein?

Sommer: Die Tabus bei Schimpansen sind ja schon so etwas wie Rituale, eben Verhalten, bei dem die Form wichtig ist und nicht eine praktische Funktion. Ein anderes Beispiel liefern Japanmakaken. In einigen Gebieten, aber eben nicht überall tragen diese Affen Kieselsteine mit sich herum. Die schlagen sie klackernd aneinander, tun aber sonst nichts damit. Auch das ist Verhalten ohne praktische Nutzenanwendung und hat damit den Charakter eines Rituals.

Drossel: Ich möchte anmerken, dass es noch nichts über den Wahrheitsgehalt von Religionen aussagt, wenn

man eine These dazu hat, wie sie historisch entstanden sind. Reduziert man Religion auf den Nutzen für die Gesellschaft, wird man ihr nur zum Teil gerecht. Für mich bedeutet Religion, dass ich für etwas lebe, was größer ist als ich selbst – nicht nur für die Gesellschaft, sondern für etwas, das den Rahmen unserer Welt und unserer Zeit sprengt. Gläubige Menschen tun oft Dinge, die dem Überleben überhaupt nicht dienlich sind, indem sie sich beispielsweise für andere opfern.

Ein solches extrem altruistisches Verhalten oder auch die tiefe menschliche Sehnsucht nach Gerechtigkeit – sind das Hinweise darauf, dass es mehr geben muss als die uns zugängliche Realität?

Sommer: Mein scheinbarer Altruismus, ob religiös motiviert oder nicht, ist fast immer verkappter Egoismus, weil er indirekt meinen Verwandten zugutekommt. Dass wir außerdem über den Osterhasen, den Weihnachtsmann oder die Wiedergeburt einen Diskurs führen können, ist keinerlei Beleg für deren Existenz.

Drossel: Man kann doch sinnvoll darüber diskutieren, ob die Existenz dieser Dinge plausibel ist!

Sommer: Aber wenn Sie sich dabei auf den auferstandenen Christus kaprizieren, müssen Sie behaupten, dass nur Christen einen offenbaren Zugang zur Wirklichkeit haben. Oder wie ordnen Sie es ein, wenn in präkolumbischen Andenkulturen Kinder geopfert wurden, um Götter zu beschwichtigen?

Drossel: Ich würde sagen, einerseits hatte ihr Glaube manche Ähnlichkeiten mit Dingen, die es auch im christlichen Glauben gibt, einschließlich des Wissens, dass Schuld Sühne verlangt und Leben kosten kann. Andererseits kenne ich Gott als Christin so, dass er keine Kinderopfer will. An dem Punkt haben die Andenkulturen tatsächlich geirrt.

Sommer: Nach meiner Meinung haben Menschen zu verschiedenen Zeiten schlicht unterschiedliche Glaubensinhalte gelebt. Eine universell gültige Unterscheidung von Gut und Böse an Religion zu knüpfen, muss scheitern, weil ja unterschiedlichste gegensätzlichste Moralkodexe entwickelt wurden. Das hat regelmäßig horrenden Untaten gerechtfertigt, bei Christen ebenso wie bei Buddhisten und auch bei angeblich nichtreligiösen Ideologien wie Maoismus und Stalinismus. Am Ende geht es immer um Macht.

Drossel: Religion ist eine starke Kraft, die missbraucht werden kann. Aber sie kann auch wunderbare Dinge leisten. Paulus beispielsweise sagte, hier sind nicht Sklaven und nicht Freie, nicht Mann und Frau, sondern wir sind alle eins in Christus. Das ist doch ein starkes Bekenntnis – und es ist ein total wichtiger Gedanke, dass jeder Mensch wertvoll ist.

Sommer: Das hat die Christen nicht davon abgehalten, Juden zu verfolgen.

Drossel: Im Widerspruch zu ihrer eigenen Heiligen Schrift – eine schlimme Verirrung. Im Römerbrief heißt es doch, Gott liebt sein Volk. Jesus zufolge lautet das höchste Gebot, du sollst Gott lieben von ganzem Herzen und deinen Nächsten wie dich selbst. Das ist eine zentrale biblische Aussage.

Sommer: Mit genau dem Liebe-Argument sind die Katharer ausgerottet worden. Es hieß, diese Häretiker liefen Gefahr, auf ewig in der Hölle zu schmoren. Deshalb müsse man sie schnellstmöglich umbringen, damit wenigstens einige noch in den Himmel kommen.

Drossel: Man kann alles missbrauchen. Aber ein wichtiges Gebot der jüdisch-christlichen Tradition lautet, du sollst nicht töten.

Sommer: Das bezieht sich nur auf die Binnengruppe. Die anderen sind damit nicht gemeint. De facto wird überall getötet, im Namen von Religionen genauso wie im Namen politischer Ideologien.

Angenommen, es gebe ein letztes Prinzip. Glauben dann alle Religionen im Grunde an dieses eine?

Drossel: Es gibt durchaus wichtige Unterschiede zwischen den Religionen, zum Beispiel in der Frage, wie Gott ist. Doch sie haben einiges gemeinsam in dem Sinne, dass sie glauben, die letzte Realität sei geistig – etwas, was mit persönlichen Attributen assoziiert ist. Man kann, entsprechend der mittelalterlichen scholastischen Tradition, nichts Größeres denken als Gott.

Sommer: Was soll Geist sein? Schon im Englischen gibt es den Begriff so nicht, während im Deutschen von geistigen Fähigkeiten gesprochen wird, von Geisteswissenschaften, vom Weltgeist. Was wird damit suggeriert? Verstand, Nichtmaterielles, Bewusstsein? Das sind problematische Begriffe, zumal, wenn sie als Grundlage dienen sollen, um auf einen Schöpfer zu schließen.

Drossel: Aber wenn Materie nicht ewig ist, muss sie von etwas anderem in Existenz gerufen worden sein.

Sommer: Ich brauche solche Fragen nicht, um ein erfülltes Leben zu führen.

Drossel: Und was tun Sie, wenn Ihnen genommen wird, was Ihnen Lebenserfüllung gibt? Das Großartige am Glauben ist für mich, dass der Lebenssinn tiefer geht als die Dinge, die ich selbst in das Leben hineinlege.



Sommer: Mein Dasein hat keinen tieferen Sinn – so sehe ich das, und es gibt mir ein freies Gefühl von Zugehörigkeit zu genau dieser Zeit, in die ich zufällig hineingeboren wurde und die ich mit anderen teile, hoffentlich einigermassen verantwortungsvoll.

Drossel: Für mich war die Sinnfrage der Anlass, zum Glauben zu finden.

Sommer: Das nehme ich ja auch ernst. Gewiss schöpfen viele religiöse Menschen aus ihrem Glauben Kraft und Halt und leben damit subjektiv besser. Aber andere sind gottlos glücklich und teilen meine Sicht, dass wir mit dem Tod erlöschen und dass danach nichts mehr ist.

Drossel: Wäre das nicht furchtbar ungerecht? Manche haben sehr viel Leid ertragen, andere viel Leid verursacht, und das soll dann einfach alles weggewischt sein? Kein Ausgleich, keine Antwort, keine Auflösung? Da finde ich die biblische Verheißung »Gott wird abwischen alle Tränen« viel stimmiger.

Brauchen wir Religion, um moralisch zu sein?

Drossel: Die Tatsache, dass wir moralisch sind, weist auf eine Instanz hin. Wir alle haben moralische Maßstäbe, ob wir es wollen oder nicht, und bei bestimmten Dingen sind wir uns einig, dass sie objektiv böse sind. Offenbar gibt es eine uns prägende Instanz, die moralisch ist.

Sommer: Moral konstituiert sich über Normen, die wir übernehmen, ohne selbst darüber nachgedacht zu haben. Denn es wäre viel zu unökonomisch, müssten wir stets alles selbst abwägen. Moral ordnet sich keinen objektiven Kriterien unter, sondern ist zeit- und ortsgebunden. Im hinduistischen Indien galt es als moralisch, dass Witwen sich auf dem Scheiterhaufen des verstorbenen Gatten verbrannten. Vielen Christen und orthodoxen Muslimen gilt es als moralisch, gegenseitig ihre Gotteshäuser zu zerstören oder Homosexuelle und Menschen mit Albinismus zu diskriminieren. Das ist in Afrika an der Tagesordnung. Im Deutschland des 21. Jahrhunderts gilt das weit-

hin als inakzeptabel. Sittliche Normen können einander also fundamental widersprechen. Das heißt sich mit der Annahme, Religionen würden eine gleichsinnige Moral stiften, die auf einen gütigen »Anreger« hindeutet. Ganz im Gegenteil – gepredigte Werte nähren sich aus dem jeweiligen Wir-Verständnis.

Eine letzte Frage: Weisen die Gesetze der Naturwissenschaft den Weg zu einem Schöpfergott?

Drossel: In gewissem Sinne ja. Die Physik wirft Fragen auf, die über sie selbst hinausweisen. Allein dass die Welt rational verstehbar ist, in einer mathematischen Sprache beschrieben werden kann und es Naturgesetze gibt, deutet auf einen rationalen Gesetzgeber hin. Weshalb es Naturgesetze gibt, kann innerhalb einer naturgesetzlich bestimmten Welt nicht beantwortet werden – genauso wenig wie die Frage, warum wir diese Gesetze verstehen können. Für Einstein war die Verständlichkeit des Universums ein großes Rätsel. Ich halte die Antwort für plausibel: Das ist so, weil es einen Gott gibt, der uns erlaubt, seine Gedanken ein Stück weit nachzuvollziehen. Oder nehmen Sie die Feinabstimmung der Naturkonstanten, also das anthropische Prinzip, wonach das Universum offenbar mit der Absicht gemacht wurde, dass Leben darin entsteht. Die Frage nach Gott ist freilich eine Metafrage, keine physikalische.

Sommer: Was gewinnen Sie mit der Annahme, es gebe einen rationalen Schöpfer? Das ist keineswegs eine Antwort, sondern Sie verschieben das Problem damit nur.

Drossel: Sie nehmen also einfach alles so hin, wie es ist, ohne tiefere Erklärung?

Sommer: Ja, ich lebe gut und ohne Sehnsucht nach so genannten tieferen Erklärungen. Nehmen wir das anthropische Prinzip: Woher wollen Sie wissen, dass es nicht Milliarden verschiedener Paralleluniversen gibt und unseres bloß zufällig eines ist, in dem Menschen leben können? Nur weil wir das nicht wissen, den Schluss zu ziehen, es müsse einen planenden Gott geben, tut der Religion keine Ehre. Das ist eine Lückenbüsser-Philosophie.

Drossel: Sie meinen, die Frage nach der letzten Realität sei illegitim?

Sommer: Ich halte die Frage für unnötig, aber vor allem halte ich die Gottesantwort für inhaltslos. ◀

Die Fragen stellten die **Spektrum**-Redakteure **Frank Schubert** und **Carsten Könneker**.

LITERATURTIPPS

Grabner-Haider, A., Wuketits, F.M.: Religion als Zeitbombe? – Biologische und kulturgeschichtliche Analysen. Alibri, Aschaffenburg 2016
Die Autoren untersuchen die gesellschaftlichen Funktionen der Religion.

Lennox, J.: Gott im Fadenkreuz – Warum der neue Atheismus nicht trifft. SCM R. Brockhaus, Witten 2013
Eine Streitschrift wider die Argumente der »Neuen Atheisten«

WEBLINK

<https://www.youtube.com/watch?v=zF5bPI92-5o>

Ein Streitgespräch zwischen dem Biologen und Atheisten Richard Dawkins und dem Mathematiker und Christen John Lennox über Dawkins' Buch »Der Gotteswahn« (englisch)



CHRISTIAN SCHAUDER

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN DAS 120-ZELL

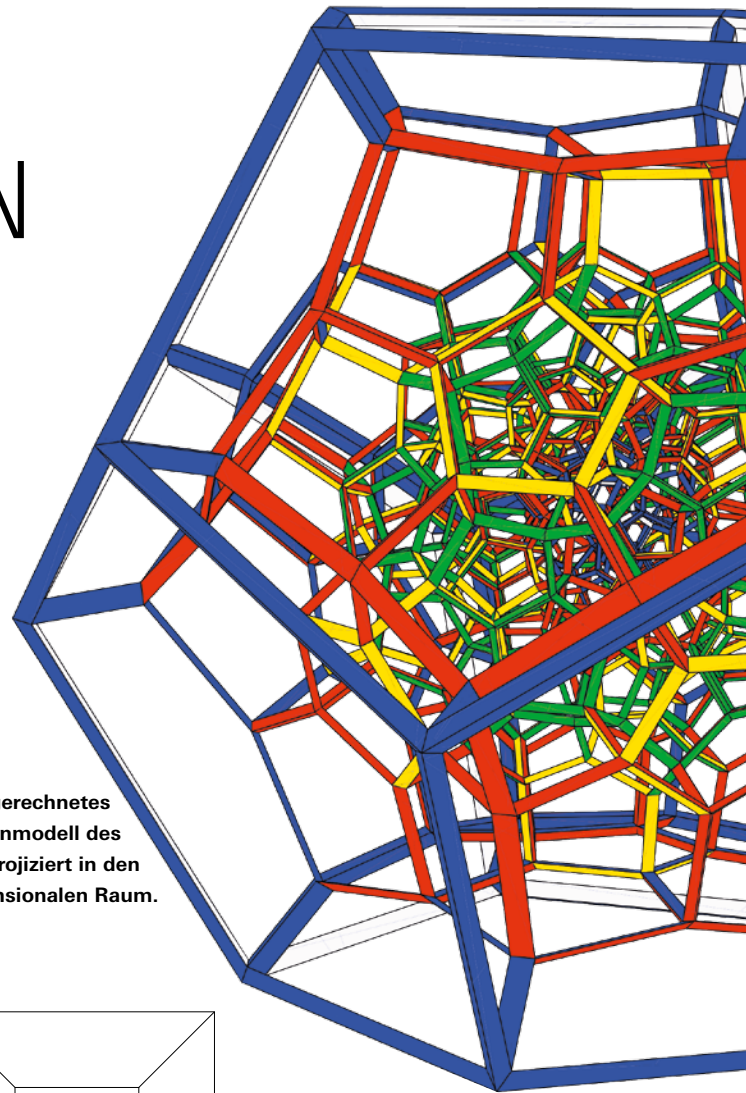
Ein vierdimensionaler Körper soll in unsere gewöhnliche dreidimensionale Welt geholt werden: mit Holz, Papier und Klebstoff.



Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

» spektrum.de/artikel/1587630

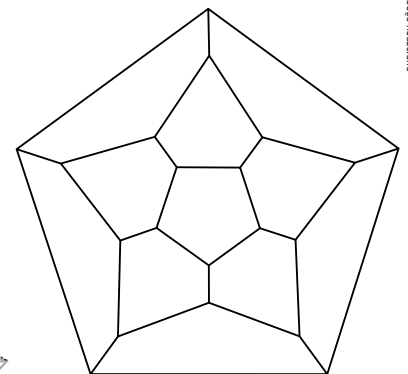
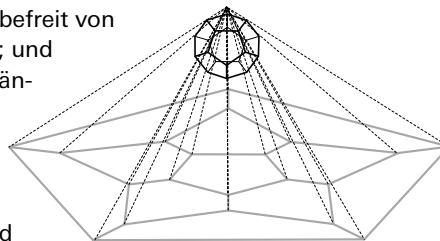
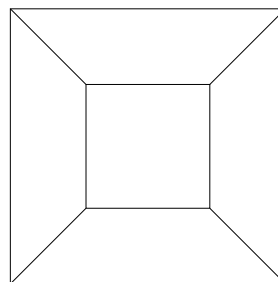
Computergerechnetes Kantenmodell des 120-Zells, projiziert in den dreidimensionalen Raum.



