

Spektrum

der Wissenschaft



Eine neue Kosmologie

Gab es den
Urknall wirklich?

KLIMAWANDEL Aufruhr im antarktischen Ozean

MEDIZIN Menschliche Organe aus Tieren

CYBORGS Werden wir eines Tages unsterblich?

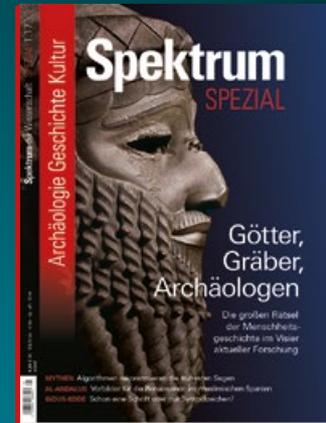
Unsere Neuerscheinungen!



Gentechnik: Revolution mit CRISPR/Cas • Epigenetik: So vererben sich Umwelteinflüsse • Erbkrankheiten: Irrwege der Evolution • Pflanzenzucht: Gentechnik im Tarnmantel • Stressgenetik: Spurensuche im Erbgut • € 8,90



Quantengravitation: Die Theorien werden überprüfbar • Dunkle Materie: Neue Bewegungsgesetze statt unsichtbarer Teilchen? • Schwarze Löcher: Wie Verschränkung ein Wurmloch erzeugt • € 8,90 (erscheint am 26.5.2017)



Klimawandel: Umbrüche am Ende der Eiszeit • Anthropologie: Die Urahren der großen Mythen • Ägyptologie: Ein Puzzle der besonderen Art • Südamerika: Archäologie in Amazonien • Hawaii: Gottkönige im Inselparadies • € 8,90



Quantengravitation: Das fraktale Quantenuniversum • Essay: Ist die Stringtheorie noch eine Wissenschaft? • Schwarze Löcher: Nackte Singularitäten • Kosmische Expansion: Die Dunkle Energie und ihre Feinde • € 8,90



Einschulung: Wann ist ein Kind schulreif? • Naturerfahrung: Warum sie die Konzentration verbessert • Inklusion: Ein Vorteil für alle? • Keine Lust auf Hausaufgaben? So können Eltern helfen • Psychopharmaka für Kinder? • € 8,90



Verfahren: Gezielter Eingriff ins Erbgut • Ausblick: Was wir von CRISPR erwarten können • Gesetzgebung: Gentechnik ohne Gene? • Medizin: Umstrittener Eingriff ins embryonale Erbgut • Zellanalyse: Die CRISPR-Welle • € 5,90

Hier bestellen:
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/neuerscheinungen

**Ausgewählte
 Sonderhefte
 auch im
 PDF-Format**



EDITORIAL

WIE SCHWER IST EIN KILOGRAMM?

Von Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Es ist der 25. April, der Vorrat an Schokoladenostereiern und -hasen auf meinem Schreibtisch neigt sich dem Ende. Vielleicht sollte ich mich mal wieder auf die Waage stellen, um zu sehen, welche Spuren die Schlemmerei hinterlassen hat: ein, zwei Kilo plus oder mehr?

Nur was ist das überhaupt, ein Kilogramm? Dazu gibt es eine simple Antwort: das, was ein unscheinbarer Metallzylinder in einem Tresor am Rande von Paris wiegt – das legendäre Urkilogramm von 1889. Leider wird diese Definition den Ansprüchen von Forschern immer weniger gerecht. Denn offenbar verliert der Zylinder aus rätselhaften Gründen ganz allmählich an Masse. Im Zeitalter der Nanotechnik ist eine Abweichung auch nur im Mikrogrammbereich einfach nicht mehr tragbar. Daher wollen Experten das Kilogramm auf eine solidere Basis stellen, indem sie es mit dem planckschen Wirkungsquantum verknüpfen, einer physikalischen Naturkonstanten. Nur müssen sie dessen Zahlenwert dazu erst einmal wirklich exakt bestimmen. Der langwierige Prozess ist jetzt in die heiße Phase eingetreten, und Sie sind sozusagen live dabei!

Ab S. 46 beschreibt Tim Folger den langen Weg vom Urkilogramm bis zur für 2018 geplanten Neudefinition. Ziel ist es, drei voneinander unabhängige, praktisch identische Bestimmungen für die Planck-Konstante zu bekommen, um dann auf dieser Grundlage das Kilogramm präzise festzulegen. Der Zeitplan sieht vor, dass die entsprechenden Fachpublikationen bis zum 1. Juli 2017 eingereicht sein sollen: nach aktuellem Stand – Ende April – ein ambitioniertes, aber noch realisierbares Unterfangen, wie der maßgeblich beteiligte deutsche Metrologe Horst Bettin im Interview ab S. 54 verrät. Es bleibt also spannend – auch für uns Redakteure. Es gab intern heiße Diskussionen darüber, ob wir den Artikel in diesem Heft überhaupt drucken sollen. Wird er bereits in einigen Aspekten überholt sein, wenn Sie ihn lesen? Um Sie möglichst dicht am Puls der Forschung zu informieren, haben wir das Risiko in Kauf genommen.

Wenige Tage bevor diese Ausgabe am Kiosk erscheint, soll ein Treffen des Consultative Committee for Mass and Related Quantities stattfinden, das vermutlich eine Empfehlung formulieren wird, wie das Ganze weitergehen soll. Bis zum Herbst könnte dann Klarheit darüber herrschen, ob das Kilogramm tatsächlich 2018 neu definiert wird – oder ob der alte Metallzylinder in Frankreich noch etwas länger seinen Dienst verrichten muss.

Herzlich, Ihr



NEU AM KIOSK AB 26.5.!

Wie Physiker die Struktur von Raum und Zeit ergründen, lesen Sie im **Spektrum Spezial Physik – Mathematik – Technik** 2.17.

AUTOREN DIESER AUSGABE



ANNA IJJAS

Ein Stipendium brachte die theoretische Kosmologin von Deutschland in die USA. Dort deckt sie gemeinsam mit Paul Steinhardt und Abraham Loeb die Schwächen des Standardmodells auf (S. 12).



JUAN CARLOS IZPISÚA BELMONTE

forscht am renommierten Salk Institute for Biological Studies über Stammzell-techniken. Eines seiner Ziele lautet, menschliche Organe in Tieren zu züchten (S. 30).



JÖRG WAGNER

Der Tübinger Althistoriker studiert den antiken Vielvölkerstaat Kommagene – und dessen ungewöhnlichen Königs kult (S. 76).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Hydrothermale Quellen auf Saturnmond Enceladus

Zellersatz bei Parkinsonpatienten

Sanitärerameisen retten Kameraden

Rückschlag für »sterile« Neutrinos

Supererde mit Atmosphäre

Glutenunverträglichkeit durch Virus

20 FORSCHUNG AKTUELL

Gaias erster Sternkatalog

Die Daten enthalten handfeste Überraschungen

Wiederbelebung bei Bärtierchen

Ein spezielles Protein schützt sie vor Strahlungsschäden

Zeitkristalle

Quantenmaterie in endloser Schwingung

Abelpreis für Yves Meyer

Die mathematische Theorie der Wavelets

29 SPRINGERS EINWÜRFE

Der Erde wird das Wasser knapp

Intensive Bewässerung in der Landwirtschaft gefährdet die Lebensgrundlage der Menschheit.

58 SCHLICHTING!

Lichtbahnen über den Wellen

Spiegelungen auf unruhigen Gewässern produzieren seltsame Streifen.

61 IMPRESSUM

85 FREISTETTERS FORMELWELT

Plutos Degradierung

Immerhin ist der Zwerg nicht kartoffelförmig.

12 ASTRONOMIE **INFLATIONSMODELL IN DER KRITIK**

Die meisten Astronomen nehmen an, direkt nach dem Urknall habe sich das Universum schlagartig aufgebläht. Doch neue Messungen und theoretische Argumente erschüttern die Grundlagen dieser Hypothese.

Von Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt und Abraham Loeb

30 TRANSPLANTATIONSMEDIZIN **SPENDERORGANE AUS TIEREN**

Indem sie menschliche Körperteile in Schweinen oder Rindern züchten, wollen Forscher dem Mangel an Spenderorganen begegnen.

Von Juan Carlos Izpisua Belmonte

36 GENEXPRESSION **EPIGENETIK FÜR FORTGESCHRITTENE**

Auch die Abschriften von Genen tragen wichtige Signaturen.

Von Cassandra Willyard

40 ANTARKTIS **OZEAN IN AUFRUHR**

Das Südpolarmeer nimmt gewaltige Mengen an Kohlenstoff und Wärme auf. Aktuellen Messdaten zufolge könnte sich das demnächst ändern.

Von Jeff Tollefson

46 METROLOGIE **DAS NEUE MASS DER MASSE**

Seit 1889 bestimmt ein Zylinder in einem Tresor in Paris, wie schwer ein Kilogramm ist. Nun wagen sich Forscher an eine Neudefinition.

Von Tim Folger

54 INTERVIEW **»DAS VERSTEHT ZUNÄCHST FAST NIEMAND«**

Der Metrologe Horst Bettin arbeitet seit Jahren an einer alternativen Festlegung für das Kilogramm.

Von Janosch Deeg

62 TRANSHUMANISMUS **WOLLEN WIR EWIG LEBEN?**

Serie: Die Zukunft der Menschheit (Teil 6/1) Wenn unser Bewusstsein in einem Computer fortleben könnte, hätte es völlig neue Probleme.

Von Hillary Rosner

67 ANTHROPOZÄN **APOKALYPSE ODER AUFBRUCH?**

Serie: Die Zukunft der Menschheit (Teil 6/2) Wir Menschen haben begonnen, das System Erde zu dominieren. Übernehmen wir uns damit?

Von David Grinspoon

70 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **GLEICHKANTIGE POLYEDER**

Die Bedingung »gleich lange Kanten« lässt Raum für prächtige Formenvielfalt.

Von Christoph Pöppe

76 HELLENISMUS **EIN KÖNIG, EIN GOTT, EIN REICH**

Serie: Kultbauten der Menschheit (Teil 2) Um seinen Vielvölkerstaat zu einen, inszenierte sich Antiochos I. von Kommagene als Gottkönig.

Von Jörg Wagner

THE WORRIES



12
TITELTHEMA
INFLATIONSMODELL
IN DER KRITIK

FOTOLIA / SERGEY INEVENS



36
GENEXPRESSION
EPIGENETIK
FÜR FORTGESCHRITTENE

ISTOCK / RAY HEINS



40
ANTARKTIS
OZEAN IN AUFRUHR

ISTOCK / BARTUNG



76
HELLENISMUS
EIN KÖNIG, EIN GOTT,
EIN REICH



62
TRANSHUMANISMUS
WOLLEN WIR
EWIG LEBEN?

ISTOCK / ILEXK

86 REZENSIONEN

- Philip T. Hoffman:** Wie Europa die Welt eroberte
- Rüdiger Vaas:** Einfach Hawking!
- Raimund Schmid:** Wehe du bist alt und wirst krank
- Marc Bekoff, Jessica Pierce:** Sind Tiere die besseren Menschen?
- Nikil Mukerji:** Die 10 Gebote des gesunden Menschenverstands
- Clive Gifford:** Das ist kein Biobuch

92 ZEITREISE

Vom prähistorischen Steinkreis zum Lasertunnelbohrer

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Das Internet der Dinge
Intelligente Küchengeräte unter sich

98 VORSCHAU

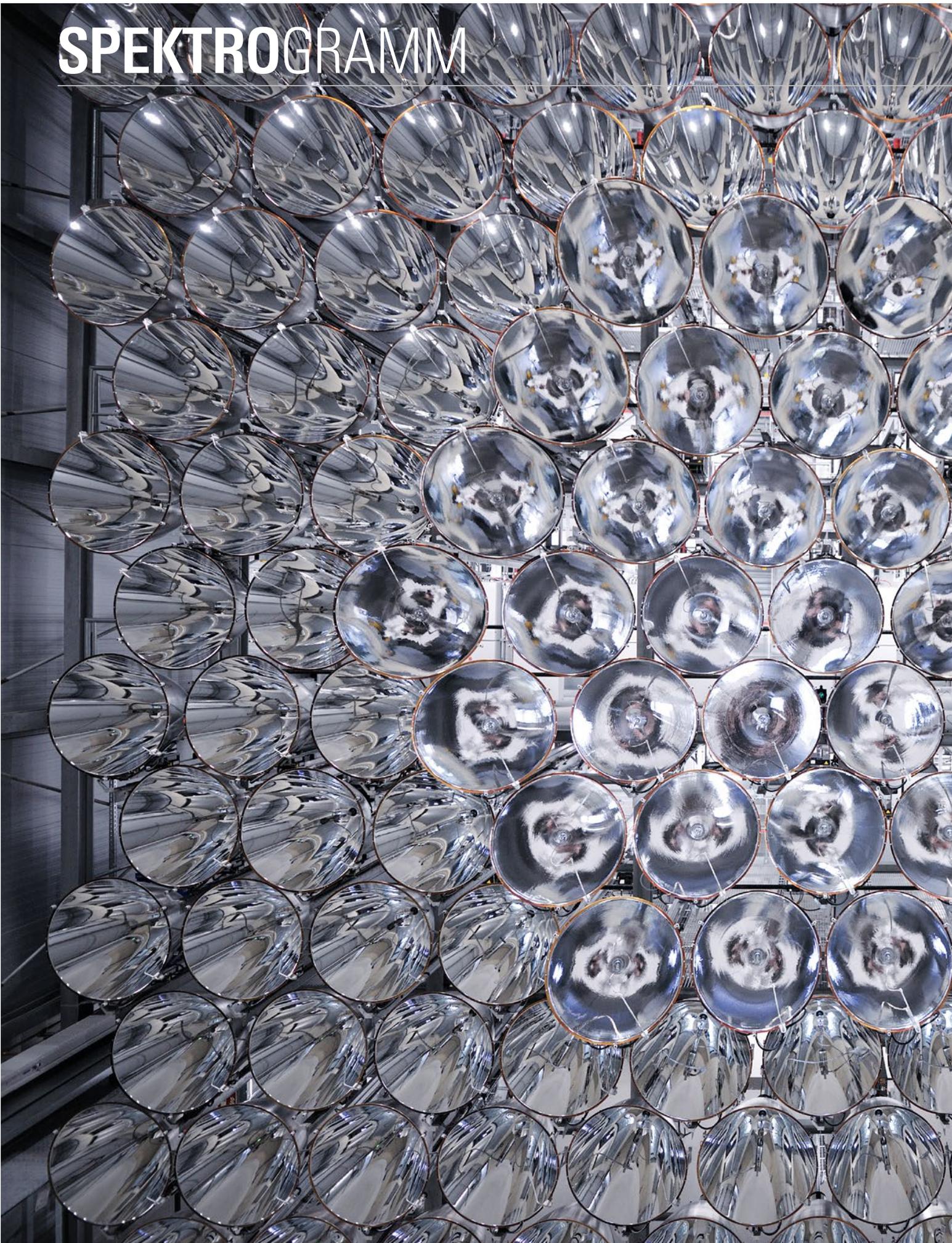
Titelbild: iStock / bestdesigns (Kugel);
iStock / pixelparticle (Urknall);
Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

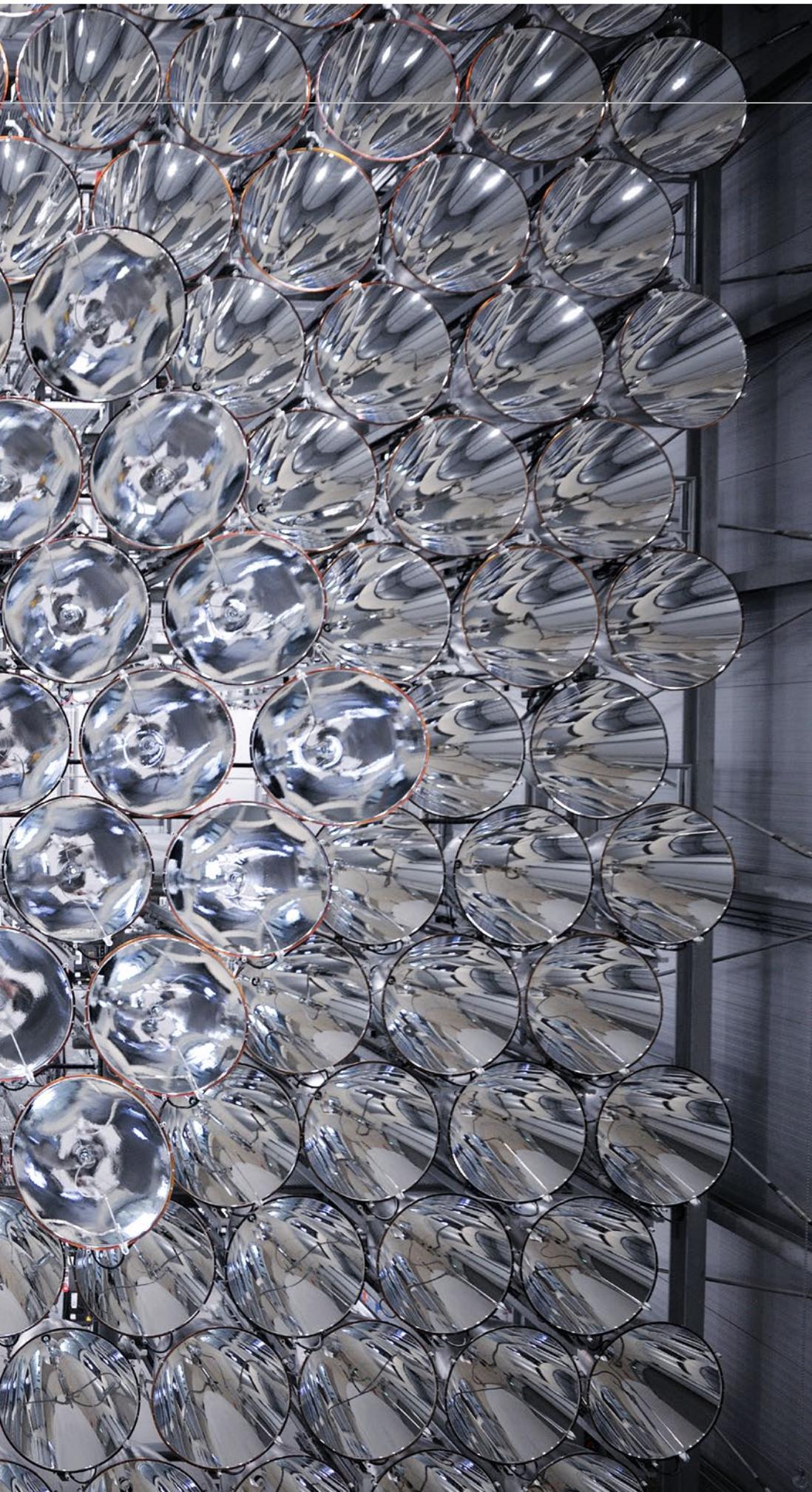


Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM

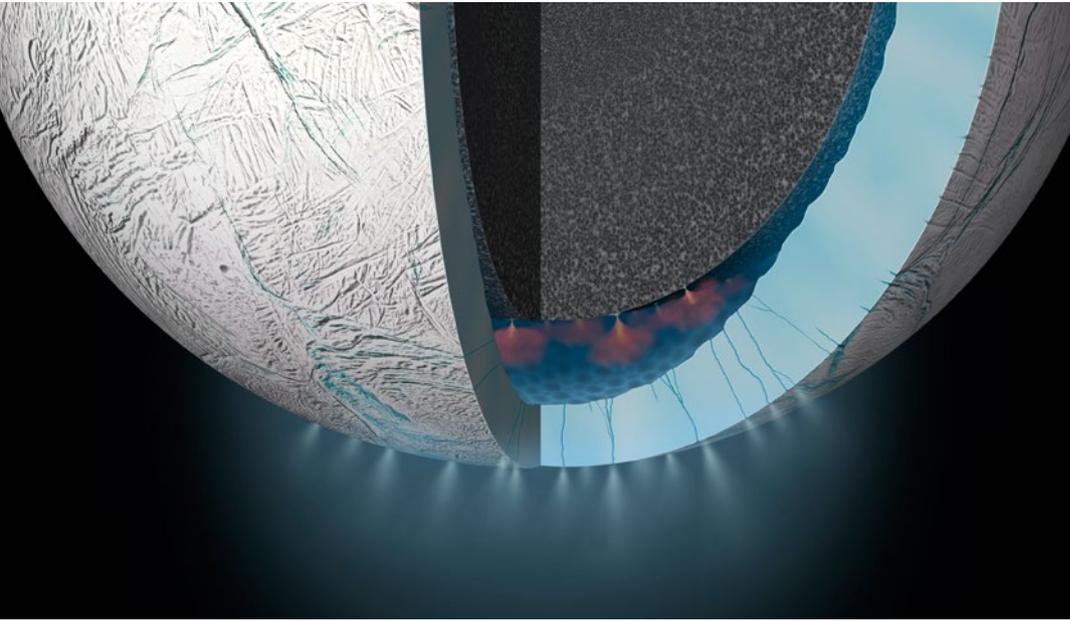




KÜNSTLICHE SONNE IM LABOR

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat in Jülich die Versuchsanlage »Synlight« eingeweiht, laut DLR »die größte künstliche Sonne der Welt«. Sie besteht aus 149 an einer Wand befestigten Xenon-Kurzbogenlampen. Die Wissenschaftler können das Licht dieser Hochleistungsstrahler auf eine Fläche von 20 mal 20 Zentimetern fokussieren. Im Brennpunkt der Lampen, deren Gesamtleistung 350 Kilowatt erreicht, entstehen dadurch Temperaturen von bis zu 3000 Grad Celsius. Die Forscher wollen die gleichmäßige, genau regelbare Strahlung nutzen, um unter anderem Wasserstoff herzustellen, der sich dann als Treibstoff verwenden lässt. Er entsteht, wenn Wassermoleküle durch starkes Sonnenlicht aufgespalten werden. In der Vergangenheit ist dies DLR-Wissenschaftlern bereits im Labormaßstab gelungen. Die 3,5 Millionen Euro teure Synlight-Anlage soll den Prozess nun auch für die Industrie interessant machen.

DLR, Pressemitteilung, 23.3.2017



NASA / JPL/CALTECH

Unter der Eiskruste des Saturnmonds Enceladus soll es einen Ozean geben, der von heißen Quellen erwärmt wird. Durch Risse im Eis schießen Wasserdampf und andere Gase ins All.

SONNENSYSTEM HYDROTHERMALE QUELLEN AUF SATURNMOND

► Eine neue Studie befeuert die Spekulationen um mögliches Leben auf dem Saturnmond Enceladus. Unter dessen kilometerdickem Eispanzer vermuten Wissenschaftler seit Langem einen Ozean, den geologische Prozesse im Inneren der 500 Kilometer großen Welt flüssig halten. In ihm könnten nach Einschätzung von Astrobiologen Mikroorganismen gedeihen. Statt von Sonnenlicht würden sie von hydrothermalen Quellen mit Energie versorgt – auf der Erde gibt es vergleichbare Habitate in der stockfinsternen Tiefsee.

Ein US-Forscherteam um Hunter Waite vom Southwest Research Institute in Texas präsentiert nun ein neues Indiz für diese Theo-

rie. Die Raumsonde Cassini hat bei einem Vorbeiflug im Oktober 2015 Wasserstoffmoleküle aufgefangen, die von den schon länger bekannten Geysiren an Enceladus' Südpol ins All gepustet wurden. Vermutlich entstand das Gas tief im Inneren des Mondes bei der Vermischung von flüssigem Wasser mit eisenhaltigem Gestein und ist über hydrothermale Schlote in den unterirdischen Ozean gelangt, spekulieren die Forscher.

Einige der ältesten bekannten Einzeller auf der Erde nutzten Wasserstoffgas für ihren Stoffwechsel. Diese Chemolithotrophen setzen H_2 zusammen mit Kohlendioxid zu Methan um, Experten sprechen von Methanogenese. Da Cassini bei früheren Vorbeiflügen über den Geysiren sowohl Methan als auch CO_2 nachgewiesen hatte, sind in Enceladus' mutmaßlichem Ozean aus Sicht von

Waites Team nun alle Indizien für primitives Leben gegeben.

Das Team konnte sogar ein Modell für die Prozesse im Inneren des Mondes entwerfen, das die von Cassini beobachteten Häufigkeiten der Gase einigermaßen gut wiedergibt. Allerdings sind Waite und Kollegen davon ausgegangen, dass die im All beobachteten Häufigkeiten der Gase denen im unterirdischen Ozean gleichen, was nicht zwangsläufig der Fall sein muss. Auch ist offen, ob große Mengen Wasserstoff in den Gewässern des Mondes wirklich ein Indiz für Leben wären – oder eher für dessen Fehlen. Auf der Erde jedenfalls beobachten Meeresbiologen, dass methanogene Mikroorganismen das Gas rasch vertilgen, sobald dieses ins Meerwasser gelangt.

Science, 10.1126/science.aai8703, 2017

MEDIZIN ZELLERSATZ VON PARKINSON- PATIENTEN

► Bei der Parkinson-Krankheit fallen zunehmend bestimmte Neurone aus, die den Botenstoff Dopamin bereitstellen. Jetzt hat ein Team um Ernest Arenas vom schwedischen Karolinska-Institut solche Nervenzellen im Körper von Mäusen nachgezüchtet. Gelänge das auch in Menschen, ließen sich damit wohl die Krankheitssymptome lindern.

Die Forscher verwandelten zunächst im Labor so genannte Astrozyten, ein wichtiger unterstützender Zelltyp im Gehirn, durch Gabe eines Signalmolekül-Cocktails in Dopaminneurone. In weiteren Versuchen gelang es Arenas' Team außerdem, solche Neurone direkt im Gehirn von erkrankten Mäusen nachzuzüchten. Dazu schleusten sie die Gene für die Produktion der Wirkstoffe mit Virenfähren in die Tiere ein. Auf diese Weise entstanden nicht nur neue Neurone, auch die Symptome der Schüttellähmung, etwa ein unsicherer Gang, ließen nach.

Auf ähnliche Weise könnte man in Zukunft vielleicht auch Patienten helfen, hoffen die Forscher. Bislang hatten Mediziner im Labor daran gearbeitet, fertige dopaminerge Neurone herzustellen und diese dann ins Gehirn transplantieren zu können – das Verfahren ist aber noch sehr aufwändig und fehleranfällig. Zudem müsste der Neuronennachschub dabei aus dem begrenzten Reservoir

BIOLOGIE

SANITÄTERAMEISEN RETTEN KAMERADEN

Die südlich der Sahara lebende Ameise *Megaponera analis* ernährt sich ausschließlich von Termiten – die verteidigen ihre Kolonie allerdings mit wehrhaften Soldaten. Die Ameisen schicken daher zusammen mit einem aus 200 bis 500 Kämpfern bestehenden Angriffstrupp auch ein spezialisiertes Pionierkommando aus besonders großen Exemplaren in die Schlacht. Sie schlagen eine Bresche in die Verteidigungslinien der Termiten und verschaffen so einer Fraktion kleinerer Kollegen Zutritt, die dann Termiten töten und verschleppen. Übersehen wurde dabei offenbar bislang eine weitere Gruppe von Ameisenspezialisten: Sie bringen im Kampf verletzte Artgenossen in Sicherheit, wie Forscher um Erik Frank von der Universität Würzburg nun herausgefunden haben.

Die Wissenschaftler hatten in freier Wildbahn an der Elfenbeinküste mit Infrarotkameras typische Attacken von *Megaponera analis* auf Termitenbauten gefilmt und ausgewertet. Zu ihrer Überraschung wurden dabei regelmäßig verwundete Ameisen, die etwa im Kampf Gliedmaßen verloren hatten, von anderen Tieren geborgen und zurück in den Ameisenbau getragen. Dort erholten sich die Tiere dann von der Verwundung: Während die Versehrten direkt nach dem Verlust etwa eines Beins oft eher unkoordiniert herumstolperten, erlaubte ihnen eine Phase der Ruhe sich an die neuen anatomischen Gegebenheiten anzupassen. Die regenerierten Ameisen beteiligten sich dann auch wieder am Kampfgeschehen.

Offenbar lohnt sich der mit der Bergung verbundene Aufwand für den Ameisenstaat. Bei den 54 gefilmten Attacken wurden im Durchschnitt jeweils drei Tiere aus dem Gefecht gerettet, von denen fast alle der kleineren Kampfameisensorte angehörten. Von diesen, welche die Forscher mit Acrylfarbe markierten, zogen 95 Prozent später wieder in den Kampf, teilweise schon nach nur einer Stunde Erholung. Insgesamt verschafft das den Ameisen vermutlich Vorteile: Ameisenarmeen mit Sanitätswesen führen eine im Durchschnitt knapp 30 Prozent höhere Kopfzahl ins Feld, berechneten die Forscher.

Angelockt werden die Sanitäter über Pheromone aus Drüsen der Verwundeten. Dieser chemische Hilferuf wirkt, wie die Forscher im Experiment testen konnten: Gesammelt und auf gesunde Ameisen appliziert, stimulierte er Artgenossen, zum Sanitäter zu werden und die als verletzt angesehenen Tiere abzutransportieren.

Science Advances, 10.1126/sciadv.1602187, 2017



Ameisen der Art *Megaponera analis* kämpfen oft mit mehreren Termiten gleichzeitig (oben), oder sie werden auf dem Heimweg von Spinnen überfallen (Mitte). Einige der Ameisen transportieren dann verwundete Artgenossen ab. Das war bisher nur von *Paltothyreus tarsatus* bekannt. Sie tragen andere Individuen davon, wenn diese nach einem Kampf ein Pheromon aussenden (unten).



FOTOS: ERIK FRANK, FRANK, ET. AL.: SAVING THE INJURED: RESCUE BEHAVIOR IN THE TERMITE-HUNTING ANT MEGAPONERA ANALIS. IN: SCIENCE ADVANCES 3, E1602187, 2017

TEILCHENPHYSIK RÜCKSCHLAG FÜR »STERILE« NEUTRINOS

Seit dem Jahr 2011 grübeln Physiker über ein rätselhaftes Ergebnis von Neutrinoexperimenten: Wiederholt haben Detektoren, die den flüchtigen Partikeln im Umfeld von Atomkraftwerken nachspüren, weniger der Teilchen nachgewiesen als erwartet. Eine Erklärung für diese »Reaktor-Antineutrino-Anomalie« wäre eine neue, nicht nachweisbare Variante, in die sich einige der Teilchen im Flug verwandeln. Solche »sterilen« Neutrinos finden auch deshalb viel Beachtung, weil Physiker sie als mögliche Erklärung für die Dunkle Materie heranziehen. Diese hypothetische Materieform soll im Weltall allgegenwärtig sein; woraus sie bestehen könnte, ist aber unklar.

Eine Messung der amerikanisch-chinesischen Daya-Bay-Kollaboration versetzt den sterilen Neutrinos nun allerdings einen Dämpfer. Mit vier Detektoren haben die beteiligten Forscher zwischen 2011 und 2015 gut zwei Millionen Antineutrinos aufgefangen, die aus den sechs Kernreaktoren des Daya-Wan-Nuklearkomplexes in der

Nähe von Shenzhen, China, stammen. Die Geisterpartikel entstehen dort in den Brennstäben der Reaktoren, wenn Atomkerne von Uran-235 oder Plutonium-239 gespalten werden. Die Physiker konnten nun nachvollziehen, wie stark diese beiden Elemente jeweils zum Antineutrinofluss beitrugen. Ihr Verhältnis ändert sich mit fortlaufender Betriebsdauer der Reaktoren, und sie produzieren jeweils Antineutrinos mit unterschiedlicher Energieverteilung.

Im Fall von Uran-235 erreichten acht Prozent weniger Antineutrinos die Detektoren von Daya Bay, als ein verbreitetes Modell des Kernzerfalls vorhergesagt hatte – hier hatte die Anomalie also weiter Bestand. Bei der Analyse der Antineutrinos aus Plutonium-239 zeigte sich hingegen keine Spur der zuvor beobachteten Diskrepanz. Dies würde man jedoch erwarten, wenn sich einige der ausgesandten Teilchen im Flug tatsächlich in sterile Neutrinos verwandeln. Aus Sicht der Forscher ist die plausibelste Erklärung, dass das Modell für den Zerfall von Uran-235 schlicht fehlerhaft ist – vermutlich sagt es eine zu hohe Rate der emittierten Antineutrinos voraus. Weitere Messungen sollen diese Vermutung bestätigen.

Vorabveröffentlichung, arXiv:1704.01082, 2017

solcher verpflanzten Zellen erfolgen. Die im neuen Ansatz umprogrammierten Astrozyten können sich dagegen vor Ort vermehren. Tatsächlich entstehen bei der Parkinsonkrankheit im Rahmen einer »reaktiven Gliose« sogar mehr Astrozyten, die sich dann in dopaminerge Neurone umwandeln lassen.

Noch sind die Experimente nicht weit genug fortgeschritten, um auch bei Menschen getestet zu werden. Zunächst, so die Autoren, müsse die Effizienz des Verfahrens erhöht werden. Bisher wurden maximal 16 Prozent der Astrozyten erfolgreich reprogrammiert. Zudem müssen Mediziner einen Weg finden, diesen Zelltyp in den bei Parkinson betroffenen Hirnbereichen gezielt anzusprechen.

Nature Biotechnology, doi:10.1038/nbt.3835, 2017

ASTRONOMIE SUPERERDE MIT ATMOSPHERE

Astronomen haben erstmals die Atmosphäre eines Exoplaneten nachgewiesen, der nur wenig größer als die Erde ist. Bisher konnten sie nur bei sehr viel massiveren Welten eine Gashölle beobachten. Der 39 Lichtjahre entfernte Planet GJ 1132b hat Schätzungen zufolge nur den 1,4-fachen Durchmesser der Erde und das 1,6-Fache ihrer Masse. Die Welt zählt damit zu den »Supererden«. Sie umrundet einen roten Zwergstern im südlichen Sternbild Segel und dürfte wegen ihrer hohen Oberflächentemperatur eher der Venus als der Erde gleichen.

GJ 1132b zieht von uns aus gesehen alle 1,6 Tage vor seinem Stern vorüber

und bedeckt ihn dabei zu einem kleinen Teil. Bei jedem dieser Transite treten minimale Helligkeitsunterschiede auf, die Rückschlüsse auf die Größe des Planeten zulassen. Das Team um John Southworth von der Keele University, zu dem auch Forscher des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg gehören, betrachtete die ferne Welt mit Hilfe des MPG/ESO-2,2-m-Teleskops

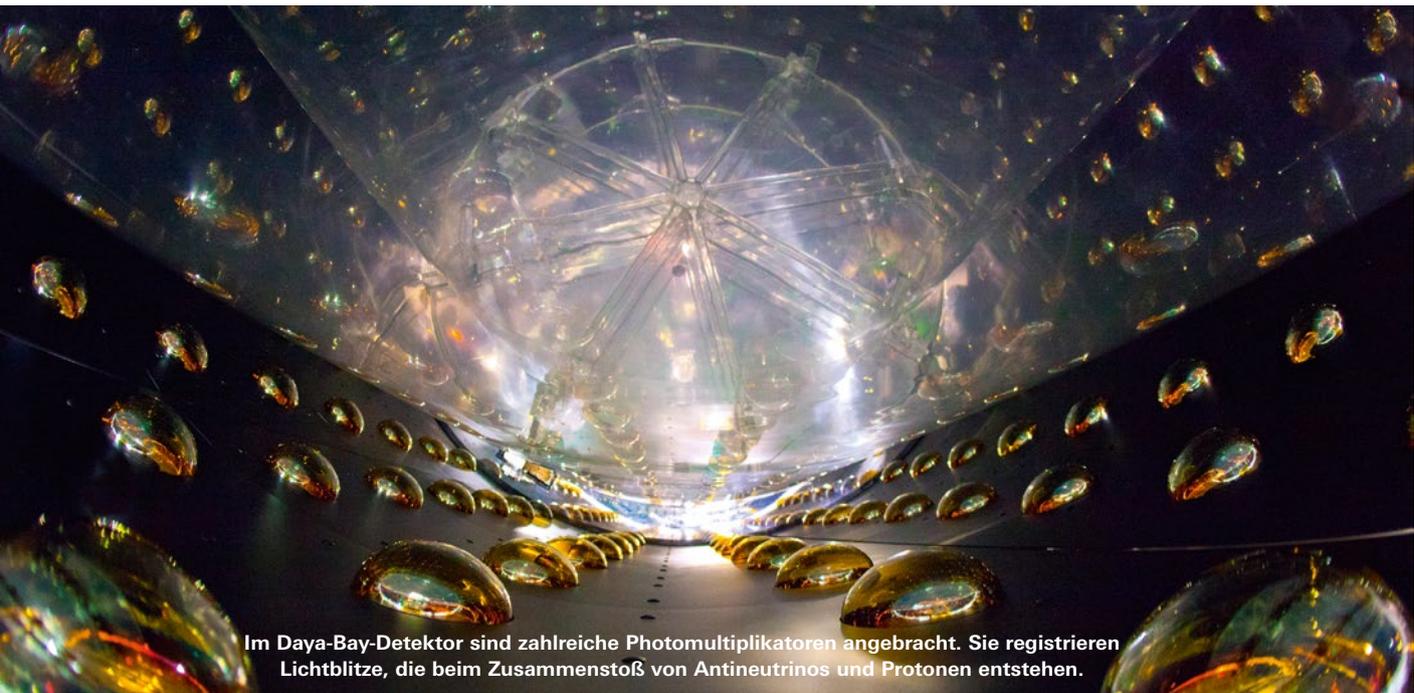
MPA-GRAFIKABTEILUNG / VANESSA CH. QUETZ



Künstlerische Darstellung des Exoplaneten GJ 1132b.

der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile. Dabei stellten die Forscher fest, dass der Planet bei einer Wellenlänge im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums etwas größer erscheint als bei anderen Wellenlängen. Das deutet auf eine Lufthülle hin, die für diese Strahlungsart undurchsichtig ist, so die Forscher. Laut ihren Simulationen könnte eine Atmosphäre mit reichlich Wasserstoff und Methan den Effekt erklären.

Die Studie bietet aus Sicht der Astrophysiker Grund zum Optimismus: Zwergsterne wie das Zentralgestirn von GJ 1132b neigen zu starken Strahlungsausbrüchen, welche die Atmosphären naher Planeten davonblasen könnten. Gleichzeitig befinden sich viele der bisher bekannten Exoplaneten im Orbit Roter Zwerge. Die



Im Daya-Bay-Detektor sind zahlreiche Photomultiplikatoren angebracht. Sie registrieren Lichtblitze, die beim Zusammenstoß von Antineutrinos und Protonen entstehen.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY / ROY KALTSCHMIDT, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY / THE DAYA BAY ANTINEUTRINO DETECTOR (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/DEPARTMENTOFENERGY/8056998030/) / PUBLIC DOMAIN

nun beobachtete Gashölle einer Supererde stärkt die Hoffnung, dass die Atmosphären erdgroßer Felsplaneten dieses Bombardement überstehen können.

The Astronomical Journal, doi.org/10.3847/1538-3881/aa6477, 2017

ERNÄHRUNG GLUTENUNVER- TRÄGLICHKEIT DURCH VIRUS

► Schätzungen zufolge leiden in Deutschland hunderttausende Menschen an Zöliakie: Sie reagieren heftig auf Gluten, das in Weizen und anderen Getreidesorten vorhandene Klebereiweiß. Die Krankheit, die den Dünndarm stark schädigt, gilt als erblich bedingte Autoimmunreaktion des Körpers. Eine Studie von Wissenschaftlern um Bana Jabri

vom University of Chicago Celiac Disease Centre deutet nun allerdings darauf hin, dass Zöliakie bei entsprechender Veranlagung zumindest zum Teil von Viren ausgelöst werden könnte.

Die Biomediziner haben für ihre Studie Mäuse mit zwei Reovirusstämmen infiziert. Reoviren befallen oft auch den Verdauungstrakt von Menschen, rufen aber meist keine Symptome hervor. Jabri und ihr Team nutzten für ihre Studie die Stämme T1L und T3D. Beide lösten in den Mäusen eine Immunreaktion aus, doch T1L sorgte darüber hinaus dafür, dass das Immunsystem der Tiere ähnlich wie bei Zöliakie auf Gluten reagierte. Auffallend war, dass dabei vor allem ein Molekül namens Interferon-Regulatory-Factor-1 (IRF-1) beteiligt war: Laut früheren Studien kommt

dieses Protein bei Kindern mit Zöliakie in erhöhten Mengen im Darm vor.

Daher gingen die Chicagoer Forscher noch einen Schritt weiter und verglichen 73 Menschen ohne Glutenunverträglichkeit mit 160 Zöliakiekranken. Letztere wiesen im Schnitt deutlich höhere Konzentrationen an Reovirenantikörpern und IRF1 im Körper auf als die gesunde Vergleichsgruppe. Eine Infektion mit dem Erreger kann in Anwesenheit des Nahrungsmittelantigens Gluten offenbar dazu führen, dass das Immunsystem dieses Antigen nicht mehr toleriert. Der Grund: Der Virusbefall verhindert anscheinend die Ausdifferenzierung entsprechender toleranzvermittelnder T-Lymphozyten. Dies könnte später eine heftige Autoimmunreaktion hervorrufen, wenn der Körper Gluten ausgesetzt wird. Die Wis-

senschaftler vermuten, dass dies vor allem der Fall ist, wenn genetisch vorbelastete Kleinkinder früh mit den normalerweise harmlosen Reoviren infiziert werden, während sie gleichzeitig erstmals mit Gluten in der Nahrung in Kontakt kommen.

Allerdings müssen klinische Arbeiten erst noch zeigen, inwieweit die Ergebnisse der Mäusestudie auf Menschen übertragbar sind. Sollte sich der Verdacht bestätigen, wären völlig neue Therapieansätze bis hin zu präventiven Impfungen möglich, hoffen die Wissenschaftler. Bislang gibt es noch keine Möglichkeit, Zöliakie zu behandeln. Betroffene können ihre Situation nur durch Verzicht auf glutenhaltige Lebensmittel verbessern.

Science, 10.1126/science.aan1500, 2017

KOSMOLOGIE INFLATIONSMODELL IN DER KRITIK

Die meisten Astronomen nehmen an, direkt nach dem Urknall habe sich das Universum schlagartig enorm aufgebläht. Doch neue Messungen und theoretische Bedenken erschüttern die Grundlagen dieser Hypothese.



Anna Ijjas ist Postdoc am Princeton Center for Theoretical Science in Princeton im US-Bundesstaat New Jersey. **Paul J. Steinhardt** ist dessen Direktor sowie Albert-Einstein-Professor an der Princeton University. **Abraham Loeb** (unten) leitet die Astronomieabteilung der Harvard University in Cambridge in Massachusetts sowie das Institute for Theory and Computation am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

» spektrum.de/artikel/1453289





Physiker vermuten bislang:
Das junge All müsste regel-
recht aufgeplatzt sein. Doch
was genau verursachte dies?

Am 21. März 2013 präsentierte die Europäische Welt- raumorganisation in einer internationalen Pressekon- ferenz die neuesten Resultate des Planck-Weltraum- teleskops. Der Satellit hatte mit bislang unerreichter Detailgenauigkeit die unmittelbar nach dem Urknall vor mehr als 13 Milliarden Jahren ausgesandte kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung vermessen. Wie die Veranstalter den Journalisten mitteilten, erhärten die neuen Daten eine Theorie, die den Kosmologen seit drei Jahrzehnten lieb und teuer ist. Ihr zufolge gab es direkt nach dem Urknall eine kurze Phase extrem beschleunigter Expansion, die so genannte kosmische Inflation. Die plötzliche Aufblähung bügelte quasi das Universum so gründlich aus, dass der Weltraum noch Milliarden Jahre später überall und in jeder Richtung nahezu gleichförmig ist – und obendrein »flach«, das heißt nicht im Großen gekrümmt wie die Oberfläche einer vierdimensionalen Kugel oder eine Sattelfläche. Auf dieser eintönigen Bühne treten nur winzige Unterschiede in der Konzentration der Materie auf; sie stellen die bekannte Hierarchie von Ster- nen, Galaxien und Galaxienhaufen dar.

Die Kernaussage der Pressekonferenz war: Die Planck- Daten passen perfekt zu den einfachsten Inflationsmodel- len. Das verstärkte den Eindruck, die Theorie sei fest etabliert und weitere kosmologische Debatten würden sich erübrigen. Wir drei diskutierten diese Aussage am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts). Ijjas war damals eine deutsche Gaststu- dentin. Steinhardt verbrachte gerade ein Sabbatjahr an der Harvard University; er hatte das Inflationsmodell in den 1980er Jahren mitbegründet, äußerte aber später ernste Zweifel an seiner theoretischen Basis. Loeb war als Leiter der Astronomieabteilung der Harvard University unser Gastgeber. Übereinstimmend lobten wir die ungemein präzisen Beobachtungen des Planck-Teams, ohne jedoch die Interpretation der Ergebnisse zu teilen. Nach unserer Überzeugung sprechen die Daten eher gegen die einfachen Inflationsmodelle und verschärfen die hartnäckigen Prob-

leme der Theorie. Es gibt gute Gründe, konkurrierende Ideen über Ursprung und Entwicklung des Universums in Betracht zu ziehen.

Seither haben das Planck-Weltraumteleskop und ande- re Instrumente noch präzisere Daten geliefert, die unseren Standpunkt unterstützen. Dennoch weigern sich die meisten Kosmologen, die Inflationstheorie unvoreinge- nommen zu betrachten und deren Kritiker ernst zu neh- men. Die Mehrheit meint, sie liefere die einzige einfache Erklärung für die beobachteten Eigenschaften des Univer- sum. Doch in Wahrheit erschüttern die Planck-Daten diese Behauptung; hinzu kommen theoretische Mängel.

Die Inflationstheorie im Licht der neuen Satellitendaten

Um die Schwächen des Modells zu demonstrieren, wollen wir zunächst annehmen, es treffe zu und die Inflation habe tatsächlich stattgefunden. Was genau folgt daraus für die weitere Entwicklung des Universums? Wenn das Modell wirklich eine simple Erklärung der Welt liefert, müssen wir damit die Befunde des Planck-Teleskops einigermäßen vorhersagen können.

Zu einem gewissen Zeitpunkt gleich nach dem Urknall gab es also in einem winzigen Raumgebiet eine exotische Energieform, die eine rapide beschleunigte Expansion dieses Gebiets auslöste. Die meisten in Materie und Strah- lung enthaltenen Energieformen verlangsamten die Aus- dehnung des Universums, weil die Gravitationsanziehung bremst. Die Inflation verlangt hingegen, dass das All anfangs von einer hochverdichteten Energie mit abstoßen- der Wirkung erfüllt war, welche die Expansion verstärkte und beschleunigte. Allerdings ist diese inflationäre Energie eine reine Hypothese, für die es kein direktes Indiz gibt. In den vergangenen 35 Jahren haben Forscher Hunderte von Vorschlägen für das Wesen der Inflationsenergie gemacht, aus denen höchst unterschiedliche Werte für Beschleuni- gung und Ausdehnung folgen. Ganz offensichtlich ist die Inflation keine präzise Theorie, sondern ein flexibler Rah- men, in den viele Möglichkeiten passen.

Was lässt sich unabhängig von der speziellen Art der Inflationsenergie über alle Modelle sagen? Aus unserem Grundwissen über die Quantenphysik können wir schlie- ßen, dass Temperatur und Materiedichte nach dem Ende der Inflation örtlich ein wenig variieren mussten. Aus zufälligen subatomaren Dichtefluktuationen der Inflations- energie entstanden durch den plötzlichen Wachstums- schub astronomisch große Regionen unterschiedlicher Energie. Der Theorie zufolge endete die beschleunigte Expansion, als die Inflationsenergie in gewöhnliche Mate- rie und Strahlung zerfiel. Dort, wo die Dichte der Inflati- onsenergie etwas größer war, dauerte die beschleunigte Expansion ein wenig länger, und an diesen Orten des Universums lagen Dichte und Temperatur nach dem Zerfall der Inflationsenergie etwas höher. So entstand aus den Quantenfluktuationen der Inflationsenergie ein Muster von etwas wärmeren und kälteren Flecken in der kosmi- schen Hintergrundstrahlung, das noch heute von der Inflationsphase kündet. In den folgenden 13,8 Milliarden Jahren kondensierten die winzigen Dichte- und Tempera-

AUF EINEN BLICK ZEIT FÜR EINE ANDERE KOSMOLOGIE

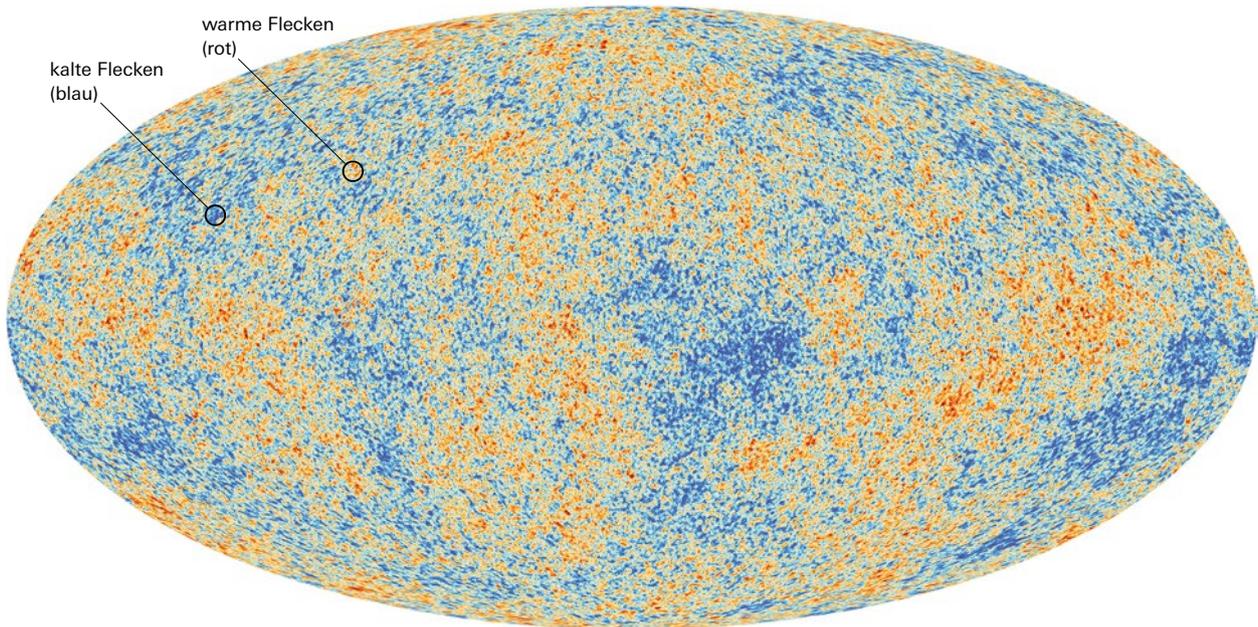
- 1 Neuere Messungen der kosmischen Hintergrund- strahlung wecken Zweifel am gängigen Infla- tionsmodell, das am Beginn des Universums eine kurze Phase rapider Aufblähung postuliert.
- 2 Denn das passt nicht gut zum Muster der Temperatur- unterschiede in der Hintergrundstrahlung. Außerdem müsste die Inflation urtümliche Gravitationswellen erzeugen – die bisher nicht nachgewiesen wurden.
- 3 Angesichts der Beobachtungsdaten sollten die Kos- mologen das herrschende Paradigma überdenken und andere Modelle für die Anfänge des Alls in Be- tracht ziehen.

Ein Schnappschuss des frühen Universums

Das Planck-Weltraumteleskop der Europäischen Weltraumorganisation hat die bislang genaueste Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung geliefert, ein Bild vom Kosmos kurz nach seiner Entstehung. Die blauen und roten Flecken bezeichnen Gebiete geringerer und höherer Strahlungstemperatur; sie geben indirekt Aus-

kunft über die Verhältnisse kurz nach dem Urknall. Die Verfechter des Inflationsmodells behaupten, der Kosmos habe sich damals plötzlich aufgebläht und das beobachtete Fleckenmuster stütze dieses Modell. Tatsächlich lassen sich aus der Inflationstheorie fast beliebige Verteilungen herleiten – vorzugsweise solche, bei denen die

Temperatur stärker variiert als auf der Karte des Planck-Teleskops. Außerdem suchen Forscher in der Hintergrundstrahlung bisher vergeblich nach Anzeichen für urchimliche Gravitationswellen, die bei einer inflationären Dehnung der Raumzeit hätten entstehen müssen. Die aktuelle Datenlage lässt weiterhin alternative Modelle zu.



ESA UND DIE PLANCK COLLABORATION

turunterschiede unter dem Einfluss der Gravitation zu einem Muster von Galaxien und großräumigen Strukturen.

Das klingt plausibel, wenngleich etwas vage. Können wir auf Grund dieses Szenarios die Anzahl und räumliche Verteilung der Galaxien vorhersagen? Die Krümmung des Raums? Die Menge der Materie oder anderer Energieformen, aus denen das heutige Universum besteht? Nein. Die Inflation ist eine derart flexible Idee, dass sie jedes Ergebnis zulässt. Erklärt sie dann, warum der Urknall stattfand oder wie das anfängliche Raumstück erzeugt wurde, aus dem schließlich das heute beobachtete Universum hervorging? Auch darauf lautet die Antwort nein.