Wie lebt es sich in nur zwei Dimensionen? Sehr eingeschränkt. Verschiedene Autoren haben sich ausgemalt, wie es den Einwohnern der Ebene geht, die über ihre flache Welt nicht hinausdenken, geschweige denn hinausschauen können. In dem klassisch gewordenen Roman »Flatland« (1884, ins Deutsche übersetzt als »Flächenland«) des britischen Schulmeisters und Theologen Edwin Abbott Abbott (1838–1926) setzen sich Geraden, Kreise, Dreiecke und was sonst noch die Ebene bevölkert, über ihre Rangordnung auseinander; Ian Stewart beschreibt in »Flatterland« (»Flacherland«) Ähnliches, wenn auch befreit von den sexistischen Vorurteilen seines Vorgängers; und Alexander K. Dewdney hat das Leben der Plattländer bis hin zu Maschinen und dem Periodensystem der Elemente physikalisch korrekt ausgemalt (Spektrum September 1980, S. 6).

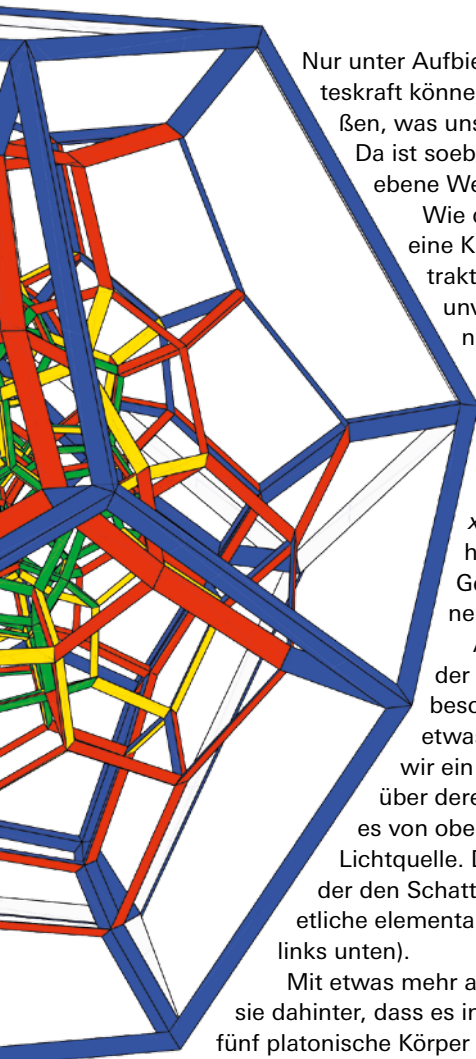
Allen diesen Beschreibungen gemeinsam ist eine Mischung aus Überlegenheitsgefühl und Bedauern. Die armen Flachdenker! Selbst wenn man ihnen die Fähigkeit zu mathematischer Argumentation zuschreibt – es hilft ihnen alles nichts. Einen dreidimensionalen Körper wie eine Kugel oder einen Würfel können sie sich beim besten Willen nicht wirklich vorstellen.

Angenommen, ein Punkt trifft ihre Ebene, weitet sich zu einem immer größer werdenden Kreis; der schrumpft wieder bis auf einen Punkt zusammen und verschwindet.



Ein Plattländer, mit dem Schatten eines Würfels konfrontiert (links oben), könnte mühelos feststellen, dass dieses Gebilde acht Ecken hat und von jeder Ecke drei Kanten ausgehen. Dass alle Vierecke eigentlich Quadrate sind und nur durch perspektivische Verzerrung teilweise wie Trapeze aussehen, muss er sich erschließen, ebenso wie die Tatsache, dass der Würfel sechs Flächen hat: Das äußere Quadrat, das alle anderen Flächen enthält, zählt mit. Ähnlich verhält es sich mit dem Dodekaeder (links unten und rechts).

CHRISTOPH PÖPPE



Nur unter Aufbietung ihrer geballten Geisteskraft können die Plattländer erschließen, was unsereinem offensichtlich ist: Da ist soeben eine Kugel durch die ebene Welt gefallen.

Wie denkt sich ein Plattländer eine Kugel? Das geht, mit abstrakten Mitteln. Ein Punkt der unvorstellbaren dreidimensionalen Welt hat drei statt der üblichen zwei Koordinaten; und die Gleichung $x^2+y^2=1$ für den wohlbekannten Einheitskreis verallgemeinert man auf $x^2+y^2+z^2=1$ für das rätselhafte Objekt. Ein ähnlicher Gedankengang macht aus einem Quadrat einen Würfel.

An dieser Stelle können wir der Vorstellungskraft unserer beschränkten Freunde sogar etwas aufhelfen. Dazu hängen wir ein Drahtmodell eines Würfels über deren Ebene und beleuchten es von oben mit einer punktförmigen Lichtquelle. Dann können die Plattländer den Schatten studieren und immerhin etliche elementare Schlüsse ziehen (Bild links unten).

Mit etwas mehr abstrakter Algebra kommen sie dahinter, dass es in drei Dimensionen nur fünf platonische Körper gibt, also von regelmäßigen Vielecken begrenzte Gebilde endlicher Ausdehnung, deren Ecken sämtlich ununterscheidbar sind. Aus plattländischer Perspektive sind das enttäuschend wenige. Schließlich gibt es von den zweidimensionalen Gegenständen der platonischen Körper – regelmäßigen Vielecken – unendlich viele.

Denken wir uns jetzt das ganze Szenario eine Dimension höher. Wir mit unserem dreidimensionalen Denken sind die Beschränkten, und irgendwo im vierdimensionalen Raum sitzen die überlegenen Wesen, die mit großer Herablassung und nicht ohne Mühe versuchen, sich in unsere mangelhafte Weltanschauung hineinzudenken (*Spektrum* November 2004, S. 101, und Dezember 2004, S. 106). Leider hat sich von ihnen noch niemand bei uns bemerkbar gemacht; also bleibt uns nichts anderes übrig, als uns mit abstrakten Mitteln eine gewisse Kenntnis ihrer Welt zuzulegen.

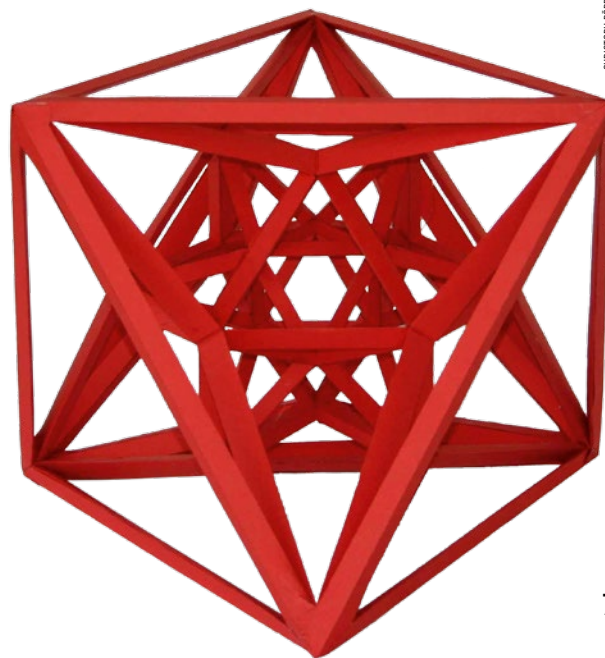
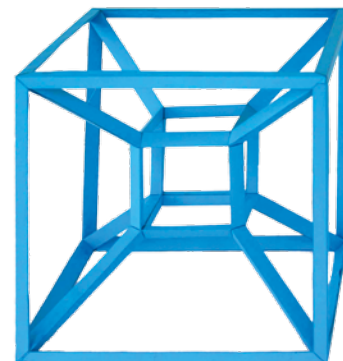
Das geht. Ein Punkt der vierdimensionalen Welt hat vier statt der üblichen drei Koordinaten. Strecken haben eine Länge, ebene Figuren eine Fläche, Körper aller Art ein Volumen und deren vierdimensionale Entsprechung ein Maß, für das man einen Namen erst noch finden muss, sagen wir »Hypervolumen«, und das mit der Einheit m^4 gemessen wird. Eine Teilmenge des vierdimensionalen Raums hat nicht eine Oberfläche, sondern, na ja, ein »Obervolumen« – alles etwas gewöhnungsbedürftig.

Um uns Dinge anschaulich zu machen, die eigentlich eine Dimension zu hoch für uns sind, haben wir im Wesentlichen dieselben zwei Möglichkeiten wie die Plattländer:

- ▶ den Schnitt: So wie die Flachwelt die Kugel durchschneidet und damit eine unendlich dünne Scheibe von ihr sichtbar macht, so durchschneiden wir den vierdimensionalen Raum mit einem geeigneten Teilraum und erhalten eine dreidimensionale »Scheibe«. Dass die für einen Vierdimensionalen unendlich dünn ist, bemerken wir nicht.
- ▶ die Projektion: Wir denken uns eine Lichtquelle »oben« in der vierten Dimension und studieren den Schatten, den der Gegenstand in unseren dreidimensionalen Raum wirft und der natürlich seinerseits dreidimensional ist.

Das ist alles eine Herausforderung an das Vorstellungsvermögen, aber im Gegensatz dazu überraschend einfach zu berechnen. Welche Punkte des vierdimensionalen Körpers liegen in dem durchschneidenden Teilraum? Alle, deren vier Koordinaten eine einfache (lineare) Gleichung erfüllen. Und wohin fällt der Schatten eines vierdimensionalen Punkts? Dorthin, wo die Gerade durch die Lichtquelle und den Punkt unseren Raum schneidet. Das ist ebenfalls eine lineare Gleichung.

Kantenmodell des 8-Zells und des 24-Zells. Im »Original« sind alle Begrenzungsvolumina platonische Körper mit vollkommener Regelmäßigkeit. Durch die Projektion sind sie perspektivisch verzerrt, bis auf den jeweils innersten und äußersten Körper.



Auch das Konzept des platonischen Körpers lässt sich ohne größere Schwierigkeiten auf höhere Dimensionen übertragen. Wieder fordert man höchste Regelmäßigkeit. Das Obervolumen eines vierdimensionalen platonischen Körpers soll von lauter gleichen (dreidimensionalen) platonischen Körpern begrenzt sein, die auch noch an jeder Stelle auf die gleiche Weise aneinanderstoßen. Nachdem es in zwei Dimensionen deren unendlich viele und in drei Dimensionen nur noch fünf gibt, könnte man erwarten, dass es in vier Dimensionen noch weniger sind. Überraschenderweise gibt es sogar sechs Stück:

- ▶ das 5-Zell aus fünf Tetraedern;
- ▶ das 8-Zell aus acht Würfeln (Bild S. 77 rechts, oben);
- ▶ das 16-Zell aus 16 Tetraedern;
- ▶ das 24-Zell aus 24 Oktaedern (Bild S. 77 rechts, unten);
- ▶ das 120-Zell aus 120 Dodekaedern und
- ▶ das 600-Zell aus 600 Tetraedern.

In diesem Artikel soll es vor allem um das 120-Zell gehen. Warum? Es hat eine überaus vielfältige Struktur; und im Gegensatz zum 600-Zell, das ihm an Anzahl der Elemente nicht nachsteht, sieht es auch in der Projektion ziemlich gut aus (Bild S. 76/77). Noch besser wird es aussehen, wenn es nicht nur – mit bescheidenen Mitteln – computeranimiert, sondern in Überlebensgröße zu betrachten ist. Der vorliegende Artikel will den Bau eines solchen Objekts vorbereiten (siehe unten).

Unter einer Projektion kann ein Körper sehr verschieden aussehen, je nachdem, wie er zur Lichtquelle und zur Projektionsfläche – oder zum Projektionsraum – ausgerichtet ist. Obendrein kann man ihn statt mit einer punktförmigen Lichtquelle auch mit parallelem Licht beleuchten. Im Bild S. 76 links unten steht das Dodekaeder mit einer Fünfecksfläche parallel zum Boden und wendet die gegenüberliegende Fläche der Lichtquelle zu. Diese wiederum ist so dicht über dem Objekt aufgehängt, dass der Schatten der obersten Fläche alle anderen Schatten einschließt. In der Projektion entstehen so vier Klassen von Fünfecken: ein unverzerrtes in der Mitte, umgeben von fünf mäßig verzerrten, diese wieder umgeben von fünf stark verzerrten und schließlich eingeschlossen von einem großen unverzerrten.

Genau analog verhält es sich mit unserer Projektion des 120-Zells. Seine 120 dodekaederförmigen Zellen gliedern sich in neun Klassen. Die erste besteht aus einem einzigen unverzerrten Dodekaeder in der Mitte, dem »Baby«. An jede seiner Flächen grenzt ein weiteres Dodekaeder. Wären die alle ebenfalls regelmäßig, so würden zwischen ihnen keilförmige Lücken klaffen, ebenso wie ein regelmäßiges Fünfeck, allseits von seinesgleichen umgeben, Lücken lässt. Schneidet man diese sechs Fünfecke aus Papier aus und knickt sie gegeneinander, so kann man die Lücken zum Verschwinden bringen und hat dabei die untere Hälfte eines Dodekaeders gebaut.

So ähnlich darf man sich das in vier Dimensionen vorstellen. Alle zwölf Dodekaeder werden gegen das Baby

in die vierte Dimension gedreht, bis sie aneinanderstoßen. Dabei muss man sich mit dem Gedanken anfreunden, dass man in zwei Dimensionen um einen Punkt, in dreien um eine Achse und in vierten eben um eine ganze Ebene dreht. In der Projektion macht sich die Drehung dadurch bemerkbar, dass die Lücken sich schließen, während die zwölf Körper perspektivisch verzerrt werden – aber nur ein bisschen. Man muss schon sehr genau hinschauen, um zu bemerken, dass die Elemente des Clusters aus den 13 innersten Zellen (das Baby unsichtbar in der Mitte) nicht ganz regelmäßig sind (Bild unten, links).