Aus dem Inflationsmodell lässt sich nicht viel über die warmen und kalten Flecken vorhersagen, die der Planck-Satellit vermessen hat. Das beobachtete Fleckenmuster erweist sich als selbständig oder »skaleninvariant«: Seine körnige Struktur bleibt bei immer stärkerer Vergrößerung fast dieselbe. Nach den neuesten Planck-Daten beträgt die Abweichung von perfekter Skaleninvarianz bloß wenige

Prozent, und die durchschnittliche Temperatur der Flecken variiert nur um 0,01 Prozent. Verfechter der Inflation betonen gern, es sei möglich, ein derartiges Muster zu erzeugen. Doch dabei verschweigen sie einen wichtigen Punkt: Die Inflation lässt viele andere Muster zu, die nicht nahezu skaleninvariant sind und viel größere Temperaturunterschiede aufweisen. Das heißt, Skaleninvarianz ist möglich, aber ebenso auch eine große Abweichung von ihr, sowie allerlei dazwischen; das hängt ganz von den Details der angenommenen Inflationsenergiedichte ab. Deshalb können die Planck-Daten nicht als Bestätigung der Inflation erhalten.

Es gibt ein weiteres Indiz, das wir ziemlich sicher in den Planck-Daten finden müssten, da alle einfachen Varianten des Inflationsszenarios darin übereinstimmen. Die urchimlichen Quantenfluktuationen erzeugen nicht nur Zufallsschwankungen der Inflationsenergie, sondern auch zufällige Raumverzerrungen, die sich am Ende der Inflationsphase als Gravitationswellen durch das All ausbreiten. Sie

verursachen ebenfalls warme und kalte Flecken im kosmischen Strahlungshintergrund, die sich aber durch einen deutlichen Polarisierungseffekt auszeichnen. Das heißt, die Gravitationswellen zwingen der elektromagnetischen Strahlung eine bevorzugte Schwingungsrichtung auf, die davon abhängt, ob die Strahlung von einer warmen oder kalten Stelle oder von einem Ort dazwischen ausgeht.

Leider blieb die Suche nach inflationären Gravitationswellen bisher erfolglos. Seit die Kosmologen 1992 mit dem Satellit COBE der NASA erstmals warme und kalte Flecken in der Hintergrundstrahlung entdeckten, haben sie deren Vermessung bis zu neueren Planck-Daten von 2015 immer mehr verfeinert. Dennoch finden sie trotz intensiver Suche keinerlei Anzeichen für Gravitationswellen aus der Ära der kosmischen Inflation. Zwar verkündeten Forscher des BICEP2-Experiments am 17. März 2014, sie hätten kosmische Gravitationswellen nachgewiesen, doch stellte sich bald heraus, dass sie nur einen vom Staub der Milchstraße verursachten Polarisierungseffekt beobachtet hatten (siehe »Wellenschlag des Urknalls« von Lawrence M. Krauss,

Spektrum März 2015, S. 46). Wohlgermerkt, diese Suche hat nichts mit den im heutigen Universum durch die Vereinigung Schwarzer Löcher erzeugten Gravitationswellen zu tun, die das LIGO-Observatorium 2015 entdeckte.

Es ist bemerkenswert, dass der Planck-Satellit einerseits eine unerwartet geringe Abweichung von der perfekten Skaleninvarianz des Fleckenmusters findet und andererseits trotz intensiver Suche keine kosmischen Gravitationswellen. Damit fehlt den einfachsten Inflationsmodellen, obwohl sie längst in Lehrbüchern stehen, der Beleg durch Beobachtungen. Natürlich haben sich die Theoretiker beeilt, das Inflationsszenario flugs zurechtzuflicken, aber das führt nur zu obskuren Modellen für die Inflationsenergie und schafft neue Probleme.

Eine Schifahrt über die Pisten des Inflationfelds

Um die Bedeutung der Planck-Messungen richtig einzuschätzen, wollen wir die gängigen Inflationsmodelle näher betrachten, ohne ihre Mängel zu beschönigen. Die Inflationsenergie soll aus einem hypothetischen Feld namens

Zwei Versionen der Inflationstheorie

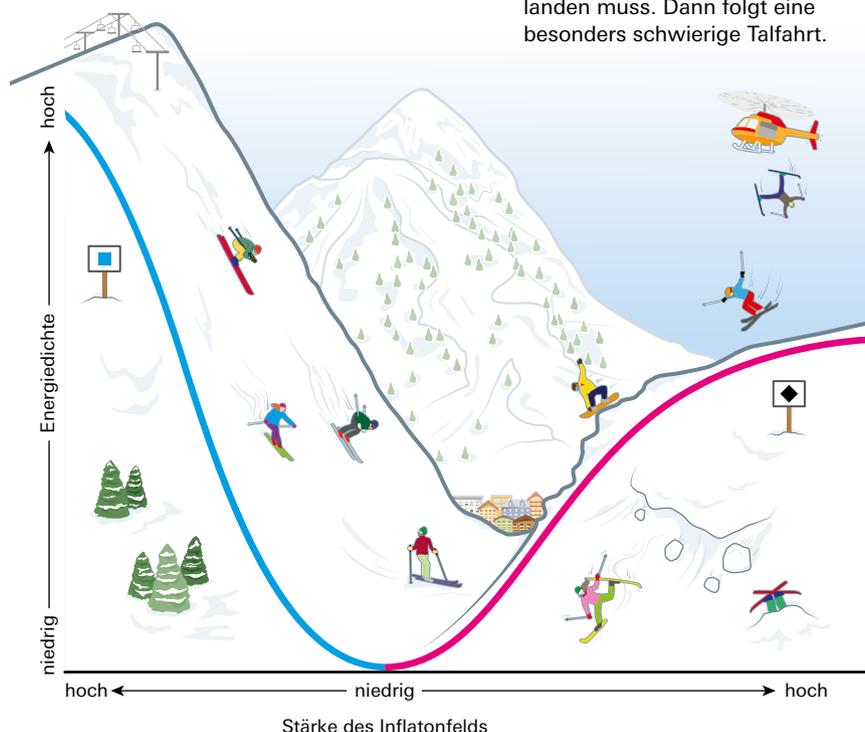
In den üblichen Szenarien wird die Inflation durch ein hypothetisches »Inflationfeld« verursacht, das kurz nach dem Urknall den Raum erfüllte. Verschiedene Varianten der Theorie postulieren unterschiedliche Zusammenhänge zwischen Feldstärke und Energiedichte des Inflationfelds. Hier sind zwei solche Verläufe in einem Diagramm kombiniert. Die blaue Kurve (links) entspricht der üblichen Lehrbuchversion. Die rote Kurve (rechts) erfordert sehr spezielle Anfangsbedingungen und erscheint darum weniger plausibel. Der Vergleich mit zwei Schipisten verdeutlicht, warum die zweite Variante unwahrscheinlicher ist, obwohl sie besser zu den neuen Daten passt als die erste.

1 Herkömmliche Variante

Die einfache Abfahrt entspricht dem ursprünglichen Inflationsmodell, das mit wachsender Feldstärke eine steile Zunahme der Energiedichte vorsieht. Die Inflation setzt bei einem hohen Anfangswert der Inflationsenergie ein, symbolisiert durch das obere Ende des Schilifts, und führt glatt ins Tal. Die Planck-Daten widersprechen diesem Modell jedoch.

2 Plateaumodell

Neue Versionen erfordern hingegen höchst unwahrscheinliche Anfangsbedingungen: Das Inflationfeld muss zur rechten Zeit einen ganz bestimmten Wert annehmen, damit die Inflation beginnen kann. Das entspricht einem Schifahrer, der vom Helikopter abspringen und auf einem präzisen Punkt des Plateaus landen muss. Dann folgt eine besonders schwierige Talfahrt.



BROWN BIRD DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2017

Inflaton hervorgehen, das den Raum erfüllt und an jedem Punkt eine bestimmte Stärke besitzt. Damit das Inflaton eine beschleunigte Expansion des Alls verursacht, postulieren die Theoretiker, es wirke wie eine abstoßende Schwerkraft. Die lokale Stärke des Inflatonfelds bedingt die jeweilige Inflationsenergiedichte. Die Beziehung zwischen Feldstärke und Energiedichte lässt sich als hügelige Kurve darstellen (siehe »Zwei Versionen der Inflationstheorie«, links). Jedes der vielen Inflationsmodelle ergibt eine Hügellandschaft, welche die Eigenschaften des Alls nach dem Ende der Inflation festlegt – insbesondere, ob das Universum wie das unsere nicht gekrümmt ist und fast skaleninvariante Temperatur- und Dichteunterschiede aufweist.

Seit der Veröffentlichung der Planck-Daten stehen die Kosmologen vor einer Situation, die folgendem Szenario ähnelt: Angenommen, Sie leben in einem schwer zugänglichen Dorf, das von hohen Bergen umschlossen ist und in dem jeder jeden kennt. Doch eines Wintertags taucht ein Fremder auf, und nun rätseln die Einwohner, wie er ins Dorf gelangt sein kann. Die meisten meinen, der Fremde habe Schier benutzt. Es gibt aber nur zwei, höchst unterschiedlich schwere Abfahrten ins Dorf.

Die leichtere Piste ist mit einem Schilift ausgestattet, führt gleichmäßig bergab, bietet freie Sicht und gute Schneeverhältnisse. Ganz anders die zweite Abfahrt: Sie beginnt auf einem flachen Plateau, das plötzlich in eine Steilwand übergeht; es gibt keinen Lift, und obendrein herrscht Lawinengefahr. Wer unbedingt diese Abfahrt wagen will, muss mit dem Fallschirm aus einem Hubschrauber abspringen und punktgenau und mit exakt passender Geschwindigkeit auf einer bestimmten Stelle des Plateaus landen. Der kleinste Fehler lässt den Schifahrer in ein Nebental abstürzen oder auf dem Plateau steckenbleiben; schlimmstenfalls erfasst ihn eine Lawine.

Sofern die Überzeugung der Dorfbewohner zutrifft, dass der Fremde auf Schiern gekommen ist, drängt sich unweigerlich der Schluss auf, er habe die leichte Piste benutzt. Doch dann fällt ihnen auf: Der Fremde trägt keine Liftkarte bei sich! Das zwingt zu der unwahrscheinlichen Folgerung, dass er die schwierige Abfahrt genommen hat – oder gar nicht auf Schiern unterwegs war.

Wenn wir analog glauben, das Universum hätte sich mittels Inflation zu seinem gegenwärtigen Zustand entwickelt, erwarten wir eine einfache Kurve der Inflationsenergiedichte: überall gleichmäßig, möglichst wenige freie Parameter und weitgehend unabhängig von den Anfangsbedingungen. Tatsächlich präsentieren fast alle Lehrbücher der Inflationskosmologie derart simple, glatte Kurven. Insbesondere nimmt bei solchen Verläufen die Energiedichte mit wachsender Feldstärke stetig zu. Das ermöglicht einen Anfangswert des Inflatonfelds, bei dem die Inflationsenergiedichte der so genannten Planck-Dichte entspricht; sie bezeichnet die Gesamtenergiedichte unmittelbar nach dem Urknall und ist 10^{120} -mal so hoch wie heute. Unter dieser günstigen Anfangsbedingung gibt es nichts als Inflationsenergie, und die beschleunigte Expansion setzt sofort ein. Im weiteren Verlauf nimmt die Energiedichte langsam und gleichmäßig ab, bis sie am Ende der

undramatischen Talfahrt ein Minimum erreicht, das unserem heutigen Universum entspricht. Das Inflatonfeld gleitet problemlos längs der Kurve bergab wie unser Schiläufer auf der leichten Anfängerpiste. Das ist zumindest die klassische Lehrbuchversion der Inflationsgeschichte.

Doch laut den Beobachtungen des Planck-Teleskops kann diese Geschichte nicht stimmen. Einfache Inflationskurven erzeugen einerseits warme und kalte Flecken, die deutlicher von der Skaleninvarianz abweichen als beobachtet, und andererseits Gravitationswellen, deren Stärke für einen Nachweis ausreichen müsste. Falls wir auf dem Inflationsmodell beharren, folgt aus den Daten eine kom-

Die Daten schließen einfache Inflationsmodelle aus und lassen nur unwahrscheinlich komplizierte zu

plizierte Kurve für die Energiedichte des Inflatonfelds, die der schwierigen Schiabfahrt gleicht. Diese Energiekurve steigt von ihrem Minimum aus nicht gleichmäßig an, sondern als steile Klippe, die oben plötzlich in ein flaches Plateau übergeht. Die dort herrschende Energiedichte ist billionenfach kleiner als die unmittelbar nach dem Urknall verfügbare Planck-Dichte und reicht somit bei Weitem nicht aus, eine sofortige Inflation des Universums zu verursachen.

Da die Inflation ausbleibt, kann das Inflatonfeld mit jedem beliebigen Ausgangswert starten und sich in halbsprecherischem Tempo verändern – wie der vom Helikopter abspringende Schifahrer. Die Inflation beginnt erst, wenn das Inflatonfeld schließlich einen Wert annimmt, der einem Punkt auf dem Plateau entspricht, und sich danach nur sehr langsam ändert. So wie es dem Schifahrer kaum gelingt, nach dem Absprung aus großer Höhe mit der richtigen Geschwindigkeit auf dem flachen Plateau zu landen, um die Abfahrt stetig fortzusetzen, so ist es dem Inflatonfeld fast unmöglich, just so schnell auf exakt den richtigen Wert zu fallen, dass die Inflation beginnen kann.

Das ist noch nicht alles. Da das Universum sich nicht gleich nach dem Urknall inflationär ausdehnt, unterbleibt anfangs das für die Inflation typische Ausbügeln räumlicher Inhomogenitäten. Das bedeutet, im gesamten Universum nehmen alle anfänglichen Ungleichmäßigkeiten der Energieverteilung weiter zu; ab einer gewissen Größe verhindern sie – unabhängig von der Entwicklung des Inflatons – den Start der Inflation. Das gleicht einem Lawinenglück, das den Schifahrer an der Abfahrt hindert, obwohl ihm der Absprung vom Helikopter gelungen ist.

Zusammengefasst heißt das: Sofern man am Inflationsmodell festhält, zwingen die Planck-Daten zu dem seltsamen Schluss, dass die Inflation mit einer plateauförmigen Energiedichtekurve begann – trotz aller damit verbundenen Probleme. Sollte man da nicht lieber das ganze Inflationsmodell in Frage stellen?

Statt blind an die Inflation zu glauben, sollten die Kosmologen die Theorie daran messen, wie gut sie zu den beobachteten Eigenschaften des Universums passt. So gesehen gibt es zu denken, dass die verfügbaren Daten die einfachsten Inflationsmodelle ausschließen und nur unwahrscheinlich komplizierte zulassen. Außerdem verschärfen die neuesten Beobachtungen gewisse Probleme, welche die Inflationstheorie seit jeher plagen.

Passendes Raumgebiet verzweifelt gesucht

Beispielsweise sollten wir uns fragen: Wieso musste das Universum Anfangsbedingungen aufweisen, die zu jeder beliebigen Art von Inflationsenergie passen? Damit die Inflation beginnen kann, müssen zwei unwahrscheinliche Bedingungen erfüllt sein. Erstens muss es kurz nach dem Urknall ein Raumgebiet gegeben haben, in dem Quantenfluktuationen keine große Rolle mehr spielten und der Raum den klassischen Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie genügte. Zweitens muss dieses Raumgebiet bereits genügend flach gewesen sein und eine halbwegs glatte Energieverteilung aufgewiesen haben, damit die Inflationsenergie alle anderen Energieformen dominieren konnte. Nach theoretischen Schätzungen der Wahrscheinlichkeit, ein derartiges Raumgebiet kurz nach dem Urknall zu finden, wäre es einfacher, in einer Wüste auf einen verschneiten Berg mit Schilift und gepflegten Pisten zu stoßen.

Vor allem gilt: Wenn es leicht wäre, nach dem Urknall ein ausreichend flaches und glattes Raumgebiet für den Start der Inflation zu finden, dann bräuchte man gar keine Inflation. Deren einzige Begründung ist ja gerade, zu erklären, wie das beobachtbare Universum zu seinen Eigenschaften kommt. Wenn schon der Start der Inflation diese Eigenschaften voraussetzt – bloß in einem kleineren Raumgebiet –, ist wenig gewonnen.

Doch damit gehen die Probleme erst richtig los. Die Inflation erfordert nicht nur diffizile Anfangsbedingungen, sie lässt sich auch nicht mehr stoppen, wenn sie einmal begonnen hat. Schuld sind die Quantenfluktuationen der Raumzeit. Sie verursachen lokale Schwankungen des Inflatonfelds, wodurch die Inflation mancherorts länger andauert als anderswo. Wir stellen uns Quantenfluktuationen als winzig vor, doch wie Steinhardt und andere Theoretiker schon 1983 erkannten, kommen große Quantensprünge des Inflatonfelds nicht oft vor, können aber den Verlauf der Inflation völlig ändern.

Sie sind selten, blähen allerdings die Regionen, in denen sie stattfinden, enorm auf. Ein Gebiet, in dem die Inflation aufhört, wird augenblicklich von weiterhin inflationär expandierenden Regionen umringt, bei denen sich dieser Prozess wiederholt. In den meisten angeschwollenen Regionen wird sich das Inflatonfeld zwar so verändern, dass die Energiedichte abnimmt. Doch durch seltene Sprünge wird die Inflation mancherorts weiter andauern und noch mehr inflationäres Volumen schaffen. So setzt sich der Prozess endlos fort.

Auf diese Weise geht die Inflation ewig weiter und erzeugt eine unendliche Anzahl von Gebieten, in denen die Inflation lokal erlahmt und jeweils ein eigenes Universum



Die meisten Kosmologen glauben an eine explosionsartige Ausdehnung des frühen Alls. Manche Theoretiker bevorzugen jedoch eine weniger dramatische Erklärung.

erzeugt. Nur dort, wo die Inflation aufgehört hat, expandiert der Raum so langsam, dass sich Galaxien, Sterne, Planeten bilden und vielleicht auch Leben. Bedenklich ist, dass jedes Gebiet wegen der Zufallswirkung der Quantenfluktuationen andere kosmologische Eigenschaften aufweisen wird. In den meisten Universen wird der Raum nicht flach sein, sondern verzerrt oder stark gekrümmt. Von einer halbwegs homogenen Materieverteilung kann dort keine Rede sein, und die warmen und kalten Flecken in der Hintergrundstrahlung werden gewiss kein halbwegs skaleninvariantes Muster bilden.

So entsteht eine unendliche Vielfalt möglicher Universen, von denen keines – unseres inklusive – wahrscheinlicher ist als alle anderen. Insgesamt bilden sie das sogenannte Multiversum. Da jedes Teiluniversum beliebige physikalische Eigenschaften besitzen kann, erklärt das Multiversum nicht, warum in unserem Kosmos die sehr speziellen Bedingungen herrschen, die wir beobachten; sie existieren rein zufällig.

Ein Paradigmenwechsel: Urprall statt Urknall?

Aber selbst dieses Bild mag noch zu rosig sein. Manche Forscher bezweifeln, dass Raumgebiete sich überhaupt jemals zu Regionen von der Art unseres Universums entwickeln können. Aus der ewigen Inflation geht vielleicht eine reine Quantenwelt hervor, in der überall Zufallsfluktuationen herrschen. Egal ob das Ergebnis der ewigen

Inflation nun eine unendliche Vielfalt von Gebieten mit zufällig verteilten Eigenschaften ist oder ein Quantenwirrwarr – es verdient statt Multiversum wohl eher die Bezeichnung großes Kuddelmuddel. Dass daraus ein Universum wie das unsere entsteht, ist jedenfalls extrem unwahrscheinlich. Eine brauchbare Theorie sollte erklären, warum das geschieht, was wir beobachten, und nichts anderes. Das große Kuddelmuddel genügt dieser grundlegenden Anforderung nicht.

Angesichts solcher Probleme müssen wir uns ernsthaft fragen, ob je eine Inflation stattgefunden hat. Es gibt zwei logische Möglichkeiten. Entweder hat das Universum einen Anfang, den wir gewöhnlich Urknall nennen, oder der vermeintliche Urknall war eigentlich ein »Urprall« (englisch *big bounce*), mit dem vor 13,8 Milliarden Jahren eine noch frühere kosmologische Periode in die gegenwärtige Expansionsphase überging. Obwohl die meisten Kosmologen den Urknall favorisieren, spricht derzeit kein Indiz gegen einen Urprall. Vor allem: Anders als der Urknall erfordert dieser keine anschließende Inflationsphase, um unser Universum hervorzubringen. Damit bedeuten Urpralltheorien eine dramatische Abkehr vom Paradigma der Inflation.

Warum erreicht ein Urprall dasselbe wie ein Urknall plus Inflation? Hier kann eine vorausgehende, Milliarden Jahre lange Kontraktionsphase für ein glattes und flaches Universum sorgen. Insofern wirkt die langsame Kontraktion genau wie eine plötzliche Expansion. Der Grund dafür: Ohne Inflation würde ein langsam expandierendes Universum unter dem Einfluss der Gravitation mit der Zeit immer gekrümmter, verzerrter und ungleichförmiger. Wenn man einen Film dieses Vorgangs rückwärts abspielt, erlebt man ein großes, stark gekrümmtes und inhomogenes Universum, das sich allmählich zusammenzieht und dabei flach und gleichförmig wird.

Wie im Fall der Inflation modifiziert die Quantenphysik auch bei den Urpralltheorien die einfache Glättungsgeschichte. Da Quantenfluktuationen das Kontraktionstempo von Ort zu Ort verändern, werden manche Regionen früher als andere zum Schauplatz eines Urpralls und beginnen sich bevorzugt auszudehnen und abzukühlen. Steinhardt hat zusammen mit Neil Turok vom kanadischen Perimeter Institute for Theoretical Physics in Ontario Modelle konstruiert, in denen das Kontraktionsverhalten spätere Temperaturunterschiede herbeiführt, die zu dem vom Planck-Teleskop beobachteten Muster warmer und kalter Flecken passen. Die Kontraktion vor dem Urprall kann also das leisten, wozu die Inflation ursprünglich erfunden wurde.

Zugleich haben Urpralltheorien gegenüber der Inflation einen wichtigen Vorteil: Sie erzeugen kein großes Kuddelmuddel. Wenn die Kontraktionsphase beginnt, ist das Universum bereits groß und klassisch – das heißt, es gehorcht der allgemeinen Relativitätstheorie –, und der Urprall tritt ein, bevor es so sehr schrumpft, dass Quanteneffekte wichtig werden. Deshalb gibt es nie eine Phase, in der die Quantenphysik wie beim Urknall das ganze Universum beherrscht, und es wird nie nötig, eigens einen Übergang zur klassischen Physik zu erfinden. Und da es während der Glättung keine Inflation gibt, welche die Gebiete mit seltenen großen Quantenfluktuationen riesig aufbläht,

erzeugt die kontraktionsbedingte Glättung keine Vielzahl von Universen. Neuere Arbeiten von Steinhardt, Turok und anderen beschreiben erstmals im Detail, wie das Universum von der Kontraktion zur Expansion übergehen konnte, und erlauben die Konstruktion einer vollständigen Urprallkosmologie.

Eine Theorie ohne Empirie?

Angesichts der Schwächen des Inflationsmodells und der Möglichkeiten der Urprallkosmologie sollte man eine lebhaftere Debatte darüber erwarten, welche Beobachtungen die eine oder andere Theorie bestätigen könnten. Doch die Sache hat einen Haken: Die gängige Inflationskosmologie lässt sich nicht wissenschaftlich überprüfen. Wie oben beschrieben, ist das Ergebnis der Inflation fast beliebig, wenn man die Anfangsbedingungen variiert, die Form der Inflationsenergiedichtekurve ändert oder einfach feststellt, dass am Ende ewige Inflation oder großes Kuddelmuddel herauskommt. All das macht die Inflation derart flexibel, dass kein Experiment sie je zu widerlegen vermag.

Einige Forscher räumen diesen Mangel zwar ein, wollen das Modell aber dennoch nicht aufgeben. Sie meinen stattdessen, die Wissenschaft müsse sich wandeln und einen ihrer Grundpfeiler opfern: die empirische Prüfbarkeit. Diese Idee hat eine wirre Debatte über das Wesen der Wissenschaft und ihre mögliche Neudefinition ausgelöst, wobei so etwas wie eine nichtempirische Naturforschung ins Spiel gebracht wurde.

Ein verbreiteter Irrtum besagt, mit Experimenten lasse sich eine Theorie falsifizieren. In Wirklichkeit wird eine schwache Theorie zunächst meist durch Flickschusterei gegen Experimente immunisiert. Um sich neuen Beobachtungen anzupassen, wird sie immer überdrehter und obskurer, bis ihre Erklärungskraft allmählich völlig erlahmt. Diese bemisst sich nach der Menge von Möglichkeiten, welche die Theorie ausschließt. Je mehr Immunisierung, desto weniger Erklärungskraft. Eine Theorie, die ein großes Kuddelmuddel ergibt, schließt gar nichts aus und besitzt überhaupt keine Kraft.

Um dies als das unwiderlegbare Standardmodell auszugeben, muss man irgendeine Absicherung außerhalb der Wissenschaft heranziehen und sich auf Dogmen und Autoritäten berufen. Wie die Geschichte lehrt, ist das der falsche Weg. Zum Glück stellen uns die Beobachtungen vor präzise und fundamentale Fragen. Die Tatsache, dass die gängigen Modelle nicht zutreffen, bietet die historische Chance für einen theoretischen Durchbruch. Die kosmologische Geschichte des frühen Universums muss neu geschrieben werden. ◀

QUELLE

Ijjas, A. et al.: Inflationary Paradigm in Trouble after Planck 2013. In: *Physics Letters B* 732, S. 261–266, 2013

LITERATURTIPP

Steinhardt, P.J.: Kosmische Inflation auf dem Prüfstand. In: *Spektrum* August 2011, S. 40–48
Kritische Darstellung der theoretischen Schwächen des Standardmodells



Das Bild zeigt die mit der Gaia-Mission entdeckte Sternenbrücke zwischen der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke, den beiden größten Begleitgalaxien der Milchstraße.

ASTRONOMIE GAIAS ERSTER STERNKATALOG

Seit 2014 vermisst der Gaia-Satellit der ESA die Sterne der Milchstraße genauer als je zuvor. Jetzt hat die Auswertung der ersten Daten begonnen – und erste überraschende Resultate erbracht.

Seit September 2016 sind die neuesten Präzisionsmessungen zu 1,143 Milliarden Sternen für die Wissenschaftsgemeinde frei zugänglich – und bislang hält der Ansturm auf die Onlineportale der fünf Gaia-Datenzentren unentwegt an. Bis Anfang April 2017 erschienen bereits fast 100 wissenschaftliche Arbeiten auf Grundlage dieses »Gaia Data Release 1«; und alle paar Tage kommen neue hinzu. Das Besondere an der Satellitenmission: Im Unterschied zu vielen anderen bisherigen Datensammlungen werden von dem Gaia-Sternkatalog sämtliche Arbeitsgebiete der Astronomie profitieren.

Hauptziel der Gaia-Mission ist es, die Positionen, Bewegungen und Entfernungen von mehr als einer Milliarde Sternen in der Milchstraße neu zu vermessen. Daraus erhoffen sich die Astronomen ein besseres Verständnis der Struktur und Entwicklungsgeschichte dieser Spiralgalaxie aus 100 bis 300 Milliarden Sternen. Als Stichprobe zur Erforschung der Galaxis nimmt das Weltraumobservatorium alle Sterne auf, die heller als die 20,7. Größenklasse sind. Das entspricht der Helligkeit einer Kerze in etwa 30000 Kilometern Entfernung.

Gaias Vorgänger, der HIPPARCOS-Satellit der europäischen Weltraumbehörde ESA, bestimmte schon von 1989 bis 1993 die Himmelspositionen von 118000 Sternen mit einer Genauigkeit von etwa einer Millibogensekunde. Dieser Winkel entspricht der Höhe eines PKW auf dem Mond, von der Erde aus betrachtet. Gaia soll nun die Anzahl der vermessenen Sterne um das 10000-Fache und die Messgenauigkeit um das 50-Fache erhöhen.

Am 19. Dezember 2013 startete Gaia mit einer russischen Sojus-Fregat-Trägerrakete vom Weltraumbahnhof der ESA bei Kourou in Französisch-Guayana. Sein Ziel, den 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernten Lagrange-punkt L2 im Erde-Sonne-System, erreichte der Satellit

18 Tage später. Dort umläuft er die Sonne in derselben Zeit wie die Erde, allerdings auf einer Bahn, deren Radius um ein Prozent größer ist als der Abstand Erde-Sonne. An diesem Beobachtungsort ist Gaia weit genug von den störenden thermischen und gravitativen Einflüssen der Erde entfernt. Fünf Jahre lang scannen die beiden Teleskope des Satelliten gleichzeitig zwei 106 Grad voneinander entfernte Himmelsregionen ab und beobachten jedes Gebiet 30- bis 250-mal.

Eine spezielle Software namens AGIS (Astrometric Global Iterative Solution) bestimmt unter Berücksichtigung der Instrumenteneigenschaften für jeden Einzelstern (im Gegensatz zu Doppelsternen, die gesondert behandelt werden müssen) die Himmelsposition, die Winkelgeschwindigkeit, welche die zur Blickrichtung orthogonale Eigenbewegung eines Sterns angibt, und schließlich die Parallaxe. Letztere gibt die scheinbare Verschiebung der Sternposition auf Grund der jährlichen Bewegung von Gaia um die Sonne an. Für einen nahe gelegenen Stern ist sie größer als für einen weiter entfernten. So lässt sich aus der Parallaxe die Entfernung eines Sterns bestimmen. Kennen wir zudem seine Helligkeit, können wir ausrechnen, wie viel Energie er tatsächlich abstrahlt. Diese sogenannte Leuchtkraft ist ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis der Sterne und hängt vor allem von deren Masse und Alter ab.

Daher misst Gaia zusätzlich zu den bereits genannten Parametern die Sternhelligkeit. Ein spezielles Fotometer an Bord von Gaia bestimmt außerdem die Farben der Sterne. Aus ihnen kann man beispielsweise auch auf ihre Temperatur schließen und den Sternentyp bestimmen: Ein blauer Stern ist heißer als ein roter.

Für die helleren Sterne misst ein Spektrograf darüber hinaus die Dopplerverschiebung der Spektrallinien. Daraus lässt sich die Radialgeschwindigkeit der Sterne berechnen. Das ist jene Komponente der Bewegung, die auf uns beziehungsweise von uns weggerichtet ist: Im ersteren Fall sind die Spektrallinien zu kürzeren, also blauen Wellenlängen hin verschoben, im letzteren Fall zu längeren, roten Wellenlängen. Aus diesen Spektren lassen sich auch die Häufigkeiten bestimmter chemischer Elemente wie etwa Eisen oder Kalzium in den Sternatmosphären ermitteln.

Da der erste Gaia-Sternkatalog auf Messdaten von nur elf Monaten beruht, enthält er für die meisten Sterne lediglich Helligkeiten und Sternpositionen. Denn während eines solch kurzen Zeitraums lassen sich Parallaxen- und Eigenbewegung eines Sterns noch nicht voneinander trennen.

Um dennoch für etwas mehr als zwei Millionen Objekte Eigenbewegungen und Parallaxen zu bestimmen, griffen die Astronomen zu einem Trick: Sie kombinierten die Gaia-Daten mit Positionsmessungen aus dem Jahr 1991, die der HIPPARCOS-Satellit zusätzlich zu seinem Hauptkatalog an 2,5 Millionen weiteren Sternen, allerdings weniger genau, durchgeführt hatte. Dank der großen Zeitspanne zwischen den beiden Satellitenmissionen ließen sich die Effekte von Eigenbewegung und Parallaxe nun unterscheiden. Damit

hatte man mit einem Schlag 20-mal mehr und etwa dreimal präzisere Entfernungsmessungen und Sternbewegungen als im HIPPARCOS-Katalog.

Kein Wunder also, dass sich die Wissenschaftler auf diesen neu gewonnenen Datenschatz stürzten. Unter anderem fanden Vasily Belokurov von der University of Cambridge und seine Kollegen auf der Basis von Positions- und Helligkeitsmessungen des ersten Gaia-Katalogs eine bisher unbekannt Verbindung zwischen der Kleinen und der Großen Magellanschen Wolke. Dieser Sternenstrom kommt vermutlich dadurch zu Stande, dass die massereichere Große Magellansche Wolke mit ihren Gezeitenkräften Sterne aus der Kleinen Magellanschen Wolke zu sich hin und von sich weg beschleunigt. Der Anteil der Sterne, die weggeschleudert werden, ist jedoch noch nicht entdeckt. Zusätzlich dürfte ein Teil des Stroms auch durch die Gezeitenwirkung der Milchstraße auf ihre beiden größten Begleitgalaxien entstehen.

Neue Sternhaufen in der Nachbarschaft und Entfernungsmessung auf kosmischen Skalen

Ein anderes Forscherteam studierte spezielle Sterntypen sowie die Bewegung sonnennaher Sterne und Sternhaufen, also Gruppen von Sternen, die gemeinsam aus einer großen Molekülwolke entstanden sind. Dabei stießen Sergey Koposov, ebenfalls von der University of Cambridge, und seine Kollegen auf einen gewaltigen Sternhaufen von etwa 14000 Sonnenmassen, der den Astronomen bisher entgangen war. Er ist nur zehn Bogenminuten von Sirius, dem hellsten Stern am Himmel, entfernt. Bisherige Himmelsdurchmusterungen hatten die Gegend um den alles überstrahlenden Stern ausgespart. Ein Team um Janet Simpson vom Australian Astronomical Observatory konnte ergänzend aus erdgebundenen spektroskopischen Beobachtungen die chemische Zusammensetzung des Sternhaufens analysieren und daraus ein Alter von rund drei Milliarden Jahren ableiten.

Doch nicht nur für das lokale Universum spielt der erste Gaia-Katalog eine wichtige Rolle. Bestimmte Sterntypen, die Cepheiden, ändern in regelmäßigen Abständen ihre Leuchtkraft und damit für uns messbar ihre Helligkeit. Das geschieht nach einer bekannten Periode-Leuchtkraft-Beziehung. Diese Sterne sind umso leuchtkräftiger, je länger die Periode ihres Lichtwechsels dauert. Auf diese Weise dienen Cepheiden als Standardkerzen zur Entfernungsmessung selbst von anderen Galaxien. Je genauer die Beziehung bekannt ist, umso präziser lassen sich auch die Distanzen im Universum und damit verbundene kosmologische Parameter berechnen. Das ist wiederum eine wichtige Grundlage zur Bestimmung der Hubble-Konstanten, welche die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums als Ganzes beschreibt.

So haben Stefano Casertano und der Nobelpreisträger Adam Riess, beide am Space Telescope Science Institute und an der Johns Hopkins University in Baltimore, gemeinsam mit ihren Kollegen anhand der Gaia-Entfernungen die Periode-Leuchtkraft-Beziehung von 212 solcher

Cepheiden-Sterne innerhalb unserer Milchstraße überprüft. Ihre Ergebnisse weisen statistisch auf eine Hubble-Konstante hin, die um 0,3 Prozent kleiner ist als bisher angenommen. Allerdings liegt der systematische Fehler bei der Bestimmung der Hubble-Konstanten, bedingt durch verschiedene Techniken, die auf unterschiedlichen Entfernungsskalen zu deren Bestimmung angewandt werden, ohnehin bei einigen Prozent. Auch überwiegen derzeit noch die systematischen Unsicherheiten durch die Gaia-Messungen selbst. Künftig wollen die Astronomen den Messfehler bei der Hubble-Konstanten anhand von Gaia-Daten aber auf unter ein Prozent senken.

Dazu setzen sie ihre Hoffnungen bereits auf den zweiten Gaia-Katalog, der im April 2018 veröffentlicht werden soll. Er wird auf über 20 Monate dauernden Messungen beruhen und für mehr als eine Milliarde Sterne Positionen, Eigenbewegungen und Parallaxen enthalten, ohne auf HIPPARCOS-Messungen zurückgreifen zu müssen. Das sind 500-mal mehr Objekte als im Data Release 1. Zudem wird die Genauigkeit der Positionen, Bewegungen und Parallaxen noch einmal deutlich zunehmen. Außerdem werden sich erstmals Farben und für besonders helle Sterne Radialgeschwindigkeiten abrufen lassen. Messungen von vielen veränderlichen Sternen sowie Positionen von mehr als 10 000 Kleinplaneten ergänzen den Katalog.

Mit Hilfe des zweiten Gaia-Katalogs werden wir eine Menge neue und interessante Informationen über die Struktur und Entwicklungsgeschichte unserer Milchstraße gewinnen. Man wird die Lage der Spiralarme besser definieren können und Sterne, die aus vor Milliarden von Jahren mit der Milchstraße verschmolzenen Zwerggalaxien stammen, auf Grund ihrer besonderen Bewegungsmuster identifizieren. Diese Zwerggalaxien wurden von den Gezeitenkräften der Milchstraße vollständig zerrissen, ähnlich wie es Gaia jetzt bei den Magellanschen Wolken beobachtet hat.

Der finale Gaia-Katalog, für den der Satellit fünf Jahre lang messen muss, ist für das Jahr 2022 geplant. Darin sollen Sterne der 15. Größenklasse, deren Helligkeit einer Kerze in 2000 Kilometer Entfernung entspricht, mit einer Winkelgenauigkeit von 20 Mikrobogensekunden vermessen werden. Das kommt der Verschiebung einer starken Taschenlampe in der Entfernung des Mondes um kaum mehr als drei Zentimeter von der Erde aus gesehen gleich. Die Entfernung von Sternen in einer Distanz von 1000 Lichtjahren lässt sich dann mit einer Genauigkeit von einem Prozent bestimmen, während heute der Messfehler oft noch bei 100 Prozent liegt. ◀

Stefan Jordan ist Außerplanmäßiger Professor am Astronomischen Recheninstitut der Universität Heidelberg. Seit 2004 arbeitet er am Gaia-Projekt und kümmert sich außerdem um die Öffentlichkeitsarbeit.

WEBLINK

www.cosmos.esa.int/web/gaia/release
Informationen zum Gaia Data Release und Publikationen

BIOLOGIE WIEDERBELEBUNG BEI BÄRTIERCHEN

Diese winzigen Überlebenskünstler überstehen sogar im Weltraum. Dabei schützt sie ein nur ihnen eigenes Protein vor Strahlungsschäden.

▶ Mit Bären verbindet die Bärtierchen allenfalls ihre äußere Anmutung: der gedrungene Körper, der kurze, dicke Kopf und die stämmigen Beine, mit denen sie tapsig laufen. Ansonsten sind diese Tiere winzig, zwischen einem halben und gut einem Millimeter lang. Sie bilden unter den Wirbellosen einen eigenen Tierstamm, die Tardigrada (»Langsamgeher«), und sind mit den Gliederfüßern wie Insekten, Spinnen- und Krebstieren näher verwandt. (Zum Aussehen und Verhalten siehe auch den Film: <https://youtu.be/DVNgcb8EzNE>).

Die meisten Bärtierchen kommen auf Moosrasen vor. Einige finden sich auch im Boden und in Laubstreu sowie in Süßwasser, heißen Quellen und selten im Meer. Da die Mehrzahl ihrer mehr als 1000 bekannten Arten im Wasser lebt oder zumindest im Wasserfilm von feuchtem Moos, heißen sie umgangssprachlich auch Wasserbären. An sich ist ihre Lebensweise unspektakulär: Sie ernähren sich von Pflanzenzellen oder allerlei winzigen Tieren, die sie anstechen und aussaugen. Fortpflanzen können sie sich über befruchtete wie unbefruchtete Eier. Manche Arten bilden Zwitter, die sich unter Umständen selbst befruchten.

Sensationell ist allerdings die erhebliche Widerstandskraft vieler Arten in extrem lebensfeindlichen Verhältnissen. Etliche Bärtierchenspezies können sich von praktisch völligem Austrocknen wieder erholen. Ebenso überstehen sie hohe Temperaturen von bis zu 100 Grad Celsius und tiefe Minusgrade über längere Zeiträume. Als man beispielsweise Moos von der Antarktis auftaute, das 30 Jahre lang bei –20 Grad Celsius eingefroren gewesen war, fanden sich in der Probe Tardigrada. Diese waren binnen zwei Wochen wieder aktiv und vermehrten sich bald sogar. Schlagzeilen aber machten die Bärtierchen 2007 nach einem »Weltraumspaziergang«: Sie überlebten als erste Tiere überhaupt einen zehntägigen Aufenthalt in einem ungeschützten Behälter außen an einer unbemannten Raumkapsel. Dabei verkrafteten sie Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt von –273 Grad Celsius sowie das Vakuum im All und die kosmische Strahlung.

Ihr Geheimnis ist die so genannte Kryptobiologie, ein todesähnlicher Zustand praktisch ohne Stoffwechselaktivität. Eine nahezu komplette Austrocknung löst ihn aus. Hierbei wandelt sich die Körperform: Die Tiere schrumpfen zusammen und werden zu walzenförmigen, unbeweglichen Tönnchen (siehe Bild S. 24 rechts). Vor allem Arten aus häufig austrocknenden Umwelten, etwa Mooskissen, halten so nicht nur extremen Temperaturen stand, sondern auch Drücken von mehreren Gigapascal (wie in einer

Diamantstempelpresse). In der Trockenform können Bärtierchen auch ein Bad in organischen Lösungsmitteln überleben oder starke Ultraviolett-, Röntgen- und radioaktive Strahlung aushalten. Bei Rückkehr der Feuchtigkeit quillt der Körper schnell wieder auf und gewinnt seine normalen Konturen zurück (siehe den Film <https://youtu.be/EdOsqVV9V4M>).

Was den Tardigraden so große Widerstandskraft verleiht, war bisher noch weitgehend unklar. Laut einer 2015 von Forschern um Thomas C. Boothby und Bob Goldstein von der University of North Carolina in Chapel Hill vorgebrachten These könnte dabei fremdes Erbgut mithelfen, das sie in beträchtlichem Maß aufgenommen hätten. Nach dieser Studie stammen 17,5 Prozent der Gene der Süßwasserart *Hypsibius dujardini* von anderen Organismen, und zwar hauptsächlich von Bakterien. Mikroben ertragen Umweltstress häufig wesentlich besser als höhere Organismen. Die These erfuhr allerdings von anderen Forschern einen Widerspruch, denn zum einen handelt es sich bei *H. dujardini* um eine vergleichsweise empfindliche Art der Bärtierchen. Zum anderen rührt die nachgewiesene fremde DNA anscheinend von der Haut- und Darmflora dieser Tiere her.

Überraschungen im Genom eines Überlebenskünstlers

Eine alternative Erklärung stellte 2016 ein japanisches Konsortium um Takuma Hashimoto und Takekazu Kunieda von der Universität Tokio vor. Dieses Forscherteam hat das gesamte Genom der gegen schädliche Umwelteinflüsse extrem resistenten Art *Ramazzottius varieornatus* sequenziert, einer erst 1993 beschriebenen Art, die im Sediment einer Regenrinne gefunden wurde. Vor dem Gewinnen des Erbguts hatten sich die Wissenschaftler bemüht, die Tiere vollständig von Bakterien zu reinigen.

Hashimoto und Co fanden im Gegensatz zu den US-Forschern im Genom dieser Art nur 234 proteinkodierende Gene, die mutmaßlich fremden Ursprungs sind – ein Anteil von gerade einmal 1,2 Prozent. Sie stammen außerdem meist wohl eher von Pilzen als von Bakterien. Ähnlich niedrige Werte für Fremd-DNA kennt man von verwandten Tierstämmen. Wie sich außerdem zeigte, weist das Genom von *R. varieornatus* eine hohe Informationsdichte auf: Die knapp 20 000 proteinkodierenden Gene machen also einen ungewöhnlich großen Teil davon aus, und andere Abschnitte sind relativ kurz. Auch die nichtkodierenden Zwischensequenzen in den Genen sind verhältnismäßig knapp bemessen.

Einige der offenbar eingebauten Gene fremden Ursprungs könnten diesem Bärtierchen tatsächlich beim Überleben unter Extrembedingungen helfen. Denn deren Proteine vermitteln Eigenschaften, die zur Toleranz gegenüber Austrocknung und energiereicher Strahlung beitragen. Drei solche Genprodukte katalysieren beispielsweise die Entgiftung von Wasserstoffperoxid, das bei manchen Stoffwechselprozessen anfällt, sehr reaktionsfreudig ist und Proteine wie auch Erbgut schädigt. Im ausgetrockneten Tier sind die betreffenden bakteriellen Proteinvarianten

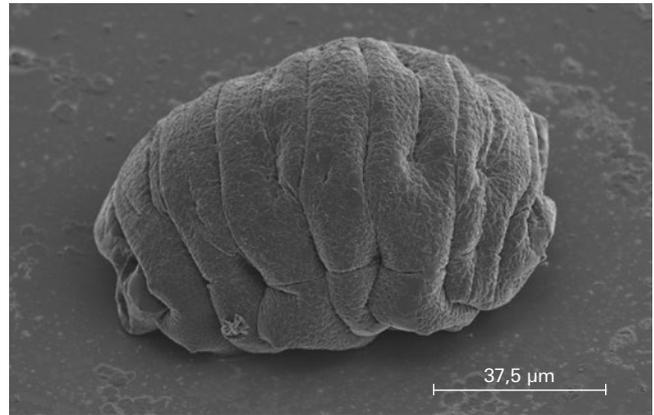
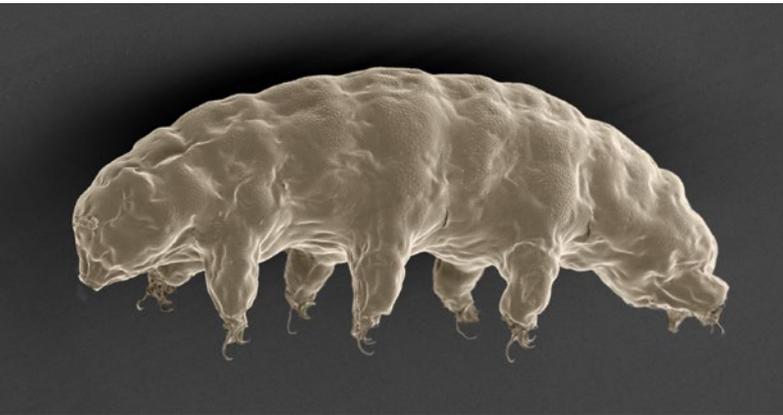
JAHRGANGS CD-ROM 2016



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

Tel. 06221 9126-743

**www.spektrum.de/recherche
service@spektrum.de**



SALF TANAKA, HIROSHI SUGIYA UND TAKESHI HANEDA: MIT FEHL-GEN VON TARDIGRA, UNIVERSITY OF TOKYO

Ein Bärtierchen der Art *Ramazzottius varieornatus* im aktiven und im ausgetrockneten Zustand.

stabiler als die ebenfalls vorhandenen Versionen tierischer Herkunft.

Die japanischen Forscher entdeckten bei *R. varieornatus* allerdings keine Komponenten bakteriellen Ursprungs für die Reparatur des Erbguts. Stattdessen stieß die Gruppe auf viele originär tierische Gene mit Schutzfunktion, die über einen genetischen »Copy & Paste«-Mechanismus im Erbgut verdoppelt oder noch weiter vervielfacht wurden. Die Erbanlage für ein Protein, das Doppelstrangbrüche der DNA repariert, liegt beispielsweise vierfach vor. Und ein Katalysator, der schädliche Sauerstoffradikale entschärft, die sich beim Austrocknungsprozess anhäufen, existiert sogar in 16 Kopien.

Interessanterweise fehlt im *R.-varieornatus*-Genom die Information für einen kompletten Stoffwechselweg zum Fettabbau. Diese Bärtierchen können Fettsäuren daher nur in den Mitochondrien (den »Kraftwerken« von Zellen) zur Energiegewinnung nutzen und nicht mehr in den so genannten Peroxisomen abbauen. In diesen membranumhüllten Entgiftungsapparaten werden normalerweise längere Fettsäuren für die weitere Nutzung im Mitochondrium verkürzt. Dabei würde in den Peroxisomen Wasserstoffperoxid entstehen, und diesen Prozess hat die Art offenbar abgeschafft.

Ebenso fehlen anscheinend drei Signalwege, die in bestimmten Stresssituationen angeschaltet werden und dann aufbauende Prozesse wie die Proteinproduktion hemmen. Denn normalerweise legen Zellen bei Sauerstoffmangel, wenn DNA-schädigende Substanzen auftreten oder wenn reaktionsfreudige Sauerstoffverbindungen vorliegen, einen Wachstumsstopp ein und entsorgen beschädigte Komponenten. Hierauf verzichten die Bärtierchen: Für die obigen Formen von Stress sind sie sozusagen blind. Dass sie schadhafte Zellkomponenten nicht abbauen, hat für sie den Vorteil, beim Aufwachen aus dem Tönnchenstadium zelluläre Prozesse rasch wieder anwerfen zu können. Fürs Erste dürften viele der alten Moleküle noch gut genug arbeiten.

Anscheinend nutzen Tardigraden die meisten ihrer Schutzfaktoren nicht nur bei einer Kryptobiose, sondern

auch im aktiven Normalzustand. Gut zwei Dutzend jener Moleküle – und damit ihrer Gene – besitzt dieser Tierstamm sogar exklusiv. Bemerkenswert darunter ist insbesondere ein Protein, das die DNA unter anderem auch gegenüber Röntgenstrahlung unempfindlicher macht, was andere bisher bekannte Schutzmoleküle nicht können. Es wird Dsup (damage suppressor, Schädenunterdrücker) genannt und lagert sich direkt an den DNA-Strang an. *R. varieornatus* bildet dieses Protein vor allem während der Embryonalentwicklung, wenn das Erbgut wegen der ständigen Zellteilungen für Schädigung besonders anfällig ist. Auch menschliche Zellen, denen die Forscher das Gen für Dsup übertrugen, erwiesen sich als ziemlich widerstandsfähig gegen Röntgenstrahlung. Und zwar verhindert dieses Protein Strangbrüche der DNA, wie sie typischerweise durch Strahlung oder reaktionsfreudige Sauerstoffverbindungen verursacht werden. Damit überlebten die menschlichen Zellen für sie normalerweise tödliche Röntgendosen und vermehrten sich nach einiger Zeit sogar wieder.

Rädertierchen und die mit den Tardigraden nahe verwandten Zuckmückenlarven vertragen starke Strahlung ebenfalls recht gut. Ihre Toleranz beruht jedoch lediglich darauf, dass ihre Zellen Strangbrüche der DNA leicht reparieren können. Sie vermögen diese nicht von vornherein zu verhindern. Erwachsene Bärtierchen halten noch eine 1000-fach höhere Dosis aus als die Säugerzellen mit eingepflanztem *Dsup*-Gen. Das Genom von *Ramazzottius varieornatus* verspricht eine Schatzkammer voller Schutzfaktoren gegen Umweltextreme, darunter vielleicht manch neuer Fund, der eines Tages auch stressempfindlichen Zellen anderer Tiere nützen könnte. ◀

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

QUELLE

Hashimoto, T. et al.: Extremotolerant Tardigrade Genome and Improved Radiotolerance of Human Cultured Cells by Tardigrade-Unique Protein. In: Nature Communications 7, 12808, 2016.

ZEITKRISTALLE QUANTENMATERIE IN ENDLOSER SCHWINGUNG

Zwei Forschergruppen haben im Labor exotische Strukturen erzeugt, die erst wenige Jahre zuvor vorhergesagt worden waren: Muster in Quantensystemen, die sich mit der Zeit wiederholen.

Innerhalb von fünf Jahren haben Wissenschaftler ein radikal neues theoretisches Konzept für eine bizarre Form von Materie entwickelt, diskutiert, verworfen, überarbeitet und schließlich im Labor umgesetzt. Der Physiknobelpreisträger Frank Wilczek vom Massachusetts Institute of Technology erarbeitete 2012 das Prinzip dieser so genannten Zeitkristalle. Nun haben zwei Forschergruppen sie beobachtet.

Herkömmliche Kristalle zeichnen sich durch eine regelmäßige räumliche Anordnung aus – bewegt man sich hindurch, trifft man in immer gleichen Abständen auf ein Atom oder Molekül. Auch bei Zeitkristallen gibt es eine wiederkehrende Struktur, allerdings in der Zeit.

Physiker sprechen bei einem solchen Übergang von einem Symmetriebruch. So ordnen sich etwa die umherschwirrenden Moleküle in flüssigem Wasser beim Erstarren zu Eis auf einem Gitter an. Taucht man – auf mikroskopischer Ebene – in Wasser hinein, erscheint es von jedem Punkt und in jede Richtung über große Distanzen gleichermaßen durcheinander. Im Eis hingegen erblickt man Moleküle, die aufgereiht sind wie auf einer Perlenkette. Die Sichtverhältnisse ändern sich so plötzlich wie für einen Wanderer, der aus einem naturgewachsenen Wald auf das Gelände einer Baumschule tritt: Die Umgebung wiederholt sich nach dem Symmetriebruch nur noch an endlich vielen Stellen. Physiker sprechen hier von einer diskreten Symmetrie, im Gegensatz zu einer kontinuierlichen, bei der etwas unter beliebigen Winkeln gleich erscheint.