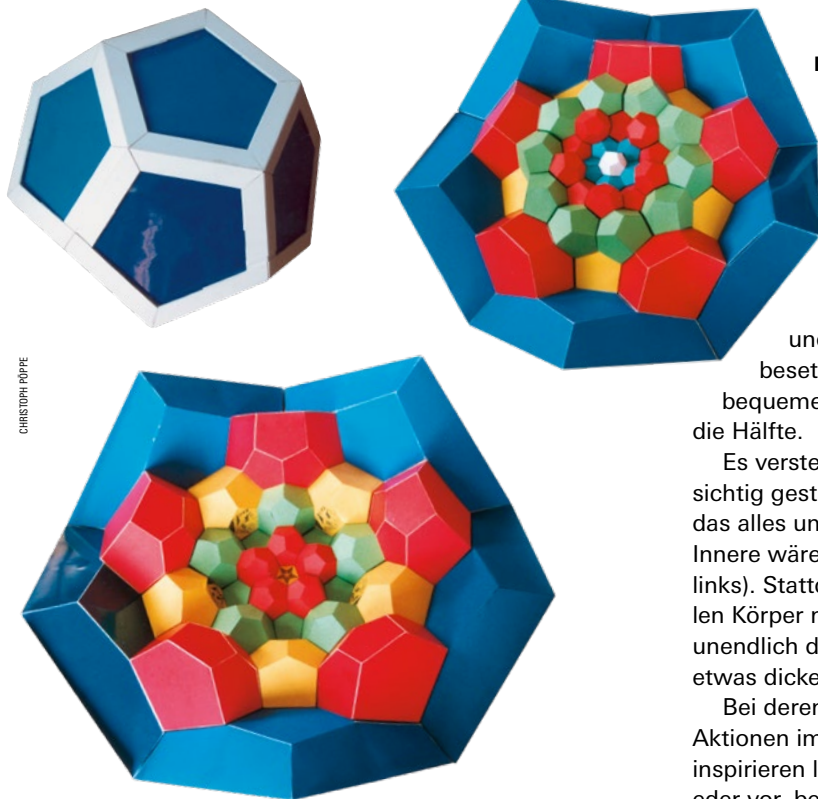
Das waren die beiden ersten Klassen von Dodekaedern. Die dritte besteht aus 20 Zellen, die sich ihrerseits zu einem dodekaederförmigen Muster anordnen (Bild unten, rechts oben). In dessen zwölf Löcher setzen sich ebenso viele Zellen der vierten Klasse, die keinen Kontakt zueinander haben. In der fünften Klasse sind dann 30 schon sehr merklich deformierte Zwölfflächner. Sie hängen miteinander zusammen und bilden wieder eine symmetrische Struktur; diesmal vertritt jedes Element eine Kante eines Dodekaeders und hat dementsprechend vier Nachbarn (Bild unten, rechts unten).

Von da an wiederholt sich die Struktur der Klassen in der umgekehrten Reihenfolge. Auf die fünfte Klasse folgen die sechste mit zwölf isolierten Zellen, die siebte mit 20, die achte mit zwölf und die neunte mit einem einzigen

Die Dodekaeder der ersten (links), zweiten (rechts oben) und vierten Klasse (rechts unten) in der Projektion des 120-Zells.



CHRISTOPH POPPE



Die Projektion des 120-Zells, ausgeführt mit einzelnen, undurchsichtigen Dodekaedern, gibt ihre Struktur erst preis, wenn man sie in zwei Teile zerlegt (rechts und unten).

dass stets zwei Zellen in der Projektion in eine zusammenfallen. Dabei entarten die Dodekaeder der fünften Klasse zu Flächen, und es bleiben insgesamt nur 45 jeweils doppelt besetzte Zellen zum Modellieren übrig. Das ist bequemer herzustellen, zeigt aber auch nur weniger als die Hälfte.

Es versteht sich, dass man die Zellen nicht undurchsichtig gestalten darf – sonst wäre von außen nichts als das alles umschließende Dodekaeder zu sehen, und das Innere wäre erst sichtbar, wenn man Teile wegnimmt (Bild links). Stattdessen sollen von dem ganzen vierdimensionalen Körper nur die Kanten ausgeführt werden. Nicht die unendlich dünnen Kanten der Theorie natürlich, sondern etwas dickere Versionen.

Bei deren Herstellung kann man sich von ähnlichen Aktionen im gewöhnlichen dreidimensionalen Raum inspirieren lassen. Man stelle sich ein massives Dodekaeder vor, beispielsweise aus Käse. Dem schneide man alle Kanten ein Stück weit ab. Auf diese Weise lassen sich gewisse halbregelmäßige (»archimedische«) Körper erzeugen. Im 120-Zell liegen um jede Kante drei Dodekaeder. Man werfe die entkanteten Dodekaeder weg und behalte nur die abgeschnittenen Reste. Die passen so zusammen, dass jede Kante durch eine Art Balken mit dreieckigem Querschnitt repräsentiert wird.

Das fertige Objekt soll im Gießener Mathematikum seinen Platz finden – und wird dort schwerlich zu übersehen sein. Nach der bisherigen Planung soll sein Durchmesser 3,36 Meter betragen. ◀

sehr großen, aber regulären Dodekaeder, das alle anderen einschließt. In dem geplanten Modell tragen die Zellen jeweils die Farbe ihrer Klasse.

Die hier beschriebene Projektion ist diejenige, die sich für das 120-Zell anbietet, weil sie alle Komponenten säuberlich getrennt zeigt, bis auf die äußerste, die alle anderen überdeckt. Diese Übersichtlichkeit würde verloren gehen, wenn nicht eine ganze Zelle, sondern zum Beispiel ein Eckpunkt der Lichtquelle am nächsten läge. Bei parallelem Licht kann man das ganze Objekt so orientieren,

Einladung: Seien Sie beim Bau des 120-Zells dabei!

Das von Albrecht Beutelspacher gegründete und geleitete Mathematikmuseum zum Mitmachen (»Mathematikum«; www.mathematikum.de) in Gießen lädt in Kooperation mit **Spektrum** der Wissenschaft ein zu einer großen Gemeinschaftsbastelei.

Datum und Ort: Samstag, 17. November 2018, ab 10 Uhr im Mathematikum, Liebigstraße 8, Gießen

Am Vorabend findet ab 19 Uhr im Mathematikum die »Lange Nacht der Wissenschaft« statt (<http://www.mathematikum.de/veranstaltungen/lange-nacht-der-wissenschaft.html>) – vielleicht ein Anlass, schon am Freitag anzureisen.

Gemeinsam mit **Spektrum**-Redakteur Christoph Pöppe wollen wir aus Karton die 600 Ecken und die 1200 Kanten des (projizierten) 120-Zells wiedergeben. Die äußersten Ecken und Kanten bilden einen dodekaederförmigen Holzrahmen, der vom Museum vorbereitet wird. Das fertige Werk wird im Museum ausgestellt. Jeder Teilnehmer erhält eine Urkunde. Zur Deckung der unmittelbaren Kosten erhebt das Mathematikum einen Teilnehmerbeitrag von 40 Euro. Darin sind Essen und Trinken sowie freier Eintritt ins Museum enthalten.

Weitere Einzelheiten sowie einen Link zum Anmelden finden Sie unter www.spektrum.de/s/120-zell. Dort gibt es auch ein Video, das einen ersten Eindruck von der Bastelei vermittelt.

ÄGYPTEN FÜRSORGE BIS INS JENSEITS

Wie sahen Eltern im Reich der Pharaonen die Kindheit? Galt sie überhaupt als eine besondere Phase des irdischen Lebens? Nur wenige Texte geben darüber Aufschluss, doch was Archäologen in Gräbern entdecken, vermittelt ein anrührendes Bild elterlicher Liebe.

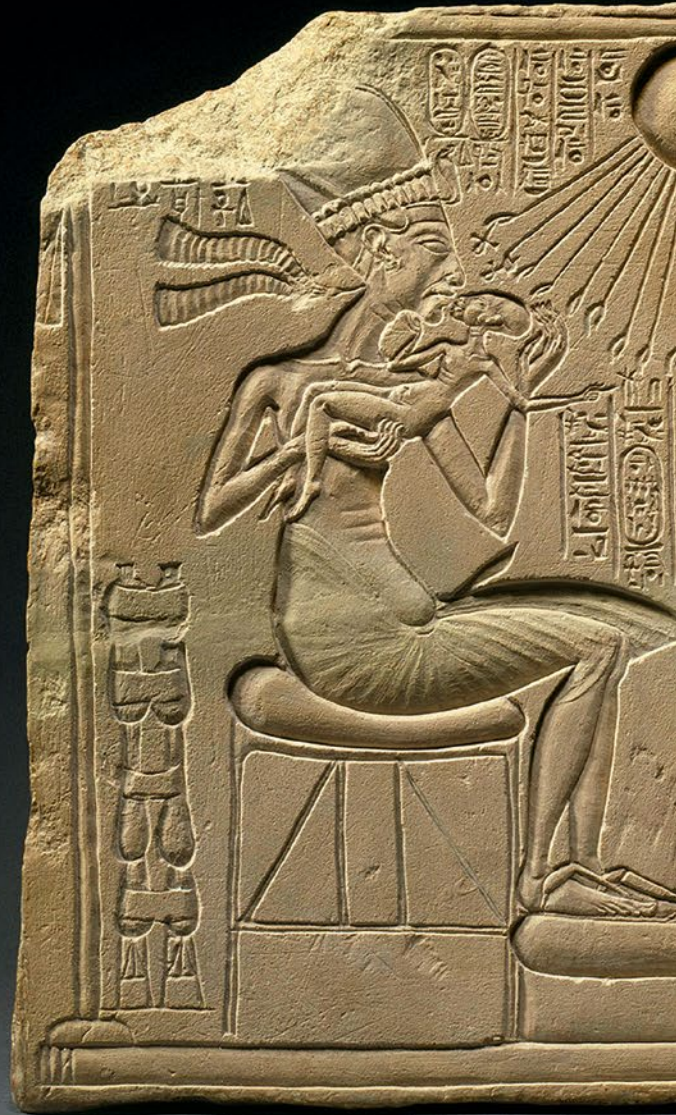


Die Anthropologin und Ägyptologin **Stephanie Zesch** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am German Mummy Project der Curt-Engelhorn-Stiftung in Mannheim. Sie promovierte über altägyptische Kindermumien an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

► spektrum.de/artikel/1586246

*»[Blaue Perlen von Lapislazuli sind darin],
grüne [Pe]rten von Türkis sind darin,
rote Perlen von Jaspis sind darin.
Perlen sind nach unten ins Wasser gefallen
(so viel) wie die Schuppen der [F]ische im Fluss,
(so viel) wie die Federn der Vögel am Himmel.
Fließ aus (?), Neschu-Krankheit,
falle auf den Boden!*

*Man soll diesen Spruch
ü[ber] drei [Steinen (?)] rezitieren,
(nämlich) einem von Lapislazuli,
einem von Jaspis,
und einem von Türkis;
es werde auf einen feinen Faden (?) aufgezogen
und an den Hals des Kindes gegeben.«*



Der deutsche Ägyptologe Adolf Erman veröffentlichte 1901 die »Zaubersprüche für Mutter und Kind«, eine erste Übersetzung des 1843 für das Ägyptische Museum und Papyrussammlung der Staatlichen Museen zu Berlin erworbenen Schriftstücks »pBerlin 3027«, welches der 18. Dynastie (1550–1292 v. Chr.) des Neuen Reichs zugeordnet wird. Auf sechs aneinandergeliebten Papyrusblättern, jedes etwa 40 Zentimeter lang und gut 16 Zentimeter breit, identifizierte Erman 18 Zaubersprüche wie den zitierten (Spruch A; hier eine Neubearbeitung durch die Ägyptologin Naoko Yamazaki an der Universität Bonn) sowie drei Arzneirezepte. Sie sollten die Kinder etwa von »Neschu« heilen – möglicherweise eine Blasen bildende Hautkrankheit –, gaben Hilfe bei der Geburt, bei Säuglingskrankheiten und angeblichen Nachtdämonen, welche die Kinder heimsuchten.



MARGARETE BÜSING: MIT FRIEDL. GEM. DER STB, ÄGYPTISCHES MUSEUM UND PAPYRUSSAMMLUNG

Den besonderen Wert des Buchs erkannte Erman in dem so gewonnenen Einblick in den Alltag am Nil, denn »es führt uns in einen besonderen Winkel des ägyptischen Lebens ein: in die Wochen- und Kinderstube«. Heutzutage wissen wir zumindest für die Angehörigen der Oberschicht recht gut, wie erwachsene Ägypter ihr Leben gestalteten und welchen Platz sie in der Gesellschaft einnahmen. Auch über den Alltag der Arbeiter und Bauern liefern archäologische Grabungen und die Analyse von Verwaltungsdokumenten immer mehr Informationen. Doch wie sahen die Ägypter ihre Kinder? Wie verlief deren Leben? Wir wissen zwar, zumindest für das spätantike Ägypten (3.–7. Jahrhundert), dass junge Männer ab 14 Jahren Land besitzen durften und dass – aus heutiger Sicht – Teenager heirateten, über die frühe Kindheit dagegen ist kaum etwas bekannt. Bis heute gehört »pBerlin

3027« tatsächlich zu den wenigen schriftlichen Überlieferungen, die das leibliche Wohlergehen von Mutter und Kind thematisieren.

Bildliche Darstellungen in Tempeln und Grabstätten verraten darüber wenig. Der Hausaltar des Königspaares Akhenaten und Nefertete mit drei ihrer Töchter, der in den Überresten eines Privathauses in Amarna gefunden wurde, ist eine der wenigen Ausnahmen (siehe Bild oben). Es kamen auch Rundplastiken von Kindern gemeinsam mit ihren Eltern zu Tage. Das lässt den vorsichtigen Schluss zu: Die Kindheit wurde wohl durchaus als besonderer Lebensabschnitt wahrgenommen. Mitunter stießen Archäologen auch auf Amulette und »Zaubermesser« (siehe *Spektrum Spezial Archäologie Geschichte Kultur* 3/2016, S. 22) – aus Nilpferdzähnen geschnitzte und mit magischen Ritzzeichnungen versehene symbolische Waffen

SERIE
Mumien

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

Teil 2: Oktober 2018
Fürsorge bis ins Jenseits
Stephanie Zesch

Opfer für die Andengötter
Stephanie Zesch

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



MUMIEN
Geheimnisse
des Lebens

16.9.2018–31.3.2019

Reiss-Engelhorn-
Museen Mannheim
Museum Zeughaus C5
68159 Mannheim

AUF EINEN BLICK MIT MAGIE GEGEN KINDERKRANKHEITEN

- 1** Wie Kindheit von der altägyptischen Gesellschaft gesehen wurde, ist eine bislang unbeantwortete Frage. Es gibt immerhin starke Indizien für eine Wertschätzung des Nachwuchses.
- 2** Auf Papyrus erhaltene Zaubersprüche sowie Amulette belegen, dass den Eltern die Anfälligkeit von Kindern für Krankheiten bewusst war.
- 3** Grabstätten, Beigaben und je nach sozialer Herkunft aufwändig gestaltete Kindermumien verraten eine Fürsorge, die auch den Übergang in die jenseitige Welt einschloss.

wider jegliches Unheil. Offenbar galten Kinder, nicht anders als heute, als Wesen, die eines besonderen Schutzes bedurften. Doch wie verhielt es sich mit ihrer Wertschätzung als Individuen?

Ägyptologen widmen sich inzwischen auch dieser Frage. Zahlreiche Skelettfunde liefern dazu aufschlussreiche Informationen. Zudem haben Museen weltweit Forschern ihre Depots geöffnet, die eine Vielzahl von Kindermumien bergen – eine besonders ergiebige »bioarchäologische Informationsquelle«.

Insgesamt kristallisiert sich bereits ein je nach Lebensalter unterschiedlicher Umgang mit den Verstorbenen heraus. So wurden Neugeborene häufig innerhalb einer Siedlung beigesetzt, Gleiches galt für Föten. Kinder über etwa 18 Monaten bestattete man gelegentlich in eigenen Nekropolen, meist aber auf denselben Friedhöfen wie die Erwachsenen und auch auf vergleichbare Weise: in einfachen Gruben, Felsgräbern oder Familiengräbern, den Kopf

nach Norden und den Blick nach Osten ausgerichtet. Diese Formen der Beisetzung blieben während der gesamten pharaonischen Epochen die Norm. Eine Grablege im Dorf bedeutete vermutlich Nähe zu den Eltern, entsprach vielleicht deren Wunsch, für diese besonders schutzbedürftigen Wesen weiterhin zu sorgen.