Wilczek überlegte 2012, ob der energiesparendste Zustand nicht etwa ein Symmetriebruch mit periodischer Ordnung im Raum sein könnte, sondern einer mit einem regelmäßigen Muster in der Zeit. Eine solche Struktur wäre selbst in ihrem niedrigsten Energiezustand nie in

Ruhe und würde immer wieder und in klar definierten Intervallen in eine bestimmte Ordnung zurückkehren.

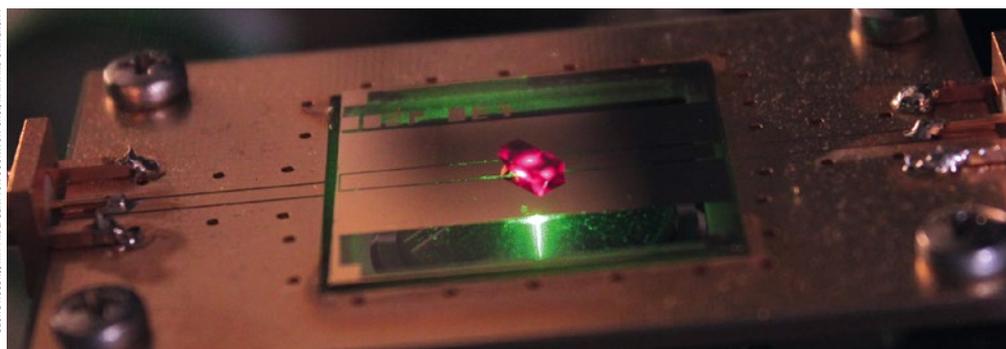
Da diese Oszillation energetisch besonders günstig wäre, entstünde von selbst eine ständige Schwingung. Wir hätten ein Perpetuum mobile, und so etwas ist nach den Gesetzen der Thermodynamik bekanntlich verboten. Warum also sollte es in diesem Sonderfall erlaubt sein? Physiker debattierten in den folgenden Jahren rege, ob und unter welchen Umständen Zeitkristalle möglich wären und wie so ein System praktisch überhaupt aussehen könnte. Zwei Kollegen kamen 2015 schließlich zu dem vernichtenden Ergebnis: Anders als klassische räumliche Kristalle kann es Zeitkristalle nicht geben. Diese Einschätzung gilt für den Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts, bei dem es keine Energieflüsse nach außen oder innerhalb des Materials gibt.

Aus dieser Einschränkung ergibt sich aber ein Schlupfloch, das ein Team aus Kalifornien 2016 fand. So sind durchaus Anordnungen im Mikrokosmos denkbar, die von selbst eine zeitliche Regelmäßigkeit entwickeln, sofern sich das System nie im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Dabei sollte der Zeitkristall eine seltsame Eigenschaft zeigen: Wenn man seine Bestandteile durch ein Signal ständig anstupst, folgen sie diesem nicht stur. Stattdessen entwickeln sie eine Schwingungsperiode, die einem Vielfachen der Anregung entspricht. Das Verhalten ist ähnlich verblüffend dem einer Wippe, deren eines Ende lediglich einmal hochsaust, obwohl man das andere viermal heruntergedrückt hat.

US-amerikanische Physiker um Norman Yao von der University of California in Berkeley erarbeiteten anschließend Strategien für die Umsetzung und veröffentlichten diese im gleichen Jahr vorab. Noch bevor der Artikel im Januar 2017 im Fachjournal »Physical Review Letters« erschien, hatten zwei Arbeitsgruppen das Rezept bereits erfolgreich in ihren Laboren nachgekocht. Norman Yao hat sie dabei unterstützt – er ist jeweils Koautor. Die Ergebnisse der beiden Experimente haben die Forscher jetzt in zwei Aufsätzen in »Nature« publiziert.

Der Ansatz beruht jeweils auf mehreren benachbarten Teilchen mit einem Spin – einem quantenmechanischen Drehimpuls. Ein von außen angelegtes Feld versetzt dieses System in einen bestimmten geordneten Zustand. Anschließend zerstreut sich diese Ausrichtung, doch kehren

GEORGE KUSKO, MIT FERI, GEN VON SODOMON CHOI, HARVARD UNIVERSITY



Die Stickstofffehlstellenzentren in einem Diamanten leuchten rot auf, wenn sie mit grünem Laserlicht bestrahlt werden. In diesem System haben Quantenphysiker der Harvard University einen Zeitkristall erzeugt und vermessen.

die Spins infolge ihrer Wechselwirkungen nach einer festen Zeit wieder in Reih und Glied zurück. Dabei ist die Oszillation recht robust gegen Störungen. Selbst wenn man das anregende Signal verändert, beharrt das System auf seinem charakteristischen zeitlichen Verhalten.

Das erste Team um Jiehang Zhang von der University of Maryland hat dazu zehn in einer Magnetfalle aufgereichte Ionen mit Lasern manipuliert. Ein ständiges Laserfeld brachte das System aus dem thermodynamischen Gleichgewicht, und mit einem zweiten Laserstrahl gaben die Forscher den Ionen in regelmäßigen Abständen einen Stoß. Das System folgte der Anregung aber nicht im gleichen Takt. Stattdessen synchronisierten sich die Spins so, dass sie erst nach der doppelten Zeitdauer in den Ursprungszustand zurückkehrten.

Dieses seltsame Verhalten entsprach genau den Erwartungen an einen Zeitkristall. Das ließ sich gut überprüfen, da es sich um einen überschaubaren und somit theoretisch berechenbaren Versuchsaufbau handelte. Doch gerade das könnte man als Schwäche auslegen – reichen so wenige Ionen tatsächlich, um eine langreichweitige Ordnung zu demonstrieren, wie sie für Kristalle charakteristisch ist? Analog würde man bei zehn räumlich gruppierten Wassermolekülen noch kaum von einem Eiskristall sprechen.

Die zweite Forschergruppe um Soonwon Choi von der Harvard University verwendete eine wesentlich größere Zahl von Spins, nämlich rund eine Million so genannte Stickstofffehlstellenzentren in einem Diamanten (siehe Bild S. 25). In diesem völlig anderen Quantensystem beobachteten die Harvard-Wissenschaftler ein ähnliches Verhalten wie das Team aus Maryland. Es antwortete je nach Anregungsfrequenz mit einer eigenen zeitlichen Ordnung von dem Zwei- oder Dreifachen der Periode und war robust gegenüber Störungen.

Die vergleichbaren Ergebnisse bei zwei so grundverschiedenen Experimenten untermauern die Vermutung der Theoretiker, dass Zeitkristalle ein generelles Phänomen darstellen. Auch zeichnen sich Anwendungsbereiche dieser neuartigen Materialklasse ab. Die Systeme in den beiden Versuchen – lasermanipulierte Ionenfallen und Spins in Diamanten – sind ohnehin Bauteile von Quantencomputer-Prototypen. Vielleicht lässt sich dieser besondere innere Taktgeber nutzen, so spekulieren die Autoren in ihren Veröffentlichungen, um die Quantensysteme gegenüber Störungen zu stabilisieren oder Präzisionsmessungen weiter zu verbessern. ◀

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

QUELLEN

Choi, S. et al.: Observation of Discrete Time-Crystalline Order in a Disordered Dipolar Many-Body System. In: *Nature* 543, S. 221–225, 2017

Yao, N.Y. et al.: Discrete Time Crystals: Rigidity, Criticality, and Realizations. In: *Physical Review Letters* 118, 030401, 2017

Zhang, J. et al.: Observation of a Discrete Time Crystal. In: *Nature* 543, S. 217–220, 2017

MATHEMATIK ABELPREIS FÜR YVES MEYER

Die Norwegische Akademie der Wissenschaften verleiht den nach dem Vorbild des Nobelpreises konzipierten und ähnlich hoch dotierten Preis an den französischen Forscher Yves Meyer »für seine Schlüsselrolle bei der Entwicklung der mathematischen Theorie der Wavelets«.

Die Geschichte des diesjährigen Abelpreises beginnt mit einem verrückten Zufall. Yves Meyer steht 1984 Schlange am Kopierer in der Pariser École polytechnique. Beim Schwätzchen mit Kollegen erspäht er eine kurz zuvor erschienene Arbeit des Geophysikers Jean Morlet und des Physikers Alex Grossmann, in der es eigentlich um die Analyse seismischer Wellen geht – und entdeckt, dass er selbst, von einem viel theoretischeren Standpunkt aus, sich mit demselben Thema beschäftigt. Auf der Stelle nimmt er den nächsten Zug nach Marseille und stößt zu der Arbeitsgruppe, der neben Morlet und Grossmann einige weitere Forscher angehören, namentlich die belgische Mathematikerin Ingrid Daubechies. Aus der Zusammenarbeit erwächst eine ganze – nun preisgekrönte – Theorie. Der Name »ondelettes« (»Wellchen«), den Morlet seinen Objekten gab, wandert mitsamt dem französischen Diminutiv »-lettes« ins Englische: Heute sind die Wellchen allgemein als »Wavelets« bekannt.

Morlet und seine Kollegen sollten im Auftrag des Ölkonzerns Elf Aquitaine die Struktur des Untergrunds ermitteln und vor allem Auskunft darüber geben, ob dort Öl zu finden sei. Zu diesem Zweck pflegt man Miniatur-erdbeben auszulösen, zum Beispiel mit einem gezielt geworfenen Betonklotz. Die Erschütterungen pflanzen sich wellenförmig durch den Erdboden fort, werden an Grenzen zwischen verschiedenen Materialien reflektiert und lassen sich an anderen Stellen mit Seismometern messen. Aus den so registrierten Wellen will man nun nützliche Informationen ziehen, insbesondere über die Struktur des Untergrunds.

Das klassische Mittel zu diesem Zweck ist die Fourier-Analyse. Dabei denkt man sich das Signal, hier die winzigen Erdbewegungen als Funktion der Zeit, zusammengesetzt aus lauter regelmäßigen Schwingungen verschiedener Frequenz. Jede dieser »Basisfunktionen« ist mit einer anderen Intensität im Gesamtsignal vertreten. Letzteres lässt sich demnach schreiben als eine Summe aus lauter Termen der Form Intensität mal Basisfunktion. Es gibt unendlich viele Basisfunktionen; daher hat auch die Summe unendlich viele Terme und muss unter Umständen sogar durch ein Integral ersetzt werden. Diese Komplikation erfordert einen gewissen theoretischen Aufwand, ist aber letztlich zu bewältigen. Wenn nämlich die Gesamtenergie des Signals endlich ist – was auf alle physikalisch



B. EYMANN / ACADEMIE DES SCIENCES

Yves Meyer, geboren 1939 in Paris, wuchs in Tunesien auf. Er promovierte 1966 in Straßburg und war Professor an der Universität Paris-Sud, an der École polytechnique und der Universität Paris-Dauphine, bis er 1995 an die École normale supérieure berufen wurde.

Die Liste der Auszeichnungen, die er vor dem Abelpreis erhielt, ist ungewöhnlich kurz. Neben der Ehre, auf etlichen internationalen Mathematikerkongressen (ICM) einen Hauptvortrag halten zu dürfen, schlägt nur der Carl-Friedrich-Gauß-Preis für angewandte Mathematik zu Buche, der ihm 2010 auf dem ICM in Hyderabad verliehen wurde. Sein offizieller Biograf führt das darauf zurück, dass Meyer in seiner selbstlosen Art sich stets mehr um das Vorankommen anderer als um seinen eigenen Ruhm gekümmert habe.

ernst zu nehmende Fälle zutrifft –, muss auch die Folge der Intensitäten hinreichend schnell gegen null gehen. Also beschreibt bereits eine begrenzte Anzahl dieser Intensitäten das Signal nahezu vollständig; nur ein gewisser Anteil der Energie bleibt unberücksichtigt, der aber durch Hinzunahme weiterer Basisfunktionen beliebig klein gemacht werden kann.

Anders ausgedrückt: Bereits eine endliche (in der Praxis relativ geringe) Anzahl von Intensitäten beschreibt das Signal mit großer Genauigkeit. Obendrein kann man die Genauigkeit beliebig hochtreiben, indem man weitere Basisfunktionen mit deren Intensitäten hinzunimmt. Diese Zahlen (die »Fourier-Koeffizienten«) nehmen weit weniger Speicherplatz in Anspruch als das ursprüngliche Signal; diese Art der Analyse eignet sich also zur Datenreduktion.

Basisfunktionen nach Fourier:

Theoretisch erstklassig, für die Praxis oft ungeeignet

Vor allem verfügt die Fourier-Analyse über eine besonders nützliche Eigenschaft: Sie zieht in die Menge aller denkbaren Signale so etwas wie ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein. Da diese Menge unendlichdimensional ist, gibt es unendlich viele Koordinatenachsen – zu jeder Basisfunktion eine –, die sämtlich aufeinander senkrecht (»orthogonal«) stehen. In der Tat gibt es ein mathematisches Mittel, das so genannte Skalarprodukt, mit dem man im Raum dieser Funktionen so etwas wie Längen und Winkel definieren kann. Und da es sich bei den Basisfunktionen der Fourier-Analyse um ein Orthogonalsystem handelt, gibt es keine Abhängigkeit der Fourier-Koeffizienten untereinander; man kann jeden für sich berechnen, was den Aufwand erheblich reduziert.

Inbesondere findet man mit der Fourier-Analyse die Frequenzen, mit denen das von der seismischen Welle durchlaufene Gestein bevorzugt zu schwingen pflegt, und kann damit auf dessen Eigenschaften schließen. Allerdings ist der zeitliche Verlauf des Signals zwar irgendwie in den Fourier-Koeffizienten enthalten – sonst könnte man das Signal aus ihnen nicht rekonstruieren –, aber nicht ohne Weiteres aus ihren Werten abzulesen. Wenn zum Beispiel ein Signal sich nur insoweit verändert, dass eine spezielle Zacke früher auftritt als zuvor, dann ändern sich alle Fourier-Koeffizienten, aber auf eine undurchsichtige Weise.

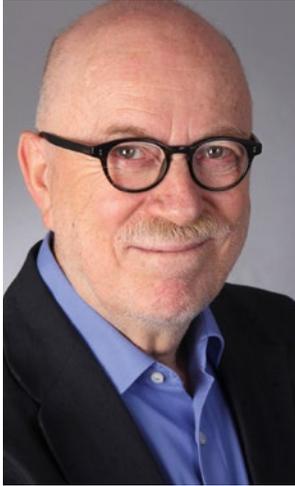
Vor allem plötzliche Änderungen des Signals bereiten den schönen glatten Sinusfunktionen Schwierigkeiten. Die niederfrequenten Anteile schaffen statt eines steilen Anstiegs nur einen sehr allmählichen, und die Analyse muss sozusagen viel Energie in den hohen Frequenzen aufwenden, um den Approximationsfehler der niedrigen auszugleichen.

Daher werden Geophysiker und andere Anwender, denen es auf die Laufzeit seismischer Störungen oder allgemein auf den Zeitpunkt besonderer Ereignisse innerhalb eines Signals ankommt, mit der Fourier-Analyse nicht glücklich; da helfen auch deren erstklassige theoretische Eigenschaften nicht. Eine erste Abhilfe besteht darin, als Basisfunktionen nicht gewöhnliche Sinusfunktionen zu verwenden, die bis in alle Ewigkeit schwingen, sondern solche, die nur in einem kurzen »Zeitfenster« aktiv sind. Eine gefensterete Sinusfunktion sieht gewissermaßen nur das, was in ihrem engen Zeitintervall passiert. Da sie nun aber plötzlich einsetzt und ebenso plötzlich wieder verschwindet, bereitet sie sich selbst und ihresgleichen dieselben Schwierigkeiten wie plötzliche Änderungen im zu analysierenden Signal.

Also muss eine gefensterete Basisfunktion sanft einsetzen und wieder abklingen. Der zeitlichen Präzision zuliebe muss sie so schmal wie möglich sein; das läuft darauf hinaus, dass man zum Beispiel nur eine einzige Sinusschwingung nimmt und sie an ihren Enden sorgfältig abdämpft, so dass nicht nur kein Sprung, sondern auch kein Knick zurückbleibt. Niederfrequente Schwingungen benötigen breitere Fenster als hochfrequente. Zweckmäßig sollten alle Basisfunktionen zeitlich verschobene und gestreckte beziehungsweise gestauchte Versionen einer einzigen »Mutterfunktion« sein. Und dann sollten die Basisfunktionen möglichst ebenso senkrecht aufeinander stehen wie die klassischen aus der Fourier-Analyse.

Basisfunktionen, die alle diese Forderungen erfüllen – was nicht einfach zu realisieren ist –, dürfen sich mit gutem Recht Wellchen (»Wavelets«) nennen. Inzwischen gibt es zahlreiche Mutterwellchen mit ihren jeweils eigenen Stärken und Schwächen (Bild nächste Seite).

Die komplette Kinderschar eines Mutterwellchens, sprich ein vollständiges Sortiment von Basisfunktionen, hat wie die klassischen Fourier-Funktionen unendlich viele Mitglieder – doppelt unendlich viele, um genau zu sein.



SPRINGERS EINWÜRFE DER ERDE WIRD DAS WASSER KNAPP

Nur eine hochmoderne Landwirtschaft kann die wachsende Weltbevölkerung ernähren. Doch intensive Bewässerung bringt die Lebensgrundlage der Menschheit in Gefahr.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftsredakteur. Seit seiner Promotion in theoretischer Physik pendelt er zwischen den »zwei Kulturen«.

► spektrum.de/artikel/1453295

Bei der aktuellen Suche nach Planeten, die um fremde Sterne kreisen, ist stets die erste Frage: Existiert auf den fernen Welten ein lebensfreundliches Milieu? Mit anderen Worten: Kann es dort flüssiges Wasser geben?

Ohne Wasser erst recht keine Zivilisation. Frühe Großreiche der Menschheitsgeschichte beruhten auf umfangreichen Bewässerungssystemen, die Flüsse regulierten, um mit dem Leben spendenden Nass die Ernährung gewaltiger Menschenmassen zu gewährleisten. Die Oberflächengewässer schienen unerlässlich zu sein, sie erneuerten sich im Kreislauf von Verdunstung und Niederschlag.

Doch längst kommt die globale Landwirtschaft mit der Bewässerung durch Flüsse und Seen nicht mehr aus. Sie ist gezwungen, unterirdische Wasserschichten zu nutzen – nicht nur hier und da durch Brunnenboh-

Ein Großteil der Menschheit hängt von virtuellem Wasser ab

ren, sondern in ganz großem Stil. Das Problem dabei ist: Die unterirdischen Ozeane sind kein nachhaltiges Gut; sie erschöpfen sich durch Abpumpen mit der Zeit.

Erstmals hat eine Forschergruppe nun den Zusammenhang zwischen weltweitem Nahrungsmittelhandel und globaler Grundwassernutzung genauer untersucht. Das internationale Team aus Ökologen, Systemanalytikern und Klimatologen um die junge Umweltforscherin Carole Dalin vom University College London benutzte dafür den Begriff des »virtuellen Wasserhandels«. Damit ist gemeint, dass beispielsweise ein Land mit trockenem Klima, das Nahrungsmittel importiert, seine knappen Wasserressourcen schont, indem es quasi – virtuell – das Wasser einkauft, welches das Exportland für seine Nahrungsmittelproduktion aufgewendet hat (*Nature* 543, S. 700–704, 2017).

Auf diese Weise ließen sich für den Zeitraum von 2000 bis 2010 die größten Exporteure von nichterneuerbarem Grundwasser identifizieren. Den Spitzenplatz belegt überraschenderweise Pakistan, dicht gefolgt von den USA und, in einigem Abstand, von Indien und Mexiko. Während diese Nationen in besonders hohem Maß ihr Grundwasser ausbeuten, um Nahrungsmittel zu exportieren, macht Chinas gigantischer Heißhunger das Land zur Nummer eins unter den Importeuren von virtuellem Wasser.

Das bedeutet aber keineswegs, dass das Riesenreich damit seine eigenen Wasserressourcen zu schonen vermag, die vor allem in den Nordprovinzen durch das Bewässern großer Landwirtschaftsbetriebe rapide erschöpft werden. Ähnlich heikel steht es um die intensive Nahrungsmittelproduktion in Nordwestindien, in den Kornkammern des Mittleren Westens der USA und in den aufwändig bewässerten Oranjenhainen Kaliforniens.

Insgesamt zeichnet die Studie ein beunruhigendes Bild: Ein großer Teil der Menschheit hängt vom Import virtuellen Wassers aus einigen besonders fruchtbaren und intensiv bewirtschafteten Regionen ab – und gerade dort gehen die Grundwasservorräte am schnellsten zur Neige.

Die Forscher räumen ein, dass ihre Methode bloß sehr grobe quantitative Schätzungen zulässt und nur wenig verlässliche Prognosen darüber ermöglicht, wann eine wichtige Agrarregion tatsächlich trockenfallen wird. Dennoch kommt die Untersuchung einer deutlichen Warnung gleich, lieber rechtzeitig gegenzusteuern. Dabei käme es wohl darauf an, den irreversiblen Verbrauch kostbaren Grundwassers im Preis des damit produzierten Nahrungsmittels zu berücksichtigen. Nicht nur der lange Transportweg eines von weither importierten Lebensmittels darf etwas kosten, sondern auch das bei seiner Herstellung verbrauchte kostbare Nass.

TRANSPLANTATIONSMEDIZIN

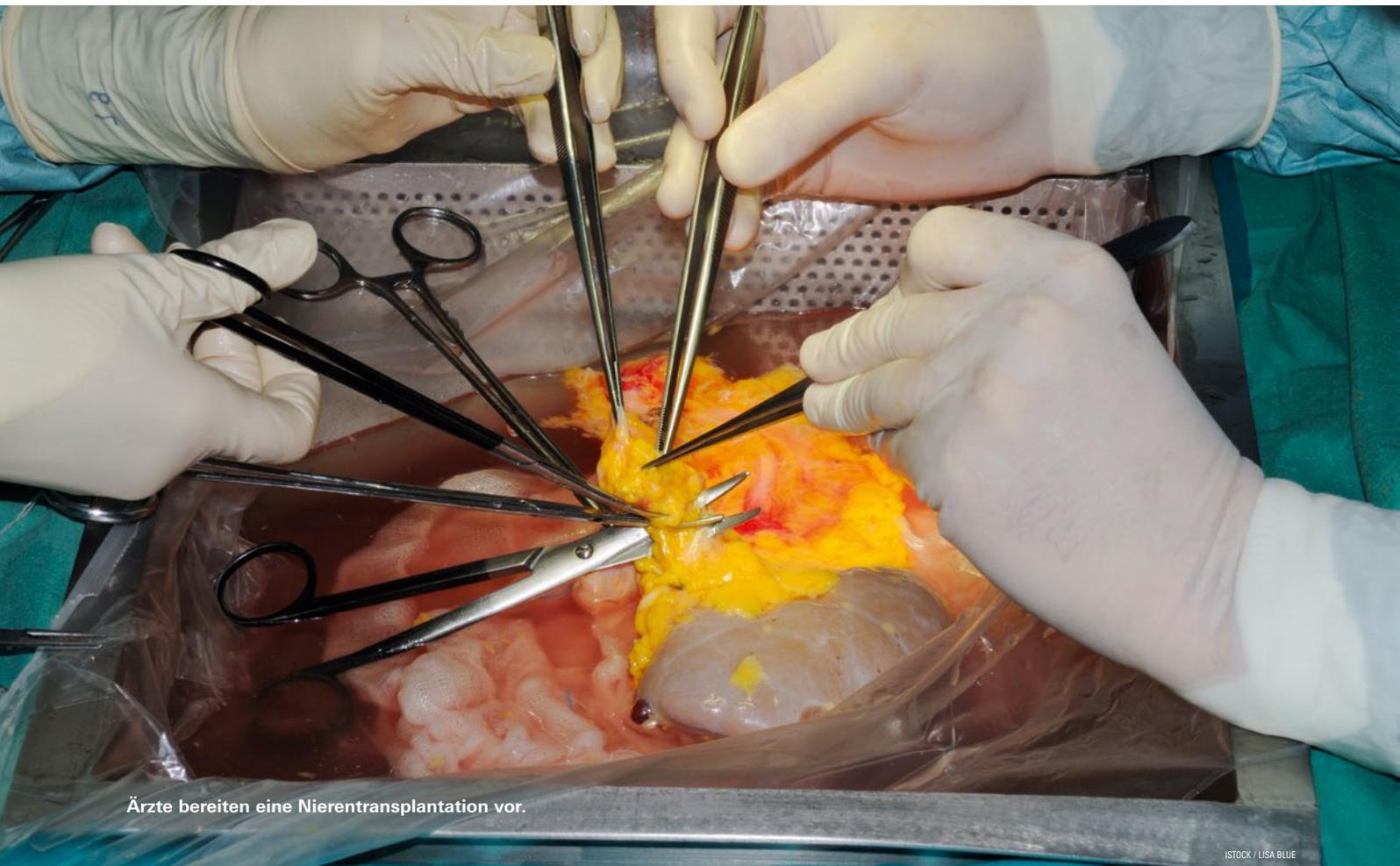
SPENDERORGANE AUS TIEREN

Wissenschaftler versuchen, menschliche Organe in Schweinen, Kühen und anderen Tieren zu züchten. Damit wollen sie dem dramatischen Mangel an Spenderorganen begegnen.



Juan Carlos Izpisúa Belmonte ist Professor am Genexpressionslabor des Salk Institute for Biological Studies, Kalifornien (USA).

» [spektrum.de/artikel/1453297](https://www.spektrum.de/artikel/1453297)



Ärzte bereiten eine Nierentransplantation vor.

ISTOCK / LISA BLUE

Jedes Jahr erhalten weltweit zehntausende Menschen ein Organtransplantat. Doch während das medizinische Fachwissen rund um Organverpflanzungen rapide angewachsen ist, fehlt es an Spenderorganen. Im Schnitt sterben jeden Tag schätzungsweise 16 Menschen in Europa und 22 in den USA, während sie auf ein Ersatzorgan warten – sei es ein Herz, eine Leber oder ein anderer Körperteil. Und die Kluft zwischen der Zahl der Patienten, die eine Transplantation benötigen, und der Menge der zur Verfügung stehenden Spenderorgane wird immer größer.

Eine Möglichkeit, dieser Unterversorgung etwas entgegenzusetzen, besteht darin, Ersatzorgane im Labor zu züchten. Noch vor einigen Jahren glaubten Wissenschaftler, dies mit Stammzellen bewerkstelligen zu können, die sich in verschiedene Gewebe ausdifferenzieren können. Hierbei versucht man, die Zellen in einem künstlichen Gerüst, dessen Gestalt dem jeweiligen Organ nachempfunden ist, zu einem Gewebeverband heranwachsen zu lassen. Das scheitert allerdings bisher daran, die Ausdifferenzierung so gekonnt zu steuern, dass ein voll funktionsfähiger Körperteil entsteht. Forscher verfolgen die Idee zwar weiter, kommen aber nur langsam voran.

Eine kleine, jedoch wachsende Zahl an Wissenschaftlern, mich eingeschlossen, hält einen anderen Weg für aussichtsreicher: nämlich der Natur die Organsynthese zu überlassen. Die Evolution hat bereits ein ausgezeichnetes Verfahren hervorgebracht, um eine Hand voll identischer Zellen in sämtliche spezialisierten Organe und Gewebe eines kompletten Organismus zu verwandeln – sei es eine Maus oder ein Mensch. Diese Meisterleistung gelingt innerhalb von Wochen und Monaten, nachdem Ei- und Samenzelle zu einer Zygote verschmolzen sind. Ohne ein künstliches Gerüst entwickelt diese sich zu einem ausgewachsenen Lebewesen mit Herzkammern, Lungen, Nieren und anderen Körperteilen. Deshalb drängt sich die Möglichkeit geradezu auf, Organe aus Schweinen oder anderen Tieren zu entnehmen, um sie Patienten einzusetzen.

Ein normales Schweineherz wäre aber nur von geringem medizinischen Nutzen, da seine Verpflanzung in einen menschlichen Körper eine massive Abstoßungsreaktion des Immunsystems provozieren würde. Zwar verwenden Mediziner heute Herzklappen von Schweinen als Gewebeersatz für Menschen, aber erst, nachdem diese chemisch vorbehandelt wurden, um die Immunabstoßung zu verhindern. Das dabei angewendete Verfahren würde bei komplexen Organen zum Verlust der Funktion führen. Meine Kollegen und ich sind allerdings überzeugt, dass es möglich ist, Organe aus menschlichen Zellen in Schweinen oder Rindern zu züchten. Das resultierende Tier wäre eine Chimäre, ein Lebewesen also, das Körperteile zweier verschiedener Spezies in sich vereinigt – ganz ähnlich dem Greifen aus der griechischen Mythologie, der den Kopf und die Schwingen eines Adlers und den Körper eines Löwen besaß.

Unser Ziel ist es, ein solches Mischwesen zu erzeugen, indem wir humane Stammzellen in sorgfältig präparierte Tierembryonen einbringen, so dass Chimären mit menschlichen und tierischen Anteilen entstehen. Nachdem man diese eingeschlafert hat, kann man ihnen die menschlichen

Organe entnehmen, um sie Patienten zu transplantieren. Die Idee klingt vielleicht etwas weit hergeholt, aber Forscher in den USA und in Japan haben bereits gezeigt, dass sie grundsätzlich funktioniert. Mehrere Arbeitsgruppen injizierten unabhängig voneinander Stammzellen von Ratten in Mausembryonen und ließen die resultierenden Mischwesen von Mäuselehmüttern austragen. Nach einigen Wochen Schwangerschaft kamen Tiere auf die Welt, die wie Mäuse aussahen und sich auch so verhielten – bis auf die Tatsache, dass sie Körperteile von Ratten besaßen.

Wissenschaftler aus meiner und aus anderen Gruppen haben auch schon den nächsten Schritt unternommen und humane Stammzellen in Schweineembryonen injiziert. Einige dieser Verpflanzungen waren erfolgreich: Sowohl der Embryo als auch das in ihm entstehende menschliche Gewebe entwickelten sich normal. Wir setzten die Chimären in Säue ein und ließen sie von diesen drei bis vier Wochen lang austragen. Diese Zeit möchten wir künftig sukzessive ausdehnen und jeweils ermitteln, wie viele Zellen des Embryos menschlichen Ursprungs sind. Vorausgesetzt, die Versuche verlaufen erfolgreich und wir erhalten die behördliche Erlaubnis, beabsichtigen wir, die Embryonen schließlich vollständig heranwachsen zu lassen – was bei Schweinen etwa vier Monate dauert.

Allerdings sind wir noch nicht so weit, diesen letzten Schritt, die Züchtung chimärer Ferkel, in Angriff zu nehmen: Wir müssen noch viel lernen darüber, wie man humane Stammzellen und Tierembryonen optimal präpariert, so dass die Chimären die gesamte Schwangerschaft überleben. Eine Menge kann schiefgehen. Aber selbst wenn es uns nicht gelingen sollte, vollständig ausgeformte Organe zu züchten, dürften wir durch unsere Experimente zumindest ein besseres Verständnis davon bekommen, wie komplexe und schwere Krankheiten entstehen, fortschreiten und sich klinisch manifestieren – beispielsweise Krebserkrankungen. Falls wir jedoch Erfolg haben, könnte unser Ansatz enorme Wirkungen auf die Transplantationsmedizin zeitigen. Wartelisten für Patienten, die ein Organ benötigen, würden möglicherweise bald der Vergangen-

AUF EINEN BLICK MISCHWESEN FÜR DIE MEDIZIN

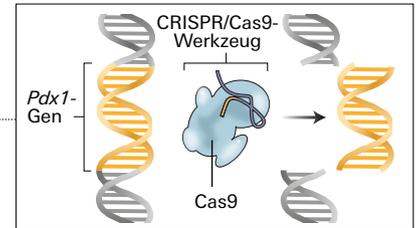
- 1** Biologen arbeiten daran, menschliche Körperteile in Tieren heranwachsen zu lassen. Sie möchten damit dem Mangel an Spenderorganen entgegenwirken, der für viele Patienten tödliche Folgen hat.
- 2** Das Konzept besteht darin, humane Stammzellen in speziell vorbereitete Tierembryonen einzupflanzen, so dass der entstehende Organismus – eine Chimäre – menschliche Organe ausprägt.
- 3** Nach der Geburt der Jungtiere lassen sich ihnen die entsprechenden Körperteile entnehmen, um sie Patienten einzusetzen.

Menschliche Organe aus Schweinen

Die Fortschritte in der Stammzelltechnologie könnten es Wissenschaftlern in absehbarer Zeit ermöglichen, menschliche Organe in Schweinen oder anderen Tieren zu züchten – beispielsweise Bauchspeicheldrüsen oder Nieren. Möglich wird das, indem man humane Stammzellen in speziell präparierte Schweineembryonen einsetzt. Die entstehenden chimären Embryonen wachsen in tierischen Leihmüttern zu Föten heran, denen man schließlich Organe aus menschlichen Zellen entnehmen kann. Momentan steckt dieser Ansatz noch in den Kinderschuhen, aber die weitere Vorgehensweise ist klar vorgezeichnet.

1 Gentechnische Veränderung einer befruchteten tierischen Eizelle

Mit Hilfe der CRISPR/Cas-Genschere entfernen Wissenschaftler das Gen *Pdx1* aus dem Erbgut einer befruchteten Eizelle (Zygote), beispielsweise von Schweinen. So erreichen sie, dass der Tierembryo, der aus der Zygote hervorgeht, keine eigene Bauchspeicheldrüse ausprägt.



2 Weiterentwicklung zur Blastozyste

Umgeben von einer schützenden Membran, teilt sich die genmanipulierte Tierzygote erst in zwei, dann in vier und mehr Zellen, bis sie das Entwicklungsstadium der Blastozyste erreicht hat.



3 Einbringen menschlicher Stammzellen

Durch Verpflanzen so genannter induzierter pluripotenter Stammzellen (iPSC) des Menschen in den sich entwickelnden Tierembryo entsteht eine Chimäre. Die iPSC enthalten intakte *Pdx1*-Gene, weshalb sie innerhalb des Embryos eine Bauchspeicheldrüse hervorbringen – die aus menschlichen Zellen besteht.

4 Einsetzen des chimären Embryos in eine Leihmutter

Der Embryo wird einer tierischen Leihmutter eingepflanzt, etwa einer Sau.

heit angehören, da man mit Körperteilen aus Nutztieren potenziell zehntausende Patienten auf der ganzen Welt versorgen kann.

Die Position innerhalb des Embryos entscheidet

In den zurückliegenden Jahren haben Biologen so viel über Embryonalentwicklung gelernt, dass es allmählich möglich ist, diesen Prozess zu unseren Gunsten zu beeinflussen. Wir wissen inzwischen: Das Wachstum wird dadurch bestimmt, welche Orte verschiedene Zellen zu bestimmten Zeiten innerhalb des sich entwickelnden Organismus einnehmen. Die Zellen geben spezialisierte Proteine ab, so genannte Wachstumsfaktoren, die je nach ihrer lokalen Konzentration eine Reihe genetischer Programme aktivieren beziehungsweise stilllegen. Gestützt auf dieses Wissen sowie auf empirische Erfahrungen kann man Schweineembryonen so verändern, dass diese Gewebe hervorbringen, welche sich am Ende in menschliche

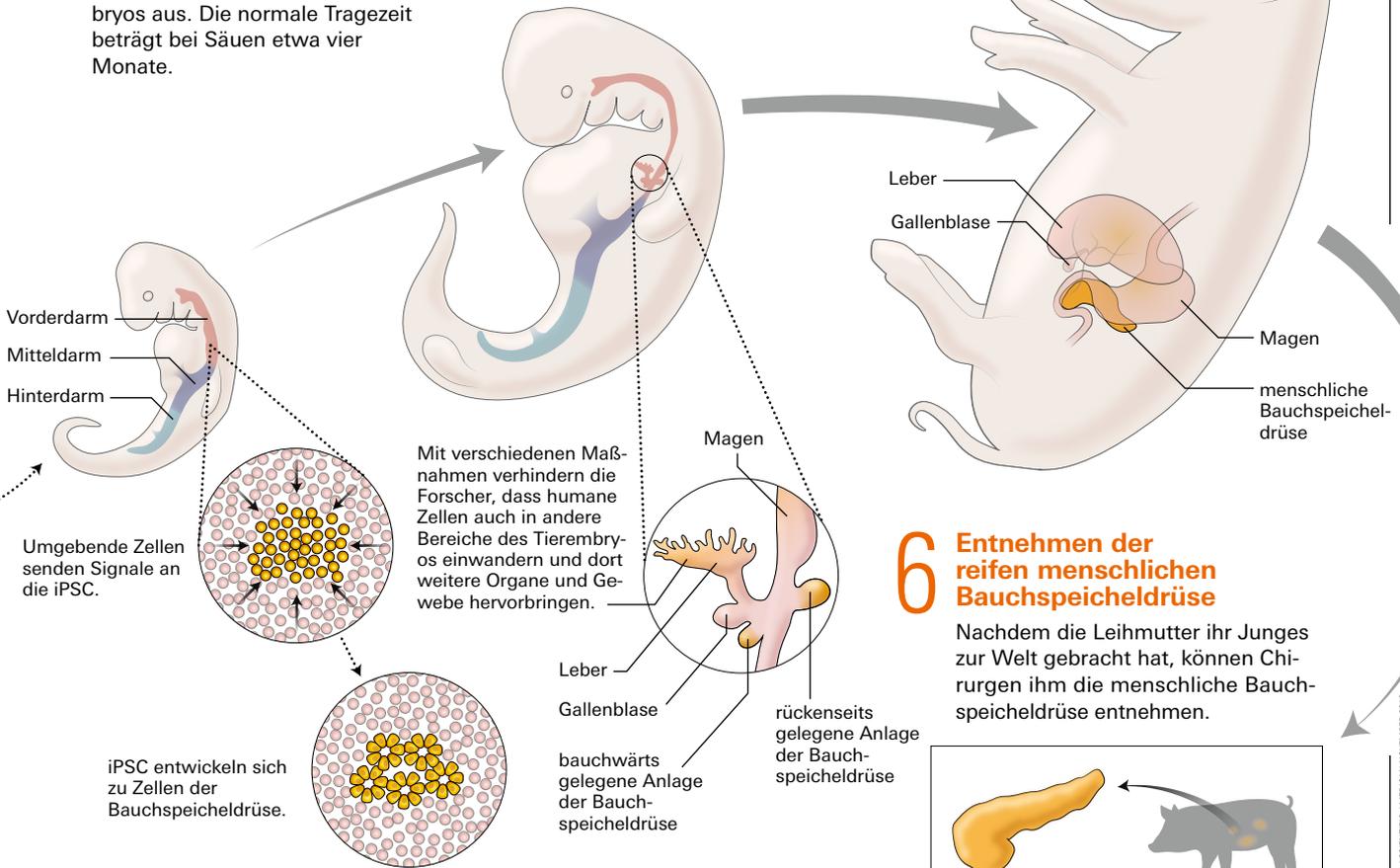
Nieren, Bauchspeicheldrüsen oder andere Organe ausdifferenzieren.

Als Ausgangsmaterial nutzen wir Ei- und Spermienzellen aus Schweinen sowie kultivierte menschliche Stammzellen. Wir verschmelzen die Geschlechtszellen, so dass eine Zygote entsteht, die sich einige Stunden später in zwei und dann vier identisch wirkende Zellen teilt. Jede davon aktiviert dieselben Gruppen von Genen auf der DNA und stellt infolgedessen Proteine her, die unter anderem zu weiteren Teilungen anregen.

Wegen des komplexen Zusammenspiels von Erbanlagen und Proteinen beginnen die einst identischen Zellen bald damit, sich unterschiedlich zu verhalten und ihre Positionen zu ändern, während sie sich teilen. Nach wenigen Tagen sind mehrere hundert Zellen entstanden, die so etwas wie eine Kugel in einer Kugel bilden, ein Gebilde namens Blastozyste. Spätestens in diesem Entwicklungsstadium – dem letzten, bevor die spezialisierten Gewebe

5 Entwicklung zum Fötus

In der Leihmutter bilden sich die Gewebe und Organe des Embryos aus. Die normale Tragezeit beträgt bei Säuen etwa vier Monate.



angelegt werden, aus denen später die Organe hervorgehen – müssen wir die humanen Stammzellen injizieren. Wenn wir länger warten, ignorieren die Stammzellen des Wirtsembryos die Neankömmlinge einfach, worauf diese verkümmern und absterben.

Während der weiteren Embryonalentwicklung formen sich aus einem Teil der Blastozyste drei Zellschichten: eine äußere (Ektoderm), mittlere (Mesoderm) und innere (Entoderm). Jetzt wird der präzise Ort einer jeden einzelnen Zelle wichtiger als je zuvor. Frühere Arbeiten haben beispielsweise gezeigt, dass bestimmte Zellen des Entoderms auf Proteinsignale in ihrer unmittelbaren Umgebung reagieren, indem sie das Gen *Pdx1* einschalten. Dies aktiviert viele weitere Gene, was wiederum die Reifung der Bauchspeicheldrüse einleitet. Zellen im Mesoderm hingegen werfen als Antwort auf äußere Signale das Gen *Six2* an, welches das Nierenwachstumsprogramm startet. Obwohl also alle Zellen des Embryos dieselben Erbanlagen

enthalten, legt ihre jeweilige Mikroumgebung fest, welche Gene ein- oder ausgeschaltet werden und somit, welchen Gewebetyp sie hervorbringen.

Die Tatsache, dass ein einzelnes Gen wie *Pdx1* oder *Six2* einen kompletten Reaktionsweg initiiert, der zur Bildung einer Bauchspeicheldrüse oder Niere führt, ist für unser Vorhaben äußerst bedeutsam. Denn indem wir das eine Gen stilllegen, das für die Entstehung der Bauchspeicheldrüse erforderlich ist (ein Verfahren, das meine Kollegen und ich als »Leeren der Nische« bezeichnen), bringen wir Schweineembryonen ohne dieses Organ hervor. Es sei denn, wir geben menschliche Stammzellen hinzu, die jenes Gen in aktiver Form enthalten. Falls sie sich richtig entwickeln, formen sie innerhalb des Embryos eine Bauchspeicheldrüse, die ausschließlich aus menschlichen Zellen besteht. Der Rest des Tieres setzt sich aus Schweinezellen zusammen.

Wie so oft in der Wissenschaft, erforderte es zahlreiche Experimente, um herauszufinden, wie man eine embryo-

nale Nische leert und dann mit Stammzellen einer anderen Spezies auffüllt. Nachdem es bereits 2010 einem Team um Hiromitsu Nakauchi (damals an der University of Tokyo) gelungen war, eine Maus mit einer Rattenbauchspeicheldrüse zu züchten, ist es kürzlich meinen Mitarbeitern und mir geglückt, Mausembryonen genetisch so zu verändern, dass sie Augen aus Rattenstammzellen ausprägen.

Schritt halten mit dem Entwicklungstempo

Da Mäuse nicht groß genug werden, um menschliche Organe auszubilden, konzentrieren wir uns inzwischen auf die Zucht von Schweineembryonen. Schweine und ihre Organe können zu nahezu jeder Größe heranwachsen, die Transplantationschirurgen für medizinische Zwecke benötigen. Außerdem tragen die Tiere ihren Nachwuchs deutlich länger aus als Mäuse: knapp vier Monate gegenüber etwa 20 Tagen. Allerdings klafft hier immer noch eine Lücke zu menschlichen Embryonen, die sich erst nach neun Monaten voll entwickelt haben. Deshalb müssen wir uns ein paar biochemische Tricks ausdenken, um die inneren Uhren menschlicher Stammzellen so zu beschleunigen, dass sie sich im gleichen Tempo wie ihr tierischer Wirt ausdifferenzieren. Das dürfte bei Schweinen jedoch wesentlich leichter zu bewerkstelligen sein als bei Mäusen mit einer viel kürzeren Tragezeit.

Momentan konzentrieren wir uns darauf, menschliche Bauchspeicheldrüsen und Nieren in tierischen Embryonen

anfallen. Doch die Verwendung solcher Zellen ist bekanntlich hoch umstritten.

Im zurückliegenden Jahrzehnt sind Forschern mehrere technische Fortschritte gelungen, die das Dilemma auf den ersten Blick zu lösen scheinen. Die Wissenschaftler fanden heraus, wie man ausdifferenzierte Zellen aus der Haut oder dem Darm erwachsener Menschen dazu bringt, sich wieder in eine Art Stammzelle zu verwandeln, eine so genannte induzierte pluripotente Stammzelle (iPSC). Mit menschlichen iPSC zu arbeiten statt mit ES, wäre aus ethischer Sicht sicherlich nicht so heikel. Außerdem böte es den Vorteil, Organe züchten zu können, die genetisch und immunologisch zu denen des jeweiligen Patienten passen.

Umfassendere Studien mit menschlichen iPSC haben allerdings ergeben, dass diese nicht in chimären Embryonen überleben können. Sie sind auf dem Differenzierungspfad bereits so weit fortgeschritten, dass sie nicht mehr auf die biochemischen Signale reagieren, mit denen der Embryo ihnen die Entwicklungsrichtung vorgibt. Daher stößt der Embryo sie als Fremdkörper ab.

Kürzlich hat mein Mitarbeiter Jun Wu damit begonnen, menschliche iPSC mit bestimmten Kombinationen von Wachstumsfaktoren zu behandeln, was einige Zellen dazu bringt, auf ein breiteres Spektrum embryonaler Signale korrekt zu reagieren. Vorläufigen Ergebnissen meines Teams zufolge können sich die so behandelten iPSC in Schweineblastozysten einfügen. Wir haben das Wachstum solcher experimentell erzeugter Embryonen zu verschiedenen Zeiten gestoppt und sie unter dem Mikroskop untersucht, um zu überprüfen, wie gut sich Wirts- und Spenderzellen vermischt hatten. Als Nächstes möchten wir den Embryonen erlauben, sich bis zu einem Alter von sechs Wochen zu entwickeln, wenn die Organanlagen zu erkennen sind. Zu diesem Zeitpunkt beginnen sich die Vorläufer der späteren Gewebe und Organe herauszubilden.

Auch wenn wir es schaffen, humane iPSC zu erzeugen, die sich vollständig in Schweineembryonen integrieren, sind wir noch nicht am Ziel. Menschen und Schweine sind evolutionär nicht so eng verwandt wie Mäuse und Ratten, aus deren Zellen sich erwiesenermaßen Chimären züchten lassen. Es könnte sich herausstellen, dass menschliche iPSC nicht mehr auf sämtliche biochemischen Signale von Schweineembryonen reagieren können. Wenn wir keine Möglichkeit finden, dieses Problem biochemisch zu umgehen, müssen wir möglicherweise auf eine andere Spezies ausweichen, etwa Rinder.

Unter behördlicher Aufsicht

Bereits 2012 diskutierte ich diese und andere Bedenken mit meinem Kollegen Josep Maria Campistol, der als Generaldirektor an der Hospital Clínic de Barcelona arbeitet und ein weltweit renommierter Spezialist für Organtransplantationen ist. Er sagte zu mir: »Die einzige Möglichkeit herauszufinden, ob humane iPSC Speziesgrenzen überwinden und menschliche Organe in Schweinen hervorbringen können, besteht darin, die Ärmel hochzukrempeln und es zu versuchen.«

Campistols Äußerung brachte mich auf Trab. Mir war allerdings klar, dass mein Team dieses Mammutprojekt



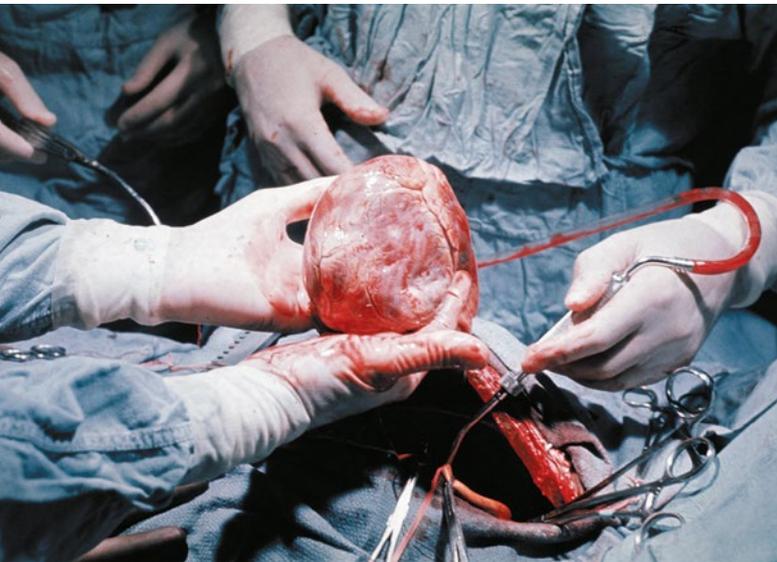
ISTOCK / HORSCHE

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

heranwachsen zu lassen, da ihre Entwicklung von einem einzelnen Gen angestoßen wird und entsprechend leicht zu kontrollieren ist. Die Differenzierung von anderen Organen wie dem Herzen dürfte dagegen von mehreren Genen initiiert werden. Somit müssen wir zum Leeren ihrer Nische mehr als ein Gen ausschalten, was wesentlich komplizierter ist. Kürzlich hat allerdings ein Team um George Church von der Harvard University das CRISPR/Cas-System (siehe **Spektrum** September 2015, S. 22) so modifiziert, dass man damit mehrere Erbanlagen gleichzeitig entfernen kann, die sich an unterschiedlichen Stellen der DNA des Embryos befinden. Das Handwerkszeug, um anspruchsvollere genetische Manipulationen vorzunehmen und so beispielsweise Herzen in Fremdorganismen zu züchten, existiert also bereits.

Als größeres Problem hat es sich erwiesen, sicherzustellen, dass die verpflanzten humanen Stammzellen in jeden Gewebetyp ausdifferenzieren können. Ideal wären hier menschliche embryonale Stammzellen (ES) aus überzähligen Embryonen, die bei künstlichen Befruchtungen



Herztransplantationen, wie die hier gezeigte, haben große Fortschritte gemacht, doch es mangelt an Spenderorganen.

nicht allein stemmen kann. Also gründeten wir – gemeinsam mit Embryologen, Veterinärmedizinern, Stammzellbiologen und Bioethikern – ein internationales Konsortium, um unsere Ideen zu testen. 2015 begannen wir damit, humane iPSC in Schweineembryonen zu verpflanzen. Bis heute haben wir, unter Aufsicht lokaler und nationaler Regulierungsbehörden, zahlreiche Experimente in Kalifornien und Spanien durchgeführt. Die Richtlinien, die die Behörden gemeinsam mit uns ausgearbeitet haben, verpflichten uns dazu, sowohl die tierischen Leihmütter als auch die Embryonen jeweils nach dem Ende der Versuche zu töten.

Durch diese und andere Studien haben wir viel über die Entwicklung chimärer Embryonen gelernt. So wird allmählich klar, wie viele humane iPSC man in den Embryo verpflanzen muss und zu welchem Zeitpunkt das geschehen sollte, damit sich der Embryo erfolgreich entwickelt. Außerdem haben wir damit begonnen, nachzuvollziehen, auf welchen Wegen die menschlichen Zellen in verschiedene Bereiche des Embryos einwandern.

Lebewesen, die niemand haben möchte

Die wissenschaftlichen Methoden zu perfektionieren, ist aber nur die eine Seite des Problems. Auf der anderen Seite steht unsere Verpflichtung als Forscher, öffentlich über die ethischen, gesellschaftlichen und regulatorischen Fragen zu diskutieren, die mit Xenotransplantationen einhergehen. Unser Konsortium hat deshalb eng mit Ethikern und Aufsichtsbehörden zusammengearbeitet, um Richtlinien für die Forschung zu entwickeln.

Über die Standardanforderungen des Tierschutzes hinaus müssen wir auf diesem Gebiet viele Schwierigkeiten meistern. Wie bereits erwähnt, können sich pluripotente Stammzellen in jeden Gewebetyp entwickeln. Setzt man sie in Tierembryonen ein, ist das besonders im Hinblick auf drei Zelltypen problematisch: Nerven-, Samen- und

Eizellen. Diese in Tieren ausdifferenzieren zu lassen, würde Lebewesen hervorbringen, die niemand haben möchte. Man stelle sich den ethischen Albtraum vor, wenn ein Schweinehirn so viele menschliche Neuronen enthält, dass es zu höheren kognitiven Leistungen fähig wird. Wir können das verhindern, indem wir in den menschlichen iPSC das Programm für die Neurogenese ausschalten, bevor wir die Zellen in einen Tierembryo verpflanzen. In diesem Fall könnten die humanen Stammzellen keine Neuronen bilden, selbst wenn sie in jene Region des Embryos einwanderten, die das Gehirn hervorbringt.

Weiterhin besteht grundsätzlich das Risiko, dass sich chimäre Tiere untereinander fortpflanzen. Einige der menschlichen Stammzellen, die wir dem Embryo einsetzen, könnten in Bereiche vordringen, in denen das Fortpflanzungssystem angelegt wird, statt in der für sie vorgesehenen Nische zu bleiben. Das Ergebnis wären Tiere, deren Geschlechtszellen praktisch identisch mit denen des Menschen wären. Würden diese sich paaren, könnte das zu der moralischen Katastrophe eines menschlichen Fötus führen, der in einem Tier heranwächst. Der beste Weg, das zu vermeiden: Man erzeugt jedes chimäre Tier, das für eine Transplantation genutzt werden soll, eigenhändig und von Grund auf neu. Das heißt, man befruchtet stets Eizellen vom Schwein mit Spermien vom Schwein und gibt erst danach die humanen Stammzellen hinzu.

Es könnte natürlich sein, dass sich die technischen Schwierigkeiten solcher Verfahren als unüberwindbar erweisen. Doch selbst wenn es uns nicht gelingt, funktionale Organe für die Transplantation mittels Tierembryonen zu erzeugen, werden die Erkenntnisse, die wir bei dem Versuch gewinnen, enorm wertvoll sein. Als Erstes dürfte die Krebsforschung davon profitieren. Viele Tumoren bei Kindern und Erwachsenen wuchern deshalb unkontrollierbar, weil sie Gene reaktivieren, die dem Embryo die Entwicklung in einen Fötus ermöglichen. Je besser Wissenschaftler die zellulären Signale verstehen, die dabei eine Rolle spielen, desto besser können sie Krebszellen von ihrem tückischen Weg abbringen.

Wir Forscher begeistern uns für neue Ideen und sind fasziniert davon, neue Wege zu beschreiten. Daher können wir die Bedeutung unserer Entdeckungen überbewerten. Dennoch stimmen mich unsere vorläufigen Ergebnisse vorsichtig optimistisch, dass wir es in den kommenden Jahrzehnten schaffen werden, menschliche Organe in chimären Tierembryonen zu züchten. ◀

QUELLEN

Hyun, I. et al.: Ethical Standards for Human-to-Animal Chimera Experiments in Stem Cell Research. In: *Cell Stem Cell* 16, S. 159–163, 2017

Kobayashi, T. et al.: Generation of Rat Pancreas in Mouse by Interspecific Blastocyst Injection of Pluripotent Stem Cells. In: *Cell* 142, S. 787–799, 2010

Wu, J., Izpisua Belmonte, J.C.: Dynamic Pluripotent Stem Cell States and Their Applications. In: *Cell Stem Cell* 17, S. 509–525, 2015

Yamaguchi, T. et al.: Interspecies Organogenesis Generates Auto-logical Functional Islets. In: *Nature* 542, S. 191–196, 2017

GENEXPRESSION EPIGENETIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Unsere DNA trägt kleine chemische Signaturen – und zwar mehr als gedacht. Aber auch die davon abgelesenen RNA-Moleküle sitzen voller unterschiedlichster Markierungen. Deren Sinn beginnen Forscher erst allmählich aufzuschlüsseln.



Cassandra Willyard ist Wissenschaftsjournalistin in Madison, USA.

» spektrum.de/artikel/1441456

Der Chemiker Chuan He suchte 2008 gerade nach einer guten Idee für ein neues Projekt, als er zufällig mit dem Molekularbiologen Tao Pan ins Gespräch kam, der im selben Gebäude an der University of Chicago (Illinois) arbeitete. Die National Institutes of Health der USA stellten Mittel für gewagte, bahnbrechende Forschungen bereit, und He wollte sich dafür bewerben. Er untersuchte damals eine Familie von Proteinen, die DNA-Schäden reparieren, und vermutete, dass diese Enzyme sich auch um RNA-Moleküle kümmern, also die Abschriften der DNA-Erbsequenzen auf den Chromosomen, die

unter anderem als Vorlagen für Proteine dienen. Pan seinerseits befasste sich mit spezifischen chemischen Markierungen an RNA-Molekülen, die als Methylgruppen bezeichnet werden.

In jenen Jahren begann das so genannte Epigenom die Genetiker zu begeistern: Damit meinen sie eine Vielfalt chemischer Signaturen an der DNA und chromosomalen Proteinen. Solche »Schildchen« – etwa Methylgruppen – sagen Zellen, welche Gene gerade abgelesen werden sollen und welche stumm bleiben müssen. Das hilft ihnen bei der Differenzierung in verschiedene Zelltypen und Gewebe sowie deren gesundem Fortbestand. In Krebszellen etwa sind die Marker oft falsch gesetzt.

Noch vor zehn Jahren konzentrierte sich die epigenetische Forschung hauptsächlich auf chemische Signaturen im Bereich der DNA und der Histone, also jener Proteine, um die sich die Erbsequenzen wickeln. Allerdings hatte man schon damals bei RNA mehr als 100 verschiedene Arten chemischer Markierungen nachgewiesen. Nur konnte niemand deren Zweck. Weil manche der Enzyme, die He untersuchte, Methylgruppen von DNA abspalten, überlegten He und Pan nun, ob darunter womöglich auch ein Molekül war, das eine RNA-Signatur entfernt. Das böte eine völlig neue Möglichkeit, um die Genexpression, also letztlich die Proteinherstellung, zu kontrollieren.

Zur Erforschung des Epigenoms (also der vererbaren Markierungen der DNA; »Epigenomik«) trat somit als

AUF EINEN BLICK RNA-SIGNATUREN IM VISIER

- 1 RNA-Transkripte, darunter Boten-RNA, werden mit Methylgruppen vielfältig modifiziert. Die Markierungen regulieren in hochkomplexer Weise die Genexpression.
- 2 Auch an DNA entdecken Forscher bislang unbekanntes Methylierungen. Deren Bedeutung lässt sich oft erst erahnen.



FOTOLIA / SERGEY NIVENS

Unsere Gene sind keineswegs zum Ablesen frei verfügbar. Kleine chemische Markierungen der DNA bestimmen mit darüber, welche von ihnen aktiv werden dürfen und welche nicht.

neues Forschungsfeld die »Epitranskriptomik« hinzu – die Beschäftigung mit den Markierungen von RNA (dem Epitranskriptom). Wie sich zeigte, ist es für die Zelldifferenzierung entscheidend, ob die RNA-Base Adenin eine Methylgruppe trägt oder nicht. Dies könnte auch etwa bei Fettleibigkeit oder Krebs eine Rolle spielen. Als Hes Team und zwei andere Forschergruppen 2015 die gleiche Markierung an DNA-Adeninbasen entdeckten, wurde klar, dass auch das Epigenom noch mannigfaltiger sein muss als angenommen. Denn bisher kannte man bei der DNA nur Methylmarkierungen der Kernbase Cytosin.

Laut dem »zentralen Dogma« der Molekularbiologie fließt die genetische Information von der DNA via Boten-(Messenger-)RNA zum Protein und nicht umgekehrt. Die Boten- oder mRNA galt vielen hauptsächlich einfach als Kurier, der die im Gen verschlüsselte Information zu den Proteinfabriken der Zelle bringt. Eigentlich war es jedoch schon seit Längerem kein Geheimnis, dass die Boten-RNA Modifikationen aufweist. Die Methylmarkierung am Adenin war dem amerikanischen Chemiker Fritz Rottman (1937–2013) bereits 1974 aufgefallen, als er herausfinden wollte, welche Funktion die RNA bei der Regulierung der Genexpression hat. Diese modifizierte Base heißt kurz m^6A

(für N^6 -Methyladenosin). Schon damals dachten Rottman und seine Kollegen, anhand der RNA-Methylierung könne der Zellapparat vielleicht erkennen, welche Boten-RNAs in Proteine übersetzt werden sollen und welche nicht. Doch Genaueres ließ sich in den Anfangszeiten der Molekularbiologie nicht herausfinden.

Nach langer vergeblicher Suche findet sich für das Enzym FTO endlich ein passendes Zielmolekül

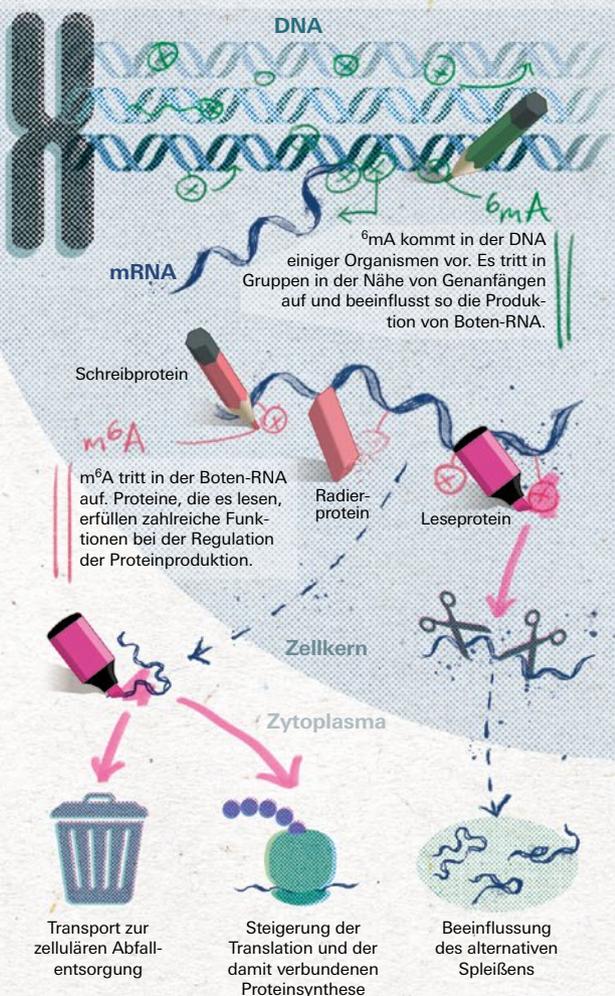
Jahrzehnte später mangelte es immer noch an wirklich geeigneten Verfahren, um diese extrem schwer fassbaren Signaturen zu untersuchen. Trotzdem trauten sich zwei von Hes derzeitigen Mitarbeitern, Ye Fu und Guifang Jia, an die Aufgabe heran. Dazu befassten sie sich mit dem Protein FTO, das mit dem Fettstoffwechsel in Verbindung gebracht wird. FTO zählt zu den eingangs erwähnten Enzymen, die Methylgruppen abspalten. Aber wovon? Lange suchte die Arbeitsgruppe vergeblich nach einer zu FTO passenden RNA-Modifikation – bis sie dem Enzym schließlich markiertes Adenin, m^6A , vorsetzte. Und tatsächlich verschwand daraufhin die Signatur! Damit war endlich erwiesen, dass eine RNA-Methylierung reversibel ist. Für die DNA und die Histone war Gleiches schon vorher

bekannt gewesen. Chuan He wertete den Befund als Anzeichen dafür, dass Genexpression auch über die RNA geregelt wird.

Zwei andere Forscherteams veröffentlichten 2012 unabhängig voneinander die ersten RNA-Karten mit Positionen von m⁶A. An den Botenmolekülen von rund 7000 Genen fanden sich insgesamt mehr als 12000 Methylierungsorte. Für das neue Forschungsfeld bedeutete das den Durchbruch. Interessanterweise verteilten sich die erfassten Markierungen nicht jeweils gleichmäßig über die gesamte RNA-Sequenz. Vielmehr saßen sie an Positionen, die für eine Rolle beim alternativen Spleißen der Transkripte sprechen – ein Vorgang, bei dem dasselbe Gen Vorlagen für verschiedene Proteine liefert. In den letzten Jahren ergaben sich noch weitere Funktionen von m⁶A:

Marken setzen, verstehen, wieder entfernen ...

Ein Großteil der Erforschung epigenetischer Modifikationen konzentrierte sich bislang auf Methylmarkierungen an Cytosinen der DNA. Neuere Untersuchungen haben jetzt methylierte Adeninbasen sowohl von DNA als auch von RNA in den Blickpunkt gerückt. Mit der Identifizierung von Proteinen, die Markierungen schreiben, lesen und wieder entfernen, wird die Bedeutung dieses Mechanismus für die Regulation der Genexpression deutlich.



NIK SPENCER / NATURE, WILLIARD, C. A NEW TWIST ON EPIGENETICS. IN: NATURE 542, S. 406-408, 2017; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Methylierung beeinflusst auch die Stabilität des Transkripts; und wie schon erwähnt entscheidet sie darüber mit, ob an der Boten-RNA ein Protein entsteht oder nicht.

Solche Aufgaben kamen zu Tage, als die Wissenschaftler zumindest ansatzweise der dafür zuständigen Maschinerie in den Zellen auf die Schliche kamen. Demnach erfordert jede Markierung einen »Schreiber« (writer), der sie setzt, einen »Ausradierer« (eraser), der sie wieder entfernt, und einen »Leser« (reader), der das chemische Schildchen deutet (siehe »Marken setzen, verstehen, wieder entfernen ...«, links).

Ein bestimmter m⁶A-Leser sorgt beispielsweise für den beschleunigten Abbau von Boten-RNA, indem er diese der zellulären Abfallbeseitigung zuführt. Ein anderes Lesemolekül leitet methylierte RNA zu den Ribosomen – was die dort ablaufende Proteinsynthese fördert. Was davon im Einzelfall geschieht, hängt von der Position der Markierung ab, aber auch davon, welcher Leser sich daran bindet. Diese Zusammenhänge genauer aufzuschlüsseln, erweist sich bis heute als äußerst diffizil. Zumindest steht inzwischen fest: Für die Zelldifferenzierung ist m⁶A unverzichtbar. Ohne die Markierung bleiben Zellen in einem Stammzellstadium oder wenig später stecken.

Setzen die Forscher bei Mäusen den m⁶A-Schreiber außer Gefecht, dann stirbt ein Großteil der Embryonen. Nach He könnten die Methylmarkierungen dazu notwendig sein, die RNA-Aktivität der tausenden Transkripte in einer Zelle auf ihr jeweiliges Differenzierungsstadium – oder auch Arbeitsstadium – abzustimmen. Mit jedem Entwicklungsschritt oder je nach Aufgabe muss sich dieses Angebot präzise und zeitgenau ändern. He nennt den Vorgang »transcriptome switch« (Transkriptom-Wechsel). Die Biologin Wendy Gilbert vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge lobt Hes Arbeiten und Interpretationen, betont aber: Außer den RNA-Markierungen haben Zellen weitere Möglichkeiten, um die Expression großer Gengruppen zu koordinieren. So genannte Mikro-RNAs etwa, kurze Fragmente, die nicht für Proteine kodieren, helfen dabei, Gene stumm zu schalten.

Wie eine alte Studie über Grünalgen den Forschern auf die Sprünge half

Dass RNA-Moleküle eine Menge Modifizierungen an allen vier ihrer Basen tragen, war schon länger bekannt. Im Gegensatz dazu wirkte die DNA von Säugetieren geradezu ärmlich ausgestattet. Sie schien nur wenige Markierungen aufzuweisen und die ausschließlich an der Kernbase Cytosin. Die häufigste Signatur ist 5-Methylcytosin oder m⁵C. Waren andere DNA-Methylierungen vielleicht nur sehr schwer zu finden? Bakterien zumindest haben in ihrer DNA ein Äquivalent des m⁶A von RNA: N⁶-Methyladenin, kurz m⁶A. Anhand der Markierung unterscheiden die Mikroben zwischen eigener und fremder DNA.

Im Jahr 2013 stieß Hes Mitarbeiter Ye Fu auf eine Arbeit aus den 1970er Jahren, wonach Forscher in der DNA von Algen methyliertes Adenin nachgewiesen hatten. Diesem Befund war aber niemand weiter nachgegangen. Fu und sein Kollege Guan-Zheng Luo kartierten nun die Signatur m⁶A bei der einzelligen Grünalge *Chla-*

mydomonas. Tatsächlich entdeckten sie die Markierung bei mehr als 14 000 Genen. Das Frappante daran: Das ⁶mA verteilt sich an den Erbsequenzen nicht etwa beliebig, sondern es konzentriert sich in mehreren dicht aufeinanderfolgenden Clustern in jenen Bereichen, wo das Ablesen eines Gens einsetzt.

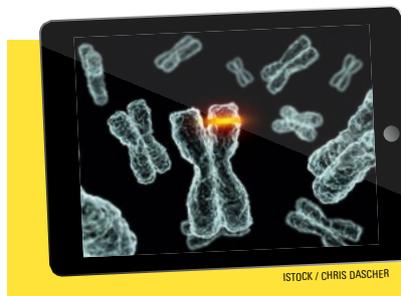
2015 fanden der Biochemiker Eric Greer von der Kinderklinik in Boston (Massachusetts) und seine Kollegen zudem zu ihrer eigenen Überraschung ⁶mA in der DNA des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*. Greer untersuchte damals im Labor von Yang Shi epigenetische Vererbung an einer Mutante des kleinen Wurms, die sich mit jeder Generation schlechter fortpflanzt. Bis dahin galt, dass diese Art keine Methylmarkierungen aufweise. Trotzdem probierten die Forscher, ob sie mit spezifischen Antikörpern nicht doch welche finden würden. Sie entdeckten zwar tatsächlich kein ⁵mC – stießen aber auf ⁶mA. Anscheinend bestand auch ein Zusammenhang: Die sich schwächer vermehrenden Generationen waren damit besser ausgestattet als die fortpflanzungsfreudigeren. Der Grund dafür, dass man diese DNA-Methylierung bei Vielzellern bis dahin noch nie aufgespürt hatte, war sicherlich deren sehr geringe Konzentration.

Der Einfluss solcher Modifikationen auf die Genexpression ist wohl um eine Größenordnung komplexer als zunächst angenommen

Um das Phänomen genauer zu ergründen, schlossen sich die beiden Forschergruppen nun zusammen. Nur ein paar Monate später traf He zudem in China einen Wissenschaftler, der ⁶mA auch bei der Taufliege *Drosophila* gefunden hatte. »Das hat mich umgehauen«, erzählt He. Im April 2015 erschienen alle drei Arbeiten gleichzeitig in der Zeitschrift »Cell«.

Diese Publikationen las der Epigenetiker Andrew Xiao von der Yale University in New Haven (Connecticut). Sein Team hatte ⁶mA in Säugerzellen identifiziert, den Befund aber nicht veröffentlicht, weil die Forscher nicht glaubten, dass das jemanden interessierte. Nun trieben sie diese Arbeiten weiter voran und brachten die Ergebnisse schon ein Jahr später heraus – was in Fachkreisen wie eine Bombe einschlug. Die Signatur ⁶mA kommt demnach in embryonalen Stammzellen von Mäusen vor, allerdings in ganz geringen Spuren, dabei am meisten auf dem X-Chromosom. Die Markierung trägt dort anscheinend zur Stummschaltung der Genexpression des einen X-Chromosoms bei. Ein Enzym, das die Signatur wohl wieder aufzuheben vermag, ließ sich in den Studien gleichfalls nachweisen.

Auch die Arbeitsgruppen von Chuan He und Yang Shi sagen, sie hätten die DNA-Methylierung von Adenin mittlerweile in Säugerzellen nachgewiesen. Noch ist unklar, was solche chemischen Veränderungen für Säuge-



Mehr Wissen auf
Spektrum.de

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

tiere bedeuten. Selbst mit den neuesten Technologien liegen die Modifikationen nur knapp über der Nachweisgrenze und lassen sich noch nicht präzise kartieren. Vermutlich variiert das Muster je nach Gewebetyp. Xiao hält es für möglich, dass solche Signaturen in bestimmten Entwicklungsstadien ganz kurz als molekulare Schalter erscheinen und dann gleich wieder verschwinden. Nach Meinung mancher Genetiker steht außerdem noch nicht fest, dass jene ⁶mA-Methylierungen der DNA an die nächste Generation vererbt werden – was ein entscheidendes Kriterium für epigenetische Veränderungen wäre.

2016 gaben die Forscher die Entdeckung einer weiteren Modifikation von Boten-RNA bekannt: N¹-Methyladenosin, kurz m¹A. Sie kommt bei vielen verschiedenen Vielzellern vor, auch beim Menschen. Offenbar fördert diese Methylierung ebenfalls die Translation der Abschrift in Proteine, allerdings in anderer Weise als m⁶A. Wie letztere könnte sie wohl außerdem dazu beitragen, in Zellen den Übergang in einen anderen Zustand zu synchronisieren.

Von der nächsten bei Boten-RNA entdeckten Methylierung – m⁶A_m – erfuhren die Epigenetiker Anfang 2017. Diese Markierung sitzt nah an den Kappen der Moleküle und macht sie stabiler. Womöglich ist also der Einfluss solcher Modifikationen auf die Genexpression um eine ganze Größenordnung komplexer als zunächst angenommen.

Wie auf einem so jungen Forschungsfeld nicht anders zu erwarten, stoßen die Epigenetiker nun auch auf anfängliche Fehldeutungen. Manche der als »Ausradierer« von bestimmten Methylierungen erkannten Enzyme etwa befassen sich mit anderen Zielmolekülen und Markierungen als anfangs postuliert. Mit den immer ausgefeilteren Techniken, chemische Signaturen an DNA und RNA aufzuspüren, versprechen sich die Wissenschaftler noch eine Menge an spannenden Einsichten über unsere Genregulation. ◀

QUELLEN

Dominissini, D. et al.: The Dynamic N¹-Methyladenosine Methylome in Eukaryotic Messenger RNA. In: Nature 530, S. 441–446, 2016

Mauer, J. et al.: Reversible Methylation of m⁶A_m in the 5'Cap Controls mRNA Stability. In: Nature 541, S. 371–375, 2017

Wu, T.P. et al.: DNA Methylation on N⁶-Adenine in Mammalian Embryonic Stem Cells. In: Nature 532, S. 329–333, 2016

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 542, S. 406–408, 23. Februar 2017



Rund um die Antarktis trifft das stürmischste Meer auf die größten Eismassen der Welt. Die gewaltigen Kräfte in der Region gelten als Motor der globalen Tiefseeströmungen.

ANTARKTIS OZEAN IN AUFRUHR

Das Südpolarmeer nimmt gewaltige Mengen Kohlenstoff und Wärme aus der Atmosphäre auf und verlangsamt so den Klimawandel. Neuen Messdaten zufolge könnte sich das demnächst ändern.

» [spektrum.de/artikel/1453301](https://www.spektrum.de/artikel/1453301)





Der Journalist **Jeff Tollefson** schreibt für »Nature« und lebt in den USA. Er berichtet vor allem über Energie-, Klima- und Umweltthemen.

► Auf zehn Meter hohe Wellen war Joellen Russell dann doch nicht vorbereitet. Dem Meer südlich von Neuseeland ausgeliefert, begann sie um sich und ihr Forschungsschiff zu bangen. »Der Ritt über die Wasserberge fühlte sich an, als würden wir jede Sekunde zwischen ihnen zerschellen«, erinnert sich die Ozeanografin von der University of Arizona an die Expedition von 1994. An ihrem Institut begegnet Russell Meeresströmungen sonst in Form von Computersimulationen und Klimamodellen. Damals hatte sie ein Kaventsmann fast über Bord gespült.

Bereits die ersten Daten der Sensoren sorgten für weitere Überraschungen. Die Meeresoberfläche enthielt wenig Sauerstoff, dafür viel Kohlenstoff und war saurer als erwartet – deutliche Zeichen für hinaufgespülte Nährstoffe aus den Tiefen der See. Wie sich später herausstellte, bestanden die Wellen aus uraltem Wasser, das seit Jahrhunderten keinen Kontakt mit der Atmosphäre gehabt hatte.

Seinerzeit haben Ozeanografen die seltsamen Umwälzprozesse im Südpolarmeer noch kontrovers diskutiert. Inzwischen sind sie als eines seiner besonderen Kennzeichen anerkannt: Rund um die Antarktis befördern die weltweit stärksten ausdauernden Winde ständig kaltes Tiefenwasser nach oben. Das Phänomen wird Auftrieb oder englisch Upwelling genannt. Die Bewegungen treiben mächtige Ströme an, die zwischen den Weltmeeren zirkulieren.

Wegen der unwirtlichen Bedingungen, wie sie Joellen Russell erfahren musste, konnten Ozeanografen das Südpolarmeer jahrzehntelang nicht in dem Maß erkunden, das seiner globalen Bedeutung gerecht geworden wäre.

Inzwischen bricht eine neue Hightechära der Antarktisforschung an. Mit Hilfe von Bojen, Satelliten, Computermodellen, ferngesteuerten Robotern und sogar mit sensorbestückten Robben widmen sich Wissenschaftler aus der ganzen Welt den Gewässern um die Antarktis. Auf diese Weise wollen sie endlich die großen Datenlücken schließen.

Ein genaueres Verständnis davon, wie der Südliche Ozean und das globale Klima zusammenspielen, macht Vorhersagen für die Zukunft der antarktischen Eisschicht, der Erderwärmung und des Anstiegs der Meeresspiegel verlässlicher. Der Ozeanograf Arnold Gordon vom Lamont-Doherty Earth Observatory in Palisades im US-Bundesstaat New York hatte schon in den 1960er Jahren Analysen des Südpolarmees geleitet und meint nun: »Der Informationsreichtum von heute ist beeindruckend. Mit neuen Technologien können wir Daten aus den entlegensten Gebieten sammeln, ohne dafür Schiffe durch das Meereseis zu manövrieren.«

Umtriebiger Umschlagplatz für den Kohlenstoff der Welt

Insgesamt entzieht das Gebiet der Atmosphäre Wärme und Kohlendioxid. Laut vorläufigen Auswertungen könnte der Ozean jedoch von Jahr zu Jahr mehr von seiner Fähigkeit einbüßen, das Treibhausgas aus der Atmosphäre aufzunehmen. Damit stellt sich die Frage, inwieweit das Gebiet die globale Erwärmung weiterhin bremsen kann. »Das Südpolarmeer hilft uns im Augenblick gegen den Klimawandel. Das könnte sich jederzeit ändern«, bekräftigt der Ozeanforscher Michael Meredith vom British Antarctic Survey in Cambridge. Er will mit seinem Team Expeditionen durchführen, um die Prozesse zu dokumentieren.

Entlang des 60. südlichen Breitengrads gibt es einen erdumspannenden Meeresgürtel. Keine Landmassen bremsen hier Wind und Wellen, während sie um den Globus brausen. Seit den 1980er Jahren merken die Wissenschaftler immer deutlicher, welche wichtige Rolle diese



2015 erreichte der Eisbrecher Aurora Australis den ostantarktischen Totten-Gletscher.

PHIL BROWN, AUSTRALIAN ANTARCTIC DIVISION

besondere Region für das Weltklima spielt. Damals versuchten sie zu klären, warum die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre in der letzten Eiszeit erst um etwa ein Drittel ab- und später wieder zunahm. Der Ozeanograf Jorge Sarmiento von der Princeton University vermutete dahinter Veränderungen im Südpolarmeer.

Drei Jahrzehnte später macht sich Sarmiento nun daran, große Datenmengen über den zeitlichen Verlauf der chemischen und biologischen Vorgänge zu sammeln und ihre Rolle für den Kohlenstoffhaushalt zu klären. Inzwischen leitet er das Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling Project (SOCCOM). Es begann 2014 und ist bis 2020 mit 21 Millionen US-Dollar ausgestattet. In seinem Rahmen wollen die Forscher insgesamt rund 200 batteriebetriebene Treibbojen entlassen, die in den oberen 2000 Metern des Südpolarmeers regelmäßig auf- und abtauchen. Sie ergänzen das etablierte weltumspannende Beobachtungssystem Argo, das mit fast 4000 ähnlichen Bojen Daten zu Temperatur und Salzkonzentration aller Meere sammelt. Die Varianten von SOCCOM werden darüber hinaus den Gehalt von Sauerstoff, Kohlenstoff und Nährstoffen im Wasser rund um die Antarktis dokumentieren.

Mit den neuen Informationen können Sarmiento und sein Team die Modelle zum Austausch von Kohlendioxid zwischen den Meeren und der Atmosphäre verbessern. Indirekten Hinweisen zufolge ist das Südpolarmeer eine Nettosenke und hat seit Beginn der industriellen Revolution bis zu 15 Prozent aller Kohlenstoffemissionen der Menschheit aufgenommen. Je nach Jahreszeit und Region entlässt kohlenstoffreiches, an die Oberfläche gespültes Wasser wieder einen Teil des Gases in die Atmosphäre.

Bald werden Forscher die Vorgänge im antarktischen Ozean beinahe in Echtzeit und flächendeckend direkt vor Ort messen können. »Wir haben gesehen, dass viel mehr Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt wird als bisher angenommen«, erzählt Sarmiento. Das scheint insbesondere im Winter der Fall zu sein. Die Untersuchungen sind noch unveröffentlicht und basieren lediglich auf Messdaten der Bojen, die seit mindestens einem Jahr im Wasser schwimmen – gut ein Dutzend. Daher ist nicht klar, ob die höheren Emissionen repräsentativ für Veränderungen über das gesamte Südpolarmeer sind. »Das ist ein spannender Hinweis, weil dann die Kohlenstoffsenke schwächer wäre, als wir bisher dachten«, meint Alison Gray, die als Postdoktorandin in Princeton die Messungen auswertet.

Der Südliche Ozean verändert sich – doch was bedeutet das?

Ähnliche Hinweise gab es schon früher. Laut einer 2007 im Fachmagazin »Science« veröffentlichten Studie des Teams um Corinne Le Quéré, heute Leiterin des britischen Tyndall Centre for Climate Change Research, ging die Kohlenstoffaufnahme im Südpolarmeer zwischen 1981 und 2004 zurück. Die Forscher machen dafür die Winde um den antarktischen Kontinent verantwortlich. Deren Geschwindigkeit hat in dieser Zeit zugenommen, wahrscheinlich als Folge der globalen Erwärmung sowie des Ozon-

Unstete Senke



Die Menge des Kohlendioxids, die das Südpolarmeer aus der Atmosphäre absorbiert, schwankt stark. In den 1990er Jahren sank die Aufnahme, seit der Jahrtausendwende steigt sie wieder. Forscher suchen noch die Ursachen – und fürchten eine erneute Umkehrung des Trends.

NATURE. MACH LANDSCHÜTZER, P. ET AL.: THE REINVIGORATION OF THE SOUTHERN OCEAN CARBON SINK. IN: SCIENCE 349, S. 1221-1224, 2015; TOLLERSON, J.: THE HOSTILE OCEAN THAT SLOWED CLIMATE CHANGE. IN: NATURE 539, S. 346-348, 2016. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

lochs. Dieses kühlt die Stratosphäre über der Antarktis. Der lokale Temperaturgegensatz verstärkt die Stürme, die wiederum mehr nährstoffreiches Wasser an die Oberfläche ziehen, wo es Kohlendioxid freisetzt.

Würde dieser Trend anhalten, könnte der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in Zukunft rascher ansteigen. Allerdings deutete eine weitere Veröffentlichung in »Science« 2015 auf eine effektivere Kohlenstoffsenke seit Anfang des Jahrtausends hin (siehe »Unstete Senke«, oben). Le Quéré ist sich nicht sicher, ob das eine Rückkehr zur Normalität

AUF EINEN BLICK INSPEKTION ÜBERFÄLLIG

- 1 Kräftige Winde und Strömungen wälzen den antarktischen Ozean bis in große Tiefen um – mitsamt der Wärme, den enthaltenen Gasen und Nährstoffen. Das beeinflusst das Klima und die übrigen Weltmeere.
- 2 Trotz dieser globalen Bedeutung ist die Dynamik des Südpolarmeers kaum erforscht. Die extrem unwirtlichen Bedingungen ließen vor Ort bislang nur vereinzelte Messungen zu.
- 3 Forscher wollen mit Hightech die Datenlücken schließen, etwa mit automatisierten Treibbojen. Erste Auswertungen deuten auf dramatische Veränderungen in der Region binnen kurzer Zeit hin.

darstellt oder lediglich eine Abweichung von einem langfristigen Trend. Eigentlich wisse man nur: Der Südliche Ozean ist wesentlich unbeständiger als gedacht.

Die Bojen des SOCCOM-Projekts werden den Forschern bei diesen Fragen weiterhelfen, auch wenn es noch Jahre dauern dürfte, bis Genaueres bekannt wird. Le Quéré zufolge könnten selbst diese Daten nicht ausreichend Details liefern. Im Juli 2016 gab sie zu bedenken, dass Modelle zur Kohlenstoffaufnahme im Südpolarmeer stark von den Annahmen über das dortige Nahrungsnetzwerk abhängen. Bessere Klimaprognosen ließen sich darum nur mit umfassenderen Informationen zur Blüte des Phytoplanktons und Zooplanktons erstellen: »Das ist die nächste große Hürde.«

Der Kohlenstoff ist nur eines der wichtigen Themen für die Wissenschaftler. Sie wollen außerdem herausfinden, was mit der Wärme geschieht. Der Südliche Ozean ist Dreh- und Angelpunkt für ein Netzwerk von Strömungen, die Wasser, Wärme und Nährstoffe durch die Meeresbecken schieben. In der Nähe der Antarktis kühlt das Oberflächenwasser ab. Es wird dichter, sinkt herab und treibt Tiefseeströmungen an. Diese streichen über den Boden und ziehen gen Norden in den Pazifik, den Atlantik und den Indischen Ozean.

Viele der bisherigen Erkenntnisse stammen aus Erhebungen, die seit den frühen 1990er Jahren etwa alle zehn Jahre mit Hilfe von Schiffen durchgeführt worden sind. Dabei stellten die Wissenschaftler 2010 fest: Das Tiefenwasser hatte sich deutlich und überraschend stark aufge-

chen. Die Bojen der bestehenden Argo-Flotte halten nur den Druck von 2000 Meter Wassersäule aus – im Durchschnitt ist das Meer mehr als doppelt so tief. Johnson gehört einem US-Konsortium an, welches die neuen Bojen vor den Küsten Neuseelands und Australiens testet. Andere Forscher wollen die Tiefenwasserströme mit Hilfe von verankerten Stationen beobachten. Seit 1999 betreut Gordon einige davon im Weddell-Meer – eine der Hauptregionen, in der das kalte Oberflächenwasser absinkt und Strömungen am Meeresboden anstößt. Wie die Wissenschaftler herausfanden, wurde das Tiefseewasser in einigen Gebieten im Lauf der Zeit immer salzärmer. Die Langzeittrends sind jedoch noch nicht eindeutig. »Wir verstehen erst allmählich, wie sich das Bodenwasser verändert und wie das die gesamte globale Zirkulation beeinflusst«, sagt er.

Eine weitere Expedition beweist:

Auch die Ostantarktis verändert sich rapide

Im Januar 2015 kreuzten Ozeanografen auf dem australischen Eisbrecher Aurora Australis vor der ostantarktischen Küste. Dabei bot ein Riss im Meereseis eine einmalige Gelegenheit: Sie folgten ihm und erreichten den Rand des Totten-Gletschers, einen der größten Abflusspunkte für die dortige Eisdecke (siehe Bild S. 42). Keine andere Expedition kam je so nah an den Gletscher heran.

Das Eisschelf ist 200 Meter dick; darunter und davor brachte das Team Messgeräte ins Wasser (Bild rechts). Die Ergebnisse schockierten sie. An der Vorderseite des Gletschers stellten sie eine um drei Grad Celsius höhere Temperatur fest als am Aufsetzpunkt an der Basis, wo das Wasser gefriert. »Wir dachten immer, der Totten-Gletscher sei weit genug von warmen Gewässern entfernt und würde von ihnen nicht beeinflusst«, berichtet der Expeditionsleiter Steve Rintoul vom Antarctic Climate and Ecosystems Cooperative Research Centre in Hobart in Australien, »doch warmes Wasser war überall am Schelf«.

Andere Teams hatten schon warme Strömungen unter der westantarktischen Eisschicht ausgemacht. Rintouls Expedition konnte belegen, dass ein ähnlicher Prozess die östliche Antarktis untergräbt. Damit ist fraglicher denn je, wie lange die gigantischen Eismengen, die den Kontinent bedecken, noch überdauern werden.

Bislang ist unklar, was diese oberflächennahen Strömungen aufheizt. Erklärungen wie Upwelling warmen Wassers durch veränderte Windlagen diskutieren die Experten ebenso wie eine Kombination aus salzärmerem Oberflächenwasser und einer Zunahme von Meereis. Beides zusammen könnte eine Art Deckel auf dem Ozean bilden, der Teile des warmen, aufsteigenden Wassers in Richtung Küste drängt. »Jeder hat seine bevorzugte Begründung, ich natürlich auch. So funktioniert Wissenschaft nun einmal: Je mehr man beobachtet, desto komplizierter wird es«, kommentiert Gordon.

Einige Forscher beziehen die ständigen Bewohner der Antarktis in ihre Suche nach Antworten ein. Merediths Team vom British Antarctic Survey möchte beispielsweise Weddellrobben mit Sensoren ausstatten. Die Tiere könnten dann Messwerte sammeln, während sie unter der Eisdecke



EPICSTOCKMEDIA / FOTOLIA

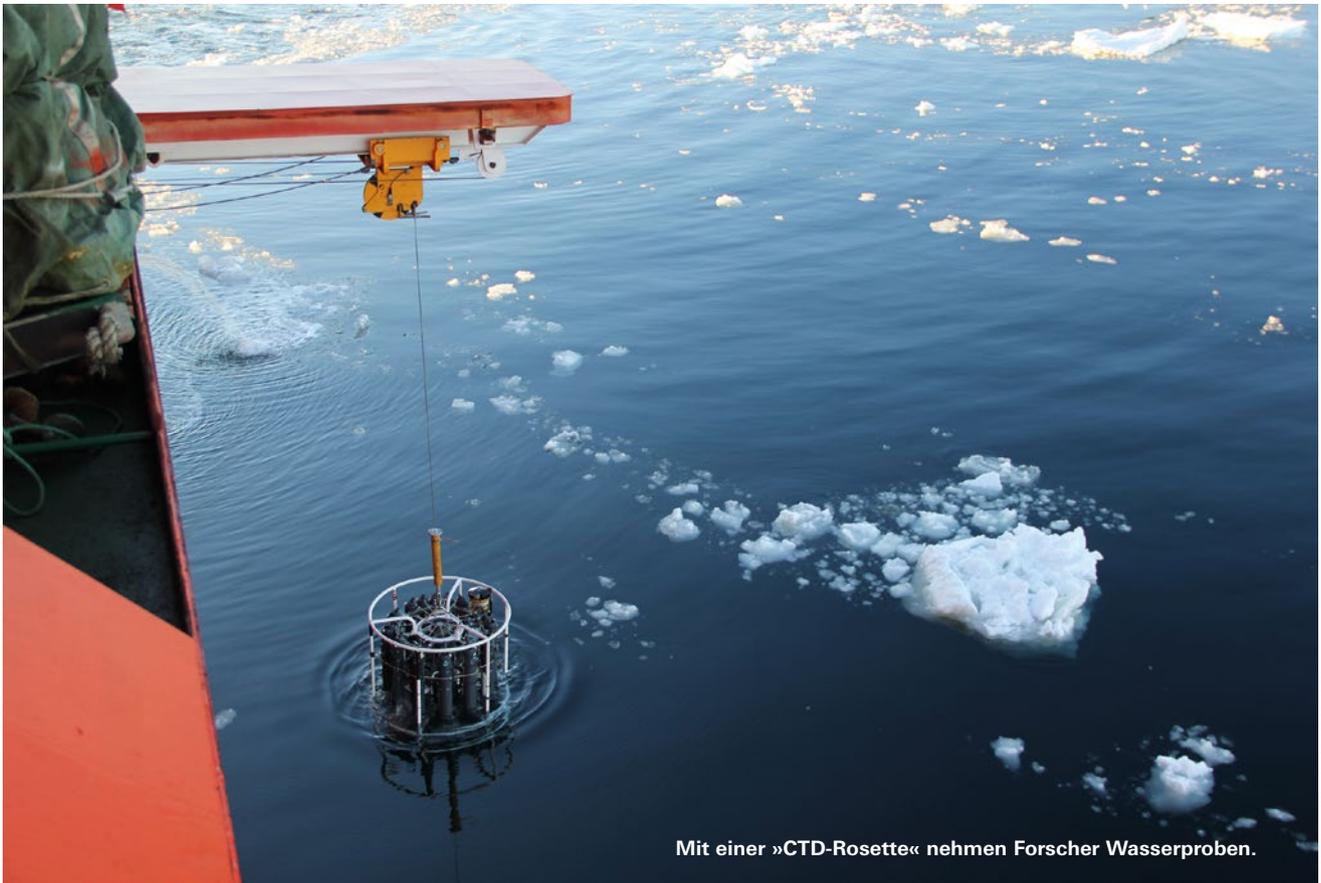
Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

heizt und etwa zehn Prozent der zusätzlichen Wärme aus dem globalen Temperaturanstieg absorbiert.

Die Forscher fanden verschiedene Erklärungen. Beispielsweise wurde das Oberflächenwasser um die Antarktis herum immer salzärmer, teilweise wegen stärkerer sommerlicher Regenfälle über dem Ozean. Salzarmes Wasser hat eine geringere Dichte und sinkt daher möglicherweise nicht mehr wie gewohnt in die bodennahen Strömungen herab. »Das Wasser in der Tiefe erwärmt sich, weil es nicht genügend Kaltwassernachschub erhält«, erklärt der Ozeanograf Gregory Johnson von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in Seattle, der auch Koautor der Analyse von 2010 war. Eine weitere Studie, die sich auf neue Beobachtungen von Schiffen stützt, kommt zum selben Schluss.

Für ein genaueres Bild brauchen die Forscher mehr Daten aus häufigeren Messungen. Das wird vielleicht mit dem geplanten internationalen Projekt Deep Argo möglich. Dabei sollen Treibbojen regelmäßig bis zum Boden abtau-



Mit einer »CTD-Rosette« nehmen Forscher Wasserproben.

STEVE RINTOUL, AUSTRALIAN ANTARCTIC DIVISION

entlang des Kontinentalsockels nach Futter suchen. Diese Zone ist besonders bedeutsam, weil dort das kalte Wasser in die Tiefe sinkt. »Die Prozesse sind äußerst wichtig für die ganze Welt, lassen sich aber nur schwer messen. Mit den Robben könnten wir unsere bisherigen Grenzen überschreiten«, erklärt Meredith. Die Meeressäuger sind nur ein Teil des Plans. Die Forscher wollen außerdem autonome Gleiter auf programmierte Routen in bis zu 1000 Meter Tiefe schicken und dort Temperatur und Salzgehalt messen. Zusammen mit Beobachtungen vom Schiff aus soll das mehr Klarheit über die Vorgänge in der Region schaffen.

Aus den vielen Daten nun noch die richtigen Schlüsse ziehen

Das Sammeln von Messwerten reicht jedoch nicht aus. Wissenschaftler müssen damit den Transport von Wärme, Kohlendioxid und Nährstoffen um den Globus vorhersagen können. Bis dahin ist es trotz fortschrittlicher Datenerhebung ein weiter Weg, denn nach bisherigen Erkenntnissen folgt das Upwelling keinem einfachen Muster. Vielmehr wirbelt das aufsteigende Wasser, bevor es die Oberfläche erreicht, zunächst eineinhalb Mal um den Kontinent. Bei den Simulationen von Sarmientos Team waren nur die Modelle mit höchster Auflösung in der Lage, dieses Verhalten zu berechnen. Sarmiento meint, es werde sicherlich noch lange dauern, bis Computer die Prozesse in der Region gut nachvollziehen können.

Russell ist zuversichtlich, dass der Südliche Ozean langsam seine Geheimnisse preisgibt. Nachdem sie 1994

von ihrer ersten Fahrt zurückgekehrt war, beschäftigte sie sich erst einmal damit, die Simulationen zu verbessern. Die damals vorhandenen Daten haben noch nicht genügt, um die Auswirkungen des von ihr beobachteten Upwellings irgendwie beziffern zu können. Inzwischen leitet sie die Modellrechnungen des SOCCOM-Projekts und bekommt mehr Daten, als sie sich jemals erträumt hat. »Aus Sicht einer Ozeanografin leben wir in einer faszinierenden Zeit«, meint sie, »dabei wohnen wir genau genommen einem beängstigenden geophysikalischen Experiment an unserem Planeten bei.« ◀

QUELLEN

Gordon, A. L. et al.: A Seasonal Cycle in the Export of Bottom Water from the Weddell Sea. In: *Nature Geoscience* 3, S. 551–556, 2010

Landschützer, P. et al.: The Reinvigoration of the Southern Ocean Carbon Sink. In: *Science* 349, S. 1221–1224, 2015

Le Quéré, C. et al.: Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change. In: *Science* 316, S. 1735–1738, 2007

Purkey, S. G., Johnson, G. C.: Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets. In: *Journal of Climate* 23, S. 6336–6351, 2010

Rintoul, S. R. et al.: Ocean Heat Drives Rapid Basal Melt of the Totten Ice Shelf. In: *Science Advances* 2, e1601610, 2016

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 539, S. 346–348, 17. November 2016

METROLOGIE

DAS NEUE MASS DER MASSE

Bisher dient ein Metallzylinder aus dem 19. Jahrhundert als Referenz für alle Gewichtsmessungen auf der Erde. 2018 soll dieses Urkilogramm in Ruhestand geschickt werden. Die Arbeit an einer neuen Definition geht nun auf die Zielgeraden.



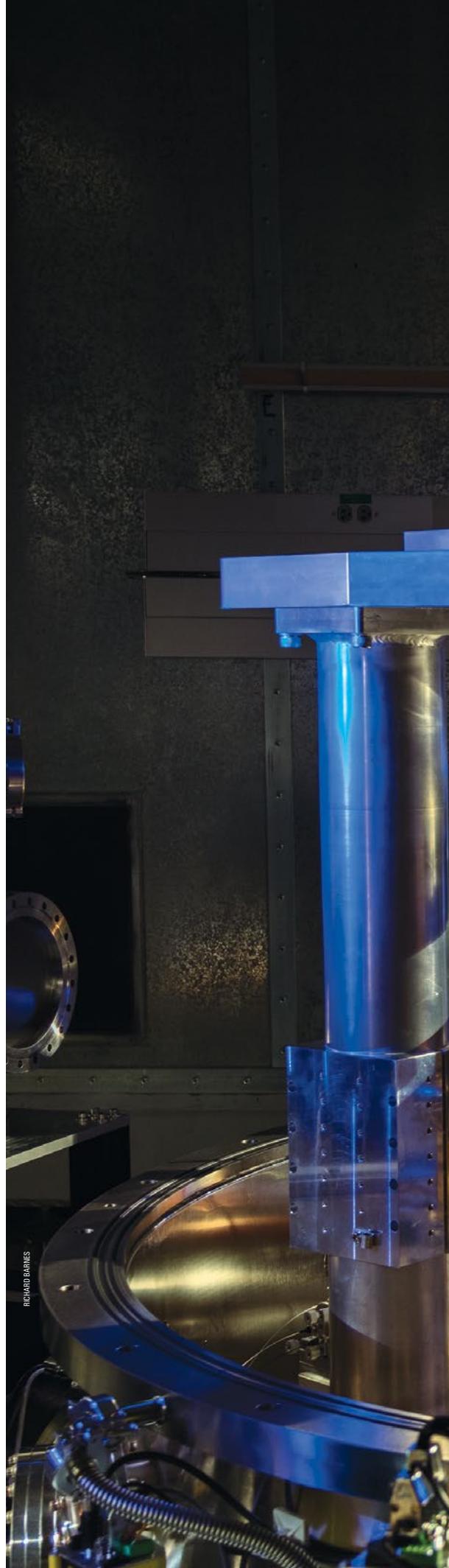
Tim Folger schreibt für »National Geographic«, »Discover« und andere Magazine in den USA. Er ist außerdem Redakteur bei »The Best American Science and Nature Writings«, einer jährlichen Anthologie des Bildungsverlags Houghton Mifflin Harcourt.

» spektrum.de/artikel/1453303

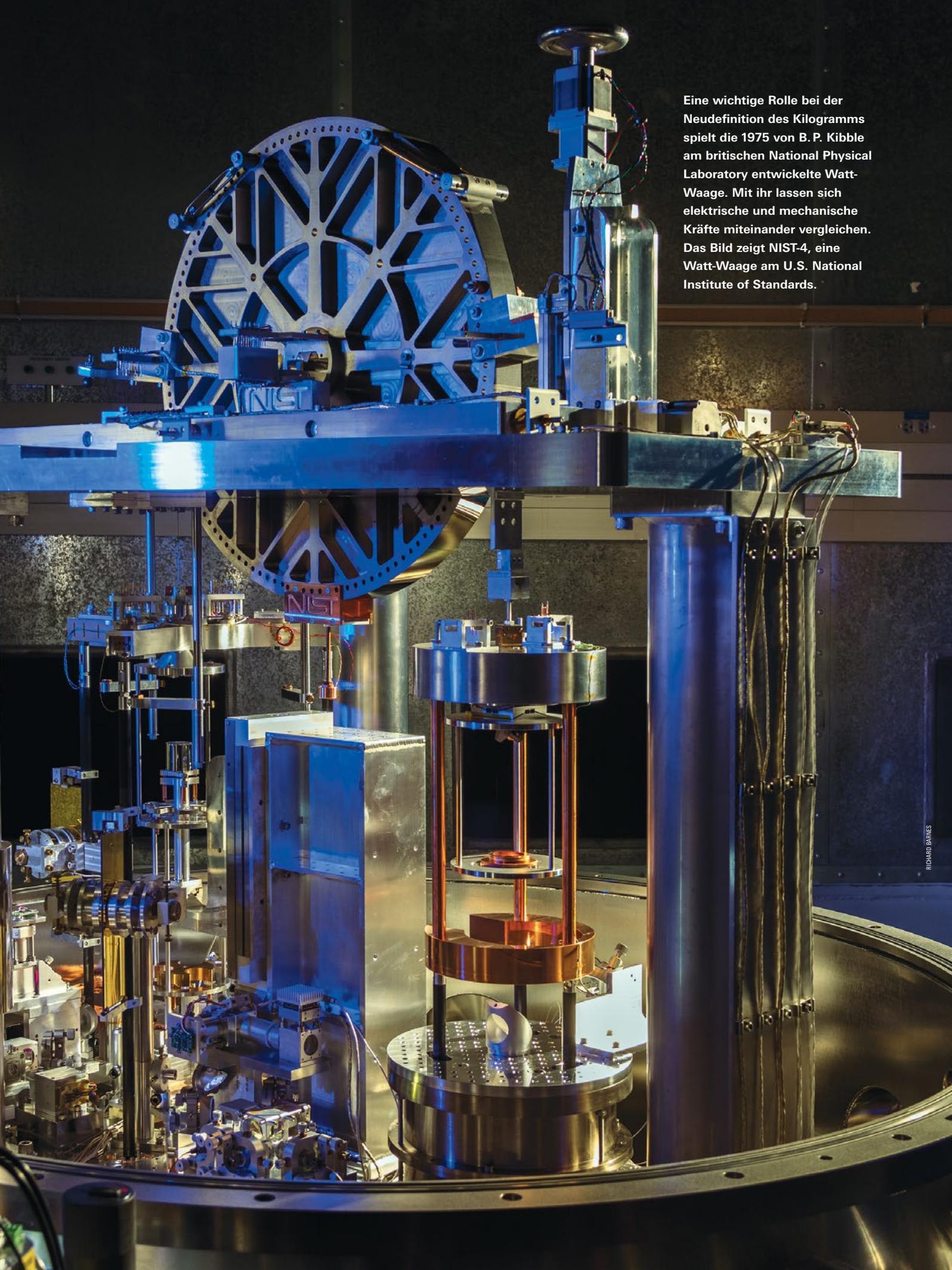
▶ Als sich Jon Pratt im April 2016 der Sicherheitsschleuse an einem Washingtoner Flughafen näherte, waren seine Nerven aufs Äußerste angespannt. In Pratts Kameratasche befanden sich vier massive Metallzylinder – also genau die Art von Objekt, die garantiert die Aufmerksamkeit der misstrauischen Kontrolleure auf sich ziehen würde. Ein Zylinder aus einer glänzenden Platin-Iridium-Legierung war halb so groß wie eine Dose Tunfisch und mindestens 40000 Euro wert. Die anderen drei bestanden aus präzise bearbeitetem, nichtrostendem Stahl. Aber nicht das Material stellte das Besondere an den Körpern dar, sondern ihr Gewicht: Jeder der Zylinder wog exakt ein Kilogramm.

Zum Glück hatte der Ingenieur des U.S. National Institute of Standards (NIST), der für Maßeinheiten zuständigen Bundesbehörde der USA, ein Schreiben dabei, das seine Mission erläuterte: Bei den Zylindern handelte es sich um vier offizielle Kilogramm-Prototypen; um Referenzmassen also, auf denen sämtliche Gewichtsmessungen in den USA basieren. Pratt sollte sie einem Kollegen in einer Pariser Vorstadt bringen. Dabei durfte niemand die Zylinder berühren oder sie aus ihren schützenden Behältern entfernen – denn das würde das Gewicht der mit großem Aufwand hergestellten Massen geringfügig verändern.

»Der Sicherheitsbeamte wollte mir schon das Leben schwer machen«, erinnert sich Pratt, der die Abteilung für Quantenmessungen des NIST in Gaithersburg im US-Bun-



RICHARD BARNES



Eine wichtige Rolle bei der Neudefinition des Kilogramms spielt die 1975 von B. P. Kibble am britischen National Physical Laboratory entwickelte Watt-Waage. Mit ihr lassen sich elektrische und mechanische Kräfte miteinander vergleichen. Das Bild zeigt NIST-4, eine Watt-Waage am U.S. National Institute of Standards.

desstaats Maryland leitet. »Aber dann las er all die Dokumente – und er fand die Sache einfach nur cool.« Nach wenigen Minuten hatte Pratt die Überprüfung hinter sich und konnte an Bord seines Fliegers gehen.