Vom Beginn des 3. Jahrtausends v. Chr. bis ins Neue Reich (1550–1070 v. Chr.) war es üblich, Kinder bis etwa zum zweiten Lebensjahr in Töpfen und Körben, also einfachen Haushaltsgefäßen beizusetzen (siehe Bild unten). Deshalb ist von ihnen leider selten mehr als der teilskelettierte Körper erhalten, wobei die Überreste häufig durcheinanderliegen und mit Resten von Textilien, Pflanzen und Sedimenten vermischt sind. Doch auch diese wenigen Informationen belegen einen wertschätzenden Umgang mit den Verstorbenen: Man hatte die kleinen Leiber gekleidet oder in Tücher und Leinenbinden gehüllt und ihnen wohl zum Teil auch Pflanzen mit ins Grab gelegt, die vermutlich Wohlgeruch verbreiten sollten. Offenbar glaubten die Ägypter, dass nicht nur Erwachsene, sondern auch Kinder im Jenseits weiterleben könnten. Wie sie sich diese Existenz vorstellten, wissen wir leider nicht, denn die überlieferten Texte schweigen darüber.

Wer von königlichem Geblüt war, erfuhr mitunter eine weit aufwändigere Behandlung. Im Grab Tutanchamuns aus der 18. Dynastie fand sein Entdecker Howard Carter zudem die künstlich hergestellten Mumien zweier Föten. Ihrer DNA zufolge waren sie Töchter des Pharaos. Eine starb im fünften bis sechsten, die andere im neunten Schwangerschaftsmonat. Das war zwar ein ungewöhnlich frühes Alter für eine künstliche Mumifizierung, diese erfolgte trotzdem entsprechend den Möglichkeiten bei den kleinen Körpern: Als die Kinder 2008 im Computertomografen durchleuchtet wurden, zeigten sich jeweils Strukturen im Torso, die entweder als Balsamierungsmaterialien oder als »Organpakete« gedeutet werden.

Letztere sind dem Körper entnommene innere Organe, die von den Balsamierern getrocknet oder einbalsamiert, umwickelt und wieder in den Leib zurückgelegt wurden. Tatsächlich entdeckten die Radiologen bei dem älteren

Komplikationen bei der Geburt, ansteckende Keime und Parasiten – auf den Nachwuchs lauerten zahlreiche Gefahren. Selbst die Aller kleinsten wurden von den Eltern betrauert, wie diese Bestattung vermuten lässt: Das Körbchen aus dem 3. Jahrtausend v. Chr. enthält die von Textilien umgebenen Überreste eines kurz nach der Geburt verstorbenen Kindes.



MIT FROL. GEN. DES MUSEO EGIZIO, TORINO



Wer immer genau im »Grab der Aline« in der Oase Fayum bestattet worden ist, einen derartigen Aufwand konnte sich nur Ägyptens Oberschicht leisten. So erhielten die sorgfältig umwickelten Mumien eines Mädchens (Mitte) und eines Jungen (rechts) – die Kinder waren nur wenige Jahre alt geworden – kunstvolle Porträts. Das Gesicht und den Oberkörper eines sechs bis sieben Jahre alten Mädchens bildete man sogar mit einer Kartonagenmaske nach.

Mädchen einen etwa 1,8 Zentimeter langen Einschnitt in der linken Leiste, der vermutlich als Zugang diente; der zweite Fötus war zu schlecht erhalten, um eine so feine Struktur zu erkennen.

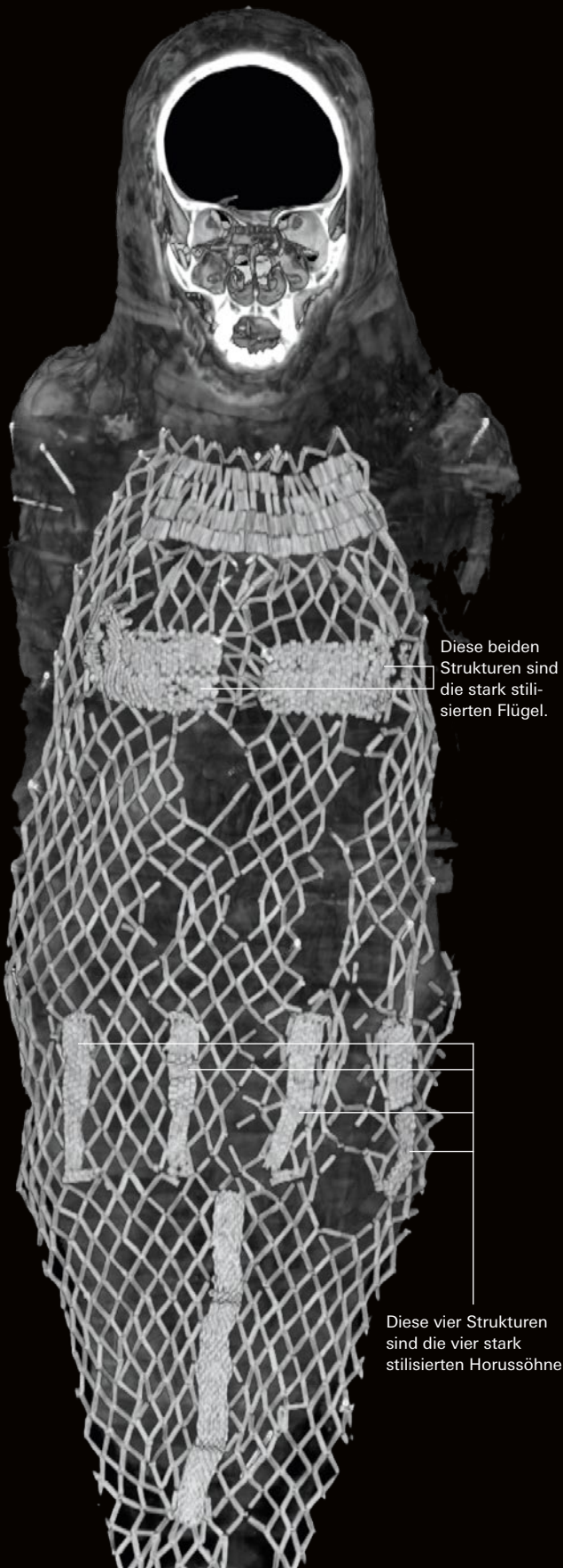
Sonderbehandlung für Tutanchamuns Töchter

Abschließend hatten die Balsamierer jeden Körper in Textilbinden gewickelt und in einen mit Goldfolie dekorierten inneren Sarg gelegt, diesen dann in einen äußeren, der mit harzigen Substanzen bedeckt und mit goldenen Bändern verziert wurde. Eigentlich waren Holzkisten beziehungsweise kleine Särgen eher Kindern ab dem zweiten Lebensjahr vorbehalten. Man kann in dieser Sonderbehandlung der königlichen Föten sicher einen Ausdruck der Wertschätzung durch die trauernden Eltern sehen.

Wie gefährdet der Nachwuchs tatsächlich war, zeigt eine Analyse von Skelettfunden aus der Nekropole Kellis 2

des antiken Dorfs Kellis in der Oase Dachla. Sie stammen zwar aus der römisch-byzantinischen Zeit Ägyptens (40–450 n. Chr.), die Ergebnisse lassen sich aber vermutlich auch auf die pharaonische Zeit anwenden. Demnach starben die meisten Kinder innerhalb ihres ersten Lebensjahrs, die zweitgrößte Gruppe der Toten war schon kurz vor oder nach der Geburt verschieden, die drittgrößte umfasste Kleinkinder im ersten bis dritten Lebensjahr. Mögliche Gründe für den Tod der Kinder kommen schnell in den Sinn: eine ungünstige Lage des Babys im Mutterleib, ein zu enger Geburtskanal bei einer jungen Frau; zudem konnten Infektionen der Mutter Fehlgeburten und Fehlbildungen verursachen.

Auch das Abstillen barg Risiken. Der Wechsel von Muttermilch zur Milch von Tieren konnte bakterielle Infektionen verursachen, die das noch unausgereifte Immunsystem nicht abzuwehren vermochte. Schwere Durchfälle,



Diese beiden Strukturen sind die stark stilisierten Flügel.

Diese vier Strukturen sind die vier stark stilisierten Horussöhne.

Ein »Mumiennetz« bedeckt großteils die Mumie eines Jugendlichen. Was erst im Computertomogramm zu erkennen ist: Das Netz hielt stark abstrahierte Darstellungen eines geflügelten Skarabäus und der vier Söhne des Horus an ihrem Platz.

Entzündungen des Magen-Darm-Trakts und Mangelzustände wären die Folge gewesen.

Zur Bestimmung des Abstillalters und zur Spezifizierung der Nahrung wurden die Anteile bestimmter Isotope von Kohlenstoff und Stickstoff in den Knochen ermittelt. Diese werden über die Nahrung aufgenommen und durch Stoffwechselprozesse eingebaut. Pflanzen haben die niedrigsten Werte, mit jeder Stufe weiter in der Nahrungskette steigen die Isotopenkonzentrationen. Auf diese Weise lassen sich nicht nur beispielsweise Pflanzen- und Fleischfresser unterscheiden: Die Knochen von Kindern, die gestillt wurden, müssen höhere Werte aufweisen als die von Frauen derselben Nekropole.

In der zu Kellis 2 gehörenden Siedlung wurde demnach etwa ab dem sechsten Lebensmonat begonnen, Muttermilch insbesondere durch Ziegen- oder Kuhmilch und einen Zusatz von Hirse zu ersetzen. Bis zum dritten Lebensjahr waren Kinder von der Muttermilch entwöhnt. Wer aber die kritischen Jahre überstand, hatte gute Chancen, deutlich älter zu werden: Die wenigsten Kinderskelette aus Kellis 2 stammen von 10- bis 15-Jährigen.

In den Depots der Museen weltweit lagern auch Mumien von Kindern. Da sie oft weniger gut erhalten und damit unattraktiver für das Publikum sind, kommen sie selten in die Vitrinen. Seit einigen Jahren stehen sie aber Forschern zur Verfügung, die sich ergänzende Informationen zur altägyptischen Kindheit erhoffen.

Insbesondere die Eliten der Römerzeit legten offenbar Wert darauf, den verstorbenen Nachwuchs mit ähnlichem Aufwand auf seine Reise ins Totenreich vorzubereiten wie Erwachsene. Das demonstrieren zum Beispiel die Mumien zweier Mädchen und eines Jungen aus dem »Grab der Aline«, das seine Bezeichnung durch eine Inschrift mit diesem Namen erhielt (siehe Bild S. 83). Entdeckt hatte es der deutsche Nationalökonom, Kunstsammler und Mäzen Richard von Kaufmann 1892 in Hawara (Oase Fayum). Experten ordnen das Grab dem 1. bis 2. Jahrhundert n. Chr. und damit der Römerzeit zu.

Der bloße Augenschein zeigte jeweils eine Umhüllung in der für ihre Zeit typischen »Kassettenwicklung«, bei der Leinenbänder so um den Körper gewickelt wurden, dass rautenförmige Vertiefungen entstanden. Bei den beiden jüngeren Kindern – einem zwei- bis dreijährigen Jungen und einem etwa ebenso alten Mädchen – enthielten einige dieser Rauten noch Knöpfe aus vergoldetem Stuck. Zudem hat man Porträts auf die letzte Lage ihrer Umwicklung gemalt, Frisur und Kopfbedeckung waren im römischen Stil gehalten. Für die Gestaltung der Mumienporträts löste man Mineralfarben in Wasser und vermischte sie mit einem Bindemittel, häufig Öl oder Wachs. Hingegen bedeckte eine teilweise vergoldete Kartonage Gesicht und Oberkörper der dritten Mumie, eines sechs bis sieben Jahre alten Mädchens; man modellierte dabei nicht nur sein Antlitz als Maske, sondern auch Arme und Hände.

Schon 1896 hatte der Physiker Carl Georg Walter König eine Mumie des Senckenberg Naturmuseums in Frankfurt am Main durchleuchtet – wenige Monate nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen. Mehr als ein Jahrhundert später ermöglichte ein Computertomograf (CT) den detail-

lierten Blick unter die Leinenwicklung der drei Kindermumien aus dem Fayum. Während sie äußerlich intakt schienen, zeigten sich nun ausgerenkte und verlagerte Knochen im Bereich von Hals, Schultern und Oberkörper. Diese Schäden entstanden aber erst nach dem Tod, wohl durch mechanischen Druck während der Mumifizierung und Umwicklung. Den CT-Daten zufolge hatte man das Gehirn des älteren Mädchens entfernt, bei den beiden anderen erschien es als stark geschrumpfte Masse auf dem Hinterhauptsbein.

Für uns Heutige mag ein solcher Eingriff befremdlich wirken, da wir das Gehirn als Sitz der kognitiven Fähigkeiten bis hin zum Bewusstsein kennen. Den Ägyptern schien es jedoch unbedeutend, barg aber als sehr wasserreiches Gewebe ein Risiko der Fäulnisbildung. Bei der Mumifizierung Erwachsener wurde es deshalb normalerweise entfernt. Möglicherweise erachtete man diesen Aufwand bei jüngeren Kindern mit entsprechend kleinerem Gehirn als unnötig. Diese Einschätzung galt wohl auch für die inneren Organe: Bei dem älteren Mädchen zeigten CT-Bilder Füllmaterial in Bauch und Becken, was für einen Eingriff der Balsamierer spricht, bei den beiden jüngeren Kindern hingegen waren noch Überreste organischen Gewebes zu erkennen.

Ein Totennetz aus blauen Perlen

Hin und wieder ließen Angehörige einem mumifizierten Leichnam Netze auflegen, deren Fäden längliche blaue Perlen trugen. Diese waren aus einem als ägyptische Fayence bezeichneten Material, das zum großen Teil aus gemahlenem Quarzsand bestand, dem Tonerde, Kalk und anderes zugesetzt wurde. Bei hohen Temperaturen bildete sich ein Festkörper, dem anschließend noch eine Glasur aufgebrannt wurde.

Ein 12 bis 14 Jahre alter Junge aus dem 4. bis 3. Jahrhundert v. Chr. (siehe Bild links) war seinen Eltern den Aufwand wert: Das »Mumiennetz« bedeckte ihn vom Hals bis zu den Knöcheln. Es fixierte eine stilisierte Nachbildung zweier Flügel aus verschiedenfarbigen, länglichen und sehr flachen Perlen auf der Brust. Vergleichbare Dekorationen bei anderen Mumien weisen zwischen den beiden Flügeln einen Skarabäus auf, der die Flügel spreizt und damit zum Himmel aufsteigt – ein Symbol für Wiedergeburt und Auferstehung. Etwa auf Höhe des Beckens waren ebenfalls stark stilisierte Darstellungen der vier Söhne des Gottes Horus – Hapi, Kebechsenuef, Duamutef und Amsset – in länglich rechteckiger Form im Mumiennetz nachgebildet. Sie galten als Schutzgötter für die vor dem Mumifizieren entnommenen Organe Leber, Lunge, Magen und Gedärme sowie für die Eingeweidekrüge (Kanopen), in welchen man diese Organe nach dem Konservieren mit ins Grab legte. Dunkle Verfärbungen auf den Bandagen an Kopf, Rücken und Füßen verraten, dass die Balsamierer wohl bitumenhaltige Flüssigkeit verwendeten, die an diesen Stellen durch die Umhüllung sickerte.

Eine CT-Untersuchung bestätigte, dass die inneren Organe bis auf wenige Gewebereste fehlen, ebenso das Gehirn. Sie offenbarte aber auch, dass die Wirbelsäule an

zwei Stellen durchtrennt worden war. Wann und warum, lässt sich derzeit nicht sagen. Die Mumie war 1840 dem damaligen Basler Museum für Völkerkunde (heutiges Museum der Kulturen) geschenkt worden und wird inzwischen im Antikenmuseum Basel und Sammlung Ludwig aufbewahrt.

Ihre Herkunft ist unbekannt. In den 1920er Jahren untersuchte der Altertumswissenschaftler Balthasar Poertner dort einige Mumien, die er dabei auch auswickelte. Ob dieser Junge dazugehörte und ob Poertner die Schnitte vornahm, sollen weitere Archivrecherchen erweisen.

Grabbeigaben, Skelette und Mumien lassen also den Schluss zu, dass Kindern auch im alten Ägypten eine große Wertschätzung zuteilwurde. Eine Schwangerschaft bedeutete angesichts der Unkenntnis über die Ursachen von Infektionen ein hohes Risiko für Mutter und Fötus, die Geburt war ein heikler Vorgang. Auch die ersten Lebensjahre bargen gesundheitliche Risiken, die ihre Opfer forderten. Dem begegneten die Eltern mit Zuwendung und Fürsorge, was entsprechend der jeweiligen Epoche magische Formeln und Schutzobjekte beinhaltete.

Hatten Dämonen und andere krank machende Unheilbringer trotzdem die Oberhand behalten, so versuchten die Eltern alles nach ihrem Platz in der Gesellschaft Mögliche, den Kindern eine gefahrlose Reise in die jenseitige Welt zu gewährleisten. Schutz gab in der Vorstellung der Ägypter schon die Nähe der Gräber zu den Lebenden in der Siedlung beziehungsweise zu den Toten auf den Friedhöfen, die ihnen vorangegangen waren. Vermutlich kamen wie bei den Erwachsenen Totenrituale hinzu, bei denen den Kindern Nahrung geopfert wurde, um sie im Jenseits zu versorgen.

Ein anrührendes Beispiel solcher Fürsorge über den Tod hinaus gibt eine bandagierte Mumie aus griechisch-römischer Zeit, die auf Grund ihrer lediglich 54 Zentimeter Länge als Baby galt, bis man mittels CT unter die Binden blickte. Tatsächlich verbargen diese ein zwei- bis dreijähriges Kind. Doch manche Knochen fehlten, und die Beine waren vollständig in den Rumpf verschoben. Der schlechte Erhaltungszustand der Mumie im Inneren veranlasste die Forscher zu der Annahme, dass die Verwesung bei diesem Körper schon weit fortgeschritten war, als man sich anschickte, es zu konservieren. Dennoch entschied jemand, dem verstorbenen Kind eine zumindest äußerlich vollkommen intakt erscheinende Gestalt zu verleihen, damit seine Reise in die andere Welt mit einem scheinbar vollständigen Körper gelingen möge. ◀

QUELLEN

Hawass, Z., Saleem, S. N.: Scanning the Pharaohs. CT Imaging of the New Kingdom Royal Mummies. The American University in Cairo Press, Kairo, New York 2016

Helmbold-Doyé, J. (Hg.): Aline und ihre Kinder. Mumien aus dem römerzeitlichen Ägypten. Ägypten im Blick. Schriftenreihe der Ägyptischen Sammlung Berlin 2. Reichert, Wiesbaden 2017

Zillhardt, R.: Kinderbestattungen und die soziale Stellung des Kindes im Alten Ägypten – Unter besonderer Berücksichtigung des Ostfriedhofes von Deir el-Medine. Göttinger Miscellen, Beihefte 6, Göttingen 2009

PERU OPFER FÜR DIE ANDEN- GÖTTER

Seit alter Zeit verehren die Bewohner der Anden die schneebedeckten Gipfel der Gebirgskette als Wohnstätten der Götter. Die Inka brachten dort sogar Menschenopfer dar.

Von **Stephanie Zesch**

► spektrum.de/artikel/1586248

► Zu ihrer Glanzzeit im 15. Jahrhundert beherrschten die Inka von ihrer Hauptstadt Cusco (Peru) aus ein Gebiet, das sich im Norden bis in das heutige Kolumbien, im Süden bis nach Chile und Argentinien erstreckte. Doch geschwächt durch innerpolitische Machtkämpfe und eine Pockenepidemie wurde das einst mächtige Reich innerhalb weniger Jahre von spanischen Konquistadoren unterworfen, die 1532 in Peru einfielen. Getrieben von der Gier nach Gold und Edelsteinen plünderten sie das Land und zerstörten unzählige Kunstschätze. Angetrieben von missionarischem Eifer vernichteten sie überdies die Zeugnisse des alten Glaubens.

Über Staat und Gesellschaft, Religion und Bräuche der Inka wissen wir deshalb zunächst von spanischen und einheimischen Chronisten, die im 16. und 17. Jahrhundert

notierten, was sie von den überlebenden Inka erfuhren. Ob deren Erinnerungen mythisch verklärt waren und inwieweit missionarische oder politische Absichten die Berichte der Chronisten färbten, lässt sich heutzutage nur schwer klären. Deshalb kommt archäologischen Daten eine besondere Bedeutung bei der Überprüfung und Ergänzung der schriftlichen Überlieferungen zu.

Diesem zufolge war Cusco nicht nur der Herrschersitz, sondern auch das spirituelle Zentrum für die Verehrung von Göttern und Ahnen. So beobachtete der peruanische Historiker Garcilaso de la Vega 1559, dass in festliche Kleider gehüllte und geschmückte Mumien verstorbener Herrscher bei heiligen Festen in Cusco präsentiert wurden. De la Vega war wohl einer der letzten Augenzeugen solcher Prozessionen: Die spanischen Invasoren empfanden



JOHAN REINHARD, BRAU, T.L. ET AL. – A COMPOSITIONAL ANALYSIS OF POTTERY VESSELS ASSOCIATED WITH THE INCA RITUAL OF CAPACCOCHA. IN: JOURNAL OF ANTHROPOLOGICAL ARCHAEOLOGY 24, S. 82-100, 2005. FIG. 1. ABBILDUNG GEBEHRT VON FELSEBERG, CCC

Auf Kokablättern kauend schlief dieses Mädchen in der eisigen Kälte auf dem Gipfel des Lulluillaco ein und erfror – als Opfer für die Götter des Bergs. Ihre Mumie bestätigt beispielhaft die Berichte spanischer Chronisten über die als Capacocha bekannten Menschenopfer bei den Inka.

diesen Kult als Bedrohung und ließen die Reliquien zerstören. Sollten einige Mumien zuvor in Sicherheit gebracht worden sein, so blieben sie bis heute verschollen.

Im Lauf des 20. Jahrhunderts kamen jedoch mumifizierte Menschen zu Tage, die im Zuge des so genannten Capacocha-Rituals geopfert wurden. Diese Menschenopfer auf den Andengipfeln bedurften besonderer Anlässe. Sie sollten beispielsweise einem erkrankten Herrscher Heilung oder im Kriegsfall den Sieg bringen, bedrohliche Dürren oder Vulkanausbrüche beendend sowie einen verstorbenen König oder seinen Nachfolger ehren. Stets galt es, den Göttern im Interesse des Reichs etwas Kostbares zu opfern. Im Rahmen der Capacocha bedeutete dies wohl meist Kinder und junge Mädchen, da diese als kultisch rein galten. Die Auserwählten seien häufig monatelang unterwegs gewesen, so die Chronisten, von Priestern und Pilgern begleitet; stets war Cusco eine Zwischenstation. Von den Gipfeln der Anden aus sollten ihre Seelen dann als Boten zu den Göttern und Ahnen weiterreisen.

Drei Mumien und mehr als 100 Beigaben

Als einer der ersten archäologischen Belege wurde 1954 ein auf natürliche Weise mumifizierter Junge auf dem gut 5400 Meter hohen Cerro El Plomo (Chile) entdeckt. In den darauf folgenden Jahrzehnten kamen zahlreiche weitere solcher Funde zu Tage. Besonderes Glück hatte 1999 eine Expedition des amerikanischen Anthropologen Johan Reinhard und der argentinischen Archäologin Constanza Ceruti auf dem Lullailaco an der Grenze zwischen Argentinien und Chile. In der Wüste Atacama gelegen, ist er mit 6739 Metern weithin sichtbar. Verschiedene Ruinen auf dem Gipfel zeugen von seiner Bedeutung in präkolumbischer Zeit.

Reinhard und Ceruti entdeckten drei Kammern unter einer steinernen Plattform, von denen jede eine bekleidete Mumie barg, dazu insgesamt mehr als 100 Beigaben: Figuren aus Gold und Silber, Muscheln, Kleidung, hölzerne Trinkgefäße sowie Keramikgefäße, einige gefüllt mit noch gut erhaltenen Nahrungsmitteln oder Kokablättern.

Das Museo de Arqueología de Alta Montaña in Salta (Argentinien) präsentiert und erforscht dieses Ensemble. Die Leichen zeigen kaum Anzeichen des Zerfalls, sie scheinen auf den ersten Blick nur zu schlafen. Wie eine erneute computertomografische Untersuchung im Jahr 2013 zeigte, handelt es sich bei den dreien um ein vier bis fünf Jahre altes und ein 13-jähriges Mädchen (siehe Bild) sowie um einen ebenfalls vier bis fünf Jahre alten Jungen. In ihren Blutgefäßen und im Herzen hatten sie noch gefrorenes Blut, in der Lunge Luft, in den Zellen verwertbare Erbsubstanz. Die molekulargenetische Untersuchung belegte typische genetische Profile präkolumbischer Bevölkerungen. Wie alle anderen Inka-Kindermumien entstanden auch diese auf natürliche Weise: Dank der sauerstoffarmen Luft sowie der extremen Trockenheit und niedrigen Temperaturen gut 6700 Meter über dem Meeresspiegel wurden Organe und andere Weichgewebe schnell gefriergetrocknet und über die Jahrhunderte hinweg konserviert.

Der einmalig gute Zustand erlaubt sehr detaillierte Schlüsse auf die soziale Zugehörigkeit der Kinder. Ihre Muskulatur war gut ausgebildet. Es wurden weder Spuren von unzureichender oder einseitiger Ernährung noch von Krankheiten entdeckt. Auf Grund der hochwertigen Bekleidung gehörten sie offenbar einer Oberschicht an. Dafür sprechen auch die kostbaren Beigaben, die allerdings ebenso von Stiftern stammen könnten.

Das passt zu schriftlichen Überlieferungen, denen zufolge Kinder aus den Familien örtlicher Stammesführer für die Capacocha ausgewählt wurden. Anderen Berichten nach konnten Eltern sie als Teil der jährlichen Tributleistungen dem Herrscher für eine Capacocha zur Verfügung stellen. Diese wertvollste aller Opfergaben steigerte das Ansehen der jeweiligen Familien vermutlich enorm.

Im 17. Jahrhundert war das Ritual längst nur noch Erinnerung, dennoch schrieben spanische Geistliche darüber. Demnach seien manche Opfer erschlagen, andere erstickt worden, beispielsweise durch Strangulation. Auch Bestattungen bei lebendigem Leib seien üblich gewesen; in diesen Fällen habe man die Opfer zuvor rituell in einen Rauschzustand versetzt. Zwar fanden sich an den Lullailaco-Mumien keine Spuren von Gewalt, tatsächlich aber bestätigen toxikologische Analysen an Haarproben, dass die Kinder über Monate hinweg Alkohol und die kokainhaltigen Blätter des Kokastrauchs zu sich genommen hatten. Das ältere Mädchen hatte sogar noch einen Blätterballen im Mund, wie dreidimensionale Visualisierungen der originalen CT-Scans enthüllten.

Noch heute spielt diese Pflanze eine große Rolle im Andenraum: Man kaut die Blätter und kocht daraus Tee. Auch Alkohol ist in Form des Maisbiers Chicha ein wesentlicher Bestandteil geselliger oder zeremonieller Zusammenkünfte. Beide Drogen könnten bei der Capacocha eine Rolle gespielt haben. Koka soll gegen Höhenkrankheit, Hungergefühl, Müdigkeit und Kälte helfen. Das würde allerdings bedeuten, dass die Kinder eher euphorisiert und wach waren. Alkohol beruhigt und verringert die Kälteempfindlichkeit. Der Widerspruch ließ sich bislang nicht auflösen. Immerhin mochten beide Effekte zusammen bewirken, dass Luftnot und eisige Kälte weniger wahrgenommen wurden. Vermutlich sank die Körperkerntemperatur, ohne dass Wärme produzierendes Zittern den Eintritt des Todes verzögert hätte. Gut möglich also, dass die drei Kinder, berauscht von Koka und Maisbier, in der eisigen Höhe einschliefen und schließlich erfroren, ohne es überhaupt zu bemerken. ◀

QUELLEN

De Castro, I., Kurella, D. (Hg.): Inka. Könige der Anden. Katalog zur großen Landesausstellung Baden-Württemberg im Linden-Museum Stuttgart. Philipp von Zabern, Darmstadt 2013

Tellenbach, V., Tellenbach, M.: Mumien im Andenraum – Präsenz der Verstorbenen. In: Wieczorek, A., Rosendahl, W. (Hg.): Mumien. Der Traum vom ewigen Leben. Philipp von Zabern, 2., teilweise überarbeitete Auflage, Darmstadt 2015, S. 95–112

Wilson, A. et al.: Archaeological, Radiological, and Biological Evidence Offer Insight into Inca Child Sacrifice. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 110, S. 13322–13327, 2013

REZENSIONEN



TV-DOKU ABSCHIED VON DER ERDE?

Bildgewaltig und mit Eindrücken von vielen Forschungsstätten klopft diese BBC-Dokumentation ab, wie aussichtsreich es für uns ist, eine neue Heimat im All zu finden.

Der britische Physiker Stephen Hawking war überzeugt davon, die Menschheit müsse schon bald die Erde verlassen und auf anderen Planeten heimisch werden, wenn sie überleben will. Klimawandel, Epidemien, mögliche Meteoriteneinschläge, das Risiko eines Atomkriegs oder einer fehlgeleiteten KI: All das hielt Hawking für potenziell so existenzbedro-

hend, dass er meinte, uns blieben vielleicht noch 100 Jahre, um neue Welten im All zu kolonisieren. Seine Überlegung bildet den Ausgangspunkt der BBC-Dokumentation »Expedition New Earth«, die am 31. August in deutscher Fassung auf DVD erscheint. Der zweiteilige Film befasst sich damit, ob es Alternativen zur Erde gibt, wie man sie aufspürt, ob

Menschen zu ihnen gelangen können und was es bei ihrer Besiedlung zu beachten gilt. Eine Ingenieurwissenschaftlerin und ein theoretischer Physiker reisen dazu um die Welt, sprechen mit zahlreichen Forscher(inne)n und besichtigen deren Labore. Auch Hawking ist immer wieder zu sehen und gibt kurze Einschätzungen ab. Was jedoch stark irritiert: Der

Der Planet Proxima b ist uns mit rund vier Lichtjahren Entfernung relativ nah, besitzt etwas mehr Masse als die Erde und umrundet seinen Mutterstern, den Roten Zwerg Proxima Centauri, in der habitablen Zone. Auf seiner Oberfläche könnte somit dauerhaft flüssiges Wasser existieren. Sollten je Menschen das Sonnensystem verlassen, wäre er vielleicht ein lohnendes Ziel. Ob es auf ihm allerdings so ähnlich aussieht wie in dieser Illustration dargestellt, wissen wir nicht.