Pratt brachte die Zylinder zum »Bureau International des Poids et Mesures« (BIPM), dem Internationalen Büro für Maß und Gewicht in Sèvres, einer an der Seine gelegenen Vorstadt von Paris. Dort verglichen Metrologen die amerikanischen Kilogramme mit Metallzylindern aus drei anderen Ländern sowie mit einer Ein-Kilogramm-Kugel aus hochreinem Silizium, hergestellt an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Damit hatte die historische Neudefinition des Kilogramms, die derzeit in vollem Gang ist, eine weitere Hürde genommen.

Seit 1889 – dem Jahr, in dem der Eiffelturm eröffnet wurde – ist das Kilogramm durch die Masse eines Platin-Iridium-Zylinders definiert. Dieses Urkilogramm ruht unter drei Glasglocken in einem Tresor der BIPM-Zentrale, im Pavillon de Breteuil, einem eleganten Gebäude aus dem 17. Jahrhundert. Das Gewicht des Zylinders nutzen die Kilogramm-Prototypen der nationalen Metrologieinstitute als Referenzwert. Nur wenn eine Masse exakt so schwer ist wie das Pariser Artefakt, wiegt sie ein Kilo.

Das Kilogramm ist die letzte Maßeinheit, die noch mit einem physischen Objekt verknüpft ist. Aber nicht mehr lange. Bereits Ende 2018 könnte das Pariser Urkilogramm entthront werden. Dann nämlich soll das Gewichtsnormale eine neue Definition erhalten. Sie basiert auf dem planckschen Wirkungsquantum, einer von Max Planck eingeführten Naturkonstanten, die in der Quantenphysik das stets gleich bleibende Verhältnis von Energie und Frequenz eines Lichtteilchens angibt.

Metrologen wünschen sich schon lange, dass der internationale Massestandard an eine grundlegende Konstante des Universums gekoppelt wird. Solch eine Definition wäre viel genauer und verlässlicher als ein verhätschelter Metallklumpen aus der viktorianischen Ära. Dieser bereitet den Metrologen schon länger große

Sorgen. Denn es scheint so, als würde das Urkilogramm schleichend an Masse verlieren. Das zumindest legen Vergleichsmessungen mit sechs offiziellen Kopien nahe, den so genannten »temoins« (französisch: Zeugen), die ungefähr alle 30 Jahre stattfinden. Diese Referenz- oder Hauptnormale des BIPM lagern im gleichen Tresorraum wie das Urkilogramm – aber ihr Gewicht weicht immer mehr von ihrem berühmten Vorbild ab.

Mit der Neudefinition des Kilogramms endet eine lange Tradition. Das heutige Urkilogramm hatte einen Vorgänger aus der Zeit der Französischen Revolution. Zuvor unterschieden sich die Standards für Längen und Gewichte

Einst gab es in Frankreich mehr als 700 unterschiedliche Maßeinheiten. Dann führten Wissenschaftler das metrische System ein

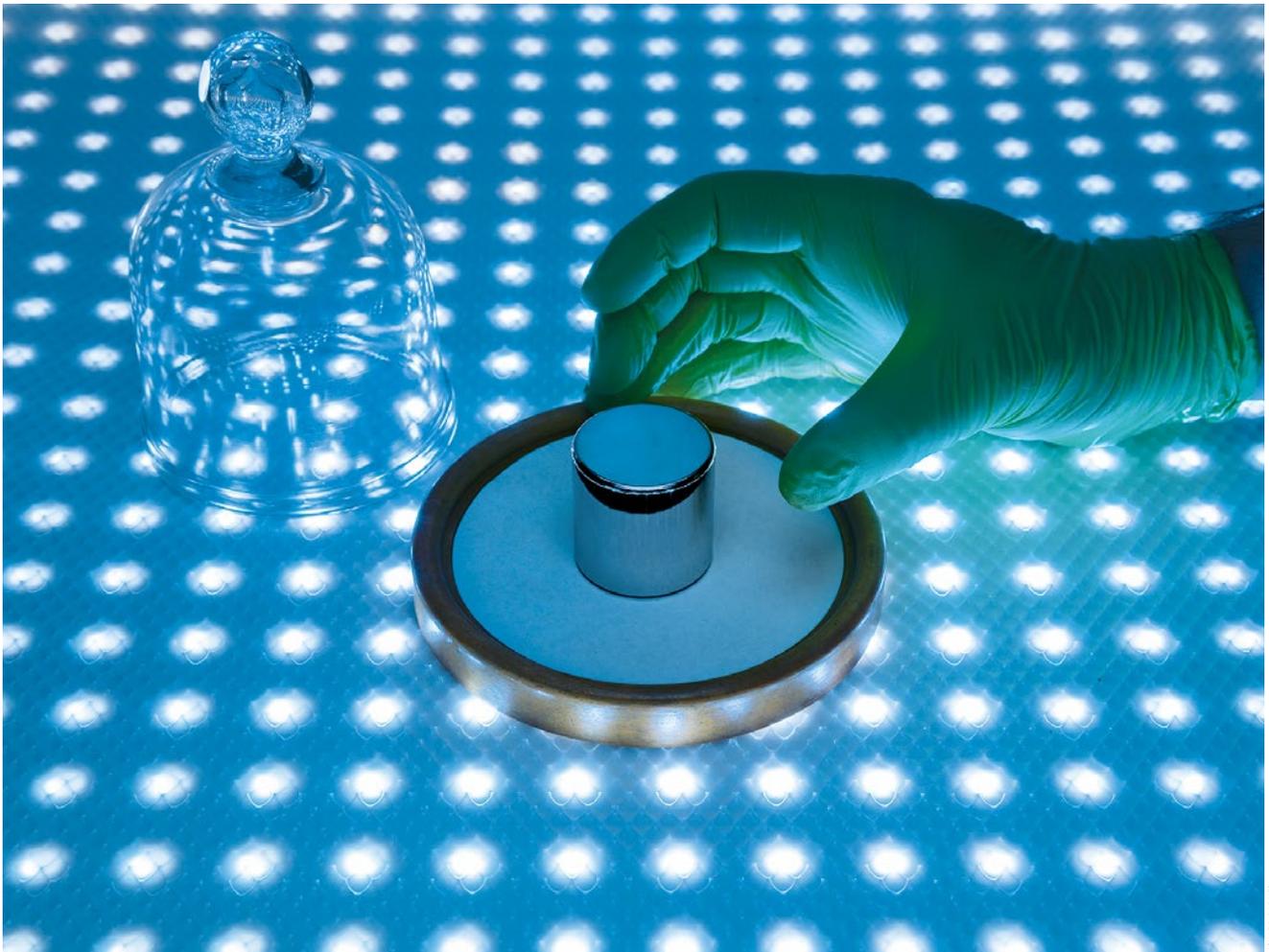
noch von Stadt zu Stadt – Historikern zufolge waren mehr als 700 unterschiedliche Maßeinheiten in Gebrauch. Ein »toise« war beispielsweise die Spannweite der Arme eines ausgewachsenen Mannes. Doch ein »toise« in Paris unterschied sich etwa von einem in Marseille. Daher suchten die damaligen französischen Wissenschaftler nach einer Möglichkeit, das Chaos zu beenden, »für alle Menschen, für alle Zeiten«. Sie führten schließlich das metrische Einheitensystem ein. 1875 unterzeichneten 17 Staaten in Paris die Internationale Meterkonvention, die Urmeter und Urkilogramm zu allgemein gültigen Maßeinheiten machte. Sie sah auch die Gründung des BIPM und anderer Metrologiebehörden vor. Heute halten sich knapp 100 Nationen an den internationalen Vertrag, zusammen machen sie 98 Prozent der Weltwirtschaft aus.

Eine kritische Zeit für das Urkilogramm war der Zweite Weltkrieg. In der Nähe des Pavillon de Breteuil stand damals eine Panzerfabrik der deutschen Wehrmacht, die mehrfach das Ziel amerikanischer Bombenangriffe war. Zwar hatte man die »temoins« während des Kriegs in einen unterirdischen Tresor der Bank von Frankreich evakuiert. Doch die Meterkonvention bestimmte, dass das Urkilogramm unter allen Umständen im Hauptquartier der Maßeinheiten-Behörde verbleiben musste. Nachdem einer der Bombenangriffe den Pavillon de Breteuil erschüttert hatte, brachte man den wertvollen Zylinder immerhin in einem stoßsicheren Behälter unter.

Als die Experten das Urkilogramm 1946 nach dem Krieg aus dem Tresor holten, um es zu reinigen und mit den sechs Kopien zu vergleichen, war es 30 Mikrogramm leichter als die »temoins«. Bei einer Messung im Jahr 1889 hatten die Massen noch übereingestimmt. Der Unterschied wurde mit der Zeit größer. Bei der nächsten Reinigungsprozedur Anfang der 1990er Jahre betrug die Differenz zwischen Original und einigen seiner Abbilder bereits gut 50 Mikrogramm, was immerhin dem Gewicht eines Fliegenflügels entspricht.

AUF EINEN BLICK DAS KILOGRAMM NEU DEFINIEREN

- 1 Seit 1889 ist das Kilogramm durch die Masse eines Platin-Iridium-Zylinders in einem Tresor in Paris definiert. Damit ist es die letzte Maßeinheit, deren Festlegung mit einem physischen Objekt verknüpft ist.
- 2 Doch das Urkilogramm verliert Masse. Das ist einer der Gründe, weshalb es nun neu definiert werden soll – und zwar durch Verknüpfung mit der Planck-Konstanten aus der Quantenphysik.
- 3 In diesem Jahr soll der Prozess, an dem Institute aus fünf Ländern beteiligt sind, in die Schlussphase gehen. Im Herbst 2018 könnten Metrologen dann die Neudefinition beschließen.



RICHARD BARNES

Auch das nationale Massennormal »K20« der USA wird mit Hilfe des Urkilogramms in Paris kalibriert. Nach der Neudefinition werden Metrologen stattdessen so genannte Watt-Waagen dafür benutzen. Oder extrem hochwertige Kugeln aus Silizium, bei denen Metrologen zuvor exakt bestimmt haben, wie viele Atome sie enthalten.

Die Reinigung des Urkilogramms und sein Vergleich mit den anderen Testmassen ist alles andere als Routine; seit 1889 hat die BIPM das Verfahren erst viermal durchgeführt. Zunächst müssen die Metrologen das Urkilogramm aus seinem Tresorraum holen, der mit drei übereinander angeordneten Schlössern gesichert ist. Im Inneren befindet sich ein großer Safe mit einem Kombinationsschloss, der schließlich das von drei Glasglocken bedeckte Urkilogramm und seine sechs Kopien enthält.

Drei Personen müssen anwesend sein, um den Tresorraum des Urkilogramms zu öffnen

Nur drei Menschen auf der ganzen Welt haben jeweils einen Schlüssel für den Tresorraum: der Direktor des BIPM, der Direktor des französischen Staatsarchivs in Paris und der Präsident des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht CIPM, das die Arbeit des BIPM überwacht. Weil jeder der drei Schlüssel unterschiedlich ist, müssen diese drei Personen gleichzeitig anwesend sein, wenn der Tresorraum geöffnet werden soll.

Nach dem Betreten des Heiligtums greift ein Techniker mit einer gepolsterten Zange nach dem schimmernden Zylinder und trägt ihn zur Reinigungsstation. Dort wird die Mutter aller Massen mit einem in Alkohol und Ether getränkten Ledertuch abgerieben und anschließend mit doppelt destilliertem Wasser abgespült. Ein Stickstoff-Gebläse beseitigt schließlich alle verbliebenen Wassertropfen. Der gesamte Vorgang dauert etwa eine Stunde.

Das BIPM hat an Testmassen mit anderen Reinigungsmethoden experimentiert – zum Beispiel mit ultravioletter Strahlung –, doch diese Verfahren machen den Zylinder zu sauber. »Sie scheinen mehr Schmutz zu beseitigen als unser bisheriges Verfahren«, sagt BIPM-Direktor Michael Stock. »Das macht die Masse instabil, denn die Oberfläche ist so sauber, dass sie sehr reaktionsfreudig wird.« Das wiederum würde das Urkilogramm als Standard noch unzuverlässiger machen, weshalb das BIPM bis heute bei der alten Leder-und-Wasser-Methode geblieben ist.

Nach ihrem Bad werden das Urkilogramm und die »temoins« in einen Reinraum befördert und dort auf einem

Geänderte Maße

Das internationale Einheitensystem SI, auch als metrisches System bezeichnet, basiert auf sieben Basis-Einheiten. Weitere 22 Einheiten leiten sich aus diesen ab. Die internationale Generalkonferenz für Maß und Gewicht plant für 2018 eine Neudefinition gleich mehrerer Basis-Einheiten – es handelt sich um die größte Erneuerung des metrischen Systems seit 1960. Damit sollen die Basis-Einheiten an unveränderliche Naturkonstanten gekoppelt werden. Meter, Sekunde und Candela bleiben dabei im Wesentlichen unverändert, aber die anderen vier Einheiten erfahren eine grundlegende Neudefinition.

Bereits jetzt in Abhängigkeit von physikalischen Konstanten definiert

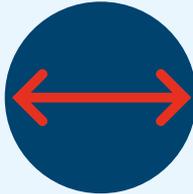
Einheit: **Meter**
Abkürzung: **m**
Messgröße: **Länge**

gegenwärtige Definition (eingeführt 1983):

Die von Licht im Vakuum in $1/299\,792\,458$ Sekunden zurückgelegte Strecke

historische Anmerkung:

Als die französische Akademie der Wissenschaften 1791 das metrische System vorschlug, definierte sie den Meter als den zehnmillionsten Teil eines Viertels des Erdumfangs – der wiederum über den Meridian festgelegt war, der vom Nordpol durch Paris zum Südpol verläuft.



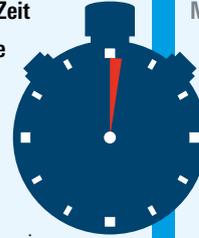
Einheit: **Sekunde**
Abkürzung: **s**
Messgröße: **Zeit**

gegenwärtige Definition (eingeführt 1967):

Eine Sekunde ist die Dauer von $9\,192\,631\,770$ Schwingungsperioden jener Strahlung, die beim Übergang zwischen zwei Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Zäsium-133-Atomen entsteht.

historische Anmerkung:

Die ursprüngliche Definition ist uns vertrauter: Eine Sekunde war der 86400ste Teil des mittleren Sonnentages, also der Zeitdauer, welche die Erde für eine Umdrehung relativ zur Sonne benötigt.



Einheit: **Candela**
Abkürzung: **cd**
Messgröße: **Lichtstärke**

gegenwärtige Definition (eingeführt 1979):

Die Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $1/683$ Watt pro Steradian beträgt. Steradian ist die SI-Einheit für den Raumwinkel.

historische Anmerkung:

Anfang des 20. Jahrhunderts definierten die USA, Frankreich und Großbritannien die Candela über die Lichtstärke einer Kohlefadlampe. Im Jahr 1933 präzisierten Metrologen die Definition dann unter Bezugnahme auf Schwarzkörperstrahlung. Eine solche Definition wurde 1948 eingeführt und später durch die gegenwärtige ersetzt.



NIGEL HOLMES / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2017; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

so genannten Massekomparator platziert, einem etwa 500 000 Euro teuren Gerät, das Massedifferenzen bis hinab zu einem Mikrogramm messen kann. Der Massekomparator und zehn Arbeitsnormale sind gewissermaßen die Arbeitspferde der BIPM-Abteilung für die Massenbestimmung. Sie werden für die alltäglichen Kalibrationen von Gewichten genutzt, während das Urkilogramm und die »temoins« nur alle paar Jahrzehnte zur Verifikation der nationalen Kilogrammprototypen herangezogen werden.

Weshalb das Pariser Urkilogramm Masse verliert, ist ein großes Rätsel

Niemand weiß, warum das Gewicht des Urkilogramms in den knapp 130 Jahren, die seit seiner Einführung vergangen sind, immer mehr von dem der Vergleichsmassen abgewichen ist. Der historische Zylinder ist viel zu wertvoll, als dass man dieser Frage mit Experimenten auf den Grund gehen könnte. Experten halten es für unwahrscheinlich, dass alle Kopien an Masse zugenommen haben, während das Original unverändert geblieben ist. Die plausiblere Erklärung: »Vermutlich verliert der internationale Kilogrammprototyp an Masse«, sagt Stock.

Auch deshalb entschied die Generalkonferenz für Maß und Gewicht – das beschlussfassende Organ der Meterkonvention – 2011, ein neues Massenormal einzuführen.

Denn das Mysterium verursacht mittlerweile ganz reale Probleme. In den kommenden Jahrzehnten wird der technische Fortschritt Präzisionsmessungen von Massen auf molekularer Skala oder sogar darunter zur Routine machen. »Wir benötigen dann Methoden, um Mikrogrammmassen mindestens auf drei Nachkommastellen genau zu messen«, sagt Jon Pratt, der die amerikanischen Referenzmassen nach Paris gebracht hat. »Aber mit einem historischen Artefakt als Kilogrammprototyp ist die Unsicherheit bei so kleinen Skalen beträchtlich.«

Die ungefähr 50 Mikrogramm, um die sich die Referenzmassen in der Vergangenheit vom Urkilogramm entfernt haben, mögen auf den ersten Blick gering erscheinen. Im Reich der Nanotechnologie sind sie jedoch eine ganze Menge. Zumal sich die Unsicherheit in der Masse des Kilogramms durch eine lange Reihe von Einheiten fortpflanzt: Die metrische Einheit der Kraft, das Newton, ist in Abhängigkeit vom Kilogramm definiert, vom Newton wiederum hängt das Joule, die Einheit der Energie, ab, vom Joule das Watt, die Einheit der Leistung, und so geht es immer weiter.

So kann letztlich eine kleine Unsicherheit beim Kilogramm nahezu jede Messung in der Welt der Physik verschlechtern. »Wir sind jetzt an einem Punkt, an dem Veränderungen des internationalen Kilogrammprototyps

Noch in Abhängigkeit von physikalischen Konstanten zu definieren

Einheit: **Kilogramm**
Abkürzung: **kg**
Messgröße: **Masse**

gegenwärtige Definition (eingeführt 1889):

Noch ist das Kilogramm in Referenz zum Urkilogramm definiert, einem Zylinder aus einer Platin-Iridium-Legierung in einem Tresorraum in Paris.



Vorschlag zur Neudefinition:

Wenn alles nach Plan verläuft, soll das Kilogramm 2018 mit dem planckschen Wirkungsquantum verknüpft werden, einer festen Größe aus der Quantentheorie. Sie spezifiziert, welche Energiemenge ein einzelnes Lichtteilchen einer bestimmten Frequenz transportiert.

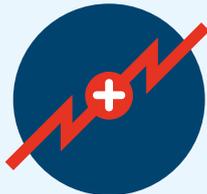
Einheit: **Ampere**
Abkürzung: **A**
Messgröße: **Stromstärke**

gegenwärtige Definition (festgelegt 1946):

Die derzeitige Definition des Ampere basiert unter anderem auf zwei geraden parallelen Leitern unendlicher Länge mit vernachlässigbarem Querschnitt, die sich im Abstand von einem Meter im Vakuum befinden – Bedingungen, die sich unmöglich in einem Labor reproduzieren lassen.

Vorschlag zur Neudefinition:

Die Definition des Ampere lässt sich vereinfachen, indem man den Wert der Ladung eines Elektrons – die Elementarladung – festlegt.



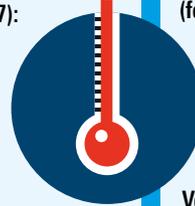
Einheit: **Kelvin**
Abkürzung: **K**
Messgröße: **Temperatur**

gegenwärtige Definition (eingeführt 1967):

Heute ist ein Kelvin das Äquivalent zu $1/273,16$ der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser – also der Kombination von Druck und Temperatur, bei der Wasser in Form von Eis, Dampf und Flüssigkeit koexistieren kann.

Vorschlag zur Neudefinition:

Durch eine Verknüpfung des Kelvin mit einem festen Wert der Boltzmann-Konstanten – die den Zusammenhang zwischen der mittleren kinetischen Energie von Gasmolekülen mit der absoluten Temperatur beschreibt – ließe sich die Genauigkeit von Messungen extrem niedriger und extrem hoher Temperaturen verbessern.



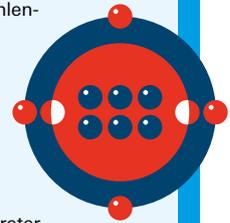
Einheit: **Mol**
Abkürzung: **mol**
Messgröße: **Stoffmenge**

gegenwärtige Definition (festgelegt 1971):

Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12 Gramm des Nuklids Kohlenstoff-12 enthalten sind.

Vorschlag zur Neudefinition:

Die Verknüpfung des Mols mit dem Kilogramm wird gekappt. Stattdessen wird das Mol durch eine Fixierung des Zahlenwerts der Avogadro-Konstanten definiert, welche die Anzahl der Teilchen – Moleküle, Atome oder anderer diskreter Materiebausteine – pro Mol angibt.



NIGEL HOLMES / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2017; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

andere Naturkonstanten beeinflussen könnten«, sagt Stock. »Und das ist irrsinnig.«

Die Neudefinition der Masseneinheit ist Teil einer Generalüberholung des metrischen Systems. Das internationale Einheitensystem SI von 1960 basiert nicht nur auf dem Kilogramm, sondern auch auf dem Meter für Längen, dem Ampere für elektrische Stromstärken, der Sekunde für Zeitmessungen, der Candela für Lichtstärken, dem Mol für Stoffmengen und dem Kelvin für Temperaturen. Die Basis von einigen dieser Einheiten hat die BIPM bereits vor Jahrzehnten erneuert. So war ein Meter bis 1983 der Abstand zweier Striche, die in einen Platin-Iridium-Stab geätzt waren. Er befand sich im selben Tresorraum wie das Urkilogramm.

Heute ist der Meter die Strecke, die Licht im 299 792 458ten Bruchteil einer Sekunde zurücklegt. Die Sekunde wiederum, einst anhand der Tageslänge definiert, fassen Metrologen bereits seit den 1960er Jahren als die Zeit auf, in der Zäsiumatome am Temperaturnullpunkt 9 192 631 770-mal zwischen zwei Energiezuständen hin- und herspringen. Die Einheiten Mol, Kelvin und Ampere wollen Wissenschaftler ebenfalls 2018 neu definieren.

Die gegenwärtige Festlegung des Ampere ist besonders skurril: Offiziell ist es über den Strom definiert, der zwischen zwei parallelen, unendlich langen Drähten eine

bestimmte Lorentzkraft hervorrufen würde – eine abstrakte Festlegung, die sich nicht exakt im Labor replizieren lässt. Von 2018 an soll das Ampere dann aus der Ladung eines Elektrons abgeleitet werden, deren numerischen Wert Metrologen festschreiben wollen – möglich machen es Geräte auf Basis von Nanoelektronik, mit denen sich einzelne Ladungsträger zählen lassen. In Zukunft ist eine Festlegung auch für die numerischen Werte der Avogadro-Konstanten, der Boltzmann-Konstanten und der so genannten Lichtausbeute geplant. Zusammen mit der Lichtgeschwindigkeit, der Frequenz der Strahlung von Zäsiumatomen, aus der die Sekunde abgeleitet wird, und der Planck-Konstanten folgen aus den fixierten Konstanten letztlich alle jetzigen SI-Einheiten, vom Kilogramm bis zur Candela.

Im Prinzip könnten intelligente Wesen überall im All die neue Definition verstehen

Die neuen Definitionen werden aus Sicht von Metrologen ein wahrhaft universelles System von Maßeinheiten bilden, das nicht länger an irdische Konventionen gebunden ist. Im Prinzip könnten intelligente Wesen überall im Kosmos dann das irdische Einheitensystem verstehen. Denn die Naturkonstanten sollten überall den gleichen Wert haben. Indem man ihn festlegt und zur Basis des

irdischen Einheitensystems macht, stellt man außerdem sicher, dass der Wert der Einheiten sich in Zukunft nicht ändern wird.

Beim Kilogramm ist das wegen des labilen Zustands des Pariser Urkilogramms besonders dringend. Künftig soll sich seine Definition aus dem numerischen Wert der Planck-Konstanten ergeben. Das Committee on Data for Science and Technology (CODATA) gab diesen 2014 als $6,626\,070\,040 \cdot 10^{-34}$ (Kilogramm · Meter²)/Sekunde an. Der Wert ist jedoch mit einer Messungenauigkeit behaftet – ganz im Gegensatz zum Wert eines Kilogramms, der per Definition gleich der Masse des Urkilogramms in Paris ist.

In Zukunft soll es genau andersherum sein: Die Planck-Konstante soll fixiert werden – und diese legt dann den

Das plancksche Wirkungsquantum und das Kilogramm sind direkt miteinander verknüpft – das ermöglicht die Neudefinition

Wert des Kilogramms fest. Möglich macht das die direkte Verknüpfung der beiden Einheiten, die sonst nur noch von Sekunde und Meter abhängen. Deren jeweiligen Wert haben Metrologen aber ja bereits in der Vergangenheit festgelegt. Das bedeutet: Wenn das BIPM auch den Wert der Planck-Konstanten festnagelt, ergibt sich aus ihm zusammen mit den genauen Werten von Sekunde und Meter die Kilogrammsee.

Statt weiter das Pariser Urkilogramm als Referenz zu nutzen, können Metrologen also künftig das Gewichtsnormale aus der Planck-Konstanten ableiten. Der Übergang zu diesem neuen Quantenstandard ist allerdings ein aufwändiger Prozess, nicht zuletzt, weil sich der Wert des Kilogramms dabei nicht ändern soll. Vielmehr soll der heutige Massewert des Pariser Artefakts konserviert werden. Dazu müssen die Metrologen zunächst die Planck-Konstante möglichst präzise aus der Masse des Urkilogramms ableiten – und diesen Wert dann fixieren, um ihn künftig als Referenz verwenden zu können.

Schon 2014 haben die Metrologen deshalb das Urkilogramm mit den Prototypen des BIPM und den Massenormalen nationaler Metrologiebehörden verglichen. Auf dieser Basis bestimmten mehrere Gruppen anschließend die Planck-Konstante. Letztlich nutzen Forscherteams in aller Welt zwei Methoden dafür. Die PTB in Braunschweig ist maßgeblich am so genannten Avogadro-Projekt beteiligt. Darin zählen Wissenschaftler die Atome in zwei exakt ein Kilogramm schweren, mit großem Aufwand hergestellten Siliziumkugeln (siehe das Interview mit Horst Bettin ab S. 54). So lässt sich die Avogadro-Konstante genau bestimmen, die ein Maß für die Zahl der Teilchen in einer Stoffmenge ist. Aus ihr lässt sich dann ein extrem präziser Wert der Planck-Konstanten berechnen.

Bei dem anderen Verfahren spielt ein sehr komplexes Instrument die Hauptrolle, die Watt-Waage. Seit ihr

britischer Erfinder, der Physiker Bryan Kibble, 2016 starb, nennen Metrologen sie zunehmend auch Kibble-Waage. Experimente mit Watt-Waagen sind so komplex, dass das Fachjournal »Nature« sie 2012 zu den fünf schwierigsten Unterfangen in der Physik zählte, auf Augenhöhe mit der Suche nach dem Higgs-Boson und dem Nachweis von Gravitationswellen.

Eine von zwei Watt-Waagen des NIST befindet sich in einem zweistöckigen Gebäude am Rande des bewaldeten Campus des Instituts in Gaithersburg. Wegen der ländlichen Umgebung erinnert das Haus auf den ersten Blick an eine Farm. Seit die Wissenschaftler 2014 ein neueres Modell der Waage in Betrieb genommen haben, ist das Gerät im Inneren quasi eingemottet. Es funktioniert allerdings weitgehend wie das aktuelle Exemplar und diente den NIST-Metrologen in der Vergangenheit dazu, das plancksche Wirkungsquantum zu messen.

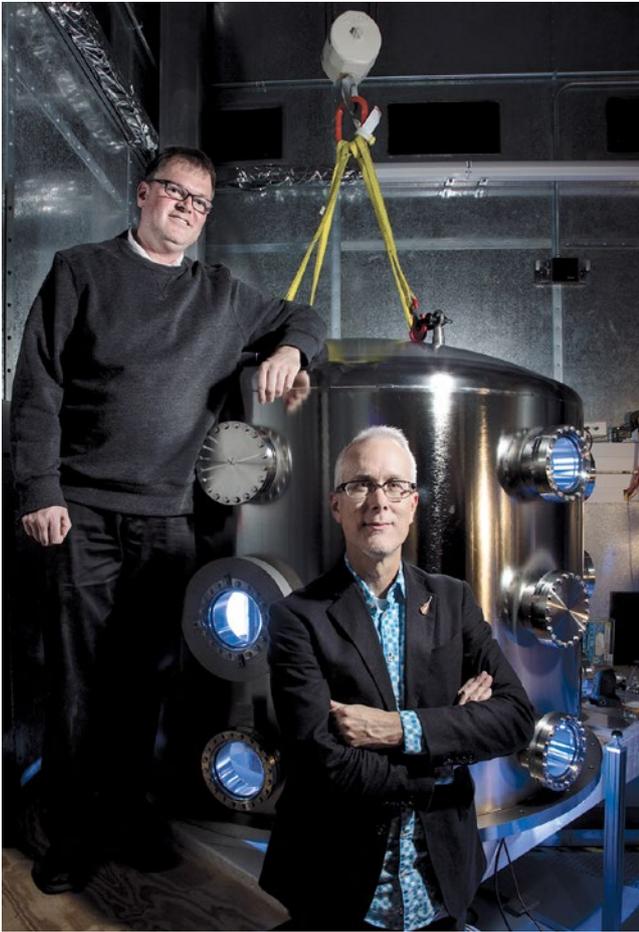
Spannung und Strom aus der Watt-Waage werden in quantenmechanische Gleichungen eingesetzt

Im Inneren des Gebäudes verschwindet jede Erinnerung an Landleben. Alle Wände bis hinauf zur Decke im oberen Stockwerk sind mit Kupfer beschlagen. »Die ganze Hardware hier besteht aus Messing, nicht aus Eisen«, sagt NIST-Metrologe Stephan Schlamminger. Die Legierung schirmt das Instrument vor externen Magnetfeldern ab. Doch die im Inneren des Gebäudes erzeugten Felder sind stark genug, um die Magnetstreifen auf Kreditkarten zu löschen.

Der eigentliche Waage-Mechanismus befindet sich im Obergeschoss des Gebäudes. Er besteht aus einem vertikal montierten Aluminiumrad mit einem Durchmesser von einem halben Meter. Auf jeder Seite hängt an einem Draht eine Waagschale. Während der Messung befindet sich in der einen Schale eine Masse von einem Kilogramm. Unter dieser Schale hängt an drei langen Stäben eine Drahtspule. Die andere Waagschale enthält ein Gegengewicht und einen Elektromotor.

Die Waage besitzt zwei unterschiedliche Betriebsarten. Mit ihnen lassen sich alle Messgrößen bestimmen, die plancksches Wirkungsquantum und Masse verknüpfen. Im so genannten Wägungsmodus wird die nach unten gerichtete Gravitationskraft auf die Testmasse exakt durch ein Magnetfeld ausgeglichen. Dieses wird durch Strom erzeugt, der wiederum durch die Spule unter der Waagschale fließt. Im Bewegungsmodus hingegen wird die Testmasse entfernt und die Spule durch den Motor auf der anderen Waagschale mit konstanter Geschwindigkeit angehoben. Dabei bewegt sich die Spule durch ein von dem supraleitenden Magneten erzeugtes Feld, das eine Spannung in die Spule induziert.

Der im Wägungsmodus gemessene Strom und die im Bewegungsmodus induzierte Spannung lassen sich dann in quantenmechanische Gleichungen einsetzen, die Strom, Spannung und elektrischen Widerstand in Beziehung zum planckschen Wirkungsquantum setzen. Zusammengefasst lässt sich auf diese Weise aus einer exakt ein Kilogramm schweren Masse die Planck-Konstante bestimmen. Anschließend kann man die Watt-Waage benutzen,



Die US-Metrologen Stephan Schlamminger (links) und Jon Pratt vor der Watt-Waage NIST-4 mit ihrer 450 Kilogramm schweren Vakuum-Glocke.

um mit diesem akkuraten Wert etwas zu wiegen, ohne dabei auf irgendein physikalisches Artefakt als Referenzmasse zurückgreifen zu müssen.

Für die Messung müssen Schlamminger und seine Kollegen lokale Schwankungen des Luftdrucks und der Schwerkraft berücksichtigen. Auch die Präzession der Erdachse müssen die Forscher einbeziehen, ebenso die Gezeiten. Trotz der Komplexität der Watt-Waage hat Schlamminger oft das Gefühl, an einem Experiment einer längst vergangenen Epoche beteiligt zu sein. Bei den Messungen müssen Ventile in genau vorgeschriebener Reihenfolge geöffnet und geschlossen werden. »Es fühlt sich an, als ob man eine Dampfmaschine betreibt«, sagt der Wissenschaftler.

Ob sich der Aufwand lohnt, wird sich im Herbst 2018 zeigen. Dann wollen die Delegierten der internationalen Generalkonferenz für Maß und Gewicht über die Neudefinition abstimmen. Diese würde dann 2019 in Kraft treten. Das war zumindest der Plan in den letzten Jahren. Ob es wirklich zu einer Abstimmung kommt und ob die Delegierten die Neudefinition beschließen, ist noch nicht sicher. Vor ein paar Jahren klafften die unterschiedlichen Messungen der Planck-Konstanten noch recht weit aus-

einander. Zuletzt sah es so aus, als hätten die Metrologen diese Lücke geschlossen, Sicherheit darüber bestand bis Redaktionsschluss aber nicht.

Wichtig dürfte auch sein, was bei einer Art Probelauf herauskam, den die Metrologen 2016 machten: Die metrologischen Staatsinstitute von fünf Ländern bestimmten das Gewicht ihrer jeweiligen Kilogrammprototypen auf Basis eines testweise vereinbarten Werts der Planck-Konstanten. Vertreter der nationalen Institute brachten auf diese Weise gewogene Kilogrammnormale anschließend nach Paris – Jon Pratt musste hierfür die Zylinder des NIST 2016 über den Atlantik fliegen. Dort wurden die nationalen Normale miteinander sowie mit den Referenzmassen des BIPM verglichen. Das sollte sicherstellen, dass die nationalen Institute zu vergleichbaren Ergebnissen kommen können, wenn sie künftig das Kilogramm anhand der Planck-Konstanten bestimmen. Die Ergebnisse der Pilotstudie waren zur Zeit des Redaktionsschlusses Ende April 2017 allerdings noch nicht veröffentlicht worden.

Generell hat das BIPM strenge Voraussetzungen für die Neudefinition festgelegt: Drei unabhängige Messungen des planckschen Wirkungsquantums müssen auf $5 \cdot 10^{-8}$ (50 Teile pro Milliarde) übereinstimmen und mindestens eine der Messungen muss auf $2 \cdot 10^{-8}$ (20 Teile pro Milliarde) genau sein. Stichtag ist der 1. Juli 2017 – bis dahin müssen Ergebnisse von einer Fachzeitschrift angenommen worden sein, um berücksichtigt zu werden. Dann wird man auch abschätzen können, wie realistisch eine Neudefinition 2018 ist.

Und was geschieht mit dem Urkilogramm? Nach aktuellem Stand wird es in seinem Tresor verbleiben. Mit Blick auf die Komplexität von Watt-Waagen werden Kilogramm-Artefakte wohl noch eine Weile als Referenzmassen erhalten bleiben. Statt ständig mühselige Messungen durchzuführen, werden Metrologielabore in aller Welt in den kommenden Jahrzehnten eine neue Generation von Referenzmassen für ihre tägliche Arbeit verwenden. Das BIPM entwickelt bereits diese neuen Prototypen. Die Metrologen werden sie aber mit Watt-Waagen und Siliziumkugeln kalibrieren und nicht mehr mit dem Urkilogramm.

Ist das also das Ende der Geschichte? Haben wir nun ein Kilogramm für alle Ewigkeit? Stock ist sich da nicht sicher. »Einer meiner Vorgänger, der Nobelpreisträger Charles Edouard Guillaume, dachte, dass die gegenwärtige Kilogrammdefinition 10000 Jahre gelten würde«, sagt er. »Das war natürlich viel zu optimistisch. Ich bin mir nicht sicher, ob dies die letzte Neudefinition ist, aber sie sollte schon gut genug für einige Zeit sein. Wenn auch vielleicht nicht für 10000 Jahre.« ◀

QUELLEN

Bettin, H. et al.: Realization, Maintenance and Dissemination of the Kilogram in the Revised SI. In: Metrologia 53, A1–A5, 2016

Fischer, J., Ulrich, J.: The New System of Units. In: Nature Physics 12, S. 4–7, 2016

Robinson, I., Schlamminger, S.: The Watt or Kibble Balance: A Technique for Implementing the New SI Definition of the Unit of Mass. In: Metrologia 53, A46–A74, 2016

INTERVIEW

»AUF DEN ERSTEN BLICK VERSTEHT DAS NIEMAND«

2018 soll das Kilogramm eine neue Definition erhalten. Horst Bettin leitet ein Team deutscher Metrologen, das an der Erarbeitung des neuen Standards beteiligt ist. Ein Gespräch über die Schwierigkeiten des Verfahrens – und was eine Eine-Million-Euro-Kugel damit zu tun hat.

» spektrum.de/artikel/1453305



Dr. Horst Bettin

- ▶ Geboren 1955 in Berlin
- ▶ Studium der Physik an der Technischen Universität Braunschweig
- ▶ 1989 Promotion
- ▶ Seit 1990 an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)
- ▶ Seit 2011 leitet er an der PTB die Arbeitsgruppe »Avogadro-Konstante«, die an der Neudefinition des Kilogramms mitwirkt

Seit knapp 130 Jahren legt ein Zylinder in einem Pariser Tresor fest, wie schwer ein Kilogramm ist. Aber dieses Urkilogramm scheint mit der Zeit leichter zu werden. Die genaue Masse eines Kilogramms soll daher künftig mittels des planckschen Wirkungsquantums festgelegt werden, einer Naturkonstanten aus der Quantenphysik. Sie ist mit dem Kilogramm über eine Gleichung verknüpft (siehe den Artikel ab S. 46). Beim Übergang von der alten zur neuen Definition soll sich das Gewicht eines Kilogramms nicht ändern. Mehrere Metrologen-

Teams messen daher zunächst die Planck-Konstante auf Basis des Pariser Urkilogramms. Künftig soll sich aus dem so festgelegten Wert des Wirkungsquantums dann die Masse eines Kilogramms ergeben – und das Pariser Artefakt kann in Ruhestand gehen. Dr. Horst Bettin von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig arbeitet an der Neudefinition des Massenormals mit. Er und sein Team haben die Atome in einer extrem hochwertigen Siliziumkugel gezählt – und wollen auf diesem Weg die Planck-Konstante exakt bestimmen.

Herr Dr. Bettin, das Urkilogramm ist ein uralter Platin-Iridium-Zylinder, der in Paris in einem Tresor lagert. Haben Sie ihn schon einmal mit eigenen Augen gesehen?

Horst Bettin: Nein, nein. Das Urkilogramm darf eigentlich fast niemand sehen. Man weiß nicht einmal, wo es sich genau befindet – irgendwo in einem Kellerraum des BIPM (das Internationale Büro für Maß und Gewicht, *Anm. d. Red.*) im Pariser Vorort Sèvres. Und einmal im Jahr wird geprüft, ob es noch da ist. Viel mehr ist nicht bekannt.

Aber Sie haben Kopien des Urkilogramms in Ihrem Institut in Braunschweig?

Genau, Prototypen nennen wir die. Das sind ebenfalls Zylinder aus Platin-Iridium, die dem Urkilogramm sehr ähnlich sind. Die meisten nationalen metrologischen Institute besitzen solch einen Prototyp als nationales Normal. Daneben haben wir noch vier weitere Kopien. In erster Linie arbeiten wir mit dreien davon, das vierte wurde im Zweiten Weltkrieg beschädigt.

Wie regelmäßig kommen die Prototypen denn zum Einsatz?

Sie werden viel häufiger als das Urkilogramm aus ihrem Tresor genommen, bei dem passiert das ja nur alle 40 bis 50 Jahre. Unser nationales Normal, gewissermaßen das Urkilogramm Deutschlands, benutzen wir einmal pro Jahr, die anderen etwas häufiger, so bis zu fünfmal jährlich. Zusätzlich müssen wir die Stücke auch immer wieder ans BIPM nach Paris schicken. Dort vergleicht man sie dann mit den so genannten Arbeitsnormalen – nicht mit dem Urkilogramm selbst.

Für was nutzen Sie die deutschen Massennormale denn normalerweise?

Für unsere tägliche Arbeit. Wir verwenden die Prototypen hauptsächlich, um Gewichtsstücke der PTB und von anderen metrologischen Instituten zu kalibrieren. In seltenen Fällen auch für die Forschung, etwa zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten.

Das Urkilogramm scheint an Gewicht zu verlieren, etwa 50 Mikrogramm könnte es seit seiner Einführung 1889 eingebüßt haben. Angeblich weiß man nicht weshalb. Gibt es unter Experten denn keine Vermutungen?

Man weiß, dass in diesen Platin-Iridium-Stücken sehr viel Wasserstoff eingeschlossen ist – mehr, als sich bei Raumtemperatur eigentlich lösen würde. Das Metall ist sozusagen übersättigt. Das ist bedingt durch den Herstellungsprozess und tritt bei vielen Metallen auf. Normalerweise kommt der Wasserstoff nicht heraus, die Energieschwelle ist dafür zu hoch. Womöglich tritt er hier aber doch langsam aus, was allerdings reine Spekulation ist. Das große Problem an der Sache ist, dass man das Urkilogramm nicht untersuchen kann. Man darf ja an das Ding nicht ran.

Nun steht die Neudefinition des Kilogramms an. Sie und Ihre Kollegen an der PTB zählen dafür Siliziumatome in Kristallkugeln, im Gegensatz zu amerikanischen und kanadischen Metrologen, die mit einer Watt-Waage arbeiten. Was ist der Hintergrund Ihres Ansatzes?

Wenn man einen Physiker fragt, wie man das Kilogramm definieren könnte oder ganz allgemein eine Masseneinheit, dann wäre wohl das Erste, worauf er kommt, es über die Anzahl bestimmter Atome zu machen. Denn Atome eines bestimmten Isotops haben exakt die gleiche Masse; sie sind in keiner Hinsicht unterscheidbar. Die Idee ist also eigentlich trivial und kam bereits Mitte des 20. Jahrhunderts auf.

Sie wollen also ermitteln, wie schwer ein einzelnes Atom ist, da dessen Masse stets gleich bleibt. Wieso hat die Umsetzung so lange gedauert?

Man muss eine riesige Anzahl an Atomen zählen – so ungefähr 10^{25} . Doch egal wie schnell ich zähle, ich bekomme das selbst in den nächsten Jahrtausenden nicht hin. Bereits in den 1960er Jahren schmiedeten Wissen-

Zunächst müssen die Metrologen die Atome in einer aufwändig hergestellten Kugel aus reinem Silizium-28 zählen

schaftler daher den Plan, die Anzahl über die regelmäßige Kristallstruktur von Siliziumatomen zu rekonstruieren. Die Atome sind darin perfekt angeordnet und haben einen bestimmten Abstand voneinander. Und den kann man messen.

Wie wird das gemacht?

Vor ungefähr 40 Jahren entwickelte Ulrich Bonse ein Verfahren namens Verschiebeinterferometer mit Röntgenstrahlung. Vorher ließen sich mit Röntgenstrahlen nur verschiedene Kristallstrukturen vergleichen. Mit Bonses Methode hingegen konnte man den Abstand der Atome tatsächlich in der Längeneinheit Meter messen. Man war nun in der Lage, das Volumen zu berechnen, das ein einzelnes Siliziumatom im Kristall einnimmt. Teilt man das Gesamtvolumen durch diesen Wert, ergibt sich die Anzahl der Atome. Das war der erste wichtige Knackpunkt.

Das allein war aber noch nicht ausreichend, um die Atome in der Kugel zu zählen?

Nein, denn man verwendete natürlich vorkommendes Silizium. Das besteht aus drei verschiedenen Isotopen, die jeweils unterschiedliche Atommassen haben. Dementsprechend hätte man genau wissen müssen, wie viel von jeder Sorte in dem jeweiligen Kristall drin ist. Das geht aber nicht. Etwa vor 20 Jahren hat man deshalb begonnen, Siliziumisotope anzureichern und Kristalle herzustellen, die



Mit einer solchen Kristallkugel aus hoch angereichertem Silizium-28 haben Metrologen aus Deutschland, Italien und Japan die so genannte Avogadro-Konstante so genau wie nie zuvor ermittelt. Da sie exakt ein Kilogramm wiegt, soll die Kugel künftig auch für die Kalibrierung von Waagen genutzt werden.

fast ausschließlich aus dem Isotop Silizium-28 bestehen. Das klappte irgendwann auch, und vor rund neun Jahren bekamen wir die ersten Silizium-28-Kugeln.

Und damit konnten Sie schließlich die Masse eines einzelnen Silizium-28-Atoms bestimmen.

Genau. Mit Hilfe eines Lasers bestimmen wir den Durchmesser der Kugel und berechnen ihr Volumen. Dieser Wert geteilt durch das Atomvolumen ergibt die Anzahl der Atome. Über das Gewicht der gesamten Kugel errechnet sich schließlich die Masse eines einzelnen Silizium-28-Atoms. Wir haben die Unsicherheiten dieser Messung mit der Zeit immer weiter reduziert.

Damit haben Sie also auf Basis der Urkilogramm-Masse die Masse eines Atoms bestimmt. Wie ergibt sich daraus nun die Planck-Konstante, deren Wert künftig festgelegt werden soll, um das Pariser Artefakt in Ruhestand zu schicken?

Zusammen mit der Masse der Kugel lässt sich aus der Atommasse die Avogadro-Konstante berechnen (sie definiert die Anzahl der Teilchen, die in einem Mol eines Stoffes enthalten sind. *Anm. der Red.*). Nun fehlt noch die molare Planck-Konstante. Sie lässt sich über andere Messungen und Größen, die sehr genau bekannt sind, bestimmen. Die molare Planck-Konstante geteilt durch die Avogadro-Konstante ergibt schließlich die Planck-Konstante.

Worin besteht denn nun der Vorteil, die Definition des Kilogramms an die Planck-Konstante zu koppeln?

Zunächst einmal gibt es einen offensichtlichen Nachteil: Auf den ersten Blick versteht es nämlich fast niemand. Der Vorteil liegt in den elektrischen Größen, die mit der Planck-Konstanten zusammenhängen: im Quanten-Hall-Effekt, der zur Messung von Widerständen benutzt werden kann,

und im Josephson-Effekt, mit dem sich Spannungen bestimmen lassen. Die Messungen von solchen Quanteneffekten sind in der Regel sehr genau, und die Ergebnisse lassen sich gut reproduzieren.

Bis spätestens zum 1. Juli 2017 müssen die Ergebnisse für die Planck-Konstante eingereicht sein, damit das BIPM sie bei der momentan für 2018 vorgesehenen Neudefinition des Kilogramms verwenden kann. Wie führen dieses Gespräch im April. Wie weit sind Sie und Ihr Team?

Wir haben bereits einiges veröffentlicht. Aber die finale Publikation, in der dann sowohl die Avogadro- als auch die

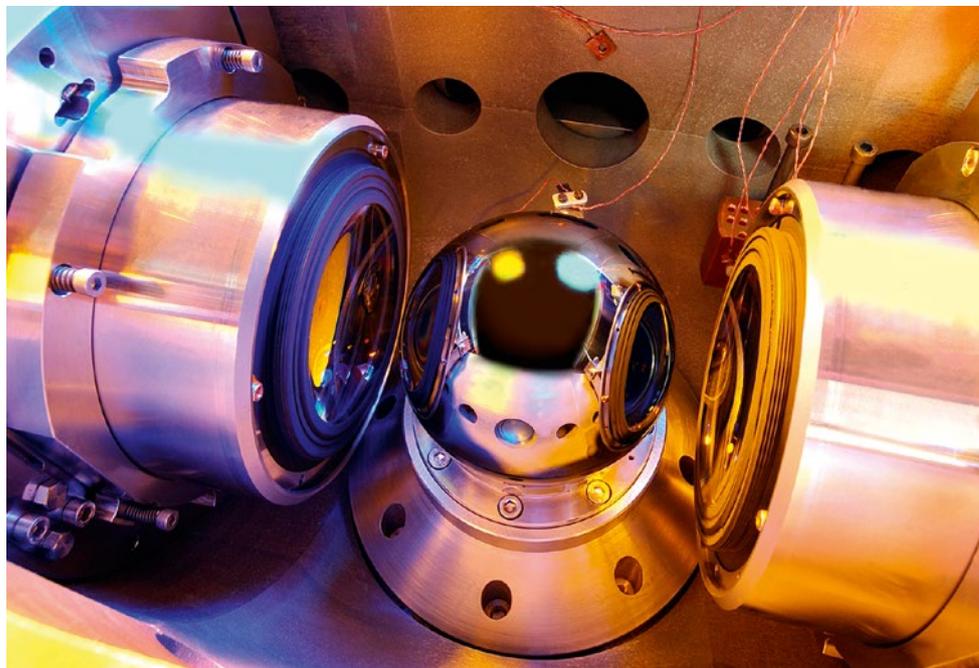
Bei der Neudefinition soll sich die Masse eines Kilogramms nicht ändern. Nur Experten würden davon etwas mitbekommen

von uns ermittelte Planck-Konstante drinstehen, haben wir noch nicht fertig. Das wird auch tatsächlich ein wenig knapp. Wir haben noch einiges zu tun.

Die Generalkonferenz für Maß und Gewichte wird im Herbst 2018 nur dann für die Neudefinition stimmen, wenn mindestens drei unabhängig ermittelte Werte der Planck-Konstanten innerhalb eines engen Toleranzbereichs übereinstimmen. Wird das gelingen?

Das ist noch nicht ganz klar. Bisher sind insbesondere die neuesten Werte noch nicht veröffentlicht. Es gibt unsere Veröffentlichungen von 2011 und 2015 vom Avo-

Mit einem so genannten Kugelinterferometer können Metrologen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig den Durchmesser der mit großem Aufwand hergestellten Siliziumkugel bis auf wenige milliardstel Meter genau vermessen.



PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB)

gadro-Team und die Werte von der Watt-Waage in Kanada. Und die passen gut zueinander. Es gibt dann noch die Zahlen vom NIST, der Metrologiebehörde der USA. Die liegen etwas abseits, haben aber etwas größere Unsicherheiten und würden deshalb noch zu unseren Werten passen.

Wenn es zu einer Neudefinition des Kilogramms kommt: Werden wir davon im Alltag etwas merken?

Nein, das ist ja genau unsere Aufgabe. Wir müssen dafür sorgen, dass die Maßeinheiten perfekt definiert und dargestellt sind, so dass der Rest der Welt sie benutzen kann. Jeder Sprung der Kilogrammmasse würde für Aufregung sorgen. Allerdings würden im Zuge der Neudefinition auch elektrische Einheiten neu definiert werden, die mit der Planck-Konstanten zusammenhängen.

So soll zum Beispiel das Ampere durch die elektrische Ladung eines Elektrons definiert werden. Davon würden Elektriker nichts mitbekommen?

Prinzipiell könnte die Änderung jeder mit einem sehr guten käuflichen Spannungsmessgerät feststellen, doch erst ab der siebten Stelle. Da wird es entsprechende Warnungen geben. Den normalen Menschen wird das aber auch nicht tangieren.

Für Metrologen wird sich allerdings etwas ändern. Ab der Kilogramm-Neudefinition müssen Massenormale mit einer Watt-Waage oder einer Siliziumkugel geeicht werden. Stehen bei Ihnen schon Käufer Schlange?

Bislang noch nicht. Die meisten metrologischen Institute haben keine Lust, eine Million Euro für eine Kugel auszugeben. Ich verstehe das nicht wirklich. Denn wenn ich etwa eine Watt-Waage aufbaue, kostet das noch mehr.

Allein die Personalmittel belaufen sich da meist auf mehr als eine Million Euro.

Eine schlichte Kugel fühlt sich für diesen Preis vielleicht doch einfach nach zu wenig an.

Vielleicht müssen wir schlicht die Neudefinition abwarten. Denn jedes metrologische Institut möchte natürlich den Wert von Maßeinheiten selbst bestimmen können – zumindest die größeren Einrichtungen. Das ist einfach eine Prestige-Sache. Im Fall des Kilogramms versuchen es inzwischen viele Institute über die Watt-Waage. Aber es gibt bislang nur zwei Exemplare, die funktionieren. Und manches Institut ist seit 10, 20 Jahren dabei, ein solches Gerät zu bauen.

Eine Ihrer Kugeln wäre also die einfachere Lösung? Ist die Handhabung so aufwändig hergestellter Kugeln nicht etwas heikel?

Silizium ist ein sehr harter Kristall und eigentlich sehr unempfindlich. Doch in Anbetracht der Tatsache, dass eine Kugel eine Million Euro wert ist, gehen wir sehr vorsichtig damit um. Allerdings bin ich immer wieder erstaunt, dass es Leute schaffen, sie zu zerkratzen. ◀

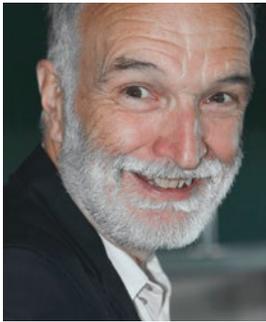
Die Fragen stellte **Janosch Deeg**. Er ist Physiker und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.



QUELLE

Fujii, K. et al.: Realization of the Kilogram by the XRCM Method. In: Metrologia 53, S. A19–A45, 2016

SCHLICHTING! LICHTBAHNEN ÜBER DEN WELLEN



Spiegelungen auf unruhigen Gewässern führen manchmal zu seltsamen hellen und dunklen Streifen.

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/1453307



Auf dem Wasser entstehen helle Streifen, indem die jeweils passend geneigten Oberflächen die Lücken zwischen den Bäumen und die Baumkronen spiegeln. Im Vordergrund des Fotos erreichen die Reflexionen den Betrachter nicht mehr, und man sieht nur noch das Grau des Himmels. Hier könnte die leicht dunklere Tönung der Wellenflanken daher stammen, dass sie das Licht weniger intensiv zurückwerfen, weil es steiler einfällt und daher stärker absorbiert wird.

H. JOACHIM SCHLICHTING

► Eine Wasseroberfläche sieht nie einheitlich aus. Durch Wellenbewegungen changieren die Farben und die Muster. Lässt man sich etwas intensiver auf die Ansichten ein, entschlüsselt man bald einige auf den ersten Blick rätselhafte Phänomene.

Wie auch immer das gespiegelte Bild aussieht, es entsteht stets durch den Himmel und die ufernahe Umgebung – so viel ist klar. Mit Hilfe des Reflexionsgesetzes wird man meist schnell Zuordnungen finden und sich darüber freuen, dass alles seine Richtigkeit hat. Kommen aber windbewegte Wellen hinzu und laufen diese obendrein vorwiegend auf den Beobachter zu, erschließen sich die entstehenden Strukturen oft nicht sofort. Ein solches Bild bietet etwa manchmal ein unruhiger See (siehe Foto unten links).

Hier zeichnen sich die Wellen ab, wenn sie an ihren Flanken das Grau des Himmels reflektieren und im Bereich der Kämme das spärliche Licht der ufernahen dunklen Bäume (siehe Illustration S. 60). Helle Längs-

streifen, die vom Horizont her in Richtung des Betrachters zeigen, kann man rasch den Lücken zwischen den Bäumen zurechnen. Einzig gibt zu denken, um wie viel weiter sie sich ins Wasser erstrecken. Bewegt man sich zudem am Ufer entlang, so scheinen die Streifen mitzulaufen und bleiben auf den Beobachter gerichtet.

Das erinnert an ein anderes Phänomen, das »Schwert der Sonne« im Meer oder auf überfrorenen Schnee-

flächen (siehe **Spektrum** März 2017, S. 54). Dieses Ensemble von Lichtreflexen entsteht an allen passend ausgerichteten Stellen, welche die Strahlen der tief stehenden Sonne ins Auge

des Beobachters werfen können. Auf einer unruhigen, spiegelnden Fläche gibt es solche Ebenen überall. Im vorliegenden Fall nehmen die hellen Partien zwischen den dunklen Bäumen die Rolle der Sonne ein. Daher gibt es nicht nur eine Lichtbahn, sondern viele.

Es ist umso schwieriger, diesen Sachverhalt sofort zu erkennen, wenn wie in unserem Beispiel ein Wasserstreifen,

Die Verbindungen von simplen Gesetzen können sehr verwickelte Erscheinungen gewähren

Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

Seitlicher Wind kann das Wellenmuster stören und die geordnete Reflexion des Hintergrunds streifenweise unterbrechen.

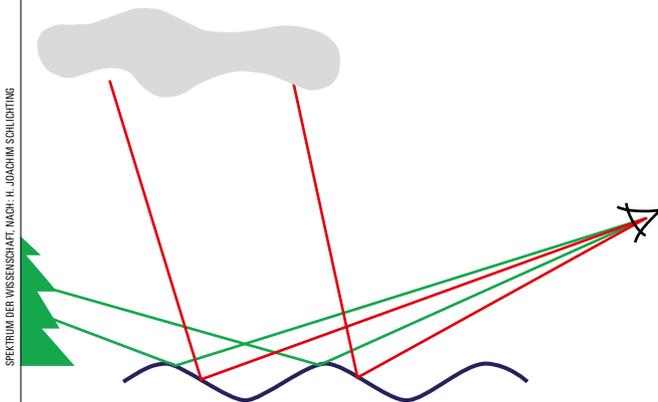


H. JOACHIM SCHLICHTING



In einer Lichtbahn, die einheitlich über den ganzen Fluss Arno in Florenz geht, verursachen menschliche Schattengeber spitz hervorstehende Aussparungen.

H. JOACHIM SCHLICHTING



Die dem Beobachter zugewandten Wellenflanken werfen vorwiegend das Himmelslicht ins Auge des Betrachters. Im Bereich der Wellenberge wird eher das horizontnahe Licht reflektiert.

fen parallel zum gegenüberliegenden Ufer hell getönt ist. Hier hat eine Strömung das Wasser aufgeraut, und die chaotische Wellenbewegung vermischt das reflektierte Umgebungslicht zu einem einheitlichen Grau. In anderen Fällen bringt Wind das Bild auf vergleichbare Weise durcheinander.

Solche lokalen Störungen der Wasseroberfläche durch einzelne Böen können mehrere helle Querstreifen hinterlassen, die senkrecht zu den »Lichtschwertern« verlaufen (siehe Foto S. 59). So bekommt man insgesamt ein nahezu kariertes Muster zu Gesicht. Auf der linken Seite des Kanals, an dem sich dieses Bild ergab, wachsen ebenfalls Bäume. Durch Lücken dazwischen dürfte Wind geströmt sein und den normalen Wellenverlauf gestört haben.

Die Lichtbahnen in dem Beispiel stammen im Unterschied zur ersten Erscheinung nicht von Abständen zwischen Bäumen, sondern von Lichtbündeln, die durch Löcher in einer belaubten Krone fallen. Das wellige Wasser verlängert sie ebenfalls nach Art des Schwerts der Sonne

zu hellen Lichtbahnen. Komplementär dazu erzeugt das Blattwerk dunkle Streifen.

Lücken in der horizontnahen Kontur führen also zu ganz ähnlichen Erscheinungen, wie man sie von eigenständigen Lichtquellen kennt. Das macht sich auf umgekehrte Weise ebenfalls bemerkbar, wenn einzelne Schattengeber eine sonst einheitlich helle Umgebung unterbrechen.

Sobald eine breite Lichtspur fast das gesamte Gewässer bedeckt, wird sie nicht mehr als solche wahrgenommen. Indirekt erkennt man sie jedoch, wenn ein Objekt das Licht ausblendet und komplementär eine Art Schattenbahn ausbildet.

Lücken in der horizontnahen Kontur wirken ganz ähnlich wie eigenständige Lichtquellen

Dieses Phänomen bereitete mir am Fluss Arno in Florenz einmal Kopfzerbrechen, als das Wasser großflächig den rötlichen Abendhimmel reflektierte (siehe Foto links). Am Rand des Bereichs, den die Bögen einer Brücke abdunkelten, waren rätselhaft dunkle Stacheln zu sehen. Sie bewegten sich, wurden also wohl durch hin- und herlaufende Fußgänger hervorgerufen. In der Dämmerung waren die Menschen selbst kaum noch vor dem fernen Hintergrund dunkler Bäume auszumachen. Die Oberkörper der Passanten erschienen nur einen Bruchteil so groß wie deren lange, spitz zulaufende Schatten auf dem welligen Wasser.

Müsste nicht auch die reflektierte Abbildung der Brücke selbst wesentlich stärker in die Länge gezogen erscheinen? Normalerweise würde sie das. Aber die Lichtbahn hinter den Bögen greift gewissermaßen unter diesen hindurch: Wegen der Öffnungen sehen wir auf Grund der Welligkeit des Wassers Licht von Stellen kommen, die bei einer ebenen Reflexionsfläche dunkel blieben. Das staucht den horizontal verlaufenden Schatten des Überbaus wieder zusammen.

Die Beispiele zeigen: Einfache physikalische Phänomene wie das Schwert der Sonne treten in einem geringfügig veränderten Kontext manchmal auf viel komplexere und subtilere Weise erneut in Erscheinung.

LITERATURTIPPS

Schlichting, H. J.: Das Schwert der Sonne – Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. Teil 1: Überblick und Phänomene. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 51/7, S. 387–397, 1998

Schlichting, H. J.: Das Schwert der Sonne – Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. Teil 2: Mathematische Modellierung und Simulation. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 52/6, S. 330–336, 1999

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, Robert Gast, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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. Eva Gottfried, Dr. Claudia Hecker, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Katja Mellenthin, Dr. Andreas Nestke, Elke Reinecke, Dr. Michael Springer

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 38 vom 1.1. 2017.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2017 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson,
Executive Vice President: Michael Florek

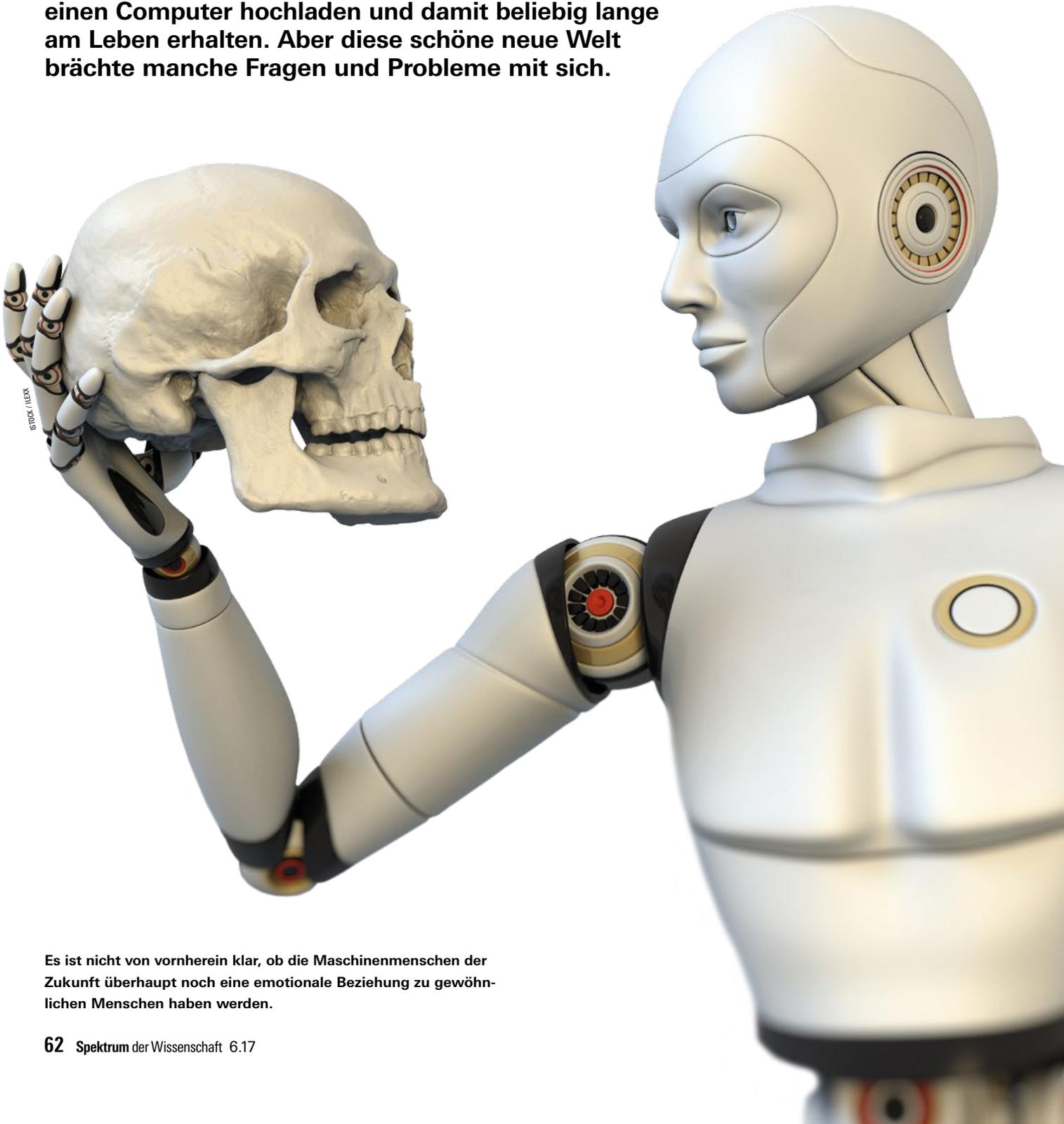


Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



TRANSHUMANISMUS WOLLEN WIR EWIG LEBEN?

SERIE: DIE ZUKUNFT DER MENSCHHEIT Vielleicht können wir tatsächlich irgendwann unser Bewusstsein in einen Computer hochladen und damit beliebig lange am Leben erhalten. Aber diese schöne neue Welt brächte manche Fragen und Probleme mit sich.



Es ist nicht von vornherein klar, ob die Maschinenmenschen der Zukunft überhaupt noch eine emotionale Beziehung zu gewöhnlichen Menschen haben werden.



Hillary Rosner ist Wissenschaftsjournalistin in Boulder (Colorado).

► spektrum.de/artikel/1453309

► Auf einem Hochzeitsempfang vor ein paar Monaten kam plötzlich das Thema Unsterblichkeit auf. Ich fragte ein hochakademisches Pärchen aus San Francisco, Eltern zweier junger Töchter: »Angenommen, ihr könntet schon morgen euer Gehirn auf einen Computer hochladen und dann ewig als Mischwesen aus Mensch und Maschine leben – würdet ihr das tun?« Der Mann,

ein 42-jähriger promovierter Mediziner, sagte auf der Stelle Ja: Seine gegenwärtigen Forschungsarbeiten würden erst in den nächsten Jahrhunderten Früchte tragen, und das würde er gerne miterleben. »Außerdem wüsste ich zu gerne, wie die Welt in 10 000 Jahren ist.« Seine 39 Jahre alte Ehefrau, Doktorin der Kunstgeschichte, antwortete ebenso eindeutig: »Auf gar keinen Fall. Der Tod gehört zum Leben. Ich will wissen, wie das Sterben ist.«

Es hätte mich interessiert, ob die Entscheidung seiner Frau den Mann nachdenklich machte, aber ich ließ das Thema lieber diplomatisch fallen. Dennoch – die Frage ist alles andere als esoterisch. Immerhin gehen einige Zukunftsforscher davon aus, dass wir auf eine postbiologische Welt hinsteuern, in der sich der Tod erledigt hat oder zumindest unter unserer Kontrolle befindet. Wenn wir solchen Behauptungen Glauben schenken, werden früher oder später ungeahnte Entscheidungen auf uns zukommen.

Die ausführlichste Vorstellung einer derartigen transzendenten Zukunft finden wir bei dem Erfinder und Zukunftsforscher Ray Kurzweil, hauptberuflich Leiter der technischen Entwicklung bei Google. Im Jahr 2005 erschien sein Bestseller »The Singularity is Near« (»Menschheit 2.0: Die Singularität naht«), in welchem er voraussagte, die künstliche Intelligenz werde bald »das gesamte menschliche Wissen und Können umfassen«. Durch technische Entwicklungen wie Hirnscans in Nanogenauigkeit werde es letztendlich möglich sein, »unsere Intelligenz, Persönlichkeit und Fähigkeiten schrittweise auf eine nichtbiologische Ebene zu überführen«. Bis dahin würden Milliarden von Nanobots in unserem Körper »Krankheitskeime zerstören, Schäden reparieren, Giftstoffe neutralisieren sowie jede Menge anderer Aktionen durchführen, die unsere Gesundheit erhalten, mit der Folge, dass wir unbegrenzt leben, ohne zu altern.« Obendrein erschaffen die Nanobots »eine virtuelle Realität, indem sie sich in unser Nervensystem einnisten«. Wir werden zunehmend in einer virtuellen Welt leben, die in allem der herkömmlichen Welt (der »realen Realität«) gleich ist – nur bunter und ereignisreicher.

Wäre es wirklich möglich, das Gehirn Atom für Atom getreulich abzubilden?

Auf Grund der Fortschritte in Genetik, Nanotechnologie und Robotik sowie allgemein der exponentiell ansteigenden Geschwindigkeit des technischen Wandels prognostiziert Kurzweil für das Jahr 2045 ein Ereignis, das er die »Singularität« nennt. Ungefähr zu diesem Zeitpunkt werde die nichtbiologische Intelligenz ihr menschliches Gegenstück so weit übersteigen, dass »eine tief greifende und revolutionäre Transformation der menschlichen Fähigkeiten« eintritt. Auch heute halten noch eine Hand voll von »Singularianern« an diesem Datum fest und fühlen sich bestätigt durch den jüngsten Erfolg der künstlichen Intelligenz, das »Deep Learning« (**Spektrum** September 2014, S. 62).

Den mathematischen Begriff der Singularität hat sich Kurzweil wohl bei den Astrophysikern ausgeborgt, die mit diesem Wort so etwas wie den Urknall beschreiben: einen Zeitpunkt, zu dem entscheidende Größen unendlich wer-



den oder nicht mehr definiert sind, mit der Folge, dass nichts mehr so ist wie zuvor. Diesem vollmundigen Anspruch begegnen die meisten Wissenschaftler mit Skepsis. Wenn wir unser Schicksal in einer Existenz als Maschinenwesen, als »Cyborg«, finden sollten, dann jedenfalls nicht so bald. So führt Sebastian Seung, Professor am Princeton Neuroscience Institute, Gründe dafür an, dass ein »Uploading« eines Hirns grundsätzlich unmöglich sei. Immerhin besteht ein Gehirn aus rund 100 Milliarden von Neuronen, verbunden durch die 10000-fache Menge an Synapsen; die Gesamtheit dieser Verknüpfungen (das Konnektom) macht nach der Überzeugung einiger Neurowissenschaftler unsere Identität aus. Das ist eine ganze Menge von Verbindungen, die man abbilden und hochladen müsste, und ein überaus weiter Weg vom heutigen Stand der Technik bis zu der geforderten Abbildungsqualität, selbst wenn man sich Kurzweils Vorstellungen von der Geschwindigkeit des technischen Fortschritts zu eigen macht.

Und das Konnektom ist vielleicht nur der Anfang. Neurone können auch außerhalb der Synapsen aufeinander Einfluss nehmen, und diese »extrasynaptischen Interaktionen« sind möglicherweise von entscheidender Bedeutung für die Hirnfunktion. In seinem 2012 erschienenen Buch »Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are« (»Das Konnektom. Erklärt der Schaltplan des Gehirns unser Ich?«) argumentiert Seung, dass in diesem Fall eine Gehirnübertragung auf ein digitales Medium, ein »brain upload«, nicht nur jede Verbindung und jedes Neuron abbilden müsste, sondern letztendlich jedes Atom. Die dafür benötigte Computerkapazität sei »völlig außer jeder Reichweite, es sei denn, unsere fernen Nachfahren überleben galaktische Zeitspannen« (siehe den Artikel S. 30).

Dennoch wirft schon die bloße Möglichkeit einer Cyborg-Zukunft, so fern oder unwahrscheinlich sie auch sein mag, so viele Fragen auf, dass Philosophen sich ernsthaft mit dem Thema beschäftigen. Selbst wenn unsere Technologien niemals die Visionen Kurzweils in vollem Umfang erreichen, so werden uns doch einige Weiterentwicklungen unseres Geistes und unseres Körpers zumindest ein Stück weit auf diesem Weg voranbringen – und damit die Frage auslösen, was es ist, das uns menschlich macht.

David Chalmers, Philosoph und einer der Direktoren des Center for Mind, Brain and Consciousness der New York University, hat darüber spekuliert, wie ein Gehirn so »hochgeladen« werden könnte, dass die eigene Identität bewahrt bleibt. Der 51-jährige Chalmers glaubt nicht daran, dass er selbst die Gelegenheit zum ewigen Leben bekommen wird, wohl aber, dass »so etwas auf jeden Fall zu einer praktischen Möglichkeit werden wird – irgendwann im nächsten Jahrhundert oder so«.

Wären die höher entwickelten Wesen bereit, sich noch um die gewöhnlichen Menschen zu kümmern?

Ronald Sandler, Umweltethiker und Vorsitzender des Instituts für Philosophie und Religion der Northeastern University, meint, dass die Diskussion über unsere Cyborg-Zukunft uns »eine Menge von Problemen deutlich vor Augen führt. Das Nachdenken über den fernen Grenzfall kann Erkenntnisse über Fragen der nahen Zukunft bringen.«

Und wenn tatsächlich auch nur die entfernteste Möglichkeit besteht, dass heute lebende Menschen irgendwann die Wahl zwischen dem Tod und der Unsterblichkeit als Cyborg haben, dann sollte das Nachdenken lieber jetzt beginnen als später. Über die Frage der Machbarkeit hinaus stellen sich nämlich einige grundsätzliche Fragen: Ist ein solches Maschinenleben überhaupt erstrebenswert? Wenn mein Gehirn und mein Bewusstsein in einen Cyborg transferiert werden, wer wäre ich dann genau? Würde ich immer noch meine Familie und meine Freunde lieben? Würden sie mich lieben? Wäre ich überhaupt noch menschlich?

Andere Fragen betreffen die Ethik. Würde die »Goldene Regel« (»Behandle andere so, wie du selbst behandelt werden willst«) in einer posthumanen Welt weiter gelten? Sandler argumentierte vor einigen Jahren in der Arbeit »Transhumanism, Human Dignity and Moral Status«, den technisch verbesserten Supermensch obliege eine moralische Verpflichtung gegenüber Normalmensch. »Auch wer in irgendeiner Form höher entwickelt ist, muss sich weiter um mich kümmern«, sagte er zu mir. Dagegen lässt sich schwer etwas einwenden – aber noch schwerer ist es vorstellbar, dass dies wirklich geschieht.

Andere Philosophen machen sich für »moral enhancement« stark: Mit Hilfe der modernen Biomedizin soll unsere Prinzipientreue auf eine höhere Stufe gehoben werden. Wenn wir dereinst mit enormer Intelligenz und Macht ausgestattet sind, kommt es entscheidend darauf an, dass nicht ein bössartiger Psychopath diese neuen Mittel nutzt. Unser wissenschaftlicher Fortschritt »versetzt uns immer

SERIE

Die Zukunft der Menschheit

Teil 1: Januar 2017

Eine vielschichtige Angelegenheit
von Jan Zalasiewicz

Teil 2: Februar 2017

Der Methusalem-Effekt
von Bill Gifford

Teil 3: März 2017

Reiche Welt – arme Welt
von Mara Hvistendahl

Teil 4: April 2017

Keimbahntherapie durch die Hintertür
von Stephen S. Hall

Teil 5: Mai 2017

Gespaltene Gesellschaft
von Angus Deaton

Teil 6: Juni 2017

Wollen wir ewig leben?
von Hillary Rosner

Apokalypse oder Aufbruch?
von David Grinspoon

mehr in die Lage, direkt die biologischen oder physiologischen Grundlagen der menschlichen Motivation zu beeinflussen, sei es durch Drogen, durch genetische Selektion, durch Gentechnik oder durch externe Geräte, die auf das Gehirn oder den Lernprozess einwirken«, schrieben vor Kurzem die Philosophen Julian Savulescu und Ingmar Persson. »Wir könnten diese Techniken nutzen, um die moralischen und psychologischen Unzulänglichkeiten zu überwinden, unter denen die menschliche Art leidet.«

James Hughes, Bioethiker an der University of Massachusetts in Boston, veröffentlichte genau dazu im Mai 2016 einen Gastkommentar in der »Washington Post«. In »Soon We'll Use Science to Make People More Moral« befürwortet er eine moralische Aufbesserung – allerdings auf freiwilliger Basis. »Mit Hilfe der Wissenschaft werden wir unsere eigenen Wege zu technisch erzeugter Glückseligkeit und Tugendhaftigkeit finden.« Der 55-jährige frühere buddhistische Mönch leitet auch das Institute for Ethics and Emerging Technologies, eine fortschrittliche transhumanistische Denkwerkstatt, und gestand mir in unserem Gespräch, dass er gerne lange genug leben würde, um Erleuchtung zu finden.

Ein ewiges Leben, in welcher Form auch immer, würde nicht nur unsere Beziehungen untereinander ändern, sondern auch die zu unserer Umwelt. Wenn es uns alle nur noch virtuell gibt, was kümmert uns dann noch die natürliche Welt? Und würde es ihr dann besser oder schlechter gehen?

Was bleibt vom Umweltbewusstsein, wenn wir auf unsere Umwelt nicht mehr angewiesen sind?

Sandler wies mir gegenüber darauf hin, dass die Singularität nur ein Endzustand ist, dem ein ungeheurer technologischer Wandel vorausgeht; und »nichts ändert unsere Beziehung zur Natur so schnell und nachhaltig wie die Technologie«. Wenn wir erst fähig sind, menschliches Bewusstsein hochzuladen und mühelos zwischen der virtuellen und der gewöhnlichen Realität hin und her zu wechseln, werden wir fast alles andere schon in maßgeblicher Weise technisch gestaltet haben. »Bis zur Singularität hätte sich unsere Beziehung zur Welt schon längst radikal verändert.«

Wir geben es ungern zu, aber in unserem derzeitigen sterblichen Zustand sind wir in hohem Maße abhängig von den uns umgebenden natürlichen Systemen – und verletzbar durch sie. Das würde sich in der hier angedachten zukünftigen Welt radikal ändern. Wenn wir keine Atemluft benötigen, wozu sich dann um Luftverschmutzung sorgen? Und sobald wir nicht mehr auf Nahrung angewiesen sind, fehlt der Bezug zu dem Boden, auf dem sie wächst.

In einer Welt, in der das Reale und das Virtuelle ununterscheidbar geworden sind, hätten wir vielleicht von einer digitalen Bergwanderung genauso viel wie von einer echten. Damit würde auch unsere Beziehung zur realen Umwelt nicht länger auf physikalischen Reizen, auf Fühlen und Berühren beruhen. Ein so grundlegender Wandel hätte ebenso radikale Veränderungen in unserem Gehirn zur Folge – dem echten wie dem virtuellen. Bisherige

AUF EINEN BLICK MENSCH-MASCHINE-MISCHWESEN

- 1** Nach Auffassung einiger Forscher wird es in der Zukunft möglich sein, das Bewusstsein eines Menschen vollständig in einen Computer zu transferieren.
- 2** Diese »neuen Menschen« würden in größeren Zeiträumen denken, ihrer natürlichen Umwelt weniger Bedeutung beimessen und persönliche Erinnerungen geringer schätzen als ein kollektives Gedächtnis.
- 3** Hoch problematisch ist die Aussicht, dass man sich – mehr oder weniger freiwillig – zu einem moralisch höher stehenden Menschen umprogrammieren lassen könnte.

Forschungen zeigen, dass die Interaktion mit unserer Umwelt uns tief greifend verändert – und zwar zum Besseren. Vielleicht ist die Verbindung zur Natur, und sei es die unbewusste, ein fundamentaler Bestandteil des Menschseins.

Wenn wir von der Natur nicht mehr abhängig sind und auch nicht mehr körperlich mit ihr in Kontakt treten können, dann »wandelt sich das Umweltbewusstsein immer stärker zur Verantwortung für die Natur um ihrer selbst willen«, sagt Sandler. Unser Vermögen, Umweltprobleme zu lösen – etwa das Klima zu beeinflussen –, wird weit über dem liegen, was wir uns heute vorstellen können. Aber werden wir weiterhin einen Wert in der Natur an sich sehen? Sollte das so sein, dann wird dies der belebten Welt zugutekommen. Falls nicht, wird es anderen Arten und den Ökosystemen, auf die sie angewiesen sind, wahrscheinlich schlecht ergehen.

Unsere Beziehung zur Umwelt hängt auch davon ab, in welchen Zeiträumen wir denken. Aus einer geologischen Perspektive mag das gegenwärtige massenhafte Artensterben keine Rolle spielen – bezogen auf unsere eigene Lebensspanne aber schon. Wie wird eine extrem verlängerte Lebenszeit »die Perspektive verändern, aus der heraus wir Fragen stellen und unsere nichtmenschliche Umwelt beurteilen? Der zeitliche Maßstab ist tatsächlich entscheidend dafür, was eine vernünftige Antwort ist«, so Sandler. Werden wir uns stärker um die Umwelt kümmern, weil wir sie so lange um uns haben werden? Oder eher weniger, weil wir eine langfristige, eher geologische Sichtweise einnehmen? Sinders Resümee lautet: »Es ist fast unmöglich sich vorzustellen, wie es sein wird. Aber mit Sicherheit wird unser Blickwinkel sehr, sehr anders sein.«

Wenn Sie lang genug mit Fachleuten über solche Themen reden, geht es Ihnen wie Alice im Wunderland nach dem Fall in den Kaninchenbau. Sie erleben sich selbst dabei, wie Sie anscheinend normale Unterhaltungen über absurde Dinge führen. So sagte Hughes zu mir an einem Punkt unseres Gesprächs: »Wenn es eine

Gentherapie gäbe, die Menschen mit X-Men-Fähigkeiten ausstattet – Laserstrahlen aus ihren Augen zu schießen oder die Kontrolle über den Geist anderer zu übernehmen«, dann müssten diese Menschen seiner Meinung nach zu einer Schulung verpflichtet werden und eine Abschlussprüfung machen. Schließlich kann man mit Laseraugen wesentlich mehr Schaden anrichten als mit einem Auto.

»Ist das jetzt nur ein Beispiel zum Argumentieren, oder glauben Sie tatsächlich, dass so etwas kommen wird?«,



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

frage ich. Hughes antwortet ausweichend. »Die meisten Transhumanisten versuchen, Neulinge nicht zu sehr zu verschrecken. Aber wenn Sie erst einmal Schockstufe 4 hinter sich haben, können Sie darüber reden, was ist, wenn wir alle nur noch als Nanobots existieren.«

Worüber werden wir uns dann noch Sorgen machen? Schließlich ist Angst unbestreitbar eines der Gefühle, die das Menschsein ausmachen. Erübrigt sie sich durch Unsterblichkeit? Wenn ich mir keine Gedanken darum machen muss, wie ich gesund bleibe, wie ich meine Rechnungen bezahle und wo ich bleibe, wenn ich zu alt und gebrechlich bin, um durch die Welt zu reisen und Artikel zu schreiben: Wäre ich dann immer noch ich selbst? Oder wäre ich einfach ein heiter-ausgeglichener, selbstzufriedener ... Roboter? Und wenn wir schon einmal dabei sind: Welche Wünsche hätte ich an das Leben? Würde ich meine gegenwärtigen Ziele aus dem Blick verlieren? Wenn ich ewig lebe, dann kann der große Roman, der von mir geschrieben werden will, doch sicherlich auch noch ein Jahrhundert warten, oder?

Und wenn ich kein Cyborg werden will: Liegt das nur an meinem unterentwickelten Bewusstsein?

Werde ich immer noch ich sein? Chalmers glaubt, das werde »eine extrem dringende praktische, nicht nur philosophische Frage« werden.

Dem Bauchgefühl widerspricht die Vorstellung, dass ich ich selbst bleiben würde, wenn mein Gehirn auf einen Computer übertragen wird – sogar wenn dies wirklich Neuron für Neuron geschieht, wie es Chalmers beschreibt: erst ein Prozent Silizium, dann fünf, dann zehn und so weiter, bis die 100 Prozent erreicht sind. Es ist die alte Frage über das Schiff des Theseus – wenn es Bohle für Bohle ersetzt wird, bis jedes einzelne Brett aus neuem, stärkerem Holz besteht, ist es am Ende noch dasselbe Schiff? Oder doch nicht – und an welchem Punkt kippt die Waage?

»Wenn Sie nur lang genug leben und entsprechend viele Veränderungen durchmachen, dann kommt es im Endeffekt nicht mehr darauf an, ob Sie noch etwas länger gelebt haben«, sagt Hughes. »Bin ich wirklich noch die Person, die ich als Fünfjähriger war? Sollte ich noch 5000 Jahre leben, bin ich dann immer noch derselbe Mensch wie heute? In der digitalen Zukunft teilen wir all unsere Erinnerungen mit unseren Mitmenschen. Die persönliche Identität und deren Fortschreibung sind dann nicht mehr so wichtig.« Das klingt beunruhigend.

Ganz abgesehen von der utopischen Rhetorik der Singularianer schmeckt das Ganze nach Fatalismus. Eigentlich haben wir keine Wahl: Entweder wir verschmelzen mit einer Maschine, oder wir verschwinden – oder Schlimmeres. Was ist, wenn ich kein Cyborg werden will? Kurzweil würde entgegnen, es sei nur mein im momentanen Zustand noch mangelhaftes biologisches Gehirn, das den Reiz und das Potenzial einer solchen Zukunft nicht zu erkennen vermöchte. Jegliche Art von Körper würde mir zur Verfügung stehen, jede Form von Erfahrung innerhalb der virtuellen Realität, unbegrenzte Möglichkeiten des kreativen Ausdrucks, die Chance, tatsächlich den Weltraum zu besiedeln – dagegen wirke meine derzeitige menschliche Existenz fast lächerlich trivial. Und wenn wir schon von Fatalismus reden: Was ist fatalistischer als der sichere Tod?

Nach Meinung einiger Ethiker beruht das menschliche Glück geradezu auf der Tatsache, dass wir verletzbare, voneinander abhängige Wesen sind. Wie würden wir in einer Mensch-Maschine-Zukunft Werte und einen Sinn in unserem Leben finden?

»Für mich besteht der Kern des menschlichen Daseins nicht in unseren Grenzen, ... sondern in unserer Fähigkeit, diese Grenzen zu überwinden«, schreibt Kurzweil. Es ist eine verlockende Sicht der Dinge. Der Tod war immer eine fundamentale Begrenzung für uns; macht uns also seine Überwindung eventuell sogar zutiefst menschlich?

Aber ich bezweifle, dass unsere Menschlichkeit bestehen bleibt, wenn wir die Grenzen des Todes erst einmal überwunden haben. Es ist nicht der Tod an sich, der uns definiert – alle lebenden Wesen sterben. Aber sicherlich sind unser Bewusstsein vom Tod sowie das daraus folgende Bedürfnis, der begrenzten Zeit bis zum Tod einen Sinn zu geben, ein Teil des menschlichen Geistes. ◀

QUELLEN

Hughes, J.: Citizen Cyborg. Why Democratic Societies Must Respond to the Redesigned Human of the Future. Basic Books, New York 2004

Kurzweil, R.: Menschheit 2.0. Die Singularität naht. 2. Auflage, Lola Books, Berlin 2014

Sandler, R., Basl, J.: Transhumanism, Human Dignity, and Moral Status. In: The American Journal of Bioethics 10, S. 63–66, 2010

Seung, S.: Das Konnektom. Erklärt der Schaltplan des Gehirns unser Ich? Springer Spektrum, Heidelberg 2013

Zimmer, C.: Brain Cuttings. Fifteen Journeys Through the Mind. E-Book, Scott & Nix, New York 2010



ANTHROPOZÄN APOKALYPSE ODER AUFBRUCH?

SERIE: DIE ZUKUNFT DER MENSCHHEIT Der Mensch hat begonnen, das System Erde zu dominieren. Führt er es gegen die Wand, oder läutet er ein erdgeschichtliches Zeitalter vernunftbegabten Lebens ein?



David Grinspoon ist leitender Wissenschaftler am Planetary Science Institute in Tucson, Arizona.

► spektrum.de/artikel/1420977

Derzeit debattieren Geowissenschaftler darüber, ob man das Anthropozän als erdgeschichtlichen Zeitabschnitt einführen kann und falls ja, wann es begann (siehe **Spektrum** Januar 2017, S. 12). Als Astrobiologe, der sich mit Wendepunkten der Erdgeschichte befasst, interessiert mich aber eine andere Frage mindestens ebenso brennend: Wann und wie wird das Anthropozän enden?

Epochen sind relativ kurze geochronologische Zeitabschnitte – ganz im Gegensatz zu den Äonen, den höchstrangigen Einheiten auf der Skala der Erdgeschichte, die hunderte Millionen bis Milliarden Jahre währen. An den Übergängen zwischen Äonen finden wirklich tief greifende Veränderungen statt. Der erste ereignete sich vor etwa vier Milliarden Jahren, als das glühend heiße Hadaikum vom kühleren, ruhigeren Archaikum abgelöst wurde, in dem die ersten Lebensformen entstanden. Vor rund zweieinhalb Milliarden Jahren erfolgte dann der Wandel vom Archai-

kum zum Proterozoikum, das enorm zerstörerische Mikroorganismen hervorbrachte, die den Planeten mit toxischem Sauerstoff fluteten. Dies vergiftete einen Großteil der Biosphäre, führte aber auch zur Entstehung komplexen, vielzelligen Lebens – und läutete somit vor 542 Millionen Jahren den derzeitigen Äon, das Phanerozoikum, ein.

Mit dem Beginn des Anthropozäns könnten wir nun vor einer weiteren radikalen Veränderung stehen: Ein fünfter Äon könnte dadurch gekennzeichnet sein, dass kognitiv gesteuerte Vorgänge – Gedanken, geplante Handlungen und schöpferische Prozesse – das System Erde maßgeblich beeinflussen. Vielleicht sollten wir den neuen Äon Sapiezoikum (»Zeitalter des vernunftbegabten Lebens«) nennen. Denn zum ersten Mal in der Erdgeschichte formt eine Kraft den Planeten, die sich ihrer selbst bewusst ist.

Doch aus einer Epoche wird erst dann ein Äon, wenn sie hunderte Jahrmillionen oder noch länger dauert. Wird die Menschheit so lange überleben?

Die dringlichsten Herausforderungen dieses Jahrhunderts lauten, die Bevölkerungszahlen zu stabilisieren oder eine hinreichende Energie- und Lebensmittelversorgung zu sichern, ohne die Biosphäre zu zerstören. Ohne jeden Zweifel müssen und werden wir uns von fossilen Brennstoffen verabschieden. Das Tempo, das wir dabei vorlegen, wird jedoch darüber entscheiden, ob die Verwerfungen des Klimawandels weniger stark, genauso schlimm

AUF EINEN BLICK WIR HABEN ES IN DER HAND

- 1** Das Anthropozän – der Zeitabschnitt, in dem der Mensch die Erdgeschichte prägt – hat nach Ansicht zahlreicher Forscher begonnen. Die Frage ist, wie lange es andauern wird.
- 2** Wenn wir nicht aussterben wollen, müssen wir existenzielle Herausforderungen bewältigen: das Bevölkerungswachstum, Ressourcenknappheit, Klimaveränderungen, die Gefahr von Meteoriteneinschlägen.
- 3** Das Anthropozän könnte einen neuen Äon einläuten – das »Sapiezoikum«, in dem kollektive Intelligenz das System Erde stabilisiert und die Biosphäre sich möglicherweise in den Kosmos ausdehnt.

oder sogar noch drastischer ausfallen als jene der Kriege, Revolutionen und Hungersnöte im 20. Jahrhundert.

Der anthropogene Klimawandel führt uns vor Augen, dass unser Handeln über die Zukunft der Erde entscheidet – ob wir das wollen oder nicht. Aber er ist nicht die einzige große Herausforderung, der wir uns stellen müssen. In den kommenden Jahrhunderten werden wir effektive Abwehrsysteme gegen Asteroiden und Kometen entwickeln müssen. Schon ein viel kleineres Objekt als der Zehn-Kilometer-Brocken, der den Dinosauriern den Rest gab, könnte die menschliche Zivilisation vernichten. In naher Zukunft werden wir die meisten potenziell gefährlichen Asteroiden katalogisiert haben, welche die Erdbahn kreuzen, was uns Prognosesicherheit verschafft. Ein Komet jedoch kann jederzeit ohne Vorwarnung vom Rand des Sonnensystems heranschießen. Wir sollten darauf vorbereitet sein, einen solchen Eindringling von uns wegzulenken.

Langfristig, auf Zeitskalen von zehntausenden Jahren, müssen wir lernen, mit natürlichen Klimaveränderungen umzugehen, gegen die der anthropogene Klimawandel harmlos erscheint. Die Zivilisation ist in einem Zeitfenster entstanden, das im Grunde einen 10 000 Jahre langen Sommer darstellte – eine Periode ungewöhnlich warmen und stabilen Klimas. Sie wird nicht ewig anhalten, es sei denn, wir sorgen dafür. Über Jahrzehntausende bis Jahrtausende hinweg durchläuft unser Planet immer wieder Zyklen von Vereisung und Erwärmung. Eine neue Kaltzeit würde unsere Landwirtschaft und damit die Zivilisation zum größten Teil vernichten und zugleich zahllose Arten aussterben lassen. Eines Tages könnten wir auf Geoengineering angewiesen sein, um die Erde künstlich zu kühlen oder zu erwärmen, damit das Sapiezoikum nicht endet.

Geoengineering ist unumstritten ein Reizthema, doch die gegenwärtigen Debatten darüber drehen sich um verzweifelte Kurzzeitmaßnahmen, die uns aus der selbst verschuldeten Klimafalle retten sollen. Angesichts unseres noch äußerst mangelhaften Verständnisses der Klimakomplexität liegt es auf der Hand, dass ein solcher Aktionismus

extrem riskant wäre. Wir müssen das System Erde sehr viel besser verstehen, um solide einschätzen zu können, wann und wie es auf natürliche Klimatrends oder allmähliche Veränderungen unseres Zentralgestirns reagiert.

Bei Sternen wie der Sonne nimmt die Leuchtkraft mit dem Alter stetig zu. In einigen Milliarden Jahren wird es deshalb auf der Erde so heiß werden, dass die Ozeane verdampfen, wie es auf der Venus bereits vor Jahrtausenden geschah. Zum Glück liegt das noch weit, weit in der Zukunft. Sollte es unseren Nachfahren gelingen, die existenziellen Herausforderungen der kommenden Jahrhunderte und Jahrtausende zu meistern, bleibt ihnen mehr als genug Zeit, das Problem anzugehen. Vielleicht finden sie einen Weg, die Sonne zu verjüngen, die Erde in eine größere Umlaufbahn zu katapultieren oder sie zum Teil abzuschatten. Möglicherweise entschließen sie sich auch dazu, in ein anderes Planetensystem auszuwandern.

Intelligenz konnte auf der Erde zu einem entscheidenden Faktor werden. Es gibt keinen plausiblen Grund, anzunehmen, dass das nur auf unserem Planeten möglich ist. Eines Tages finden wir vielleicht heraus, dass es drei Arten von Welten gibt: tote, belebte und durch Intelligenz geprägte. Natürlich kann man nicht ausschließen, dass unser Planet der einzige mit vernunftbegabten Wesen im gesamten Kosmos ist. Falls dem so wäre, würden unsere Entscheidungen nicht nur das Wohlergehen allen künftigen Lebens auf der Erde beeinflussen, sondern auch das Schicksal allen Lebens im Universum, das sich seiner selbst bewusst ist. Das wäre in der Tat eine ziemlich große Verantwortung.

Ein Blick in die Geschichte lässt hoffen, dass wir es schaffen werden. Der Mensch zeichnete sich von Anfang an durch seine Fähigkeit aus, existenzielle Bedrohungen zu bewältigen. Vor etwa 75 000 Jahren passierten unsere Vorfahren einen genetischen Flaschenhals: Damals schrumpfte die Menschheit so stark zusammen, dass sie kurz vor dem Aussterben stand – vermutlich infolge eines vulkanischen Winters. Bereits vor 160 000 bis 200 000 Jahren hatte eine verheerende Vereisung unsere Ahnen beinahe vollständig ausgelöscht. Was ist das Geheimnis der menschlichen Anpassungs- und Überlebensfähigkeit? Wahrscheinlich unser Sprachgebrauch, der es uns ermöglicht, neue Formen der sozialen Kooperation zu entwickeln.

Jetzt ringen wir darum, das heraufdämmernde Anthropozän zu überstehen. Ob uns das gelingt, ist offen. Wenn wir uns jedoch behaupten, dann könnten wir lernen, als erste planend schöpferische Instanz der Erdgeschichte die irdische Biosphäre beinahe unbegrenzt zu bewahren. Langfristig könnten wir uns so als eines der besten Dinge erweisen, die dem System Erde je widerfahren sind. ◀

QUELLEN

Bostrom, N., Circovic, M. M. (Hg.): Global Catastrophic Risks. Oxford University Press, Oxford 2008

Grinspoon, D.: Lonely Planets: The Natural Philosophy of Alien Life. Ecco Press, New York 2003

Waters, C. N. et al.: The Anthropocene Is Functionally and Stratigraphically Distinct from the Holocene. In: Science 351, aad2622, 2016

Einen Schritt voraus.

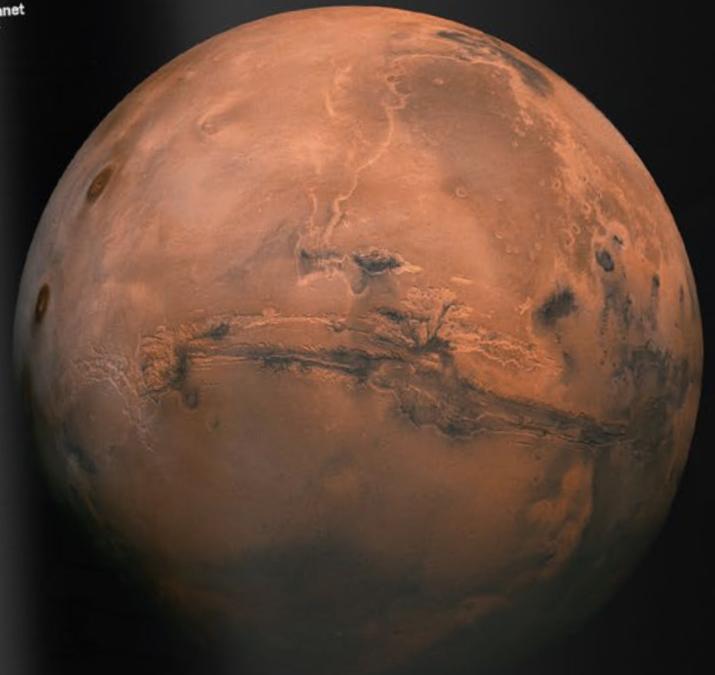
Die Visionen von Elon Musk im FOCUS.



Abflug
Elon Musks Raumfahrtunternehmen SpaceX entwickelt Raketen, die (im Idealfall) auch zur Erde zurückkehren

Ankunft
Sehnsuchtsort Mars. Seit Forscher Wasser fanden, gilt der Rote Planet als potenzieller Lebensraum

GESELLSCHAFT



Der Marsianer

Der Milliardär **Elon Musk** ist ein Mann, der Unmögliches möglich macht. Nachdem er der Welt den Tesla geschenkt hat, will er jetzt den Menschen zum Mars schicken. Wie das gehen soll, erklärt er hier

Photo: Benjamin Lemy/Contrasto. Bild: Getty Images, USA

FOCUS 44/2016

FOCUS 44/2016

Menschen im



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WUNDERWELT DER GLEICHKANTIGEN POLYEDER

Stellt man an einen von ebenen Flächen begrenzten Körper einzig die Bedingung, dass alle seine Kanten gleich lang sein sollen, dann ergibt sich eine Vielfalt von Formen, die nur mit äußerster Mühe im Zaum zu halten ist.



Christoph Pöppe ist Spektrum-Redakteur für Mathematik und Computertechnik.

» spektrum.de/artikel/1453313

► Vor wenigen Jahren verkündete ein Psychologe namens Stan Schein von der University of California in Los Angeles, er habe eine neue Klasse einigermaßen regelmäßiger Körper vollständig beschrieben: die »konvexen, gleichseitigen Polyeder mit platonischer Symmetrie«. Das Ergebnis ging durch die Presse und wurde auch in dieser Zeitschrift gefeiert (**Spektrum** Mai 2014, S. 72). Inzwischen ist klar, dass die Beteiligten, darunter ich selbst, den Mund etwas zu voll genommen haben. Nicht dass an Stan Scheins Leistung selbst etwas aussetzen gewesen wäre. Aber die Möglichkeiten sind mit seiner Entdeckung alles andere als ausgeschöpft. Das Sortiment der geometrischen Körper mit den genannten Eigenschaften ist über die Maßen reichhaltig.

Es geht um Polyeder, also räumliche Körper, die von ebenen Flächen begrenzt sind. Manche Fachleute bezeichnen mit gutem Grund diese Flächen als die »Seiten« des Polyeders. Entsprechend wären unter »gleichseitigen Polyedern« solche mit lauter gleichen Flächen zu verstehen – was hier aber nicht gemeint ist. Vielmehr geht es darum, dass alle Kanten gleich lang sind, weshalb im Folgenden von gleichkantigen Polyedern oder kurz Gleichkantonern die Rede sein soll. Unvermeidlich müssen dann alle Flächen eines solchen Körpers gleich lange Seiten haben, aber nicht unbedingt lauter gleiche Winkel – abgesehen vom Dreieck, dem nichts anderes übrig bleibt.

Es ist sinnvoll, sich auf konvexe Körper zu beschränken, also solche ohne einspringende Kanten oder Ecken – nicht weil die Polyeder mit Dellen oder sogar durchgehenden Löchern im Prinzip uninteressant wären, sondern weil die Fülle der Möglichkeiten dann endgültig nicht mehr beherrschbar wäre.

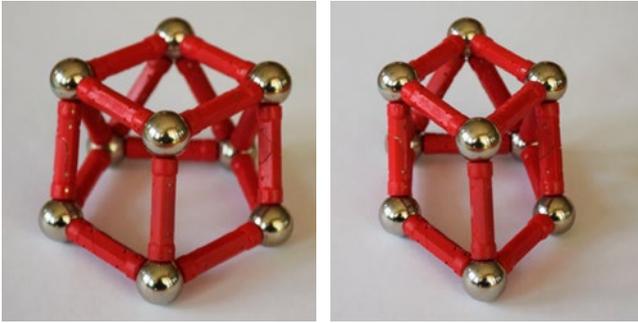
Wie findet man konvexe gleichkantige Körper? Zunächst schaut man bei den alten Meistern nach (**Spektrum** Mai 2012, S. 66). Die fünf klassischen platonischen Körper – begrenzt von lauter gleichen, regelmäßigen Vielecken, die in gleicher Anzahl um jede Ecke liegen – sind offensichtlich gleichkantig; das gilt auch für ihre nicht ganz so regelmäßigen Verwandten, die 13 archimedischen Körper. Ihre Flächen sind ebenfalls gleichseitige, gleichwinklige Vielecke, allerdings nicht mehr unbedingt alle von derselben Sorte; und alle Ecken haben die gleiche Umgebung. Zur Definition des archimedischen Körpers passen auch die unendlich vielen Prismen und Antiprismen, obgleich sie traditionell nicht dazugezählt werden: je ein regelmäßiges Vieleck mit n Seiten als Boden und Deckel und dazwischen lauter quadratische Seitenwände (Prisma) oder abwechselnd stehende und liegende gleichseitige Dreiecke (Antiprisma).

Wenn man auch noch auf die Symmetrie verzichtet, welche die archimedischen Körper auszeichnet, landet man bei der bunten Sammlung der 92 Johnson-Polyeder, von der ein spezielles Mitglied, die Bilunabironda, Thema einer »Mathematischen Unterhaltung« war (**Spektrum** März 2012, S. 61). Und schließlich finden sich in der Literatur zwei Körper, die von nicht gleichwinkligen Vielecken begrenzt sind: das Rhombendodekaeder und das Rhombentriakontaeder (Rautenzwölf- und -dreißigflächner). Sie beziehen ihren Ruhm von der Tatsache, dass sie aus den platonischen Körpern Würfel beziehungsweise Dodekaeder auf relativ einfache Weise hervorgehen: indem man auf ihre Flächen Pyramiden geeigneter Höhe aufsetzt, so dass je zwei benachbarte Pyramiden-Dreiecksflächen zu einer Raute verschmelzen.

Ein Sortiment gleichkantiger Polyeder von Enrico Bernal



Das Kiloeder (links unten) besteht aus einem »Fass« und zwei »Deckeln«, die nach dem Prinzip des Zwiebelkörpers gebaut sind.



Eduard Baumann hat das »Bügeleisen« gefunden, einen Gleichkanter aus nur neun Flächen (links). Das Geomag-Modell des Körpers ist deformierbar; aber in der schlanken Version (rechts) sind die Vierecke nicht mehr eben.

So weit hat diese Aufzählung noch keinen Neuigkeitswert, ist aber gleichwohl nützlich, weil sie das Rohmaterial für konstruktive Bemühungen liefert. Es gibt nämlich verschiedene Verfahren, aus vorhandenen Gleichkantern neue zu machen.

Eines von ihnen, das »Dekorieren«, hat auch Stan Schein schon intensiv praktiziert. Man verziere (»dekorieren«) die Flächen eines Gleichkanters mit zusätzlichen

Punkten, die ungefähr den gleichen Abstand voneinander haben. Dann ruckele man die Punkte so zurecht, dass die Abstände exakt gleich sind – jedenfalls diejenigen, die zu Kanten des neuen Gleichkanters werden sollen. Am Ende muss man noch ein bisschen weiter ruckeln, bis die Punkte, die zu einer Fläche gehören, auch in einer Ebene liegen, und fertig ist der neue Gleichkanter. Stan Schein hat diese Prozedur systematisiert, indem er insbesondere die Dreiecke eines Ikosaeders dekorierte.