Christophe Galfard,
Danielle George
EXPEDITION NEW EARTH
Suche nach einer neuen Heimat
Mit Stephen Hawking
BBC-Dokumentation, polyband,
München 2018
DVD, € 16,99

Film erwähnt an keiner Stelle, dass Hawking im März 2018 gestorben ist. Denn die BBC-Produktion wurde im Herbst 2017 fertig gestellt – und der deutsche Off-Text nicht aktualisiert.

»Expedition New Earth« ist sehr facettenreich, da die beiden Hauptdarsteller verblüffend viele Orte bereisen. Bei den Salzseen der Hochanden lassen sie

sich Bakterienmatten zeigen; an der University of Arizona betreten sie ein autarkes Lebenserhaltungssystem; im norwegischen Schnee nehmen sie an einem Überlebenstraining teil; am chilenischen Paranal-Observatorium schauen sie Astronomen bei der Exoplanetensuche zu. In Houston lassen sie sich ein Plasmtriebwerk vorführen; am Deutschen Zentrum für

Luft- und Raumfahrt legen sie sich in eine Humanzentrifuge; auf Spitzbergen sehen sie sich den weltgrößten Saatgutspeicher an; in einem niederländischen Zoo lernen sie etwas über den Winterschlaf von Bären und diskutieren, ob sich ein ähnlicher Ruhezustand bei Menschen herbeiführen lässt, um lange Weltraumflüge zu überstehen.

Heraus kommt ein bildgewaltiger, musikalisch stimmungsvoll untermalter, aber inhaltlich eher flüchtiger Eindruck davon, wo Astronomie, Triebwerksforschung, Lebenserhaltungstechnik, Raumfahrtmedizin und Robotik heute stehen. Ins Detail geht es nicht; überwiegend bleibt es bei kurzen Statements der Forscher, die von den Hauptdarstellern betont begeistert quittiert werden. Wer sich schon einmal mit Exoplaneten, bemannter Raumfahrt und Terraforming befasst hat, dem wird das meiste bekannt vorkommen. Die Dokumentation vermittelt allerdings auch Überraschendes: etwa, dass man aus Regolith (Lockermaterial auf Gesteinsplaneten und Monden) nicht nur Sauerstoff und Wasser gewinnen kann, sondern auch Baumaterial wie Seile, Pflastersteine und eine Art Beton. Autonome Roboter könnten deshalb auf fernen Welten beginnen, eine Kolonie zu errichten – lange bevor Raumfahrer dort eintreffen, und nur mit Stoffen, die vor Ort verfügbar sind.

Die Doku endet mit einem positiven Tenor (»Weltall, wir kommen«). Das ist nicht ganz nachvollziehbar, weil sich alles in allem – und einmal mehr – bestätigt: Ferne Himmelskörper zu besiedeln, ist dermaßen schwierig, dass es nach heutigem Ermessen praktisch ausgeschlossen scheint. Zahllose Probleme stehen dem entgegen: die ungeheuren Anforderungen an die Antriebstechnik; die gigantischen Herausforderungen der Lebenserhaltung; die Strahlenbelastung im All; der körperliche

Verfall in der Schwerelosigkeit; der Zwang, binnen kürzester Zeit in der neuen Welt autark zu werden; die erforderlichen Populationsgrößen, damit eine Kolonie überhaupt existenzfähig ist – um nur einige zu nennen. Falls überhaupt jemals, wird diese Möglichkeit nur für sehr, sehr wenige Menschen in Betracht kommen. Für den allergrößten Teil der Erdbevölkerung ist sie keine Option.

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



Dorlis Blume, Christiana Brennecke, Ursula Brey Mayer, Thomas Eisentraut (Hg.)
EUROPA UND DAS MEER
Hirmer, München 2016
448 S., € 39,90

KULTUR GEHEIMNISVOLL, BEDROHLICH, BETÖREND

Das Meer als Ort unergründlicher Sehnsucht und Ehrfurcht: Dieses und zahlreiche weitere maritime Themen arbeitet der Ausstellungskatalog »Europa und das Meer« aus abendländischer Perspektive auf.

► »Freier Mensch, immer wirst du das Meer lieben! / Das Meer ist dein Spiegel; du schaust deine Seele / Im unendlichen Rollen der Wogen / Und dein Geist ist ein ebenso dunkler Strudel.« Diese Zeilen verfasste der Schriftsteller Charles Baudelaire im Jahr 1857 in seinem Gedicht »Der Mensch und das Meer«. Zum Ausdruck kommt hier eine im 18. Jahrhundert einsetzende neue Naturästhetik, die teils sehr stark mit Vorstellungen früherer Zeiten kontrastierte, in denen das Meer als finsterner, bedrohlicher Ort wahrgenommen wurde – als Gewalt, gegenüber der heroische Seemänner sich bewähren mussten.

Die Ausstellung »Europa und das Meer«, die noch bis zum 6. Januar 2019 im Deutschen Historischen Museum in Berlin gezeigt wird, widmet sich dieser veränderten Sichtweise auf den Ozean und darüber hinaus noch zahlreichen weiteren maritimen Themen im Hinblick auf den europäischen Raum. Der Katalog zur Ausstellung bereitet sie am Beispiel europäischer Häfen sehr gelungen auf und überzeugt dabei sowohl inhaltlich als auch erzählerisch. In 17 Essays beschreibt er das Meer als Herrschafts- und Handelsraum, als Brücke und Grenze, als Ressource sowie als Sehnsuchts- und Imaginationsort. Der sich anschließende eigentliche Katalogteil folgt der gleichen Strukturierung und erläutert all diese Aspekte anhand von Küstenstädten und den jeweils geeigneten Ausstellungsstücken.

»Europa und das Meer« deckt eine sehr große zeitliche Spanne ab, etwa wenn die Ausführungen zum Herrschafts- und Handelsraum mit der Fahrt des Odysseus beginnen, den Bogen über die Hanse und den transatlantischen Sklavenhandel weiter spannen und bis zur modernen Containerschiffahrt führen. Dies geschieht im Wortsinne anschaulich, nämlich anhand der im Katalogteil gezeigten, sehenswerten Objekte aus den Beständen diverser Leihgeber aus Deutschland und anderen europäischen Ländern.

Lesenswert beschreibt der Katalog viele historische Aspekte, die auch heute nichts von ihrer Aktualität eingebüßt haben. So war der Atlantik im 19. Jahrhundert Schauplatz einer Massenmigration in Richtung Amerika, während es derzeit das Mittelmeer ist, über das Menschen nach Europa kommen. Und damals wie heute spielten die Ressourcen der Ozeane eine herausragende Rolle: ursprünglich vor allem der Fisch, heute dagegen, in Zeiten von Überfischung und bedrohten marinen Ökosystemen, zunehmend auch fossile Rohstoffe. Ein weiteres Thema ist die wissenschaftliche Erkundung der Ozeane, beginnend mit der Challenger-Expedition im Jahr 1872 über die »Deutsche Atlantische Expedition« des Forschungsschiffs Meteor in den Jahren 1925 bis 1927 bis zu den modernen Methoden der Meeresforschung.

Nach so vielen »harten« Fakten ist es sehr wohl-tuend, dass der Katalog mit

einer eher musischen Betrachtung schließt. Mit einer Charakterisierung nämlich, wie sich die Sicht auf das Meer in den bildenden Künsten und der Literatur gewandelt hat und wie die Meere im Zuge der Industrialisierung zu Urlaub- und Erholungsorten wurden. Insgesamt überzeugt das Werk und macht große Lust darauf, die Berliner Ausstellung zu besuchen.

Der Rezensent Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

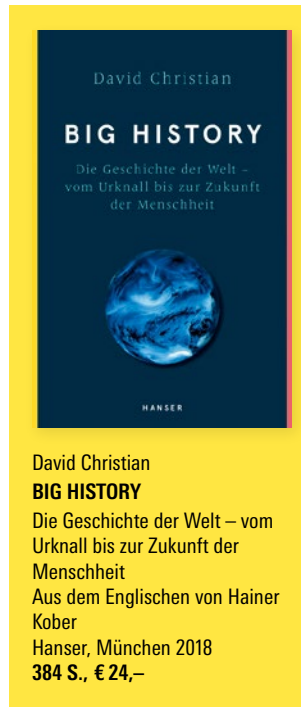
PHYSIK DAS GROSSE GANZE IM BLICK

Historiker David Christian verknüpft die Geschichte der Menschheit eng mit jener des Universums.

Was ist das für eine merkwürdige Menge, in der wir reisen? Welche Stellung haben wir in ihr? Woher kommt sie?

Wohin zieht sie, und wie wird sie schließlich verschwinden? Das sind die großen Fragen, die den amerikanischen Historiker David Christian in seinem Buch »Big History« umtreiben. Benannt ist das Werk nach dem gleichnamigen Projekt, das, finanziert von Bill Gates, in den USA und Australien gesamtgesellschaftliches Bewusstsein lehrt. Christian gilt als Mitbegründer von »Big History«.

Der Autor ist überzeugt: Beantworten lassen sich solche Fragen nur, wenn man das Universum, die Erdgeschichte und die kulturelle Entwicklung der Menschheit als Einheit begreift. Die zurückliegenden rund 200 000 Jahre, in denen sich *Homo sapiens* entwickelt hat, lassen sich demnach nicht von der »Big History« trennen: Wir sind selbst Natur. Christian bietet seinen Lesern auf 380 Seiten eine spannende Geschichtslektion mit naturwissenschaftlichem



David Christian
BIG HISTORY
Die Geschichte der Welt – vom Urknall bis zur Zukunft der Menschheit
Aus dem Englischen von Hainer Kober
Hanser, München 2018
384 S., € 24,-

Einschlag. Obwohl sein Schreibstil mitunter etwas erratisch wirkt und ihm manche Ungenauigkeit unterläuft, entlässt er sein Publikum mit dem guten Gefühl – und gesättigt mit viel Wissen –, eine faszinierende Zeitreise vom Urknall bis in die Zukunft zurückgelegt zu haben.

Der Historiker erzählt, was in den ersten Sekunden nach dem Big Bang passierte, wie die Erde sich formte, wie das Leben entstand und welche Entwicklung die Menschheit nahm. Besonders besticht das Kapitel darüber, was uns von anderen Lebewesen unterscheidet. Christian zeichnet dort das fiktive Szenario einer Forschergruppe von Außerirdischen, die uns in einer Millionen Jahre währenden Studie beobachten. Diese Untersuchung reicht bis ins gerade anbrechende Anthropozän, in dem der Mensch die Erde drastisch und unumkehrbar verändert.

Immer wieder lässt der Autor die Wissenschaftsgeschichte einfließen. Etwa wenn er erläutert, wie Ernest Rutherford Anfang des 20. Jahrhunderts mittels des radioaktiven Zerfalls erkannte, dass die Erde weit älter sein muss als die bis dahin angenommenen 100 Millionen Jahre. Oder wie Forscher die

ANZEIGE

21.10. Carl Wieman **Nobelpreisträger**

02.11. Ranga Yogeshwar

11.11. Michael Rosbash **Nobelpreisträger**

18.11. Venki Ramakrishnan **Nobelpreisträger**

19.11. Miriam Meckel

30.11. Jules Hoffmann **Nobelpreisträger**

06.12. Alain Aspect

07.12. Harald Lesch

Das komplette Programm & weitere Informationen finden Sie auf www.geist-heidelberg.de

**INTERNATIONAL
SCIENCE
FESTIVAL**
.. geistheidelberg
2018



ersten Exoplaneten entdeckten, indem sie das Licht von deren Zentralsternen sehr genau analysierten.

Heute haben wir zahlreiche Technologien, die es uns erlauben, unvorstellbare Mengen an neuen Erkenntnissen zu sammeln und diese, ähnlich wie ein

gigantisches Puzzle, zu einem Gesamtbild des Kosmos zusammenzufügen. Wie der Autor betont, sind Menschen nicht nur fähig, ihr Wissen ständig zu erweitern, sondern dieses auch so zu ordnen, dass sich daraus Zusammenhänge abstrahieren und übersichtliche Karten einer

unfassbar komplexen Wirklichkeit anfertigen lassen. Das Ganze ähnelt den Plänen der U-Bahn-Netze großer Städte: Diese bilden die meisten Kurven im Streckenverlauf nicht ab, verzerren zwecks Vereinfachung die Proportionen, verzichten auf viele weitere Details und liefern so ein übersichtliches Gesamtbild. Einen ebensolchen Plan der kosmologischen Entwicklungsgeschichte strebt »Big History« an.

Das Buch endet mit einer positiven Aussicht – jedenfalls für das Universum. Wir Menschen geraten in dieser Perspektive allerdings zur Randerscheinung, die, gemessen an den gewaltigen Zeitdimensionen des Kosmos, nur von sehr kurzer Dauer sein wird. Manche Wissenschaftler vermuten sogar, wir Menschen hätten bereits ein Komplexitätsniveau erreicht, das unsere Fähigkeiten übersteigt. Christian spekuliert, es könnte das Schicksal aller zu kollektivem Lernen befähigten Lebewesen sein, irgendwann auf eine Komplexitätsebene zu gelangen, die den Untergang ihrer Gesellschaft bedeutet.

Das Universum insgesamt hingegen erscheint kraftstrotzend, jung und voller Kreativität. Es wird noch eine Fülle komplexer Strukturen hervorbringen, ist der Autor überzeugt. Vielleicht werden sich schließlich sogar Raum und Zeit als bloße Wellen in einem größeren Ganzen erweisen. Wer weiß!

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

DIGITALISIERUNG FÜR IMMER OFFLINE

Der Internetpionier Jaron Lanier plädiert dafür, sich von sozialen Netzwerken abzumelden.

Der Datenskandal um Facebook und die Analysefirma Cambridge Analytica hat einmal mehr vor Augen geführt, dass Online-Identitäten zu handelbaren Gütern verkommen sind. Brian Acton, Gründer des Kurznachrichtendienstes Whatsapp, den Facebook 2014 für 19 Milliarden Dollar übernommen hatte, rief die Leute dazu auf, ihre Facebook-Accounts zu löschen. Unter dem Hashtag #deletefacebook formierte sich im Netz rasch eine Protest-Community.

Der Internetkritiker Jaron Lanier stößt nun ins gleiche Horn. In seinem neuen Buch plädiert er für einen sofortigen Ausstieg aus den so genannten sozialen Netzwerken. Social Media, schreibt Lanier, untergraben die Wahrheit, machen empathielos und fördern prekäre Beschäftigungsverhältnisse. Für seine Generalabrechnung hat der Autor eine Abkürzung kreiert, die so lautmalend wie bedrohlich klingt: BUMMER. Das steht für »Behaviors of Users Modified, and Made into an Empire for Rent«, auf Deutsch so viel wie: Verhaltensweisen von Nutzern modifiziert, und daraus ein Reich zum Vermieten gemacht.

Für Lanier sind Konzerne wie Facebook, Google oder Twitter »Manipulations-

BELLETRISTIK ALLES NUR GEKLAUT

Über einen der größten Wissenschaftsskandale der deutschen Geschichte.

Passend zur aktuellen Diskussion um »Fake Science«, Raubjournalale und gute wissenschaftliche Praxis arbeitet dieser Roman einen der größten deutschen Wissenschaftsskandale auf:

Der 1973 ernannte Professor Reiner Protsch »von Zieten« hatte weder Abitur noch eine gültige Habilitation, selbst sein adliger Namenszusatz war gefälscht. Für seine »wissenschaftlichen« Publikationen hatte er jahrzehntelang Knochenfunde falsch datiert, oft um tausende Jahre daneben. Im Jahr 2004 flog er auf und wurde später zu 18 Monaten Bewährungsstrafe verurteilt. Aus den Blickwinkeln verschiedener Doktoranden am betroffenen Institut spinnt der Autor eine fiktive Erzählung um diesen kolossalen Fehltritt in der wissenschaftlichen Praxis. Heraus kommt ein lesenswerter und spannender Wissenschaftskrimi, der auch für Laien nie unverständlich wird. Der Roman thematisiert, wie schwer es der wissenschaftlichen Gemeinschaft fällt, mit derlei Unfällen umzugehen – wie schwierig es beispielsweise ist, Missstände aufzudecken, ohne die eigene Karriere zu gefährden. Dadurch hält er gerade für Forschende einige Denkanstöße bereit.

Katrin Hochberg



Davidson Black
SCHÄDELFALL
Ein Frankfurter
Universitätskandal
Mainbook, Frankfurt 2018
238 S., € 11,95



Jaron Lanier
**ZEHN GRÜNDE, WARUM DU
 DEINE SOCIAL MEDIA
 ACCOUNTS SOFORT LÖSCHEN
 MUSST**

Aus dem Englischen von Karsten Petersen und Martin Bayer
 Hoffman und Campe,
 Hamburg 2018
 208 S., € 14,-

imperien«, die Menschen wie Hunde in Käfigen halten und mit virtuellen Reizen bestimmte Verhaltensweisen auslösen. Ein

System, das laut dem Autor auf totaler Überwachung und einem »perverse« Geschäftsmodell gründet. Lanier spart nicht mit vulgären Begriffen wie »Arschloch-Herrschaft«. Darunter versteht er ein System, das Menschen über perfide Belohnungsmechanismen zu Egoisten und Süchtigen macht.

Lanier ist nicht irgendwer. Der Internetpionier hatte – wie so viele seiner Mitstreiter, die aus der Hippie-Szene kommen – einst die Vision, das World Wide Web zu einer Cyber-Agora zu machen. Nun stellt er ernüchtert fest, dass einige Konzerne den virtuellen Raum okkupiert haben und ihre Reviere wie absolutistische Herrscher abstecken. Manches, was

er schreibt, ist nicht neu, etwa die Kritik am Filterblaseneffekt oder am Behaviorismus. Anderes ist blanke Polemik. Der Autor hat schon analytisch schärfere Bücher geschrieben, beispielsweise »Gadget – Warum die Zukunft uns noch braucht« (2010). Trotzdem haben seine Thesen Autorität. Lanier gilt als Wegbereiter der virtuellen Realität, er kann wie kein Zweiter die Manipulationspotenziale der Internettechnologien einschätzen, und er kennt das Mindset des Silicon Valley, das sich damit verschwistert. Sein neues Werk ist darum als Kampfschrift gegen den Techno-Utopismus zu verstehen.

Der Autor meint, die sozialen Netzwerke hätten bei der Wahl »autoritär

angehauchter Führer« in demokratischen Staaten wie der Türkei, Österreich und den USA eine wichtige Rolle gespielt: durch Fake News, Shitposts und Hassbotschaften. Lanier widerspricht der These, wonach sich mit der Verbreitung des Internets Demokratien wie durch einen Dominoeffekt etablieren (vertreten etwa von Eric Schmidt und Jared Cohen in ihrem Buch »Die Vernetzung der Welt«, 2013). Der so genannte Arabische Frühling, dessen Proteste als »Twitter- und Facebook-Revolutionen« apostrophiert wurden, belege das Gegenteil. Laniers Bilanz fällt rückblickend ernüchternd aus: »Wie immer bestand die Leistung von Social Media auch damals darin, dass sie



**STERNE UND
 WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2019

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 Infrarotlicht. Die Aufnahmen stammen u. a. vom Weltraumteleskop Hubble, der Jupitersonde Juno und dem Very Large Telescope der ESO.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2019 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

www.sterne-und-weltraum.de/kalender

E-Mail: service@spektrum.de

MOTIVE
 VORAB ONLINE
 ANSCHAUEN!

Illusionen schufen: dass man die Gesellschaft durch bloßes Wünschen verbessern könne, dass in harten Machtkämpfen immer die Vernünftigsten siegen und sich materieller Wohlstand dann schon ganz von selbst einstellen würde.«

Es lässt sich trefflich darüber streiten, ob man seine Social-Media-Accounts löschen soll. Für Lanier ist diese Forderung bloß der Aufhänger für eine Gesellschaftskritik am Silicon Valley. Am stärksten wird seine Analyse, wenn er vor einer numerokratischen Herrschaft warnt: »In vielen dystopischen Sciencefiction-Romanen gibt es ein böses Imperium, in dem Namen durch Zahlen ersetzt worden sind. Auch in echten Gefängnissen bekommen die Häftlinge eine Nummer verpasst. Das hat einen einfachen Grund: Zur Nummer zu werden bedeutet, ausdrücklich einem Herrschaftssystem unterworfen zu sein. Eine Nummer ist eine öffentliche Bescheinigung über reduzierte Freiheit, niedrigen Status und eingeschränktes Menschsein.« Diese Kritik ist auch biografisch begründet. Laniers Mutter überlebte ein Konzentrationslager der Nazis, sein jüdischer Vater musste vor Pogromen fliehen.

Der Autor, 2014 mit dem Friedenspreis des Deutschen Buchhandels ausgezeichnet, ist einer der brillantesten Internetkritiker. Es wäre wünschenswert, in der Digitaldebatte noch mehr von ihm zu lesen.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf Spektrum.de.

GESCHICHTE AUF DEM WEG ZUR WELTMACHT

Ägypten vor den Pharaonen: Gut gebildet, aber textlich recht anspruchsvoll führt dieser Band in die Frühzeit Ägyptens ein.

Wenn vom alten Ägypten die Rede ist, haben die meisten Menschen ein recht klares Bild vor Augen: das Reich am Nil, von der Bronzezeit bis in die Spätantike eine Weltmacht. Pyramiden, Paläste, monumentale Statuen. Doch was kam davor? Wo liegen die Ursprünge der vier Jahrtausende überspannenden altägyptischen Hochkultur? Um interessierten Laien eine Antwort auf diese Fragen zu bieten, hat die Ägyptologin Eva Christiana Köhler mit diesem Buch ein Porträt der ägyptischen Vor- und Frühgeschichte veröffentlicht.

Schon Jahrtausende vor der Reichseinigung gegen Ende des 4. Jahrtausends v. Chr. ließen sich im Niltal sesshafte Bauern nieder, deren materielle Hinterlassenschaften nicht weniger faszinieren als die Monumentalbauten der späteren Pharaonen. Anders als im Vorderen Orient macht die Erforschung der vorschriftlichen, also prähistorischen Epochen in Ägypten allerdings nur einen vergleichsweise kleinen Teil der archäologischen Arbeit aus. Das liegt unter anderem daran, dass das Neolithikum, also die Periode zwischen Sesshaftwerdung und Entstehung von Schrift und komplexen staatlichen Strukturen, hier wesentlich

kürzer dauerte als in anderen Gegenden der Welt.

»Vor den Pyramiden« führt eindrucksvoll vor Augen, dass die ägyptische Frühzeit durchaus Interesse verdient. Die Epochen zwischen dem ägyptischen Neolithikum und den ersten Zentralherrschern am Nil, also zwischen etwa 5400 und 2700 v. Chr., sind der Forschungsschwerpunkt mehrerer aktueller Ausgrabungen. Untersucht wird etwa die frühzeitliche Nekropole von Helwan bei Memphis, wo die Autorin, eine ausgewiesene Expertin auf dem Gebiet der ägyptischen Frühzeit, selbst tätig ist. Archäologen erforschen zwar schon lange auch die Relikte der Vorgängerkulturen des Pharaonenstaats, früher jedoch mit einem anderen Blick als heute. Köhler geht auf die Leistungen ebenso wie die Grenzen dieser frühen Archäologie ein und führt ihr Publikum so an die Möglichkeiten heran, die modernere Grabungsmethoden heutigen Prähistorikern bieten.

Statt historische Entwicklungen und Ereignisse chronologisch abzuarbeiten, untergliedert sich das Buch in thematische Kapitel, die unabhängig voneinander lesbar sind – etwa bezüglich der Bestattungstraditionen, der Entstehung der Hieroglyphenschrift, der Kunst oder der gesellschaftlichen Entwicklung der Frühzeit. Diese in sich abgeschlossenen Abschnitte zeigen, wie sich in den ägyptischen Kulturen des Neolithikums und des Chalkolithikums bereits einige Charakteristika der späteren Hochkultur formten und wie hier allmählich

der älteste Flächenstaat der Menschheitsgeschichte entstand. Zahlreiche ebenso schöne wie aufschlussreiche Fotografien nebst farbigen Karten und Grafiken illustrieren und unterstützen den Text. Mit dem großen Format ergibt sich dadurch fast der Eindruck eines Bildbands.



E. Christiana Köhler

VOR DEN PYRAMIDEN

Die ägyptische Vor- und Frühzeit
Philipp von Zabern, Darmstadt
2018

168 S., € 39,95

Das Buch eignet sich allerdings nicht gut zum Schmökern, denn die Texte sind recht anspruchsvoll und streckenweise geradezu trocken. Für Laien ohne Vorkenntnisse, die einen spannenden Archäologiekrimi suchen, ist es nicht die richtige Wahl – wohl aber für Menschen, die sich mit dem Thema bereits ein wenig auskennen und einen fundierten Überblick dazu suchen. Es bietet eine gut gegliederte Einführung in den aktuellen Stand der Archäologie zur ägyptischen Frühzeit.

Die Rezensentin Luise Loges arbeitet als Wissenschaftsjournalistin und Übersetzerin. Derzeit promoviert sie im Fach Vorderasiatische Archäologie in Glasgow, Schottland.

SUCHE NACH EINEM PHANTOM

Experimente ergründen den Übergang zwischen dem Reich der Quanten und unserer makroskopischen Welt. (»An der Grenze zur Quantenwelt«, *Spektrum* August 2018, S. 12)

Gunter Berauer, München: Der Artikel beginnt im Vorspann mit der Behauptung »Unsere gewohnte Realität ist eindeutig und berechenbar«. Das Allermeiste, was wir in unserer Alltagswelt beobachten, ist aber tatsächlich nicht nur praktisch, sondern auch prinzipiell nicht vorausberechenbar. Die quantenmechanischen Unschärfen und Zufälle transformieren sich über verschiedene Mechanismen im Wechselspiel mit den kausalen Naturgesetzen direkt oder allmählich aus der Quantenebene auf alle Größenskalen. Unsere ganze Welt ist deshalb von Indeterminismen durchwoben. Es sieht also ganz danach aus, dass bei den im Artikel beschriebenen Forschungen nach einer Grenze gesucht wird, die es gar nicht gibt!

Auch andere Aussagen des Beitrags sind fragwürdig. Für eine definierte, antizipierte Wechselwirkung eines Teils der Welt, nennen wir ihn X , mit einer bestimmten Umwelt lässt sich mit der Quantenmechanik bezüglich bestimmter Eigenschaften (etwa dem Aufenthaltsort, dem Impuls oder dem Spin) ein Spektrum von Werten berechnen, die sich bei einer solchen Wechselwirkung zeigen könnten. Aus diesem Spektrum wählt dann der Zufall nach Maßgabe der gültigen Wellenfunktion einen aus, der dadurch zum Faktum wird. Dabei sind zwei Dinge wichtig: Erstens wirkt jede Umwelt als Beobachter von X , dem Menschen kommt dabei keine besondere Rolle zu. Wenn zweitens die Wellenfunktion aussagt, X könne sich bei der antizipierten Wechselwirkung möglicherweise am Ort A oder am Ort B zeigen, dann kann man daraus nicht schließen, dass X sich vorher an beiden Orten gleichzeitig aufgehalten habe. Hier werden Möglichkeiten mit Fakten gleichgesetzt, zwei völlig verschiedene Kategorien.

Der Autor denkt nach, ob wir eine modifizierte Quantenmechanik brauchen, um die Realität besser zu verstehen. Das ist nicht nötig. Man muss die Quantenmechanik nur richtig interpretieren und die unselige, logisch unzulässige Gleichsetzung von Möglichem mit Faktischem aufgeben.

KEINE UNTERSCHIEDUNG ZWISCHEN GUT UND SCHLECHT

Sind Roboter, die nach dem Vorbild von Kleinkindern Wissen erwerben, zu sozialem Handeln fähig? (»Selbstständig lernende Roboter«, *Spektrum* Juli 2018, S. 66)

Gunter Laßmann, Berlin: In dem Beitrag wird die falsche These wiederholt, allein durch das Verfahren der Minimierung des Prognosefehlers lasse sich gutes soziales Handeln

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. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

erreichen. Jemand greift nach etwas, erreicht es aber nicht ganz. Dann schieben kleine Kinder oder der Roboter iCub im Versuch den Gegenstand dem Greifer zu, um die eigene Vorhersage zu erfüllen. Sie vollbringen so eine gute Tat.

Aber woher wissen wir denn, dass alle Prognosen zu guten Taten führen? Wenn etwa ein Auto auf einen Abgrund zurast, aber unerwartet kurz davor stoppt, würde ein prognoseerfüllender Roboter es hinunterstoßen, denn er hatte ja erwartet, dass es hinabstürzt. Es wird also zusätzlich ein Verfahren benötigt, das Prognosen mit gutem Ausgang und solche mit schlechtem unterscheidet.

FEHLINTERPRETATION DER ERBLICHKEIT

Trotz aufwändiger Studien ließ sich bislang kein einzelner Erbfaktor für Schizophrenie ausmachen. Künftige Studien müssen auch Umwelteinflüsse berücksichtigen. (»Die Stecknadel im Genhaufen«, *Spektrum* Juli 2018, S. 38)

Robert Krell, Düsseldorf: Im Kasten »Fragwürdige Erbllichkeit« (S. 41) wird die Methodik der genomweiten Assoziationsstudien durch ein Beispiel von Genetiker Eric Turkheimer angezweifelt: Erbllichkeitsschätzungen seien irreführend, weil nach üblichen Kriterien die berechnete Erbllichkeit für Zweiarbigkeit bei Menschen bei null Prozent läge, während sie in Wirklichkeit fast ausschließlich genetisch bedingt sei.

Sollte mit den »üblichen Kriterien« die von Medizinern verwendete Erbllichkeitsformel von Holzinger (1929) gemeint sein, so wird mit der Erbllichkeit (»Heretabilität«) eben nicht der Anteil der Erbanlagen an der Ausprägung eines Merkmals ermittelt, sondern der Einfluss genetischer Abweichungen auf das Merkmal. Die berechneten null Prozent bedeuten also, dass null Prozent der Zweiarbigkeit in der Bevölkerung auf genetischen Unterschieden beruhen.