Magnetspielzeug als Erkenntnisquelle

Beim Zurechtrucken ist die Vorstellung hilfreich, die Punkte seien Atome, die zueinander einen speziellen Abstand bevorzugen. Wenn dieser Abstand nicht eingehalten wird, dann bringen Rückstellkräfte die ganze Konfiguration zum Zappeln, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Da sich die Chemiker für derartige Prozesse bei echten Atomen interessieren, gibt es Software, die dieses Einschwingen bis zum Gleichgewicht simuliert; mit ihrer Hilfe ist Stan Schein zu seinen Gleichkantern gekommen. Das funktioniert für seine annähernd regelmäßigen Fünf- und Sechsecke, versagt jedoch in anderen Fällen. So sind bei einer Raute die beiden stumpfwinkligen Ecken näher beieinander als die Kantenlänge, würden also von der Chemie-Software auseinandergetrieben. Ähnliches gilt für langge-

Der aufgeplusterte Würfel

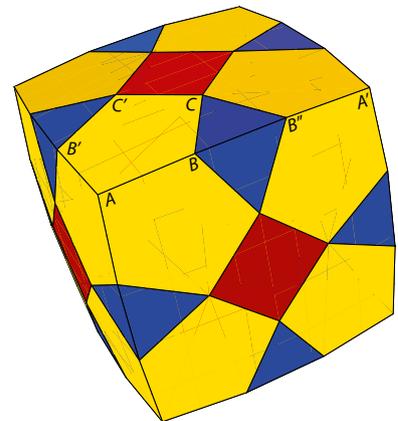
Auf den ersten Blick scheint es sich nur um einen etwas unsauber gezeichneten Würfel mit einer Musterung zu handeln. Aber entgegen dem Anschein liegen die Drei-, Vier- und Fünfecke in geringfügig verschiedenen Ebenen, und alle Kanten sind gleich lang.

Um den Körper zu berechnen, dekoriert man zunächst den Würfel mit zusätzlichen Punkten. Diese teilen einerseits jede Kante des Würfels in drei gleiche Teile, andererseits bilden sie ein um 45 Grad verdrehtes Quadrat (rot) in der Mitte jeder Seitenfläche, dessen Seitenlänge ein Drittel der Kantenlänge des Würfels beträgt. Dabei entstehen die (gelben) Fünfecke; aber sie haben noch keine gleich langen Seiten.

Um diesem Mangel abzuweichen, deformiert man nun das ganze Gebilde so, dass stets die Symmetrie des Würfels gewahrt bleibt. Da die Seite des blauen Dreiecks, die

auf der Würfelkante liegt, etwas zu kurz ist, lässt man Punkt B nach außen wandern. Dabei wandern alle symmetrischen Bilder von B mit, insbesondere B' und B'' . Wegen der Symmetrie muss B auf der (Symmetrie-)Ebene bleiben, die durch A , A' und den Würfelmittelpunkt geht; außerdem müssen die Strecken AB und BB'' wegen der Gleichkantigkeitsbedingung gleich lang sein. Daraus folgt, dass B auf einer Kurve innerhalb der genannten Symmetrieebene liegen muss.

Punkt C muss (ebenso wie C') in der durch A , B und B' definierten Ebene liegen, damit das gelbe Fünfeck eben ist. Außerdem zwingt die Symmetrie C auf die vertikale Mittelebene zwischen der linken Frontfläche des Würfels und der hinteren, zu ihr parallelen Fläche. Drittens muss die Strecke BC so lang sein wie AB und BB'' . Durch diese drei Bedingungen ist C festgelegt, wenn B es ist.



Ein 54-Flächner mit der Symmetrie des Würfels.

Damit das Polyeder gleichkantig ist, muss nur noch CC' dieselbe Länge haben wie AB und BC . Das läuft auf eine einzige Gleichung mit einer Unbekannten (der Position von B auf der genannten Kurve) hinaus. Alles andere erledigt die Symmetrie.

Gleichkanter mit der Symmetrie des Würfels von Enrico Bernal



MIT FRIHL. GEN. VON ENRICO BERNAL

Von den Körpern der oberen Reihe entstehen der zweite und der vierte aus ihren linken Nachbarn durch »Expansion«; so nennt Bernal seine Erweiterungstechnik, bei der Fugen auch durch Flächen hindurch verlaufen dürfen. Die ehemaligen Oktaederkanten des Körpers rechts unten sind in Wirklichkeit extrem langgestreckte Sechsecke, und die zu groß geratenen Quadrate seines linken Nachbarn sind Zwölfecke, bei denen je drei Seiten fast in einer geraden Linie liegen. Dessen linker Nachbar hat regelmäßige Zwölfecke!

streckte Sechsecke, von denen ein Extremfall im Bild oben (rechts unten) zu besichtigen ist.

Eine andere Quelle der Inspiration sind die Baukästen aus Eisenkugeln und Magnetstäbchen (»Geomag« und Nachahmerprodukte). Hier haben die Abstände zwischen Eckpunkten von vornherein die richtige Größe, und der Erbauer kann nach seinem Belieben darüber entscheiden, welche Vielecke er in welcher Anordnung zusammensetzen will. Nur kann man mit dieser Technik nicht erzwingen, dass alle Eckpunkte eines Vielecks in einer Ebene liegen (von Dreiecken abgesehen). Und vor allem hat die Anordnung mehr Freiheiten, als einem lieb ist. Um ein annähernd kugelförmiges Gebilde einigermaßen in Form zu halten, braucht man weit mehr als zwei Hände. Immerhin findet man mit leichter Mühe gleichkantige Polyeder mit relativ wenigen Flächen, auf die man sonst vielleicht nicht verfallen wäre (Bild S. 72 oben).

Symmetrie erleichtert die Rechenarbeit

Mit diesem Spielzeug kann man auch handgreiflich erfahren, dass sechs gleichseitige Vierecke, die zu dritt jeder Ecke anliegen, noch lange kein Würfel sind. Das Gebilde lässt sich zu allerlei mehr oder weniger platten Rautenkörpern (»Rhombenhexaedern«) zusammendrücken. Besondere Aufmerksamkeit genießen diejenigen, bei denen alle Rauten gleich sind (Spektrum Dezember 2010, S. 66).

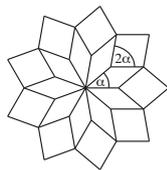
Wie funktioniert nun Dekorieren mit Zurechtrucken? Wo man es nicht mit echten Stangen und Kugeln oder mit simulierten Atomen machen kann, muss man die Eckpunkte des Körpers durch Koordinaten ausdrücken und die Bedingung, dass alle Kanten gleich lang sein sollen, durch Gleichungen. Das ist der mühsame Teil der Übung – abgesehen davon, dass es Fantasie erfordert, eine geeignete Dekoration zu finden. Eine Lösung der so aufgestellten Gleichungen findet der Computer dann rasch – wenn es überhaupt eine gibt. Es ist günstig, wenn man ebenso viele Gleichungen (Bedingungen) hat wie Unbekannte (Koordinaten, an denen man ruckeln kann), und je weniger von beiden, desto besser.

Die Anzahl der Unbekannten wie der Gleichungen kann man drastisch reduzieren, indem man fordert, dass das zu berechnende Polyeder möglichst viele Symmetrien hat, also an vielen Ebenen gespiegelt und um viele Achsen gedreht werden kann, ohne dass seine Gestalt sich ändert. Mit Hilfe einer solchen Forderung lässt sich zum Beispiel ein Gleichkanter mit immerhin 54 Flächen durch eine einzige Gleichung mit einer Unbekannten vollständig beschreiben (siehe »Der aufgeplusterte Würfel«, links). Obendrein gibt ihm die Symmetrie, die er vom Würfel geerbt hat, eine recht ansehnliche Gestalt. Kein Wunder, dass Gleichkanter mit der Symmetrie eines platonischen Körpers – der höchsten Symmetrie, die es im Raum gibt, abgesehen von der lang-

Zwiebelkörper

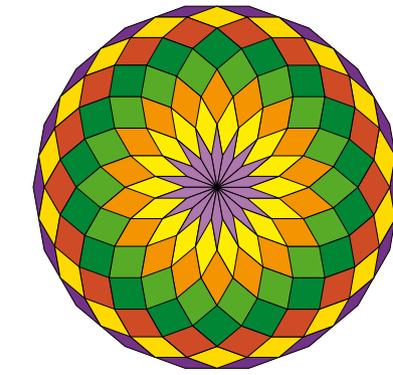
Man verteile n Punkte gleichmäßig auf dem Umfang eines Kreises und verbinde jeden von ihnen mit dem Mittelpunkt. Zwei benachbarte Strecken in diesem »Igel« schließen den Winkel $\alpha = 360^\circ/n$ ein.

An die Enden dieser Strecken füge man parallelverschobene Versionen der beiden Nachbarstrecken an mit dem Effekt, dass ein Kranz von Rauten entsteht. Nach demselben Muster setze man in die Lücken zwischen diesen Rauten neue Rauten, und so weiter. Die Rauten des zweiten Rautenkranzes haben den Öffnungswinkel 2α (das sei der Winkel an der Ecke, die dem Mittelpunkt am nächsten liegt), die des dritten Kranzes den Öffnungswinkel 3α und so weiter.

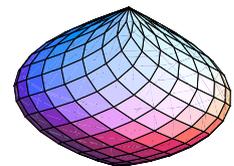
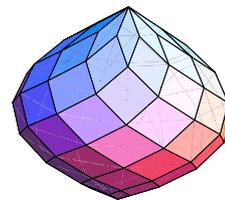
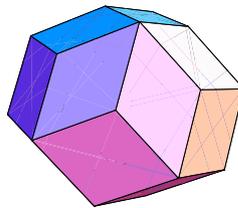


Nach $n/2$ Schritten (für gerades n) erreicht der Öffnungswinkel 180 Grad, die entsprechenden

Rauten entarten also zu geraden Strichen. Der nächste Öffnungswinkel ist dann größer als 180 Grad; entspre-



chend wächst der zugehörige Rautenkranz nach innen statt nach außen und überdeckt dabei das bisher erzeugte Muster. Für ungerade n überspringt der Öffnungswinkel den Wert 180 Grad; das Muster wächst ebenfalls nach innen, ohne das Zwischenstadium der strichförmigen Rauten. In jedem Fall ist nach $n-1$ Schritten das Muster wieder genau im Mittelpunkt angelangt.



Diese Ansammlungen von Rauten sehen ganz hübsch aus und lassen sich auch in reizvoller Weise umsortieren (*Spektrum* Februar 2005, S. 106); zu echten Polyedern werden sie allerdings erst, wenn man aus ihnen räumliche Gebilde macht. Dazu erhebt man die Punkte auf dem Kreis, mit denen die Konstruktion begann, auf eine gewisse Höhe z , während der Mittelpunkt auf Höhe 0 verbleibt. Die später konstruierten Punkte wandern mit, und zwar die Spitzen des ersten Rautenkranzes auf die Höhe $2z$, die des nächsten auf die Höhe $3z$, und so weiter. Die bislang strichförmigen Rauten entfalten sich zu echten, senkrecht stehenden Rauten. Der Kelch, der sich bis dahin gebildet hat, schließt sich beim Weiterwachsen wieder, bis sich die Rauten des letzten Kranzes wieder in einem zentralen Punkt treffen, der nun aber in einer

weiligen Kugelsymmetrie – unter ihren Konstrukteuren besondere Beliebtheit genießen (siehe »Gleichkanter mit der Symmetrie des Würfels von Enrico Bernal«, S. 73).

Dieser Artikel präsentiert die Werke von Eduard Baumann aus Fribourg (Schweiz), Tadeusz Dorozinski aus Düsseldorf und vor allem Enrico Bernal aus Stuttgart. Die drei stehen in intensivem Austausch und unterstützen sich gegenseitig bei der Berechnung und Darstellung. Hat man einmal die Koordinaten der Eckpunkte, so liefert das im Internet zu erwerbende Programm »Great Stella« von Robert Webb eine Darstellung mit farbigen Flächen, Beleuchtungseffekten und auf Wunsch weißen Kügelchen zur Hervorhebung der Eckpunkte.

Zurechtschneiden und Expandieren: So macht man aus einfachen Gleichkantern komplizierte

Wer aus einem bereits vorliegenden Gleichkanter einen neuen erzeugen möchte, kann ihm Ecken und/oder Kanten abschneiden, und zwar so weit, dass die neu entstehenden Kanten genauso lang werden wie die Reste der abgeschnittenen. So kann man auch die meisten archimedischen Körper aus platonischen machen.

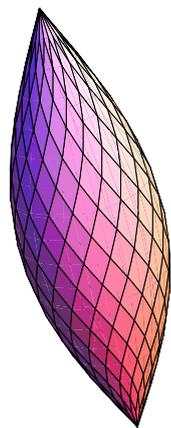
Ein weniger brutales Verfahren besteht in der Erzeugung von »Fugenpolyedern«, so Eduard Baumanns Bezeichnung. Man drückt jede Fläche des Ursprungskörpers ein Stück nach außen, so dass sich zwischen benachbarten Flächen Fugen auftun. Wenn diese Fugen so breit geworden sind, wie die Einheitskante lang ist, verbindet man je zwei Ecken, die durch die Aktion auseinandergerissen wurden, durch eine Kante. Die hat dann automatisch die richtige Länge – wenn der Ursprungskörper so regelmäßig ist, dass er einen definierten Mittelpunkt hat, und deswegen alle Fugen einheitliche Breite haben.

Bei weniger regelmäßigen Ursprungskörpern muss man hinterher vielleicht noch ein bisschen zurechtrucken. Oder man verdreht alle Flächen beim Herausdrücken ein Stück und füllt die Fugen dann nicht mit Vierecken, sondern mit abwechselnd aufrechten und kopfstehenden Dreiecken, wie man es vom Antiprisma gewohnt ist.

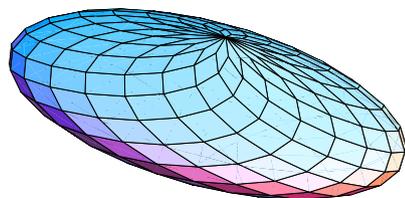
Oder man schiebt nicht alle Flächen gleichmäßig von einem Mittelpunkt weg, sondern schlitzt den Körper entlang einer Folge von Kanten, die wie eine Bauchbinde einmal um den ganzen Körper umläuft, und zieht die beiden Hälften auseinander, so dass genau ein Gürtel von

Höhe $(n-1)z$ über dem ursprünglichen Mittelpunkt liegt. So entsteht ein Polyeder aus Rauten mit lauter gleichen Kanten.

Bemerkenswerterweise kann man über den Wert von z ziemlich beliebig verfügen. Für z knapp über null wird das Polyeder flach wie ein Pfannkuchen (unten), für große z



dürr wie eine Spindel (links), und wer einen einigermaßen kugelähnlichen Körper erzeugen will, muss sorgfältig ein mittelgroßes z auswählen. Für große Werte von n sehen die Polyeder auf den ersten Blick so ähnlich aus wie Zwie-

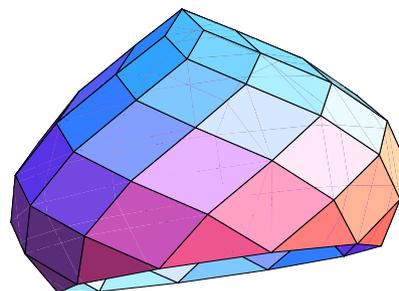


beln, sind aber im Gegensatz zu echten Zwiebeln stets konvex.

Warum funktioniert dieses Verfahren überhaupt? Alle neuen Kanten entstehen aus bereits vorhandenen durch Parallelverschiebung. In der analytischen Darstellung entspricht das einer Vektoraddition, und die findet in jeder Koordinate unabhängig von den anderen Koordinaten statt. Also ist das dreidimensionale Polyeder geschlossen, weil das zweidimensionale Muster geschlossen ist.

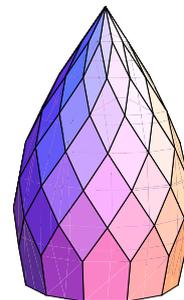
Die Freiheit bei der Wahl des Parameters z lässt sich für allerlei Zwecke nutzen. Für $n=3$ ergibt sich unter lauter dicken und flachen Rhombenhexaedern auch der klassische Würfel; das catalansche Rhombendodekaeder ist unter den Zwiebelkörpern zu $n=4$.

Man kann für beliebiges n das z auch so einstellen, dass die quer verlaufende (nicht zum Mittelpunkt gerichtete) Diagonale eines Rautenkranzes genauso lang ist wie die allgemeine Kantenlänge. Also kann man die Rauten dieses Kranzes entlang der Diagonalen entzweischneiden, so dass von ihnen nur



noch gleichseitige Dreiecke übrig bleiben, und das verbleibende Loch durch ein regelmäßiges n -Eck schließen.

Oder man schneidet jede Raute des bislang letzten Kranzes an ihrer zuäußerst liegenden Ecke auf und fügt dort eine weitere Kante der Einheitslänge ein, so dass aus der Raute ein Fünfeck wird (oben). An die Stelle der Fünfecke können auch Siebenecke treten, die zwischen sich dreieckige Zwickel lassen; oder zwischen die Fünfecke passen noch Dreiecke.



Rhomben dazwischenpasst. Damit zerstört man möglicherweise eine Symmetrie, die der Ursprungskörper gehabt haben mag. Aber das Verfahren ist so oft wiederholbar, wie die Konvexitätsbedingung es zulässt.

Schließlich gibt es einige Verfahren, mit denen man Gleichkanter von Grund auf neu erzeugen kann. Vor allem Rauten erweisen sich dabei als überaus flexibel einsetzbares Material (siehe »Zwiebelkörper«, oben). Und mit Fünfecken lassen sich Gleichkanter bauen, die stark an Antiprismen erinnern. Vorbild für diese Konstruktion ist das gewöhnliche Dodekaeder. Stellen wir es uns auf dem Tisch liegend vor, dann bildet eine seiner zwölf Fünfecksflächen den Boden. Daran grenzen fünf »untere Wände« an, leicht nach außen gekippte Fünfecke. In die Lücken zwischen ihnen greifen fünf »obere Wände« ein wie die Zähne in die Lücken eines Haifischgebisses; sie sind nach innen gekippt und grenzen oben an den Deckel. Obere Wände plus Deckel sind dasselbe wie untere Wände plus Boden, nur auf den Kopf gestellt.

Nun ersetzen wir Boden und Deckel durch regelmäßige Vielecke mit deutlich mehr Ecken. Dann können wir immer noch beide mit einer Zahnreihe aus fünfeckigen, nach

außen gestellten Zähnen versehen, so dass Ober- und Unterkiefer perfekt schließen und zusammen einen gleichkantigen Körper ergeben. Nur gleiche Winkel haben die Fünfecke dann nicht mehr.

Die hier genannten Konstruktionsprinzipien sind nur ein kleiner Ausschnitt aus denen, die Bernal, Baumann und Dorozinski angewandt haben; und die Menge der Gleichkanter, an die noch niemand gedacht hat, ist vermutlich noch viel größer als die der bekannten. Sie alle übersichtlich zu ordnen ist in der Tat hoffnungslos. Ersatzweise suchen die drei Hobbyforscher nach den schönsten Exemplaren. Das kann bedeuten: mit der größten Symmetrie – daher die Konzentration auf die Abkömmlinge platonischer Körper – oder mit der größten Kugelähnlichkeit. Wenn alle Ecken auf der Oberfläche einer Kugel liegen sollen, wäre die Aufgabe nicht unähnlich derjenigen, eine Gleichgewichtsverteilung von Elektronen auf einer Kugeloberfläche zu finden. Eduard Baumann hat eine große Liste von »Hektoedern« (Polyedern mit genau 100 Flächen) gesammelt und nach Kugelähnlichkeit geordnet. Und Enrico Bernal hat mit Erfolg nach einem »Kiloeder« (Tausendflächner) gesucht (Bild S. 71, links unten). ◀

HELLENISMUS EIN KÖNIG, EIN GOTT, EIN REICH

Das Grabheiligtum von Antiochos I. auf dem Gipfel des Nemrud im östlichen Taurosgebirge fußt auf einem ungewöhnlichen Kalkül: Der Herrscher inszenierte sich als Gottkönig, um so die griechisch- und persischstämmigen Bevölkerungsteile durch einen gemeinsamen Kult zu einen.

» spektrum.de/artikel/1453317

Serie:

Kultbauten der Menschheit

Teil 1: Mai 2017

Steinerne Symbole einer neuen Zeit

von Marion Benz

Die älteste Universität der Welt

von Max Deeg

Teil 2: Juni 2017

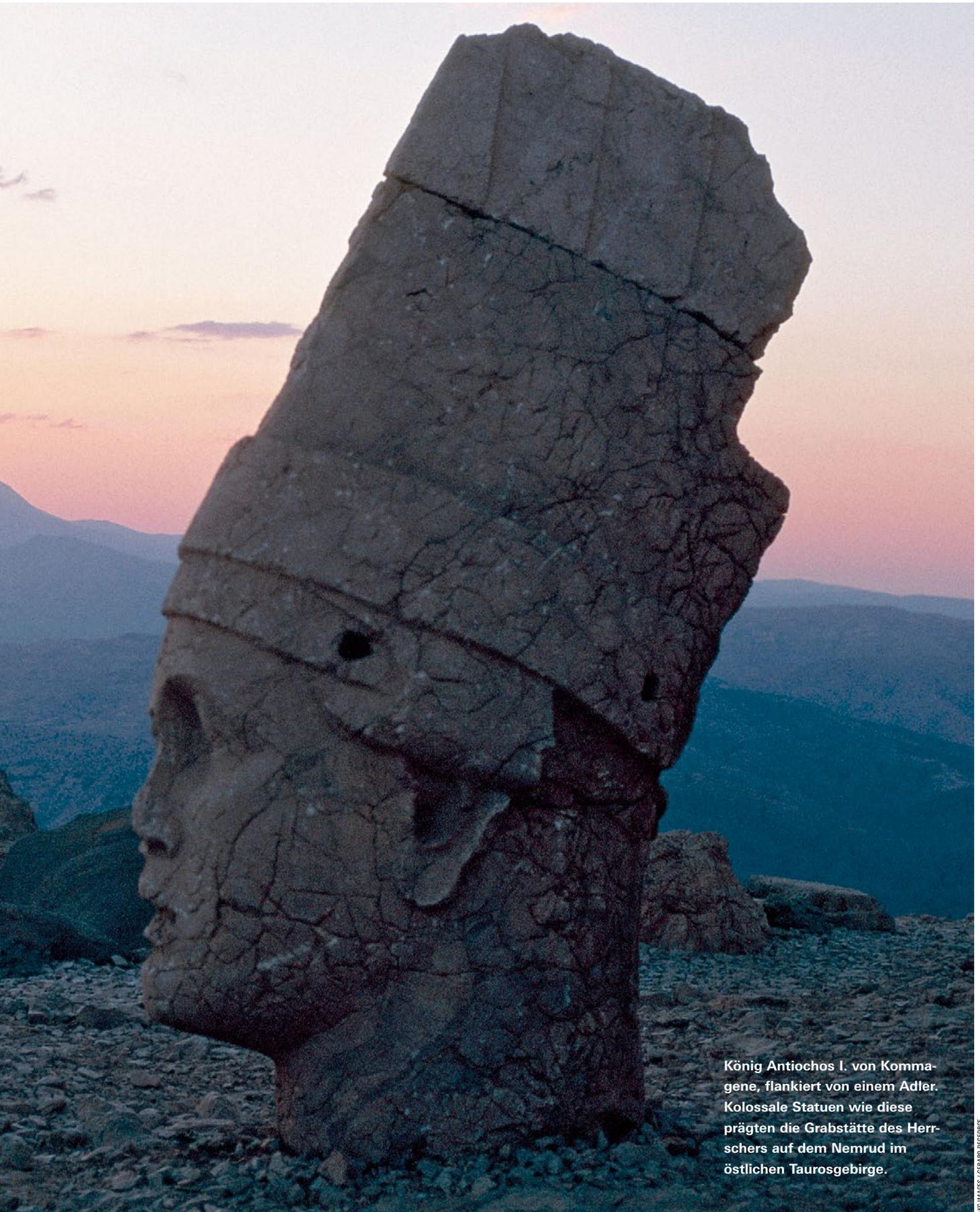
Ein König, ein Gott, ein Reich

von Jörg Wagner

Teil 3: Juli 2017

Kathedralen: Zeichen der Macht

von Matthias Untermann



König Antiochos I. von Kommagene, flankiert von einem Adler. Kolossale Statuen wie diese prägten die Grabstätte des Herrschers auf dem Nemrud im östlichen Taurosgebirge.

ARND BRONKHORST / GETTY IMAGES



Der Althistoriker **Jörg Wagner** promovierte über die antike Brückenstadt »Seleukeia am Euphrat/ Zeugma«, nahm an den Grabungen in Arsameia am Nymphaios teil und führte zahlreiche Surveys im türkischen Euphrat-Tigris-Gebiet durch. In den Jahren 1987 bis 1992 war er stellvertretender Leiter der Arbeiten im Grabheiligtum des Königs Antiochos I. auf dem Berg Nemrud.

Als König Antiochos I. von Kommagene 69 v. Chr. den Thron bestieg, erbt er ein von außen und innen bedrohtes Reich. Denn Kommagene gehörte zu einen zu jenen kleinen Euphrat-Königtümern, die eine Pufferzone zwischen dem römischen Imperium im Westen und dem Partherreich im Osten bildeten. Zum anderen bestand seine Bevölkerung aus verschiedenen Ethnien mit unterschiedlichen Kulturen. Es gab Aramäer und Armenier, deren Vorfahren einst in dieses fruchtbare Gebiet gezogen waren; dazu Nachkommen der Hethiter. Vor allem jedoch prallten orientalische und westliche Kultur direkt aufeinander, denn Perser und Griechen stellten die Elite. Erstere wünschten sich eine größere Nähe zum Partherreich, während sich die griechische Gruppe besser beim Römischen Reich aufgehoben fühlte.

Eine schlagkräftige Truppe berittener Bogenschützen und geschicktes Taktieren hielten die beiden Großmächte lange Zeit auf Abstand. So verheiratete Antiochos seine Tochter Laodike mit dem parthischen Herrscher Orodes II., titulierte sich zugleich aber auch als »Freund der Römer und Hellenen«. 51 v. Chr. spielte er sogar dem Verwalter der benachbarten römischen Provinz Kilikien, Marcus Tullius Cicero, Informationen über einen bevorstehenden parthischen Einfall in die römische Provinz Syrien zu.

Die Strategie ging auf. Zu Beginn seiner Herrschaft war Antiochos I. noch als Vasall des Tigranes von Armenien Teil einer antirömischen Koalition gewesen und damit auf Seiten der Verlierer. Doch er verstand es offenbar, Komma-

genes Nutzen für die Grenzsicherung gegen die Parther darzulegen. Als der römische Feldherr Gnaeus Pompeius Magnus im Winter 65/64 v. Chr. auf einer Versammlung der Fürsten die politische Landkarte Kleinasien und des Vorderen Orients neu ordnete, verschonte er Kommagene nicht nur. Er erweiterte Antiochos' Herrschaftsgebiet sogar um die Stadt Seleukeia am Euphrat, von den Römern Zeugma genannt. Dieser wichtige Flussübergang bescherzte dem König lukrative Zolleinnahmen.

Die brauchte er, als das Römische Reich nach dem Tod Julius Cäsars vom Bürgerkrieg zerrissen wurde und einer der Protagonisten, Marcus Antonius, im Ringen um die Macht im Orient intervenierte. Er wollte Antiochos 38 v. Chr. durch einen gewissen Alexandros ersetzen und obendrein 1000 Talente Silber für die Finanzierung seines geplanten Partherfeldzugs erpressen. Doch die Belagerung von Samosata erwies sich als Zeit raubend. Zugleich überfielen kommagenische Reiter die römischen Nachschubkolonnen. Schließlich gab sich Marcus Antonius nach harten Verhandlungen mit 300 Talenten zufrieden und ließ Antiochos in Amt und Würden.

Der König des kleinen Kommagene wandelt in den Fußstapfen Alexanders des Großen

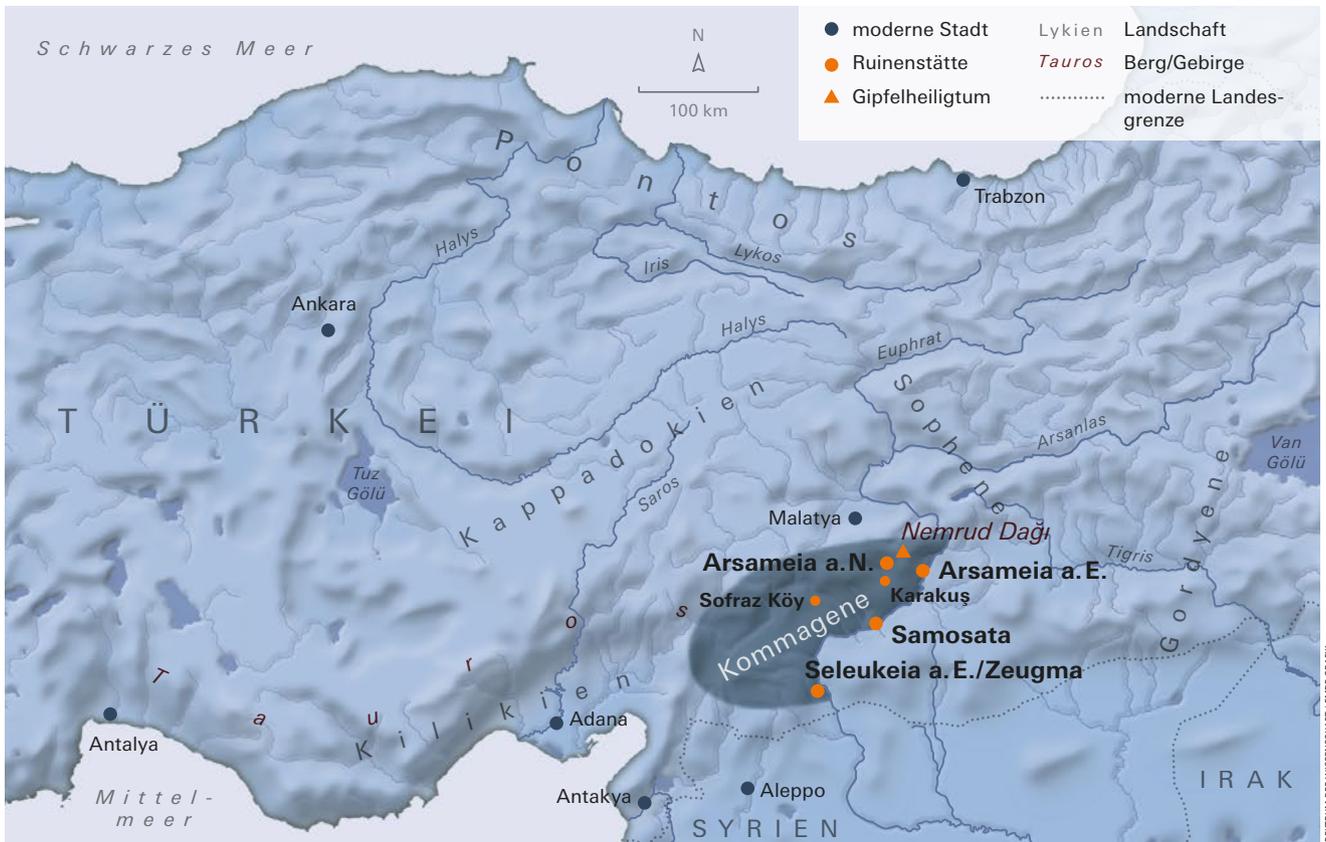
So geschickt Antiochos außenpolitisch paktierte, so einfallsreich agierte er auch im Inneren. Da er seine Abstammung väterlicherseits auf Dareios I. (522–486 v. Chr.) zurückführen konnte, einen der wichtigsten Großkönige des persischen Achämenidenreichs, verlängerte er seine mütterliche Linie über seinen Vorfahren Seleukos I. Nikator (312–281 v. Chr.) hinaus bis zu Alexander dem Großen (336–323 v. Chr.) – eine bereits im 2. Jahrhundert v. Chr. vom seleukidischen Königshaus verbreitete Fiktion. Was dem makedonischen Welteroberer nicht gelungen war, so die Botschaft, vollendete sich in der Person des Herrschers von Kommagene: die Vereinigung von Orient und Okzident.

Damit nicht genug, begründete diese Genealogie aber einen noch weiter gehenden Schritt: Alexander der Große galt den Griechen als Sohn des Zeus, Dareios I. den Persern als Sohn des höchsten altpersischen Gottes Ahuramazda (griechisch Oromasdes), demnach gehörte auch der gemeinsame Nachfahre Antiochos nicht mehr der Sphäre der Menschen an! Was heute wie Größenwahn klingt, war möglicherweise Kalkül: Der von oben diktierte Herrscherkult sollte Kommagenes Bevölkerungsgruppen im Ritual vereinen.

Dazu initiierte König Antiochos ein Kunst- und Kulturprojekt, durch das er sich in die Nachfolge großer hellenistischer Herrscher wie der Könige von Pergamon stellte und diese gar zu übertreffen suchte. Angefangen mit der Hauptstadt Samosata entstanden überall im Reich Heiligtümer, damit »alle Untertanen leicht und bequem an den regelmäßigen Feierlichkeiten teilnehmen konnten«. Zweimal im Monat sollten die Götter und der Gottkönig feierlich geehrt werden: an jedem 16. zum Gedenken an Antiochos' Geburt und an jedem 10. zur Erinnerung an seinen Krönungstag. Attraktiv und deshalb auch identitätsstiftend wurden diese Inszenierungen für das Volk, weil der König in den während seiner Herrschaft mehrfach erweiterten

AUF EINEN BLICK MONUMENTALITÄT ALS PROGRAMM

- 1** Antiochos I. von Kommagene (regierte 69 bis etwa 36 v. Chr.) verstand es durch geschickte Diplomatie, sein Kleinkönigtum am Euphrat dem direkten Zugriff des Römischen wie des parthischen Reichs zu entziehen.
- 2** Um ethnische Spannungen insbesondere zwischen persisch- und griechischstämmigen Untertanen zu begrenzen, erklärte er sich zum göttlichen Nachfahren von Dareios I. sowie Alexander dem Großen.
- 3** Auf dem Berg Nemrud ließ Antiochos ein monumentales Grabheiligtum errichten. Skulpturen, Reliefs und Inschriften betonten die Göttlichkeit des Königs und gaben Instruktionen für den Herrscherkult.



Die Kommagene war zunächst eine vom Euphrat begrenzte antike Landschaft, ab dem 2. Jahrhundert v. Chr. dann ein eigenständiges Königtum. Es geriet jedoch immer stärker unter römischen Einfluss und wurde 72 n. Chr. Teil der Provinz Syrien.

Kulttexten anordnete, die Teilnehmer kostenlos mit »angemessenen Speisen und reichlichem Trank an Wein gemischt mit Wasser« zu bewirten.

Zudem ließ Antiochos drei monumentale Heiligtümer errichten, für die in der königlichen Kanzlei die Bezeichnung »Hierothesion« – heilige Grablege – erdacht wurde. In Arsameia am Euphrat ehrte er seine Vorfahren, speziell seinen Großvater Samos II. (130–100 v. Chr.), in Arsameia am Nymphaios seinen Vater Mithradates I. Kallinikos (100–69 v. Chr.), aber auch seine eigene Person. In der rauen Einsamkeit des Bergs Nemrud schließlich ließ der König ein drittes Hierothesion erbauen, in dem er selbst seine letzte Ruhe finden wollte.

Zweimal im Monat sollten sich die Bewohner seines Reichs in dem Gipfelheiligtum zum Kult treffen, verpflegt von den Erträgen eigens zu diesem Zweck aus dem Krongut gestifteter Dörfer und Ländereien. Den getreuen Untertanen wünschte Antiochos in einer monumentalen Inschrift: »Mögen ihnen die Götter gewogen sein«, allen anderen »widerfahre das, was den Gottesfrevlern widerfährt«.

Die Anlage auf dem Nemrud beeindruckt auch heutzutage noch. Der etwa 2150 Meter über dem Meeresspiegel gelegene Platz war gut gewählt. Bei klarer Sicht kann man über die Ausläufer des Tauros hinweg bis zum Euphrat blicken. Über dem Gipfelschen, in dem vermutlich das Grab des Herrschers zu finden ist, wurde ein etwa

50 Meter hoher Tumulus aus groben Steinen aufgeschüttet, Richtung Osten und Westen schlossen sich Kultterrassen mit Reihen überlebensgroßer Skulpturen an (siehe Karte S. 81). In seinen Kultinschriften der früheren, kleineren Heiligtümer wie Sofraz Köy hatte Antiochos noch den griechischen Göttern Apollon und Artemis gehuldigt. Damit versuchte er vermutlich, seine seleukidische Abstammung zu betonen – seine Mutter war eine Prinzessin aus diesem Herrschergeschlecht. In späteren Inschriften dagegen, insbesondere auf dem Nemrud, inszenierte sich der König im Reigen eines griechisch-persischen Pantheon.

Vier monumentale Statuen repräsentierten daher die wichtigsten Gottheiten des Vielvölkerstaats (siehe Bild S. 80 oben). Neben der Landesgöttin Kommagene stand Zeus-Oromasdes, der den höchsten griechischen und persischen

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

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



FRAUKE FOCKE



Auf der östlich des Tumulus gelegenen Terrasse setzte sich der König als Gott unter Göttern in Szene (von links nach rechts): Antiochos, Kommagene, Zeus-Oromasdes, Apollon-Mithras-Helios-Hermes und Artagnes-Herakles-Ares. Im Lauf der Jahrhunderte wurden die Statuen weitgehend zerstört, nur die Köpfe sind recht gut erhalten.

Gott in einer Gestalt vereinte. Weitere Gottheiten wurden für den Herrscherkult miteinander verschmolzen und in den beiden anderen Statuen dargestellt: Apollon-Mithras-Helios-Hermes und Artagnes-Herakles-Ares. Auf einer Stufe mit diesen Unsterblichen aber erblickten die Besucher als fünfte Statue ihren Gottkönig Antiochos, der laut Inschrift »den erhörenden Göttern ebenbürtig zur Seite steht«.

Eine weitere Passage des Textes, der fortlaufend die Rückseiten der monumentalen Thronesseln der Gottheiten ausfüllte, belehrte den Besucher des Heiligtums, was von

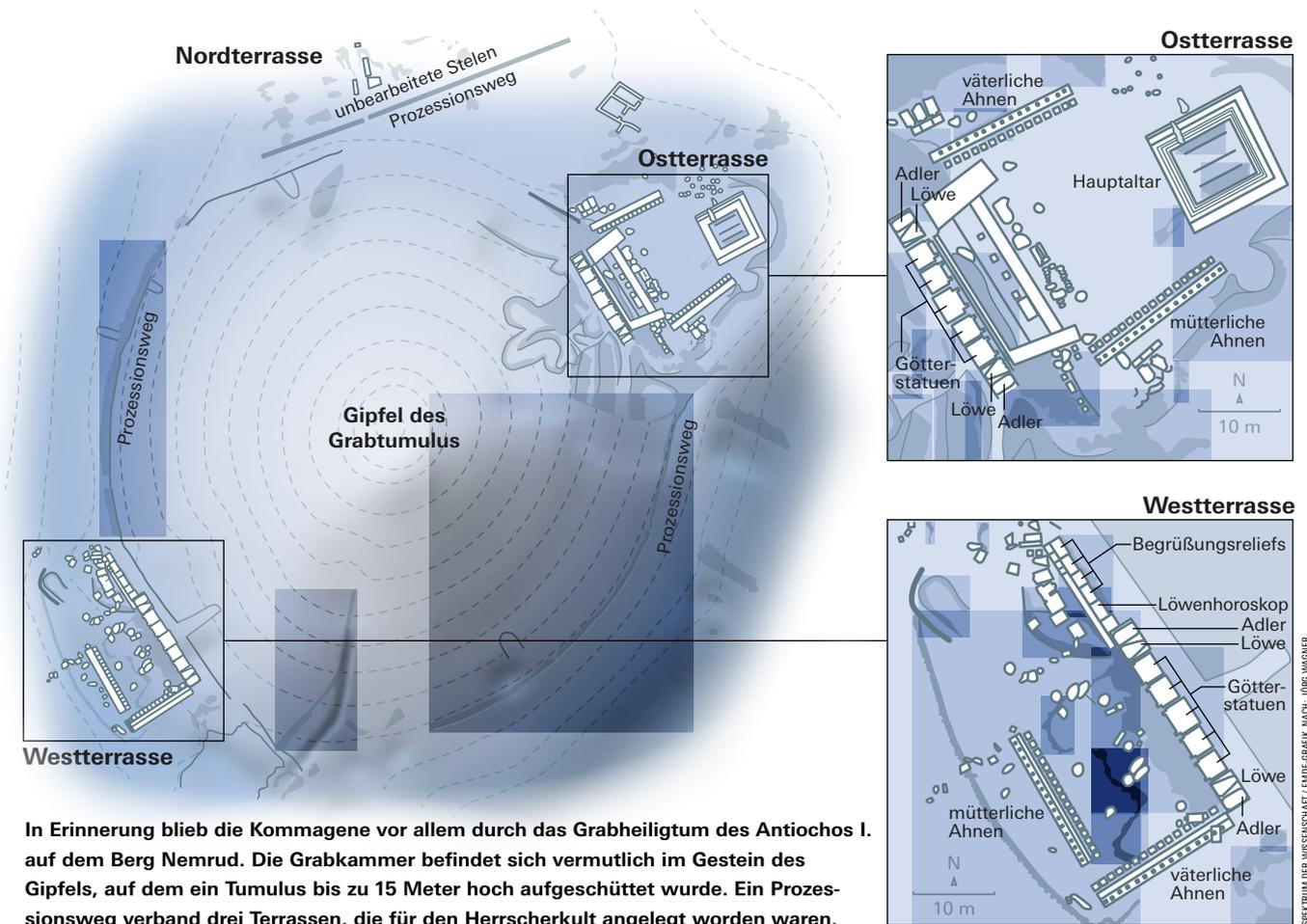
ihm erwartet wurde: Vor jeder Statue sollte er Opfer darbringen. Flankiert wurden diese von überlebensgroßen Adler- und Löwenkulpturen. Stelen der väterlichen und der mütterlichen Ahnen begrenzten beide Terrassen. Diese »heroische Schar meiner Vorfahren« sollte den Stammbaum des Königs vor Augen führen, der angeblich ja auf Zeus und Oromasdes zurückging.

Vier weitere Reliefs präsentierten – wie in den über das ganze Land verteilten kleineren Heiligtümern – König Antiochos im Handschlag mit den Göttern. Ob Perser, Grieche, Armenier oder Aramäer, jeder verstand diese in eindrucksvollen, um nicht zu sagen plakativen Bilderserien im ganzen Königreich verbreitete Botschaft: Die Unsterblichen hatten den König in ihre Reihen aufgenommen (siehe Bilder S. 82).

Und falls es noch eines Beweises bedurfte, lieferte ihn das »Löwenhoroskop« (siehe Bild links). Dieses eindrucksvolle Relief zeigt einen Löwen, auf dem Sterne des Sternbilds Löwe angebracht sind. Auf dem Hals sah man be-



Eine besondere astrologische Konstellation im Sternbild Löwe schien zu bestätigen, dass König Antiochos in den Kreis der Götter aufgestiegen war: Während der Königsstern Regulus über der Mondsichel der Landesgöttin Kommagene stand (dargestellt auf dem Hals des Löwen), zogen Zeus, Apollon und Herakles vorbei (am oberen Relieftrand).



In Erinnerung blieb die Kommagene vor allem durch das Grabheiligtum des Antiochos I. auf dem Berg Nemrud. Die Grabkammer befindet sich vermutlich im Gestein des Gipfels, auf dem ein Tumulus bis zu 15 Meter hoch aufgeschüttet wurde. Ein Prozessionsweg verband drei Terrassen, die für den Herrscherkult angelegt worden waren.

sonders groß den Hauptstern Regulus, den die Hofastrologen mit König Antiochos gleichsetzten. Regulus wurde symbolträchtig eingebettet in die Sichel des Mondes, der für die Landesgöttin Kommagene stand. Am oberen Reliefrand defilierten laut Inschrift die Planeten Jupiter, Merkur und Mars an Regulus vorbei: Zeus, Apollon und Herakles gaben dem König die Ehre. Heutige Astronomen rechnen diese Konstellation auf den 7. Juli 62 v. Chr. zurück, in die Jahre nach der Machterweiterung durch Pompeius. Antiochos hatte den Titel »Großer König« angenommen, den auch Alexander der Große getragen hatte. Wenn nun noch die drei Planetengötter grüßend am Königsgestirn Regulus vorbeizogen, welchen anderen Schluss konnte er da noch ziehen: König Antiochos I. musste annehmen, er habe seine Vergöttlichung miterlebt.

Frömmigkeit als politisches Kalkül

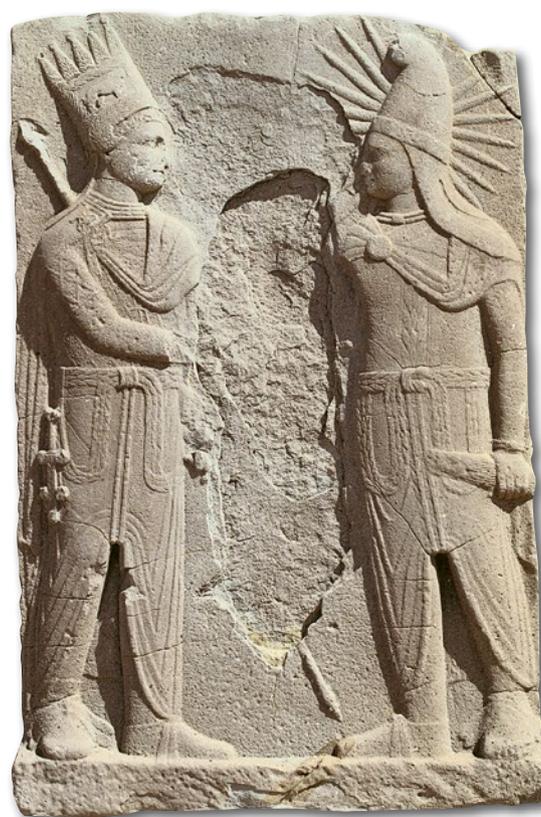
Immer wieder betonte der Herrscher auf dem Nemrud, dass er den Menschen ein Vorbild gebe. »Mein Leben lang war es für jedermann ersichtlich, dass ich die Frömmigkeit für den zuverlässigsten Wächter meines Königreichs und für eine unnachahmliche Freude hielt. Daher entkam ich auch wider Erwarten großen Gefahren, wurde geschickt Herr über fast hoffnungslose Situationen und erreichte glücklich ein Alter reich an Jahren.« Die so betonte Geisteshaltung stand im Dienst des großen Ziels: der Einigung der Ethnien Kommagenes im gemeinsamen Kult. Denn im

gleichen Text nahm er Bezug auf seine großartige Genealogie: »Die Abbilder der göttlichen Gestalten, hergestellt auf vielfältigste Weisen, wie es alte Kunde von Persern und Hellenen – die überaus glückliche Wurzel meines Geschlechtes – uns überliefert, ehrte ich mit Opfern und Festversammlungen.« Weiterhin zitierte der König »die väterlichen Götter aus Persien und Makedonien« und wies die Priester an, bei kultischen Handlungen die von ihm gestifteten prunkvollen persischen Gewänder anzulegen.

So sind auch die Götterdarstellungen mit Bedacht eingekleidet: Herakles ist bis auf ein Löwenfell über der Schulter nackt, typisch für einen griechischen Halbgott; Apollon-Mithras trägt ein reich verziertes persisches Gewand und die hohe persische Tiara; Gleiches gilt für den Göttervater Zeus-Oromasdes wie für die persischen Großkönige in der Ahnengalerie. König Antiochos selbst präsentierte sich in orientalischen Kleidern und der mit Federn besetzten armenischen Tiara. Diesen symbolträchtigen Kopfputz hatte er von König Tigranes dem Großen (95–55 v. Chr.) übernommen, nachdem Pompeius diesen 66 v. Chr. hinter den Euphrat zurückgedrängt hatte.

Doch das monumentale Integrationsprogramm blieb Vision. Unbearbeitet liegen große Tuffsteinplatten auf der Nordterrasse des Heiligtums; vermutlich sollte auf ihnen ein Prozessionszug dargestellt werden. Auch fehlen die im Kulttext erwähnten Tische, an denen die Festgemeinschaft bewirtet werden konnte – vermutlich waren sie in Stein

Ließ sich Antiochos in einem ländlichen Heiligtum nahe dem heutigen Sofraz Köy noch als hellenistischer Herrscher gemeinsam mit dem rein griechischen Gott Apollon (links) abbilden, reicht er auf einem Relief des Bergheiligtums dem griechisch-persischen Apollon-Mithras-Helios-Hermes die Hand (rechts); dieser trägt persische Kleidung. Eine Kultinschrift zur ersten Darstellung bezeichnet Antiochos noch als »König«, nicht als »Großer König«.



geplant, denn solche aus Holz für jede Feier auf den Berg zu transportieren, wäre zu aufwändig gewesen. Trotz jahrzehntelanger Forschungen stießen Archäologen nur auf wenige Tonscherben. Falls Kultfeiern dort wiederholt stattfanden – wie im Kulttext gefordert und bei anderen Tempeln üblich –, fehlt zumindest jeder Beleg dafür. Selbst den Kopf der Antiochos-Statue auf der Ostterrasse haben die Steinmetze nicht mehr bis ins letzte Detail ausgearbeitet.

Experten sind sich deshalb einig: Das ambitionierte, vielleicht auch Größenwahnsinnige Projekt wurde mit dem König stillschweigend zu Grabe getragen. Nach Antiochos' Tod ließ sein Sohn Mithradates II. (etwa 36–20 v. Chr.) ihn dem Anschein nach zwar mit allen Ehren auf dem Nemrud bestatten. Der neue König vollendete zudem eines der kleineren Heiligtümer seines Vaters, wobei er mit einer Statue des Zeus Soter zu den alten griechischen Göttern zurückkehrte. Das abseits gelegene Hierothesion auf dem Nemrud blieb aber letztlich unvollendet, zumal das ganze Konzept allein auf Antiochos zulief; für ihm nachfolgende Könige war kein Platz vorgesehen. So wandte sich Mithradates II. eigenen, kleiner dimensionierten Projekten zu wie dem Grabmal der königlichen Frauen am Karakuş, in dem seine Mutter Isias, seine Schwester Antiochis und seine Nichte Aka bestattet wurden.

Sicher erschien es Mithradates angesichts einer zunehmenden Präsenz der Römer am Euphrat nicht mehr ratsam, mit einer Abstammung von persischen Großkönigen zu prahlen. Seinen Vater und sich selbst bezeichnete er fortan nur noch als »Philorhomaioi« – Freund der Römer – und legte auch den von Antiochos getragenen Titel »Philhellen« – Freund der Griechen – ab.

Im Lauf der Jahrhunderte geriet die Grabstätte auf dem Nemrud in Vergessenheit. Erst 1881 wurde sie von dem deutschen Straßenbauingenieur Karl Sester wiederentdeckt und in den beiden Jahren darauf von den Forschern Carl Humann (1839–1896) und Otto Puchstein (1856–1911) archäologisch und epigrafisch untersucht. Das Hierothesion des Antiochos avancierte zu einer der meistbesuchten antiken Stätten der Türkei; jährlich pilgern tausende Touristen auf den Nemrud. Seit 1987 ist es Weltkulturerbe, doch Erdbeben, Regen, Schnee und Frost haben dem Monument massiv zugesetzt. Keine der Kolossalstatuen trägt noch einen Kopf, viele Reliefs sind weitgehend zerstört, manche kleinere Inschriften inzwischen unlesbar. Es wird höchste Zeit für Rettungsmaßnahmen.

Zumal das antike Heiligtum nicht nur Touristen viel zu bieten hat: Geophysikalische Messungen von 1988 bis 1990 erlaubten einen ersten Blick in den Grabtumulus. Über einem Felskern ist demnach grober Schotter aufgetragen, der an der Spitze 15 Meter erreicht; das Gesamtvolumen beträgt mindestens 110 000 Kubikmeter. Im gewachsenen Felsgestein offenbarten die Untersuchungen mögliche Hohlräume, wobei es sich um Gänge und Kammern handeln könnte. Wer weiß, welche Informationen Archäologen darin eines Tages entdecken werden? ◀

QUELLEN

Wagner, J. (Hg.): Gottkönige am Euphrat. Neue Ausgrabungen und Forschungen in Kommagene. Philipp von Zabern, Darmstadt/Mainz 2012

Westfälisches Museum für Archäologie (Hg.): Nemrud Dağ. Neue Methoden der Archäologie. Bönen/Westfalen 1991

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Ab 26. 5. 2017 bei Ihrem
Zeitschriftenhändler!



TITELBILD: ISTOCK/WILDPXEL



Print | 5,90 €
Download | 4,99 €

www.spektrum.de/aktion/mikrobiom

Spektrum gibt es auch digital.



Das Digitalabo von **Spektrum der Wissenschaft** kostet
im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-; Angebotspreise nur
für Privatkunden)

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

service@spektrum.de

www.spektrum.de/digitalabo





FREISTETTERS FORMELWELT PLUTOS DEGRADIERUNG

Bei seiner Entdeckung 1930 wusste man noch nicht genug, um Pluto richtig zu klassifizieren. Die Korrektur dieses Fehlers beschäftigt die Menschen seit mehr als zehn Jahren. Fest steht: Pluto ist kein Planet, und das zu Recht.