Daraus folgt, dass gleiche dafür zuständige Erbanlagen zu 100 Prozent die Zweiarbigkeit verursachen – was gerade die Richtigkeit der Formel stützt, statt sie ad absurdum zu führen. Vermutlich verleitet der ungeschickte Name Erbllichkeit immer wieder zu Fehlinterpretationen.

futur III

Kurz vor Pi

Chat mit einer Expertin der globalen Börsenaufsicht.

Eine Kurzgeschichte von Uwe Post

Sie kennen mich nicht, daher darf ich mich kurz vorstellen: Maxime Psaal, Junior-Operatorin bei der Weltbankenaufsicht, zuständig für die Überwachung von Echtzeit-Wertpapiertransaktionen.

Dass der angegebene Name nicht mein echter ist, sondern ein Pseudonym, wird Sie hoffentlich nicht stören. Würde ich Ihnen meinen richtigen Namen verraten, stünde mein Job auf dem Spiel. Und mein guter Ruf. Ich wohne in einem Dorf.

Im Moment bin ich nicht im Dienst, ich sitze im Schlafanzug auf dem Sofa. Es ist kurz vor Pi, bis zum nächsten Schichtbeginn habe ich also noch ein bisschen Zeit. Deshalb chatte ich gerne ein wenig mit Ihnen, obwohl ich Sie gar nicht kenne und aus naheliegenden Gründen sehr vorsichtig sein muss.

Worin mein Job besteht?

Nun, es ist natürlich verzeihlich, dass Sie das nicht wissen. Nicht jeder kann Experte für globale Geldbewegungen sein. Sie haben vielleicht schon davon gehört, dass der globale Finanzmarkt durch Algorithmen bestimmt wird, die bei steigenden Kursen innerhalb von Sekundenbruchteilen Aktien oder Wertpapiere kaufen und bei fallenden Kursen wieder verkaufen. Klitzekleine Unterschiede summieren sich zu Millionen gewinnen.

Tja, und seit der letzten Finanzkrise vom Oktober 26 wurde eine Kontrollinstanz eingeführt. Richtig. Ich und meine Kollegen. Damit so etwas nicht noch einmal passiert. Immerhin konnte nach dem Crash Amazon ganz Griechenland für einen Euro kaufen, und das auch nur, weil Nordkorea eine halbe Sekunde langsamer war.

Natürlich ist das menschliche Gehirn viel zu langsam für die Milliar-

den an Transaktionen, die die Algorithmen in wenigen Sekunden erzeugen. Aber eine humane Kontrollinstanz war nun einmal politisch gewünscht, folglich wurde mein Gehirn wie das meiner Kollegen zur Hälfte durch einen Hochleistungsrechner mit 64 Prozessoren ersetzt. Der prüft das Geschehen und schlägt bei Bedarf Alarm in meinem Innenohr.

Mein Privatleben?

Erstaunlich, dass Sie danach fragen. Sind Sie auf eine Affäre aus? Wie kommen Sie darauf, dass ich eine alleinstehende Frau bin? Vielleicht bin ich in Wirklichkeit sogar ein Mann, das können Sie ja gar nicht wissen. Haha. Offen gesagt habe ich im Moment hauptsächlich Sex mit negativen Exponentialfunktionen.

Fragen Sie nicht.

Nein, für private Angelegenheiten darf ich meinen eingebauten Computer nicht benutzen. Es läuft ohnehin kein moderneres Spiel als Tetris darauf; das Betriebssystem ist gegen jegliche App-Installation abgesichert. Nein, das root-Passwort für meine digitale Gehirnhälfte kenne ich nicht. Stellen Sie sich vor, Hacker würden sich darin einnisten und beispielsweise meine Rechenkapazität für Cryptomining verwenden. Oder meine Warnmechanismen umgehen, um heimlich verbotene Hochgeschwindigkeitsgeschäfte hinter dem Rücken der Überwachung abzuwickeln. In meinem Kopf, aber hinter meinem Rücken. Nicht auszudenken!

Außerhalb der Arbeitszeiten läuft der Rechner im Energiesparmodus, um Sicherheitsfunktionen aufrechtzuerhalten und um jederzeit Updates einspielen zu können. Das passiert zum Glück nicht allzu oft, denn das Gejaule der WLAN-Verbindung ist wirklich kaum zu ertragen. Klingt wie

acht Hiphop-Songs gleichzeitig, abgespielt mit ungefähr zehnfacher Geschwindigkeit.

Natürlich hätte ich ohnehin keine Lust, zu Hause den obligatorischen knallengen Helm mit Wasserkühlung zu tragen, um die Verlustleistung meiner Prozessoren abzuführen. Auch das dicke Kabel im Nacken wäre auf Dauer ganz schön unpraktisch. Es ist nicht einmal lang genug, um im Dienst aufs Klo gehen zu können. Und mal eben ausstecken, das geht natürlich nicht. Obwohl ich für den Fall einer kurzen Unterbrechung der Stromversorgung einen Akku hinter dem Innenohr trage.

Nein, explodieren kann der nicht, soweit ich weiß. Aber das ist schon eine berechtigte Frage, da haben Sie völlig Recht.

Normalerweise bekomme ich nicht mit, was der Computer in meinem Kopf während der Arbeit genau tut. Es kribbelt ein bisschen, wenn er vorübergehend die Rechenleistung hochfährt. Die elektromagnetische Strahlung zaubert bisweilen fraktale Scheinbilder in mein Sichtfeld. Gelegentlich fühlt es sich so an, als würde jemand hinter mir stehen. Wenn ich den Kopf dann zu schnell drehe, purzeln Zahlen und Formeln durch mein Sprachzentrum. Es kann passieren, dass mir vor lauter Potenzen und Vektoren schlecht wird und ich Logarithmen kotze.

Fragen Sie nicht.

Außerdem komme ich gelegentlich sogar mit einfachen Zahlen durcheinander. Deshalb ist es wirklich furchtbar nett von Ihnen, dass Sie mir die ganze Zeit über einen Nebenkanal aussichtsreiche Lottozahlen hochladen, aber ich würde sie garantiert durcheinanderbringen und statt der 49 die Wurzel aus -1 ankreuzen.

Doch, die steht auf dem Lottoschein. Sie müssen nur wissen, wonach Sie suchen.

Ach, das sind keine Lottozahlen? Sondern ein Foto von Ihnen im BinärfORMAT? Natürlich sind Sie attraktiv. Das würde ich nie anzweifeln. Ich hoffe, das Foto ist nicht unanständig. Meine Filtersoftware ist in dieser Hinsicht gnadenlos.

Stimmt genau, Pornos konsumieren kann ich deswegen auch nicht. Ich erwähnte ja schon die Exponentenfunktionen, oder?

Nein, es nützt rein gar nichts, mich zu entführen. Sobald Sie mir den Kopf mit einer Knochensäge öffnen, finden Sie nichts als verkohlte Elektronik. Der Selbstzerstörungsmechanismus ist an meine Körperfunktionen gebunden. Sobald mir etwas zustößt, verbrennt sich die Platine selbst.

Was meinen Sie? Nein, ich stelle mir das nicht besonders angenehm vor.

Aber, wissen Sie, mein Job ist gut bezahlt. Ich bekomme sogar Boni für pünktliches Erscheinen. Die Behörde zahlt für mich in eine Arbeitsunfähigkeitsversicherung ein, und Kopfschmerztabletten sind ohne Limit gratis.

Außerdem lernt man bei der Arbeit interessante Leute kennen. Natürlich darf ich darüber nichts Näheres erzählen. Die Kolleginnen und Kollegen kommen aus der ganzen Welt. Es gibt einen Australier, der zuvor einfacher Schalterbeamter in einer langweiligen Bankfiliale war. Das nenne ich einen Aufstieg! Ich selbst war früher bei einem Pflegedienst. An sich arbeite ich ja gerne mit Menschen. Aber das Finanzgeschäft ist einfach lukrativer, und man bekommt es seltener mit Exkrementen zu tun.

Wir machen hier einen verdammt wichtigen Job. Dafür muss man gewisse Opfer bringen, finden Sie nicht?

Gut, ein paar Kollegen haben schlimme geistige Schäden erlitten. Aber solange kein Arzt sie für arbeitsunfähig erklärt, kommen sie weiterhin zum Dienst.

Es gibt da zum Beispiel die kleine Französin, die immer kichert, wenn der Kurs der Aktie eines ganz bestimmten Rüstungskonzerns um mehr als ein Prozent steigt. Beschwerst sie sich? Nein.

Oder den Isländer, der einmal versucht hat, eine Cryptomining-Software in seinem Kopf zu installieren. Er hätte es fast geschafft.

Nein, sie haben ihn nicht fristlos entlassen. Sie haben ihm allerdings mit einem Software-Plugin den freien Willen genommen. Seitdem trägt er Windeln.

Fragen Sie nicht.

Wir haben sogar ein Recht auf 30 Tage Urlaub und erhalten regelmäßig Hotelgutscheine. Ich freue mich schon sehr auf meine Ferien in Griech ... äh, Neu-Amazonien. Nur noch drei Tage arbeiten, dann endlich Sonne, Strand und massig Produktproben gratis!

Einen Augenblick ... warten Sie.

Etwas ist seltsam. Hinter meinem Gaumen kitzelt eine Differenzialgleichung. Mindestens vierter Ordnung. Das ist ... ungewöhnlich. Sie scheint sich quer durch meinen Kopf zu integrieren und dabei irgendwelche Zahlen nach außen zu funken. Das WLAN hat sich soeben von selbst aktiviert! Ich hasse diesen Multi-Rap auf Speed!

Guten Morgen, Operator #72, hier spricht Ihr Teamleiter. Bitte trennen Sie sofort Ihre Verbindung! In einer der Chatnachrichten, die Sie gerade erhalten haben, war Schadsoftware enthalten.

Wie? Das muss ein Missverständnis sein. Natürlich haben Sie nichts damit zu tun. Wie gesagt, mein System ist hundertprozentig abgesichert gegen irgendwelche Angriffe von außen.

Und ich bin doch gar nicht im Dienst und demzufolge nicht mit dem System verbunden. Es ist doch erst kurz vor Pi, und ich sitze zu Hause im Schlafanzug auf dem Sofa.

Ha, jetzt weiß ich es! Die Meldung kam gar nicht von meinem Teamleiter. Es war ein Angriff, der so tut, als wäre er eine Abwehr. Ganz schön perfide. Aber ein alter Hut. Schon vor 20 Jahren gab es Würmer, die sich als Virenschutzsoftware tarnten.

Bitte, Nummer 72, trennen Sie Ihre Verbindung, sonst muss ich die Notabschaltung vornehmen. Um Gottes willen! Sie haben eine neuartige Schadsoftware im Kopf! Ich habe gerade Ihre Chatnachrichten überflogen: Sie sitzen nicht zu Hause auf der Couch, sondern im Büro!

Wirklich hinterhältig, dieser Hackerangriff. Was? Ja, natürlich ignoriere ich ihn einfach. Obwohl ... ein bisschen Angst habe ich jetzt aber

doch. Vor einer Weile gab es mal eine ddos-Attacke auf unsere Abteilung. Zehn Minuten lang waren wir dem Dauerfeuer von Milliarden Sex-Anfragen ausgesetzt.

Ja, genau.

Anscheinend eine Sicherheitslücke in einer Dating-App. Allen Nutzern dieser App auf der ganzen Welt wurde gleichzeitig vorgegaukelt, wir seien ihr idealer Partner. Die Bilder und Clips, die uns da in die Köpfe gehämmert wurden ...

Fragen Sie nicht. Sind Sie eigentlich noch da?

Achtung, Notabschaltung in zehn Sekunden. Operator #72, es geht nicht anders. Tut mir leid. Sie sind Opfer eines Hacks. Wir verlieren die Kontrolle. 14 Länder in Afrika sind schon pleite, und gerade hat Russland Somalia für einen Rubel gekauft. Sie gefährden gerade die ganze Weltwirtschaft! Sie wissen, was dazu in Ihrem Vertrag steht!

Ich frage mich, warum es hier plötzlich nach fraktaler Schokolade riecht. Die Alufolie knistert multidimensional. Ist das da eine negative Determinante? Warum antworten Sie nicht mehr?

Augenblick.

Es fühlt sich gerade so an, als würde die Rechenleistung hochgefahren werden. Aber das ist unmöglich. Das kann nur passieren, wenn ich angeschlossen bin. Auf der Arbeit.

Aber es ist doch erst kurz vor Pi, meine Schicht beginnt erst noch!

Sagen Sie bitte etwas, gerade haben wir noch so nett geplaudert.

Mir ist heiß ... Mindestens e⁹ Grad. Was ist das ... warum steckt das Kabel in meinem Nacken ... ich ...

Das würde ja bedeu...

Verbindung unterbrochen, bitte versuchen Sie es erneut!

DER AUTOR

Uwe Post, Jahrgang 1968, ist Chefschmied der unabhängigen Spielschmiede Ludetis. Er schreibt seit den 1990er Jahren satirische Science-fiction. Er hat viele Kurzgeschichten und mehrere Romane veröffentlicht, Ende September 2018 erscheint »Für immer 8 Bit«.

VORSCHAU

SARKIS/ISTOCK / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIE TRÜGERISCHE ELEGANZ DER NATURGESETZE

Lange diente mathematische Ästhetik als Wegweiser bei der Suche nach neuen Naturgesetzen. Nun ist ein Streit unter Physikern entbrannt, ob diese Strategie immer noch aufgeht. In einem großen Titelthema beleuchtet **Spektrum** die Debatte aus verschiedenen Blickwinkeln: Ist die Teilchenphysik vom Weg abgekommen? Was sind die großen Widersprüche im Weltbild der Forscher, die es aufzulösen gilt? Und wann ist ein Naturgesetz überhaupt »schön«?

40 Jahre

Spektrum

der Wissenschaft

Die besten 40 Artikel aus vier Jahrzehnten

Anlässlich des runden Jubiläums haben wir unser Archiv gesichtet und die besten 40 Artikel aus 40 Jahren **Spektrum** gekürt. Die Liste dieser »Artikel des Jahres« umfasst besonders bahnbrechende Erkenntnisse, von denen viele ganze Forschungszweige revolutionierten – wahre Meilensteine der Wissenschaft, präsentiert von ihren Schöpfern selbst, die für ihre Entdeckungen mit den höchsten wissenschaftlichen Weihen geehrt wurden.

NOBELPREISTRÄGER IM GESPRÄCH

Spektrum-Autoren sind ausgezeichnet – manche sogar mit dem Nobelpreis! In unserem Jubiläumsheft beginnen wir eine Serie, in der wir gemeinsam mit einigen von ihnen zurück- und nach vorne blicken. In Teil 1 erklärt Elizabeth Blackburn, warum sich unsere Körperzellen nur begrenzt teilen – und wie sich das auf die Lebenserwartung auswirkt.



JULIA NIEME / LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), über 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Digitalpaket »Digitales Zeitalter«

Das Digitalpaket enthält die Kompakt-Ausgaben (PDF-Format): »Computerspiele«, »Kryptografie«, »Künstliche Intelligenz«, »Internet und soziale Medien«, »Smartphones« und »Der digitale Mensch«.



**Wählen
Sie Ihr
Geschenk**



Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM 2017

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format.

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 2.700 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner



nature