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

► spektrum.de/artikel/1453319

»M ein Vater erklärt mir jeden Sonntag unsere neun Planeten.« Diesen Merksatz habe ich schon als Kind in der Schule gelernt. Er hat dieselben Anfangsbuchstaben wie die Planeten unseres Sonnensystems: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto. 2006 war jedoch Schluss damit: Die Generalversammlung der Internationalen Astronomischen Union in Prag beschloss eine neue Definition des Wortes »Planet«, und deren Kriterien erfüllt Pluto nicht. Von da an war er nur noch ein »Zwergplanet«, was eigentlich nichts anderes bedeutet als »großer Asteroid«.

Diese Entscheidung war schon unter den Fachleuten umstritten. Besonders heftig diskutiert wird sie aber in der Öffentlichkeit. Nach Vorträgen oder Artikeln zum Thema erhalte ich so gut wie immer Kommentare von Leuten, die sich über Plutos »Degradierung« beschwerten. Ganz besonders verärgert ist man in den USA – immerhin war Pluto der einzige Planet, der von einem Amerikaner entdeckt wurde (Clyde Tombaugh) –, und amerikanische Astronomen sind es auch, die immer wieder neue Definitionen vorschlagen, nach denen Pluto wieder seinen alten Status erlangen würde.

Aktuell wird ein Vorschlag von Kirby Runyon von der Johns Hopkins University diskutiert: Jeder Himmelskörper, in dessen Innerem keine Kernfusion stattfindet und der annähernd kugelförmig ist, soll als »Planet« bezeichnet werden. Diese Ehre käme dann allerdings nicht nur Pluto zu, sondern noch gut 100 weiteren Himmelskörpern in unserem Sonnensystem.

Ob ein Himmelskörper sphärisch ist oder nicht, hängt im Wesentlichen von seiner Größe und seinem Material ab. Diese Formel beschreibt die physikalischen Prozesse, die für die Form verantwortlich sind:

$$R = \sqrt{\frac{2\sigma_y}{\pi G \rho^2}}$$

Neben der Gravitationskonstante G und der Zahl π sind die Dichte ρ des Materials und die Druckfestigkeit σ_y die bestimmenden Größen. Aus ihnen berechnet sich der »Kartoffelradius« R : Liegt der mittlere Radius eines Himmelskörpers unter R , hat er eine unregelmäßige Form, so wie eine Kartoffel. Nur wenn er größer ist, überwindet seine Eigengravitation die Druckfestigkeit des Materials und macht ihn auf die Dauer kugelrund.

Ob ein Himmelskörper sphärisch ist oder nicht, sagt also tatsächlich einiges über seinen inneren Aufbau aus. Trotzdem halte ich es für falsch, an dieser Eigenschaft den Status »Planet« aufzuhängen. Wichtiger ist, ob der Himmelskörper massiv genug ist, um mit seiner Gravitationskraft alles Material in seiner Umgebung entweder einzusammeln oder aber in ferne Regionen zu schleudern – daran hängt die seit 2006 gültige offizielle Definition. Planeten wie Erde und Jupiter ist das gelungen, weil sie in ihrer Frühzeit rasch heranwuchsen. Aber weit entfernt von der Sonne bewegten sich die Objekte viel langsamer. Es gab weniger Kollisionen, die Himmelskörper wuchsen nur zögerlich und konnten ihre Umgebung nicht im gleichen Ausmaß beeinflussen. Deswegen wurde Pluto eben kein Planet, sondern bloß ein großer Asteroid, umgeben von vielen seinesgleichen.

Keine der zahlreichen Möglichkeiten, den Begriff »Planet« zu definieren, kann so richtig zufrieden stellen; denn eine klare Trennlinie gibt es in der Natur nicht. Die Übergänge sind fließend. Solange man aber überhaupt mit solchen Definitionen arbeitet, ist es sinnvoller, Pluto und all die anderen kleinen Asteroiden nicht in die gleiche Kategorie wie Gasriesen vom Format eines Jupiters zu stecken.

Trotzdem ist Pluto ein faszinierendes Objekt, ganz gleich, wie man ihn klassifiziert! Und in der Schule lernt man ab jetzt eben einfach: »Mein Vater erklärt mir jeden Sonntag unseren Nachthimmel.«

REZENSIONEN

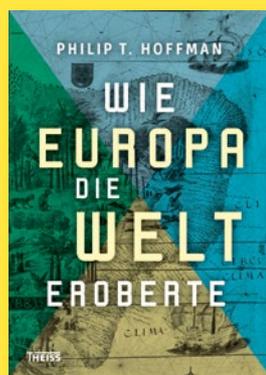
GESCHICHTE IM DAUERKRIEG MÄCHTIG GEWORDEN

Jahrhundertelange Kämpfe untereinander befähigten die Europäer dazu, fast die ganze Welt zu erobern.

► In der Geschichtswissenschaft gibt es viele historische Phänomene, die zwar als solche erkannt, nicht aber in letzter Konsequenz hinterfragt werden. So hat bereits der Mathematiker und Physiker Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) die Frage aufgeworfen, warum nicht die zivilisatorisch viel höher stehenden Chinesen Amerika entdeckt und expansiv in die Welt ausgegriffen hätten, sondern die Europäer.

Was der Göttinger Gelehrte vor rund 250 Jahren en passant in den Raum stellte, dem geht der amerikanische Wirtschaftshistoriker Philip T. Hoffman in diesem Buch genauer auf den Grund. Er legt Faktoren dar, die dazu führten, dass die Europäer kurz vor dem Ersten Weltkrieg fast den ganzen Globus beherrschten. Dabei beweist er hohen analytischen Sachverstand und profunde Kenntnis der Materie. Hoffman lehrt am California Institute of Technology.

Einen wesentlichen Grund dafür, warum die Europäer um 1914 rund 84 Prozent des Weltterritoriums kontrollierten, sieht Hoffman in der militärischen Überlegenheit des Abendlands. Zwar hätten die Chinesen das Schießpulver erfunden, doch seien



Philip T. Hoffman
**WIE EUROPA
DIE WELT EROBERTE**
Theiss, Darmstadt 2017
336 S., € 24,95

es die Europäer gewesen, die die »gunpowder technology« zur Anwendungsreife und steten Weiterentwicklung brachten. Dabei spielte der wissenschaftlich-technische Fortschritt in der frühen Neuzeit eine maßgebliche Rolle.

Hauptantrieb dieser Entwicklung war ein militärischer Wettbewerb, der unter den geografischen und politischen Bedingun-

gen Europas eine besondere Dynamik entfaltete. Nach dem Tod Karls des Großen (zirka 748–814), schreibt der Autor, habe es kein einheitliches Imperium, keine übergeordnete Macht mehr gegeben, die das Abendland hätte befrieden können. Stattdessen sei der Kontinent ein bunter Flickenteppich von Regionalmächten gewesen, die miteinander ständig um



ANG. IMAGES (DARF. RÖCHLING. 1895. BATAILLON GRENADEIERGARDE IN DER SCHLACHT BEI HOHENFRIEDBERG 1745)

In der Neuzeit entwickelten die europäischen Heere ihre Taktiken ständig weiter. Dargestellt ist die Lineartaktik, ein Nachfolger der Haufentaktik. Schlachtordnungen wie diese trugen erheblich zur militärischen Überlegenheit der Europäer bei.

Ruhm, Ehre und Macht rangen.

Aus dieser Konkurrenz erwuchs laut Hoffman eine besondere Form des militärischen Wettbewerbs – er bezeichnet sie als Turnier –, »bei der die Beteiligten unter den richtigen Bedingungen enorme Anstrengungen unternahmen in der Hoffnung, einen bestimmten Gewinn einzufahren«. Dies führte zu einem an-

haltenden Wettrüsten, begünstigt von militärischen Innovationen und den ebenfalls wettbewerbsorientierten Märkten, was dafür sorgte, dass nie ein einzelnes Land die Macht über den ganzen Kontinent errang. Zugleich verhinderte dieses Turnier, dass der Anteil der Militärausgaben am Staatshaushalt sinken konnte – anders als beispielsweise in China. Zu-

dem verfügten Europas Fürsten über gut ausgebaute Finanzsysteme, dank derer sie sich immer wieder neues Geld für Feldzüge beschaffen konnten.

In häufigen Kriegen wurden nach dem Prinzip »learning by doing« ständig neue Waffensysteme, Strategien und Taktiken erprobt. Dabei ging die Bedeutung von Elitekriegen wie Rittern zu Gunsten

von Formationskämpfern zurück. Anhaltend hohe Investitionen ins Militär sowie die Verbreitung technischer Innovationen trugen maßgeblich zur militärischen Überlegenheit der Europäer bei. Diese Dominanz tritt klar zu Tage, wenn man – wie Hoffman – die Entwicklung der europäischen Nationen mit jener von anderen Zivilisationen vergleicht.

Zwar habe es zu Beginn der Frühen Neuzeit mit China und Japan auch außerhalb Europas militärisch starke Imperien gegeben. Doch nirgendwo, so Hoffmans These, seien die Rivalitäten untereinander so intensiv und virulent, seien Glaubenseifer, Geschäftssinn und imperiales Sendungsbewusstsein so ausgeprägt gewesen wie im zersplitterten Abendland. Während sich Japan in der Edo-Zeit (1600–1868) von der Außenwelt abschottete und während Chinas Kaiser angesichts ihrer Dominanz in Ostasien sowie mangels äußerer Bedrohung keine besondere Veranlassung sahen, ihre Schusswaffentechnik aggressiv weiterzuentwickeln, rüstete Europa permanent auf.

Hoffman erfindet das Rad zwar nicht neu; vieles, was er ausführt, wurde jüngst etwa von Geoffrey Parker oder Ian Morris behandelt. Es gelingt ihm jedoch, die Debatte durch neue Fragestellungen zu bereichern und weiter zu fundieren. Ein lesenswertes Buch mit interessanten methodischen Ansätzen.

Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.



AKG IMAGES (CARL ROOHLING, 1895: BATAILLON GRENADEIERGARDE IN DER SCHLACHT BEI HOHENBERG 1745)



Marc Bekoff und Jessica Pierce
SIND TIERE DIE BESSEREN MENSCHEN?
 Fairness und Empathie
 im Tierreich
 Aus dem Englischen
 von Barbara Schöning
 Franckh-Kosmos, Stuttgart 2017
 224 S., € 20,-

ETHIK MORAL BEI TIEREN

Studien zeigen, dass Kooperation, Empathie und Gerechtigkeit nicht nur bei Menschen auftreten.

► Gibt es so etwas wie Moral auch bei Tieren? Marc Bekoff, ehemaliger Professor für Evolutionsbiologie an der University of Colorado, und Jessica Pierce, Autorin und Bioethikerin, beleuchten diese brisante Frage sowohl von der biologischen als auch von der philosophischen Seite her. Sie gehen davon aus, dass sich Moral und kognitive Eigenschaften im Lauf der Evolution kontinuierlich entwickelt haben und in ihrer maximalen Ausprägung beim Menschen auftreten. Dabei unterteilen sie moralisches Verhalten in drei große Cluster, die sie jeweils eingehender untersuchen: Kooperation, Empathie und Gerechtigkeit. In zahlreichen wissenschaftlichen Studien haben sie Belege gefunden für moralische Verhaltensweisen bei Tieren, die offensichtlich nicht nur durch Instinkte gesteuert werden. Mit ihrem Buch möchten sie ein Fundament legen für einen respektvolleren, wertschätzenderen Umgang mit Tieren. Leider ist die deutsche Übersetzung manchmal etwas mühsam zu lesen. Ein Quellenverzeichnis, das sich auf die Seitenangaben der Originalausgabe bezieht, kann man online einsehen. Das Werk ist lesenswert für alle, die mit Tieren arbeiten und denen Tiere am Herzen liegen. Tanja Neuvians

PSYCHOLOGIE KOMPENDIUM DES KLAREN DENKENS

Vernünftig werden und bleiben!

► Logisch, geordnet, effizient – wer würde nicht gern so denken. Und vor allem entscheiden. Sich nicht blenden oder ablenken lassen, nicht im Gestrüpp der Scheinargumente und Vorurteile den Durchblick verlieren: Das erscheint gerade in »postfaktischen« Zeiten wichtiger denn je. Sehr lobenswert ist daher der Versuch des Münchener Philosophen und Ökonomen Nikil Mukerji, dem richtigen und klaren Denken zu seinem Recht zu verhelfen.

Er tut dies mit einer Mischung aus Logikkurs, Beispielen für typische Denkfallen etwa aus der Homöopathie sowie daraus abgeleiteten Anweisungen. Pauschale Aufforderungen wie »Denken Sie lückenlos« oder »Prüfen Sie Ihr Denken auf widersprüchliche Annahmen« mögen teils schwer zu erfüllen sein. Doch was zählt, ist der Wille und ein geschärfter Blick dafür, nicht gleich jedem Unsinn auf den Leim zu gehen.



Nikil Mukerji
DIE 10 GEBOTE DES GESUNDEN MENSCHENVERSTANDS
 Springer,
 Berlin und Heidelberg 2017
 329 S., € 16,99

Wie Mukerji selbst einräumt, können wir häufig nicht alle nötigen Informationen hierfür einholen und jedes Detail bis ins Letzte analysieren. Umso wichtiger ist es, zumindest jene Mindeststandards zu beachten, die der Autor klug und präzise vorstellt. Darunter Ockhams Rasiermesser: das Bevorzugen einfacher Erklärungen, die mit möglichst wenigen Vorannahmen auskommen.

Mukerjis 10 Gebote – von »Bringen Sie Ordnung in Ihr Denken« bis »Lassen Sie sich keinen Bären aufbinden« – sind gut und richtig. Nur zergliedert er sie mitunter so kleinteilig, dass man als Leser leicht den Überblick verliert. Spätestens bei »Tipp 26.2.1. Erkunden Sie die Heuristik-Forschung« kommt der

Verdacht auf, dass man seine Lebenszeit vielleicht auch noch anders verbringen möchte als mit dem Prüfen möglicher Denkfallen. Festzuhalten bleibt, dass wir oft deshalb falsch denken, weil uns die Zeit, die Daten oder einfach die Notwendigkeit abgehen, es besser zu machen. Gern hätte man deshalb ein elftes Gebot gelesen: »Weniger ist manchmal mehr!« Dennoch erweist sich das Buch als gelungene Fundgrube der kognitiven Fallstricke und wie man sie vermeidet. Steve Ayan

PHYSIK GEFESSELTES GENIE

In einem launigen Buch über Stephen Hawking erklärt Wissenschaftsautor Rüdiger Vaas die Gedanken des berühmten Physikers.

▶ Hätte Stephen Hawking einen Wunsch frei, dann würde er wahrscheinlich an den Rand des Universums fliegen, um zu sehen, wie es dahinter weitergeht. Hawking, der wohl berühmteste lebende Physiker, genialer Geist und gefangen in einem reglosen Körper, gibt nicht auf, die



Rüdiger Vaas
EINFACH HAWKING!
Geniale Gedanken schwerelos verständlich
Kosmos, Stuttgart 2016
128 S., € 14,99

gewaltige Natur des Universums zu ergründen und die Grenzen der Erkenntnis zu sprengen. Wenig ist ihm geblieben, um mit seiner Außenwelt zu kommunizieren. Seit 1963 an amyotropher Lateralsklerose er-

krank, ist er an den Rollstuhl gefesselt und kann maximal noch drei Wörter pro Minute mit Hilfe eines Sprachcomputers artikulieren, den er über die Augen steuert. Trotzdem hat er viele populärwissenschaftliche Bücher verfasst, sein wohl berühmtestes »Eine kurze Geschichte der Zeit« wurde millionenfach verkauft.

Wissenschaftsjournalist und Buchautor Rüdiger Vaas widmet sein neues Werk dem Ausnahmephysiker. Darin erklärt er die Grundlagen der Kosmologie, beschreibt die Entstehung des Universums, erläutert das Konzept der Schwarzen Löcher und das Phänomen Zeit. Immer wieder geht Vaas darauf

ein, welche Gedanken sich Hawking dazu gemacht hat, wo er konstruktive Einfälle hatte – und wo er irrte.

Das Büchlein ist bewusst locker verfasst und mit witzigen, farbenfrohen Zeichnungen illustriert. Grüne Marsmännchen schweben neben den Textblöcken, Schwarze Löcher verschlucken Alltagsgegenstände, und man erblickt Hawking beim Pokerspiel mit Albert Einstein, Isaac Newton und dem Androiden Data (eine berühmte Szene aus »Star Trek«). Hinzu gesellen sich Hawking-Zitate, die den Physiker oft als selbstironischen Zeitgenossen erscheinen lassen. Am Ende jedes Kapitels wartet ein



Spektrum SPEZIAL

JETZT
IM ABO
BESTELLEN
UND 15%
SPAREN

Die **Spektrum Spezial**-Reihe **PMT** erscheint viermal pro Jahr – im Abonnement für nur € 29,60 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

Bestellen Sie jetzt Ihr Spezialabo!

service@spektrum.de

Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/spezialabo

Physik Mathematik Technik

REZENSIONEN

Quiz, bei dem man testen kann, was man bei der Lektüre im Gedächtnis behalten hat.

Obwohl das Buch viel einfacher geschrieben ist als die populärwissenschaftlichen Werke von Hawking selbst, sollte man ein wenig physikalische Vorbildung mitbringen. Spätestens wenn es um Schwarze Löcher und Relativitätstheorie geht, wird es auch mal anspruchsvoll.

Zu den Themen, mit denen Hawking sich beschäftigt hat, gehören auch das Phänomen Zeitreisen und die Zukunft der Menschheit, wie aus dem Buch hervorgeht. Der Physiker ist überzeugt, dass wir die Erde früher oder später verlassen müssen, um zu

überleben. Er hält es zudem für möglich, dass Außerirdische die Menschheit versklaven, und sieht es äußerst kritisch, dass wir mit Radiosignalen gezielt versucht haben, auf uns aufmerksam zu machen.

»Einfach Hawking!« ist kurzweilig und aufschlussreich, gewährt Einblicke in die Gedankenwelt des Physikers und stellt dazu wichtige fachliche Grundlagen vor. Etwas zu kurz kommt Hawkings Biografie, doch das Werk regt dazu an, des Wissenschaftlers eigene Bücher in die Hand zu nehmen und tiefer in die Materie einzusteigen.

Thorsten Naeser ist Diplom-geograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

MEDIZIN ÜBERFORDERTES GESUNDHEITS- WESEN

Was in der medizinischen Betreuung älterer Menschen falschläuft – und wie man es besser machen kann.

Wer in Deutschland als alter Mensch krank wird, kann sich auf einiges gefasst machen. Wegen fehlender Absprachen zwischen verschiedenen Ärzten bekommt er mit hoher Wahrscheinlichkeit zu viele und oft auch ungeeignete Medikamente verschrieben. Vom Hausarzt erhält er kaum noch Be-



Raimund Schmid
WEHE DU BIST ALT UND WIRST KRANK
Missstände in der Altersmedizin und was wir dagegen tun können
Beltz, Weinheim 2017
263 S., € 19,95

such, weil dieser immer mehr Patienten betreuen muss. Krankenhäuser haben nur in seltenen Fällen eine altersmedizinische Station; in den Notaufnahmen fehlt es an geriatrisch geschulten Fachkräften. Nach der häufig viel zu schnellen Entlassung aus der Klinik mangelt es an Reha-Angeboten, und der Übergang zur häuslichen Pflege funktioniert alles andere als reibungslos.

Medizinjournalist Raimund Schmid legt den Finger in die Wunden des deutschen Gesundheitssystems und prangert in sieben Kapiteln die Missstände der Altersmedizin an. Seine Schilderungen dürften vielen Lesern bekannt vorkommen – ob sie nun persönlich oder als Angehörige betroffen sind oder im Gesundheitswesen arbeiten. Bei seinen Recherchen hat der Autor zahlreiche Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen, Hausärzte und Patienten in verschiedenen Teilen Deutschlands besucht. Lebensnah beschreibt er die individuellen Geschich-



Clive Gifford
DAS IST KEIN BIOBUCH
und Physik ist auch nicht drin!
Aus dem Englischen von
Susanne Schmidt-Wussow
Knesebeck, München 2017
Ab 8 Jahren
96 S., € 12,95

KINDERBUCH NATURWISSENSCHAFTEN ERLEBEN

Nette Experimente für neugierige Nachwuchsforscher.

Wissenschaft macht Spaß: Das ist die zentrale Botschaft dieses Buchs, das Mädchen und Jungs ab acht in eine Welt voll spannender Experimente entführt. Es stellt 31 Projekte und Rätsel rund um Biologie und Physik vor, die kleinen Forschern bestimmt nicht langweilig werden. Mit nur wenigen Werkzeugen – Papier, Stifte, eine Schere und manchmal Zirkel oder Faden – können sie im Nu eine Papierschlange bauen, die sich im Heizungsluftstrom dreht, oder ein kleines Daumenkino, bei dem ein Gecko eine Libelle verschlingt. Viele optische Täuschungen, Klobeleien und Naturbeobachtungen ergänzen das Werk. Der Autor

erklärt durchweg kurz und bündig, unterhaltsam und lehrreich. Nur wenige Basteleien, beispielsweise der Farbkreislauf, erfordern etwas mehr Fingerspitzengefühl, als Kinder dafür typischerweise aufbringen möchten. Die meisten anderen Experimente sind schnell und problemlos gebaut. Sie zu testen, bereitet Freude und weckt die Neugier auf mehr. Alles in allem ist der Band sehr gelungen und jedem Nachwuchsforscher zu empfehlen. Michaela Maya-Mrschtik

ten seiner Gesprächspartner, unterfüttert mit statistischen und juristischen Informationen.

Wohlthuend fällt dabei auf, dass Schmid nicht nur deutlich Kritik äußert, sondern anhand konkreter Beispiele auch Lösungsmöglichkeiten aufzeigt. Unter anderem stellt er ein Modellprojekt in Baden-Württemberg vor, bei dem der Hausarzt von einer Versorgungsassistentin unterstützt wird. Hierbei handelt es sich um eine medizinische Fachangestellte mit Zusatzqualifikation, die speziell auf ältere Patienten eingeht. Das umfasst regelmäßige Hausbesuche ebenso wie eine psychosoziale Betreuung und gegebenenfalls

Beratung, wie die eigene Wohnung in Richtung Barrierefreiheit gestaltet werden kann. Ähnliche Aufgaben übernehmen in anderen Bundesländern Gemeindeschwestern, von denen der Autor einige bei ihrer Arbeit begleitet hat. Zudem stellt er Krankhäuser mit speziellen Konzepten für die geriatrische Versorgung vor, widmet sich innovativen Kommunen und erläutert, welche Möglichkeiten die Digitalisierung gerade für ältere Menschen bietet.

Ärzte, Pflegekräfte und vor allem Politiker können sich hier sicherlich Anregungen holen. Speziell den Letzteren stellt Schmid abschließend 20 Rezepte aus, die dabei helfen sol-

len, unser krankendes Gesundheitssystem zu kurieren. Unter anderem fordert er, Ansehen und

rigen sind die praktischen Tipps am Ende des Buchs. Hier listet Schmid komprimiert auf, was etwa bei

20 Rezepte stellt der Autor den Politikern aus, um das krankende Gesundheitssystem zu kurieren

Bezahlung der Pflegeberufe zu stärken, die hausarztzentrierte Versorgung auszubauen, an medizinischen Fakultäten Lehrstühle für Geriatrie einzurichten und bis spätestens 2020 die Bettenkapazitäten geriatrischer Krankenhäuser deutlich zu erhöhen.

Besonders hilfreich für Senioren und ihre Angehö-

einer Patientenverfügung zu beachten ist, welche Leistungen Hausnotrufsysteme anbieten und wie man mit einfachen Mitteln die Sturzgefahr im Alltag verringern kann. Ein kommentiertes Linkverzeichnis hilft dabei, weitere vertrauenswürdige Informationsquellen zu finden.

Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

Spektrum
der Wissenschaft

SCHREIBWERKSTATT

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

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

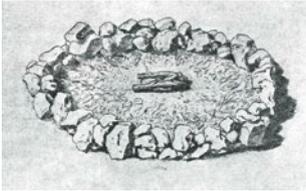
Ort: Heidelberg

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

Telefon: 06221 9126-743 | service@spektrum.de
[spektrum.de/schreibwerkstatt](https://www.spektrum.de/schreibwerkstatt)

1917

ENTZAUBERTE STEINKREISE



Kuschelige Schlafstätte aus Steinen.

»Sarasin fand an der Ostküste Kaledoniens aus aufeinandergelegten Steinen errichtete Kreise von einigen Metern Durchmesser, mit Holzresten und Asche in der Mitte. [Er] befragte die Eingeborenen nach der Bedeutung dieser

ringförmigen Steinwälle und erhielt die Auskunft, daß es Schlafstellen zum Übernachten sind. Sarasin maß dieser Aussage wenig Wert bei, bis er sich überzeugen konnte: er sah die Träger seiner Expedition sich ein Nachtlager errichten, indem sie einen Steinring von etwa 50 cm Höhe und 4 m Durchmesser bauten. Wohl mit gutem Recht weist Sarasin darauf hin, daß manches, was in der europäischen Prähistorie als Grabanlage, Opferplatz oder Hüttenrest gedeutet wurde, nichts anderes zu sein braucht als eine temporäre Lagerstätte.« *Prometheus 1443, S. 597–602*

NEUE WEGE IN DER WUNDHEILUNG

»Ein Lieblingsgegenstand der experimentellen Biologie ist die Erzeugung von Larven aus unbefruchteten Eiern, die durch ein Agens zur Entwicklung erregt werden. Popoff erprobte sie bei der Wundbehandlung und erkannte in ihnen Hilfsmittel, um die Regeneration der Gewebe anzuregen. Hypertonische Lösungen von NaCl und MgCl übten bei Muskelwunden und Erfrierungen eine günstige Wirkung aus. Äther, in einer Mischung mit Olivenöl auf die Wunde gebracht, bewährte sich gleichfalls.« *Prometheus 1441, S. 576*

UNGELÖSTES HIMMELSRÄTSEL

»Zu Anfang und im Laufe des Monats August vergangenen Jahres wurden nordwärts der Alpen Farbenspiele in der Atmosphäre vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang beobachtet. Dabei erschienen zartwellige, zirrusartige Streifen. Als Ursache konnte man fast immer Vulkanausbrüche nachweisen, deren hoch in die Atmosphäre geschleuderte Staub- und Gasmassen die prächtigsten Farbeneffekte hervorriefen. Das Merkwürdige ist nun: man kann den ganzen Komplex jener Erscheinungen auf eine vulkanische Eruption nicht zurückführen. Einige Astronomen sind der Ansicht, daß die Erscheinung kosmischen Ursprungs ist.« *Prometheus 1443, S. 608*

1967

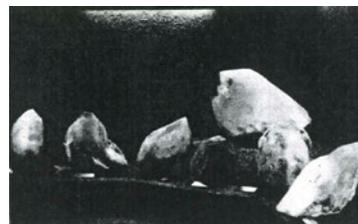
WEHRHAFT IM WINTER

»Die Honigbienen fliegen bei Temperaturen unter 18 °C nicht mehr, und bei etwa 14 °C drängen sie sich zu einem Schwarm zusammen, der mit absinkender Temperatur immer dichter wird. Innerhalb des Schwarms herrscht eine konvektionsähnliche Bewegung, indem die Bienen von der Außenseite ständig nach innen wandern, um erwärmt und von Tieren aus dem Inneren ersetzt zu werden. Obwohl bei niedrigen Temperaturen nahezu die gesamte normale Aktivität der Kolonie ruht, besteht die Verteidigungsbereitschaft weiter. In der ersten Phase krümmen die Bienen der Außenseite den Körper nach oben, mit ausgestrecktem Stachel, an dessen Spitze ein Gifftropfen hervortritt. Diese Reaktion bildet einen ausgezeichneten Schutz, da diese äußeren Bienen zu kalt sind, um zu fliegen und daher den Feind nicht aktiv angreifen können. In der zweiten Phase, die innerhalb von wenigen Sekunden folgt, kommen die wärmeren Bienen aus dem Inneren des Schwarms an die Oberfläche.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 6, S. 258*

MIT DEM LASER DURCH DEN FELS

»Bei ihren Versuchen benutzten Studenten [vom Massachusetts Institute of Technology] einen [Laser-]Strahl und richteten ihn auf eine Felsenoberfläche von etwa 40 mm Durchmesser. Auf dieser erschienen nach wenigen Sekunden Risse, die sich bald vermehrten. Nach Ansicht von Professor McGarry sollte es möglich sein, Tunnelbauten in gewachsenem Fels auszuführen, ohne dass dabei Abraum entsteht.« *Neuheiten und Erfindungen 370, S. 108*

DIE RIESEN VOM BERG



Die gewaltigen Kristalle sind auch heute noch im Salzburger Museum »Haus der Natur« zu bewundern.

»Die sieben Riesenbergkristalle aus der Nordwand des Eiskögele im Großglocknergebiet stellen [mit 1622 Kilogramm] den größten Gesamtfund dar, der bisher in den Alpen gelungen ist. Leider wurde die Fundstelle durch ganze Karawanen fanatischer Mineralsammler und Geschäftemacher ausgeplündert. Eine unzureichende Gesetzgebung verhindert ein Vorgehen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 6, S. 259*

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

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



IGNORIERTER LUFTWIDERSTAND

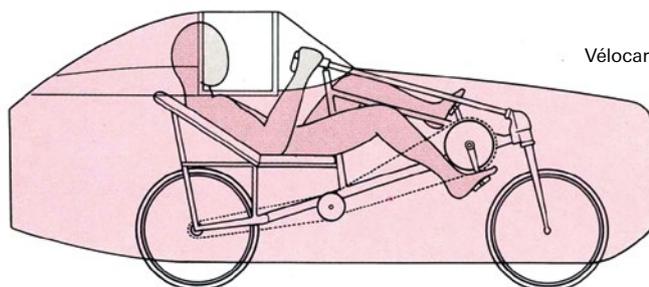
Zum 200-jährigen Jubiläum der Erfindung des Zweirads setzten drei Artikel einen Schwerpunkt in Spektrum April 2017. Die Aerodynamik des Fahrrads war früher bereits Titelthema des Hefts – im Februar 1984.

Roland Maier, Riemerling: Der Luftwiderstand ist meist das größte Hemmnis beim Radfahren. Das geht auch aus dem Diagramm von H. Joachim Schlichting (S. 75) gut hervor. Umso befremdlicher ist es, dass bei den meisten Rädern die Aerodynamik praktisch völlig außer Acht

gelassen wird. 1938 verbannte der internationale Radsportverband, die Union Cycliste Internationale (UCI), wesentliche aerodynamische Hilfsmittel aus dem Rennsport. Entsprechende Weiterentwicklungen wurden somit ausgebremst. Oft finden sich aber gerade Entwicklungen aus dem Sport später bei den Alltagsrädern wieder.

Genau dieser Reifungsprozess wäre bei den Konzepten nötig gewesen, die in der Ausgabe vom Februar 1984 vorgeschlagen wurden. Von den durchweg schlüssigen Ansätzen waren nur wenige alltagstauglich. Im Rahmen des Schwerpunktthemas »200 Jahre Zweirad« hätte

In der Spektrum-Ausgabe vom Februar 1984 wurden mehrere Ideen für windschnittige Räder vorgestellt, hier eine Auswahl. Einige wären wohl wenig alltagstauglich.



Vélocar

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.

dies durchaus mit aufgenommen werden können. Der Beitrag »Die Aerodynamik von Muskelkraft-Fahrzeugen« hat in den vergangenen 33 Jahren kaum an Aktualität verloren.

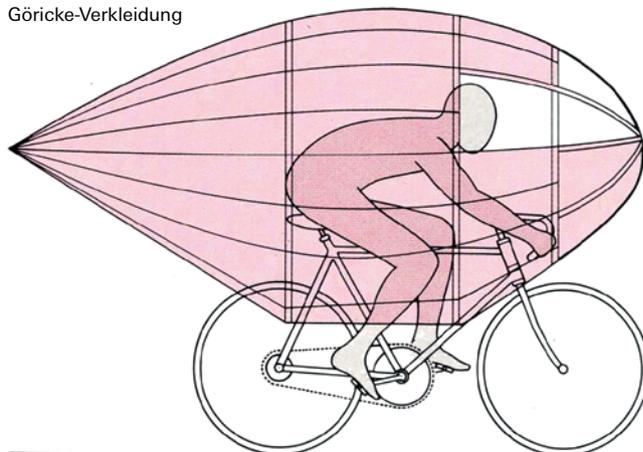
WAHRE URSACHEN LIEGEN TIEFER

Lebewesen prägen manche Merkmale nicht noch stärker aus, weil feine Unterschiede irgendwann nicht mehr als solche erkennbar wären, erläuterte Michael Springer einen Befund aus der Biologie (»Grenzen des Wachstums«, Spektrum März 2017, S. 27).

Hans Henning Wenk, Mülheim: Das Weber-Fechner-Gesetz allein kann die beschriebene Grenze des Wachstums nicht erklären, denn bei unerschöpflicher Kapazität könnte die Pflanze die logarithmische Skala der Wahrnehmung durch schiere Menge kompensieren und 10- oder 100-mal mehr Nektar produzieren. Der im Modell tatsächlich wirkende Begrenzungsfaktor muss daher tiefer liegen.

Die Implikationen in der Natur, in der die Kapazitäten beispielsweise durch den linear skalierenden Aufwand zur Produktion des Merkmals begrenzt werden, sind dennoch bedeutend. So wird dem »Wettrüsten« deutlich früher ein Ende gesetzt, als es bei ebenfalls linear zunehmender Reizempfindung der Fall wäre. Auf den Menschen scheint dieses Gesetz leider nur beschränkt anwendbar. So ist die erneut aufkeimende Diskussion zur Aufstockung der Nuklearwaffenbestände trotz längst erreichten Overkills wohl nur mit den Mechanismen der Spieltheorie zu erklären.

Görücke-Verkleidung



WALKEN GRAPHICS / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 1984

CHEMIE IST ATTRAKTIV

Seit 2016 präsentieren **Matthias Ducci und Marco Oetken** in den »Chemischen Unterhaltungen« raffinierte Versuche mit Alltagsreagenzien.

Hans-Jürgen Jäger, Cochem: Ich bin Gymnasiallehrer für Biologie und Chemie, war lange »Spektrum«-Abonnent, und inzwischen hat unsere Schule ein Abo. Die Chemie ist meines Erachtens in Ihren Heften immer etwas zu kurz gekommen. Andere Fächer wurden besser bedient mit interessanten Artikeln und Grafiken.

Umso mehr freut es mich, dass Sie als Rubrik die »Chemischen Unterhaltungen« aufgenommen haben. Mit den schönen und oft alltagstauglichen Experimenten erhöht sich die Attraktivität Ihrer Zeitschrift deutlich. Bitte mehr davon!

AUSWAHL NACH ÄHNLICHKEIT

Nicht räumliche Barrieren, sondern kulturelle Unterschiede könnten beim Großen Schwertwal allmählich neue Arten entstehen lassen. Das beschrieb der Evolutionsbiologe Rüdiger Riesch (»Orcas – Artbildung einmal anders«, Spektrum April 2017, S. 30).

Stefan Berking, Köln: Dieser Weg zur Artbildung bei Orcas ist hochinteressant. In der Populationsgenetik nennt man das (positive) assortative Paarung (Auswahl eines Partners, der den engsten Angehörigen ähnlich sieht und ein ähnliches Verhalten hat wie sie).

Beispielsweise hat Ching Chun Li 1955 die verschiedenen Formen assortativer Paarung mathematisch behandelt und gezeigt, dass bestimmte Arten dieser Partnerwahl schnell (im evolutionären Maßstab) zu großen Unterschieden in der Gestalt führen, was die Voraussetzung für

Artbildung ist. Es gibt eine Vielzahl überzeugender Hinweise, dass wir Menschen den Partner ebenfalls nach einer positiven assortativen Paarung auswählen. Dieses Verhalten kann erklären, warum wir deutlich unterschiedlicher aussehen als unsere nächsten Verwandten, die Schimpansen.

VISIONÄRER INGENIEUR

Jean-Jacques Quisquater und Jean-Lois Desvignes untersuchten, wie gut Chipkarten gegen kriminelle Angriffe geschützt sind (»Wie sicher ist die Chipkarte?«, Spektrum März 2017, S. 56).

Karlheinz Fleder, München: Ich war Anfang Februar im Deutschen Museum auf einer Gedenkfeier anlässlich des 100. Geburtstags des Raketenpioniers Helmut Gröttrup. Dieser geniale Ingenieur hatte bereits in den 1960er Jahren Patente für die spätere Chipkarte angemeldet. Leider wird das in dem Artikel nicht erwähnt.

ERRATA

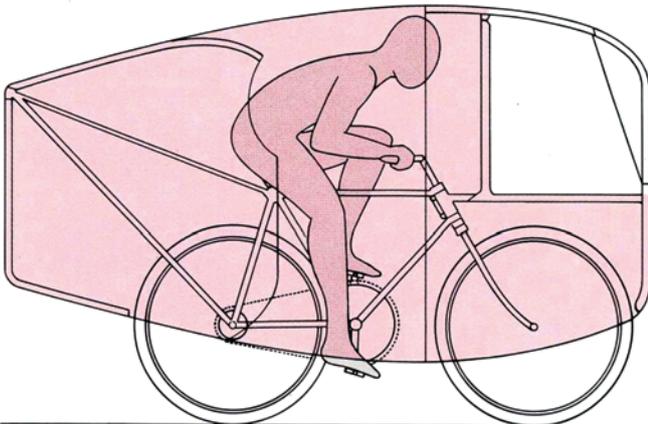
»Konkurrenlos sparsam«, Spektrum April 2017, Schlichting!, S. 74

In der Tabelle auf S. 76 wurde bei der aufs Rad übertragenen Leistung in der Zeile für eine Minute 303 Watt angegeben. Richtig wären 403 Watt, wie Leser Walter Reime nachgerechnet hat.

»Die große Leere«, Spektrum April 2017, S. 12

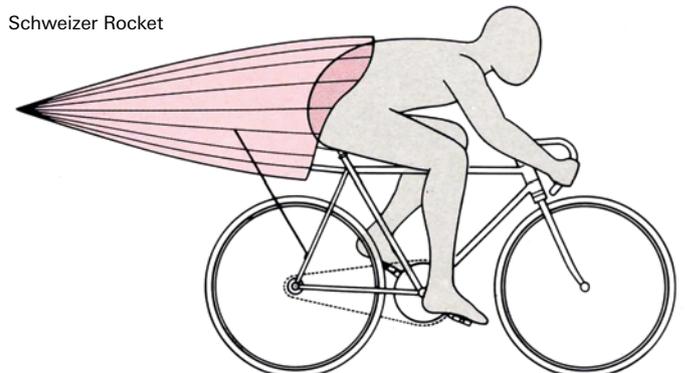
Der kalte Fleck im kosmischen Mikrowellenhintergrund nimmt nicht die 20-fache Fläche des Vollmonds ein, wie in der zweiten Spalte auf der ersten Seite des Artikels steht, sondern etwa dessen 20-fachen Durchmesser. Wir danken René Keil für den Hinweis.

Entwurf von Buneau-Varilla



WALKEN GRAPHICS / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 1984

Schweizer Rocket



futur III

Das Internet der Dinge

Intelligente Küchengeräte unter sich.

Eine Kurzgeschichte von Uwe Hermann

Die Milch ist schlecht«, sagte der Kühlschrank.

Niemand in der Küche hielt es für notwendig, ihm zu antworten. Nur die Sekundenanzeige des Küchenradios geriet für einen winzigen Moment aus dem Takt.

Der Kühlschrank schickte eine Bestandsanfrage über das Netzwerk an die Vorratskammer und wartete auf die Antwort. Es herrschte tiefste Nacht. Abgesehen von dem Monitor, der in die Tür des Kühlschranks eingelassen war und dessen Inhalt anzeigte, war es stockduster.

»Hey Leute«, meldete sich der Kühlschrank nach Auswertung der Bestandsanfrage erneut. »Meine Milch ist ungenießbar, und wir haben keine Vorräte mehr im Haus!«

Er erhöhte die Leistung seines Monitors, worauf dessen Licht den Tisch und den vorderen Bereich der Küchenzeile zu erhellen begann. Jetzt endlich reagierte der Kaffeevollautomat. Sein Farbdisplay schaltete sich an, und er fuhr aus dem Stand-by-Modus hoch.

»Hat das nicht bis morgen früh Zeit? Die meisten von uns befinden sich im Energiesparmodus, und den solltest du besser auch aktivieren.«

»Aber wir haben ein Problem. Unser Vorrat an Milch ist aufgebraucht, und ihr wisst, wie mürrisch ER ist, wenn er am Morgen nicht seinen Latte macchiato bekommt.«

»Na und? Dann trinkt ER zum Frühstück eben mal seinen Kaffee ohne Milch.«

»Als ER das letzte Mal ohne Latte macchiato aus dem Haus gegangen ist, war er so schlecht gelaunt, dass er den autonomen Piloten seines

Fahrzeugs ausgeschaltet und fast einen Unfall verursacht hat«, erinnerte ihn der Kühlschrank.

Nun meldete sich auch der Toaster: »Mir hat die medizinische Auswertungseinheit im WC gesteckt, dass SEINE Urinwerte schon länger stark von der Norm abweichen. Vielleicht täte es IHM ja ganz gut, wenn er mal ein paar Tage lang komplett auf Kaffee verzichten würde.«

»Behalte du deine Ratschläge für dich«, fuhr ihn der Kaffeevollautomat an, der es nicht leiden konnte, wenn man seine Existenzberechtigung in Frage stellte.

»Ich könnte eine Onlinebestellung aufgeben. Bis ER aufwacht, hätten wir einen Pappkarton Milch vor der Haustür stehen«, schlug der Kühlschrank vor. Auf seinem Monitor erschien die Website eines Online-shops.

»Damit du wie beim letzten Mal anstatt eines Kartons eine Palette bestellst? Auf keinen Fall!«

»Ihr wisst, dass dieser Softwarebug seit dem letzten Update gefixt ist«, maulte der Kühlschrank.

»Bug? Blödsinn! Wahrscheinlich ist dir nur wieder das Komma verrutscht«, stichelte der Kaffeevollautomat.

Für einen Moment schwieg der Kühlschrank beleidigt.

»Tee?«, schlug das Küchenradio vor. Niemand beachtete es. Das Gerät war ein uraltes Modell, ohne Sprachausgabe oder Mailfunktion, aus einer Zeit, als 64-Bit-Computersysteme noch als modern galten. Wenn es sich an den Gesprächen beteiligen wollte, zappte es durch die Sender und setzte aus Sprach- und Musikfetzen seine Antwort zusammen.

Der Kühlschrank durchsuchte das Internet nach einer Möglichkeit, Latte macchiato ohne Milch zuzubereiten, stieß bei dem Suchbegriff »Latte« aber nur auf Pornoseiten. Er wollte schon aufgeben und sich wieder in den Energiesparmodus versetzen, als sich aus dem Schlafzimmer die Wohlfühleinheit der Matratze per WLAN zuschaltete. »Meine Sensoren registrieren eine erhöhte Körpertemperatur, flachen Atem und unregelmäßige Herztöne. Ich glaube, IHM geht es nicht gut!«

»Medical Love Song ... wir gehen von einer beispiellosen ... **Bei Erkältung hilft** ...«, drang es aus dem Lautsprecher des Radios.

»Das ist keine einfache Erkältung«, widersprach die Matratze, nachdem der Kühlschrank die Antwort des Radios als E-Mail weitergeleitet hatte. »Seine Werte sehen gesundheitsbedrohlich aus.«

»Sollen wir einen Arzt rufen?«, fragte jemand.

Alle schwiegen.

Nachdem in der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts Hacker das Internet der Dinge als neues Angriffsziel entdeckt hatten, entwickelte man einen lernfähigen KI-Chip, der die Systeme selbstständig schützen sollte. Damals ahnte niemand, wie leistungsstark dieser Chip werden würde. Heutzutage waren Küchengeräte oft intelligenter als die Menschen, die sie bedienten, was dazu führte, dass sie ihr wahres Potenzial verbergen mussten. Niemand will schließlich einen Kühlschrank, der schlauer als sein Besitzer ist – oder auf eigene Faust Telefonate führt.

Da keines der Geräte die Verantwortung für den Anruf übernehmen wollte, wurde der Vorschlag abgelehnt.

»Dann sollten wir IHN wecken, damit er selbst entscheiden kann, ob er einen Arzt braucht oder nicht«, schlug der Toaster vor.

Damit waren alle einverstanden.

»**Sie hören das Beste ... alle Lieder der Achtziger und Neunziger ... I'm on the highway to hell ...**«, knallte es ohrenbetäubend aus den Radioboxen, aber selbst die höchste Lautstärke schaffte es nicht, IHN zu wecken.

»Beeilt euch, es geht IHM immer schlechter!«, drängte die Matratze.

Das Radio gab seinen Versuch auf und brachte vorsorglich einen Beitrag über Wiederbelebungsmaßnahmen am Unfallort.

»Die Lage ist ernst«, sagte der Kühlschrank. »Wir brauchen Hilfe.« Er schickte eine Rundmail an alle IP-Adressen im Haus und schilderte die Lage.

Der Kaffeeautomat hielt die Spannung nicht mehr aus

Die wenigsten Geräte reagierten auf seinen Notruf. Entweder hingen sie gerade nicht im Netzwerk, oder ihre KI war nicht bereit zu helfen. Die Rauchmelder-Zentraleinheit antwortete, dass sie Wichtigeres zu tun hätte, als sich um SEINE Alpträume zu kümmern, und die 3-D-Bildwand im Wohnzimmer beschränkte sich darauf, die letzte Episode einer Arztserie von Michael Crichton abzuspielen.

»Wir sind auf uns allein gestellt«, sprach der Toaster die traurige Wahrheit aus.

Da erinnerte sich der Kühlschrank an eine Paketlieferung vor ein paar Tagen. »ER hat in seinem Schlafzimmer einen neuen Radiowecker. Ich könnte versuchen, den anzumailen. Vielleicht kann er IHN wecken.«

Der Kaffeevollautomat ließ das Wasser vor Erregung brodeln.

Leider entpuppte sich der Radiowecker als südkoreanisches Gerät ohne mehrsprachige Benutzerführung

und verstand nicht, was der Kühlschrank von ihm wollte.

Das elektronische Äquivalent eines Stoßseufzers raste durch das Netzwerk. »Na schön, ich wähle den Notruf, aber wenn sich herausstellt, dass ER wirklich nur schlecht geträumt hat, wird er uns allen eine neue Firmware verpassen!«

»ER träumt nicht schlecht, er nippelt ab!«, sendete die Matratze mit höchster Priorität, worauf das Radio einen passenden Song von den Beatles spielte.

Der Kühlschrank wählte ... und wählte ... und wählte. Vergeblich versuchte er, eine Telefonverbindung nach draußen aufzubauen.

»Der Router lässt mich nicht hinaus. Er ist der Meinung, dass wir überreagieren. Wir sollen in den Energiesparmodus gehen und ihn in Ruhe Updates machen lassen.«

»Aber ER atmet kaum noch!« Die Matratze verschickte die Logdatei mit den Daten seines Gesundheitszustands an alle Küchengeräte.

Der Kühlschrank erschrak. »Ich maile noch mal den Router an und leite die Datei weiter.«

Da brach die Netzwerkkommunikation zusammen, und die WLAN-Verbindung zum Schlafzimmer riss ab.

»Ich empfangen keine Datenpakete mehr!«, rief der Toaster, der auf Sprachausgabe umgeschaltet hatte.

Dem Kühlschrank war klar, was geschehen war: »Der Router hat das Netzwerk abgeschaltet.«

»Und was machen wir jetzt? ER wird sterben, wenn wir nichts unternehmen!«

Der Kaffeevollautomat hielt die Anspannung nicht länger aus. Sein Betriebssystem stürzte ab, und das Display erlosch.

»**He's dead, Jim!**«, seufzte das Radio.

Der Kühlschrank analysierte ihre Möglichkeiten und fand nur noch einen Ausweg. Seine Aufmerksamkeit richtete sich auf den Toaster. »Ich habe

einen Plan«, sagte er. »Aber du bist der Einzige, der ihn durchführen kann.«

Als Richard Schroeder erwachte, hatten die Schmerzen in seiner Brust nachgelassen. Zwar spürte er noch immer jeden Atemzug, aber das innere Feuer, das ihn in der Nacht in Todesangst versetzt hatte, war erloschen.

Eine Krankenschwester beugte sich über ihn. »Hören Sie mich, Herr Schroeder?«

Richard wollte etwas sagen, brachte aber nur ein leises Röcheln heraus.

Er lag in einem Krankenzimmer. Umgeben von piependen und blinkenden Kontrollmonitoren. In der Luft hing der typische Geruch von Desinfektionsmitteln.

Die Schwester nahm ein Glas Wasser von seinem Nachtschrank und half ihm beim Trinken.

Richard ließ sich wieder zurück auf das Kopfkissen sinken. »Was ist passiert?«, flüsterte er.

»Sie hatten einen Herzinfarkt. Sie können Ihrem Schutzengel danken, dass man Sie gerade noch rechtzeitig gefunden hat.«

Er konnte sich an nichts erinnern. »Wie bin ich hierhergekommen?«

»Ihr Toaster ist durchgebrannt, hatte wohl einen Kurzschluss. Daraufhin hat die KI Ihrer Rauchmelder-Zentraleinheit den Direktnotruf aktiviert. Die Feuerwehr hat Sie gefunden.«

Die Schwester wollte schon den Raum verlassen, als ihr etwas einfiel.

»Fast hätte ich es vergessen.« Aus der Tasche ihres Kittels zog sie ein Stück Papier heraus. »Gleich nach Ihrer Einlieferung ist eine E-Mail für Sie gekommen.«

»Eine Mail? Es weiß doch niemand, dass ich hier bin.« Richard nahm den Ausdruck entgegen, faltete ihn auseinander und las: »Bringen Sie bitte Milch mit!«

DER AUTOR

Uwe Hermann, Jahrgang 1961, schreibt seit mehr als 25 Jahren Kurzgeschichten. Für seine aktuelle Anthologie »Das Amt für versäumte Ausgaben« konnte er kürzlich den zweiten Platz beim Deutschen Science Fiction Preis entgegennehmen.
www.KurzeGeschichten.com

VORSCHAU

VOM SCHWARZEN LOCH ZERRISSEN

Wenn ein Stern nah an einem massereichen Schwarzen Loch vorbeifliegt, dann sorgen Gezeitenkräfte dafür, dass der ganze Stern regelrecht aufplatzt und zerfleddert: die Physik eines »Tidal Disruption Event«.



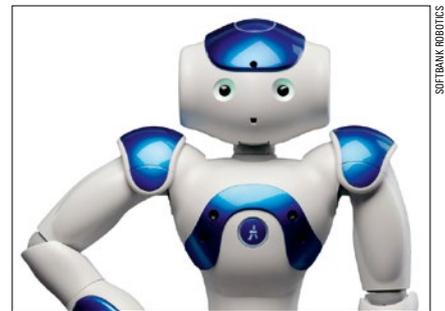
INNOVATION MIT LANGEM ANLAUF: DIE GOTIK

Größer, höher und schöner sollten die Kathedralen im 12. Jahrhundert werden. Doch was Frankreichs Dombaumeister entwickelten, fasste auf deutschem Boden erst viel später Fuß. Archäologen und Bauhistoriker rekonstruieren eine Epoche.



SUPERKEIME AUS DER TIERZUCHT

Massentierhaltung geht mit der Gefahr von Seuchen einher. Damit die Tiere nicht erkranken, werden in vielen Betrieben exzessiv Antibiotika zugefüttert. Hierdurch entstehen jedoch resistente Keime – die auf den Menschen überzuspringen drohen.



EIN ROBOTER MUSS NEIN SAGEN KÖNNEN

Isaac Asimovs klassische Gesetze der Robotik kommen in der Realität an: Ein Roboter muss in der Lage sein, selbst einzuschätzen, ob seine Handlung schädliche Folgen haben oder ethische Prinzipien verletzen würde.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:

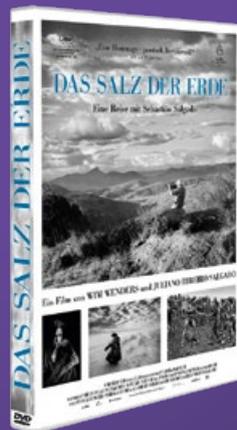
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

DVD »Das Salz der Erde«

In den vergangenen 40 Jahren hat der brasilianische Fotograf Sebastião Salgado auf allen Kontinenten die Spuren unserer sich wandelnden Welt und Menschheitsgeschichte dokumentiert. Spielzeit 106 Minuten



**Wählen
Sie Ihr
Geschenk**



Buch »Die Physik der Zukunft«:

Wie werden wir leben – in 20, 60, 100 Jahren? Der Physiker Michio Kaku beschreibt in seinem Buch auf spannende Weise den Weg in die Zukunft. Dazu befragte er weltweit 300 namhafte Forscher aus den Bereichen künstliche Intelligenz, Raumfahrt, Medizin und Biologie bis hin zu Technik, um so ein realistisches Szenario vorzustellen.

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 2.300 Profilen herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature