

Spektrum

der Wissenschaft

Stein gewordener Kult

Die ersten Monumente der Menschheit

- DUNKLE MATERIE** Eine alternative Theorie kommt ohne sie aus
- MEDIZIN** Fatale Verstopfung im Zellstoffwechsel
- ALTERNATIVE ENERGIEN** Technologische Revolution für Afrika

Unsere Neuerscheinungen!



Antarktis: Leben unter dem ewigen Eis • Beuteschlag: Die schnellsten Bewegungen von Lebewesen • Wassermangel: Kalifornien verdurstet • Exoten: Aliens auf der Erde? • Grenzfragen: Was ist Leben? • € 8,90



Gesellschaft: Das Digitalmanifest • Datenschutz: Die Folgen der digitalen Transparenz • Datensparsamkeit: Zukunftsfähig statt überholt • Big und Smart Data: Wie sollen wir Daten verwenden? • Ethik: Autonome Killerroboter? • € 8,90



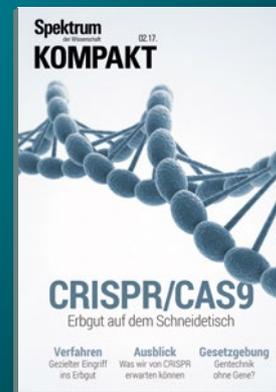
Klimawandel: Umbrüche am Ende der Eiszeit • Anthropologie: Die Urahren der großen Mythen • Ägyptologie: Ein Puzzle der besonderen Art • Südamerika: Archäologie in Amazonien • Hawaii: Gottkönige im Inselparadies • € 8,90



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



Trauma im Kreißsaal • Apps: Der Psychiater in der Hosentasche • Eltern: Opfer zweiten Grades • Der mysteriöse Fall Agatha Christie • Schematherapie: Der innere Wandel • Schizophrenie: Den Zweifel wecken • € 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 WISSENSCHAFT UNTER DAS VOLK

Von Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

► Auf mein Editorial in Heft 1.17 erhielt ich mehrere harsche Leserzuschriften. Tenor: »Spektrum« solle sich nicht in die Politik einmischen, sondern über Forschung berichten. Ich hatte an dieser Stelle gefordert, dass mehr Wissenschaftler den direkten Dialog mit der Öffentlichkeit suchen sollten, damit der gesellschaftliche Rückhalt für ihr Tun hier zu Lande nicht bröckelt. Denn der Stellenwert von Wissenschaft hängt bei den Menschen, die sie nicht selbst betreiben, nicht nur von den Erkenntnissen und Anwendungen ab, die sie hervorbringt, sondern auch von Vertrauen.

Jetzt mischt sich die Wissenschaft selbst in die Politik ein. Am 22. April wollen Forscherinnen und Forscher in zahlreichen Ländern für evidenzbasiertes Denken demonstrieren; auch bei uns sind in einem Dutzend Städten Kundgebungen geplant (www.marchforscience.de). Der Aufruf zum »March for Science« schallt aus den USA. Raus aus den Labors, ab auf die Straße! Die Kritik richtet sich unter anderem gegen die Wissenschaftspolitik der neuen US-Regierung. Man darf gespannt sein, wie viele Menschen sich den Veranstaltungen anschließen. Dass Wissenschaftler ihre Anliegen in öffentlichen Kundgebungen artikulieren, ist bereits ein Ausrufezeichen. Allerdings macht eine Massenversammlung noch keinen Dialog mit der Gesellschaft aus. Warten wir daher ab, wie sich das Projekt weiterentwickelt, hinter das sich in Deutschland sehr verschiedene Institutionen wie die großen Wissenschaftsorganisationen, aber ebenso weltanschaulich geprägte Gruppierungen stellen. Bei allem Drang: Missionarisch sollte die Wissenschaft nicht auftreten. Das erschwert den Dialog – und passt nicht zu ihrem Wesen!

Eine Symbiose aus Glaube und Wissen stellte einst das Klosterzentrum Nalanda dar, das im 4. oder 5. Jahrhundert in Indien gegründet wurde. Auf dem Lehrplan standen neben buddhistischer Philosophie auch Logik und Medizin – was die Einrichtung zur ältesten Universität der Welt macht. Die Darstellung des Religionswissenschaftlers Max Deeg ab S. 18 ist Teil unserer neuen Serie »Kultbauten der Menschheit«. Davor stellt ab S. 12 die Archäologin Marion Benz die mehr als 11000 Jahre alten Ruinen auf dem Göbekli Tepe vor – imposante Symbole der Sesshaftwerdung des Menschen auf dem Gebiet der heutigen Südosttürkei.

Eine gute Lektüre wünscht Ihr



NEU AM KIOSK AB 28.4.!

Wie die Evolutionsforschung und die Genetik wissenschaftliche Grenzen sprengen, lesen Sie im neuen **Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung 2.17.**

AUTOREN DIESER AUSGABE



MARION BENZ

Vor mehr als 11000 Jahren entstanden die ersten Monumente der Menschheit. Die promovierte Archäologin Marion Benz erkennt in ihnen Symbole des Übergangs von der Altsteinzeit zum Neolithikum (S. 12).



DETLEF KOSCHNY

Der Leiter der Abteilung für Near Earth Objects der ESA überlegt, wie sich der Einschlag großer Asteroiden auf der Erde verhindern ließe (S. 66). Seine Lieblingsfilme sind »Armageddon« und »Deep Impact«.



ANGUS DEATON

Der emeritierte Professor of Economics and International Affairs an der Princeton University erhielt 2015 den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften für seine Analyse von Konsum, Armut und Wohlfahrt (S. 78).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Bis zum Ursprung des Feuerrings

Kaum Dunkle Materie in frühen Galaxien

Rückzugsort des HI-Virus identifiziert

Die Besiedlung Australiens

Sprudelnde Meere auf Saturnmond Titan

Ursprung des Protonenspins

Warum Wirbeltiere einst an Land gingen

22 FORSCHUNG AKTUELL

Die ersten Tibeter

Seit 40000 Jahren leben Menschen in der Region

Lichtmikroskopie auf molekularer Ebene

Forscher kombinieren hochauflösende Mikroskopiemethoden

Schützendes X-Chromosom

Frauen haben seltener Krebs, wohl auch wegen ihrer Geschlechtschromosomen

Sieben erdgroße Planeten

Das spektakuläre Sternsystem Trappist-1 begeistert Astrophysiker

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Zukunftstechnik sucht spendable Kunden

IT-Anbieter verkaufen bereits Nutzungsrechte an Quantencomputern

64 SCHLICHTING!

Elektrisierender Sand

Wie sich Sandkörner im Sturm gegenseitig aufladen

85 FREISTETTERS FORMELWELT

Klein, aber oho!

Der kleine Bruder des großen fermatschen Satzes

12 MONUMENTE I **STEINERNE SYMBOLE EINER NEUEN ZEIT**

Vor mehr als 11000 Jahren schufen Wildbeuter monumentale Kultstätten als Ausdruck eines dramatischen Gesellschaftswandels.

Von Marion Benz

18 MONUMENTE II **DIE ÄLTESTE UNIVERSITÄT DER WELT**

Das indische Kloster Nalanda war einst eine Hochburg der Gelehrsamkeit, in der nicht nur die Lehren Buddhas zum Curriculum gehörten.

Von Max Deeg

32 ÖKOLOGIE **INVASION DER PLATTWÜRMER**

Die weltweite Verschleppung exotischer Landplanarien, speziell aus Südostasien und Neuseeland, bringt für die Land- und Forstwirtschaft Probleme.

Von Ronald Sluys

40 MEDIZIN **VERSTOPFUNG IM ZELLSTOFFWECHSEL**

Schwerpunkt: Lysosomale Speicherkrankheiten (Teil 1) Neue Therapieansätze gegen Defekte der zellulären Verdauungsorgane versprechen Erfolg.

Von Sarah DeWeerd

48 BIOLOGIE **MEHR ALS DER MÜLLEIMER DER ZELLE**

Schwerpunkt: Lysosomale Speicherkrankheiten (Teil 2) Störungen der Lysosomen spielen auch bei Alzheimer, Parkinson und Ebola eine Rolle.

Von Kelly Rae Chi

52 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

INTELLIGENTE FENSTER AUS BERLINER BLAU

Ein altbekannter Farbstoff ermöglicht es, Glas elektrisch abzudunkeln und wieder aufzuhellen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

56 KOSMOLOGIE **GEGENWIND FÜR DIE DUNKLE MATERIE**

Viele kosmische Objekte verhalten sich rätselhaft. Mit seinem neuen Ansatz belebt ein Physiker eine alte Debatte über mögliche Erklärungen.

Von Natalie Wolchover

66 ASTRONOMIE **FELSBROCKEN IM ALL**

Asteroiden zeugen von der Entstehung des Planetensystems, können aber auch zur Bedrohung für die Erde werden.

Von Detlef Koschny

72 TECHNIK **ENERGIEREVOLUTION FÜR AFRIKA**

Der Schwarze Kontinent setzt auf Wind- und Sonnenenergie. Kann er die klassischen schmutzigen Energiequellen Kohle und Öl überspringen?

Von Erica Gies

78 UNGLEICHHEIT **GESPALTENE GESELLSCHAFT**

Serie: Die Zukunft der Menschheit (Teil 5) Die soziale Kluft wächst.

Von Angus Deaton

SPEKTROGRAMM

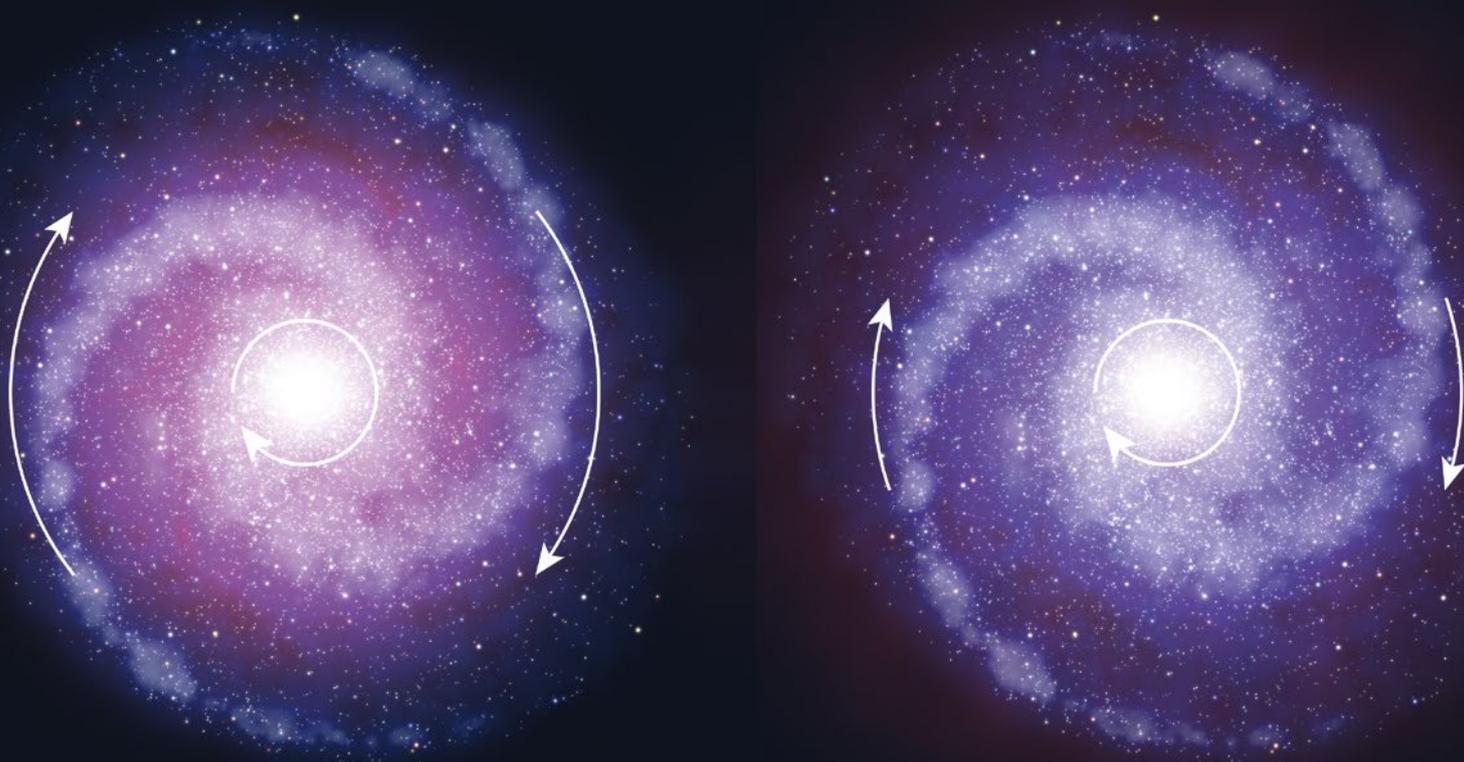




BIS ZUM URSPRUNG DES FEUERRINGS

► Philipp Brandl vom Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung und seine Kollegen haben ein 1600 Meter tiefes Loch in den Meeresboden gebohrt – beim Marianengraben, wo die Pazifische Erdplatte unter die Philippinische abtaucht. Das Foto zeigt eine Auswahl von Segmenten des Bohrkerns. Sie reicht von jüngeren, hellen Tiefseesedimenten bis zur dunklen basaltischen Kruste. Letztere stammt aus der Entstehungszeit der Subduktionszone vor rund 50 Millionen Jahren. Die Wissenschaftler analysierten anhand eingeschlossener Magma die Geschichte des Vulkanismus in der Region, der nur langsam begann. Erst als die Tiefseerinne nach Osten wanderte, kam es zu der starken Aktivität, für welche die dortigen Inseln noch heute berühmt sind.

Earth and Planetary Science Letters
10.1016/j.epsl.2016.12.027



Schematischer Vergleich von Scheibengalaxien heute (links) und im frühen Universum (rechts): Wegen eines Mangels an Dunkler Materie (rot) rotierten manche der Gebilde aus Sternen und Gas (blau) früher offenbar langsamer.

ASTRONOMIE KAUM DUNKLE MATERIE IN FRÜHEN GALAXIEN

► Manche Galaxien im frühen Universum enthielten offenbar deutlich weniger Dunkle Materie als heutige. Das folgert ein internationales Team von Astrophysikern um Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching aus den Drehbewegungen von sechs besonders weit entfernten

und massereichen Galaxien.

In ihnen rotieren die äußeren Bezirke langsamer um das Zentrum als weiter innen liegende Regionen. Dagegen bewegen sich in Spiralgalaxien aus unserer kosmischen Nachbarschaft alle Sterne etwa gleich schnell um das Zentrum der Scheibe, egal ob sie sich an deren Rand befinden oder weiter innen. Wissenschaftler machen dafür die Dunkle Materie verantwortlich. Galaxien sind demnach eingebettet in Wolken dieser hypothetischen, für

Teleskope unsichtbaren Materieform. Ihre Schwerkraft erhöht die Rotationsgeschwindigkeit der äußeren Bezirke der Scheiben, die den Gravitationsgesetzen zufolge mit steigender Entfernung vom Zentrum eigentlich abnehmen müsste (siehe auch S. 56).

Bei den jetzt betrachteten Galaxien, deren Licht vor sieben bis elf Milliarden Jahren ausgesandt wurde, scheint das tatsächlich der Fall zu sein. Die Dunkle Materie macht weniger als ein Fünftel ihrer Masse aus, schätzen Genzel und Kolle-

gen. Bei Galaxien in unserer Nähe ist es hingegen mehr als die Hälfte.

Zwei Erklärungen für die überraschende Entdeckung sind laut den Forschern denkbar: Möglicherweise strömte im jungen Universum aus dem umliegenden Weltraum besonders viel gewöhnliche Materie ins Zentrum von Galaxien, was ihren hohen Anteil erklären würde. Oder aber damals waberten Dunkle-Materie-Wolken noch wild umher, weshalb es Regionen im All gab, in denen es zufällig weniger von der rätsel-

haften Substanz gab. Weitere Messungen müssen zeigen, ob es auch anderen Galaxien aus dem frühen Universum an Dunkler Materie mangelt.

Nature 10.1038/nature21685, 2017

VIROLOGIE RÜCKZUGSORT DES HIV AUFGESPÜRT

► Bisher sind HIV-Infektionen nicht vollständig heilbar, da sich das Virus bei

den Infizierten in bestimmte Immunzellen zurückzieht, die CD4-T-Zellen. Dort überdauert es und entzieht sich den bislang verfügbaren Therapien. Eine Arbeitsgruppe um Benjamin Descours von der Université de Montpellier hat nun herausgefunden, dass der überwiegende Teil jener Zellen, in denen sich das Virus versteckt, ein besonderes Oberflächenmolekül ausprägt, nämlich den Rezeptor CD32a. Für ihre Experimente infizierten die

Forscher CD4-T-Zellen in der Petrischale mit HI-Viren. Die Zellen, in denen sich das Virus dauerhaft einnistete, lasen verschiedene Gene ab, die sie sonst nicht exprimieren – insbesondere jenes für den Rezeptor CD32a.

Anschließend untersuchte das Team um Descours die Blutproben von zwölf HIV-positiven Patienten, die mit Medikamenten behandelt wurden und bei denen die Infektion fast vollständig unterdrückt war.

Mit einem passenden Antikörper fischten die Forscher CD32a tragende, also mit HIV infizierte CD4-T-Zellen aus dem Blut und stellten fest, wie hoch deren Anteil an allen CD4-T-Zellen war. Dieser belief sich demnach auf 0,012 Prozent. Die Wissenschaftler hoffen, damit einen Biomarker gefunden zu haben, anhand dessen sich die Rückzugsorte des Virus erkennen und zerstören lassen.

Nature 543, S. 564–567, 2017

GENETIK DIE BESIEDLUNG AUSTRALIENS

► Mit Hilfe von Genanalysen haben Wissenschaftler rekonstruiert, wann die Ureinwohner Australiens den Kontinent betraten und wie sie sich darauf ausbreiteten. Überraschenderweise blieben viele der Gruppen lange Zeit in sich geschlossen und lebten zehntausende Jahre am gleichen Ort, berichtet das Team um Alan Cooper von der University of Adelaide.

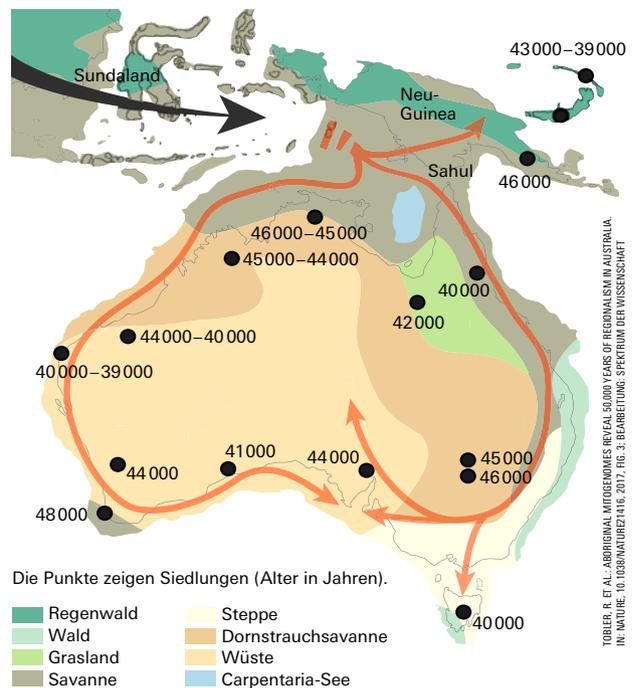
Die Forscher analysierten Haarproben von 111 Ureinwohnern, die von ihrer Universität zwischen 1920 und 1970 mit dem Einverständnis der Teilnehmer gesammelt worden waren. Aufschluss über das Siedlungsverhalten gab die mitochondriale DNA (mtDNA). Dieses Erbgut befindet sich nicht im Zellkern, sondern in Zellorganellen – den Mitochondrien – und wird daher nur von der Mutter weitervererbt. Deshalb eignet es sich gut zur Rekonstruktion von Verwandtschaftsbeziehungen. Da in der mtDNA regelmäßig neue Mutationen hinzukommen, kann man mit ihrer Hilfe grob ermitteln, wann sich Gruppen getrennt haben.

Die Vorfahren der heutigen Aborigines sind demnach in einer einzelnen Gruppe vor etwa 50.000 Jahren aus Asien eingewandert. Damals bildeten Australien und Neuguinea noch einen gemeinsamen Kontinent namens Sahul. Der Analyse von Coopers Team zufolge bevölkerten die Menschen die Landmasse innerhalb von 10.000 Jahren entlang der West- und Ostküste. Dabei ließ sich immer wieder ein Teil von ihnen nieder.

Wären diese Stämme – wie in vielen anderen Teilen der Welt – nach einer Weile weitergewandert, wären sie auf Nachbarpopulationen gestoßen, was vermutlich zu einer Vermischung des Genpools geführt hätte.

Dass dies nicht der Fall war, deckt sich mit früheren Beobachtung von Linguisten: Ihnen war aufgefallen, dass sich viele Sprachen auf dem Kontinent über sehr lange Zeiträume isoliert entwickelt haben.

Nature 10.1038/nature21416, 2017



Anhand von Genanalysen und archäologischen Funden haben Forscher die Besiedlung Australiens rekonstruiert.

PLANETEN- FORSCHUNG SPRUDELNDE MEERE AUS METHAN

► Die Oberfläche des Saturnmonds Titan ist von Meeren bedeckt, die jedoch nur äußerlich an die Gewässer der Erde erinnern. In Wirklichkeit bestehen sie aus den chemischen Verbindungen Methan und Ethan, die in der eiskalten Atmosphäre in flüssiger Form vorliegen, verdunsten und dann als Regen wieder in die Meere zurückfließen. Die Verhältnisse auf der Oberfläche hat nun ein Team um Michael Malaska vom Jet

Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena im Labor nachgestellt.

Dabei zeigte sich, dass sich unter den auf Titan vorherrschenden Temperatur- und Druckverhältnissen große Mengen von atmosphärischem Stickstoff im Methan lösen. Die Gewässer auf dem Saturnmond müssten folglich wie Mineralwasser sprudeln. Denn Stickstoff neigt dazu, schon bei leichten Veränderungen der Temperatur, des Luftdrucks oder der Zusammensetzung einer Flüssigkeit auszuperlen und in Form von Blasen aufzusteigen. Und solche Veränderungen müsste es auf Titan laufend geben, etwa wenn es regnet.

Im Labor bildete sich auch Schaum, wenn der Stickstoff aus seinem Methanbad blubberte. Das könnte den Forschern zufolge bei der Erklärung eines Phänomens helfen, das die Raumsonde Cassini schon vor Jahren auf der Oberfläche des Saturnmonds beobachtete: Auf den Meeren Titans erscheinen immer wieder viele Quadratkilometer große Strukturen, die sich nach ein paar Monaten von selbst auflösen. Möglicherweise, so die Vermutung der NASA-Wissenschaftler, handelt es sich bei diesen »magischen Inseln« um riesige Blasenteppiche.

Icarus 10.1016/j.icarus.2017.01.033, 2017

TEILCHENPHYSIK SPIN DES PROTONS

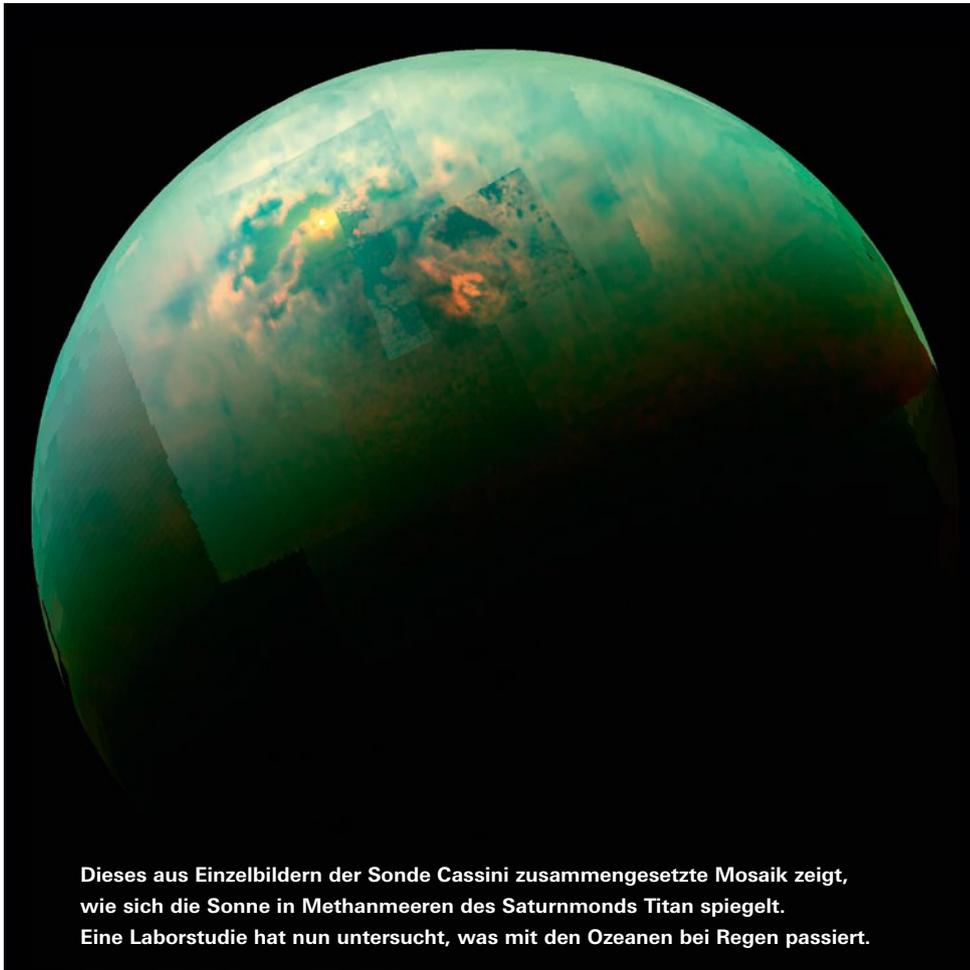
► Physiker wissen nun genauer, woher das Proton seinen Spin bezieht. Der Wert dieser quantenmechanischen Eigenschaft, die man sich vereinfacht als Eigendrehung vorstellen kann, ist zwar jedem Physikstudenten bekannt. Ein Proton hat demnach einen Spin von $1/2$. Wie die einzelnen Bestandteile des Teilchens zu diesem Wert beitragen, ist aber seit Langem ein Rätsel. Experimente an Teilchenbeschleunigern haben ergeben, dass die Selbstdrehung der drei so genannten Valenzquarks, aus denen das Proton vereinfachten Modellen zufolge besteht, nur ein Drittel des Spins beisteuert.

Nun ist einem Team um Yi-Bo Yang von der University of Kentucky im gleichnamigen US-Bundesstaat ein Fortschritt bei der Beilegung dieser »Proton-Spin-Krise« gelungen: Mittels Computersimulationen hat die Gruppe berechnet, dass so genannte Gluonen für etwa die Hälfte des Proton-Spins aufkommen. Die Teilchen sind die Vermittler der starken Kernkraft, die zwischen Quarks wirkt. Dabei huschen sie ständig kreuz und quer durch das Proton.

Offenbar übertragen die Gluonen dabei einen Teil ihres Dralls. Woher das Proton das verbleibende Fünftel seiner Eigendrehung erhält, ist dagegen weiterhin unklar. In Frage kommt unter anderem der Drehimpuls, der von den Bahnbewegungen der einzelnen Bestandteile ausgeht.

PRL 10.1103/PhysRevD.93.011501, 2017

NASA / JPL CALTECH / UNIVERSITY OF ARIZONA / UNIVERSITY OF IDAHO



Dieses aus Einzelbildern der Sonde Cassini zusammengesetzte Mosaik zeigt, wie sich die Sonne in Methanmeeren des Saturnmonds Titan spiegelt. Eine Laborstudie hat nun untersucht, was mit den Ozeanen bei Regen passiert.



Afrikanische Schlammpringer können mit ihren Augen leicht aus dem Wasser gucken – möglicherweise ein wichtiger evolutionärer Vorteil.

EVOLUTION LAND IN SICHT

► Forscher um Malcolm Mclver von der Northwestern University in Illinois haben eine neue These dazu aufgestellt, wie unsere Wasser bewohnenden Wirbeltiervorfahren das Land besiedelten. Demnach spielte dabei die visuelle Wahrnehmung eine entscheidende Rolle. An der Luft lassen sich Beutetiere aus wesentlich größerer Entfernung erkennen als unter Wasser, weshalb manche Fische im späten Devon entsprechende Spezialisierungen des Sehsinns ausprägten – was vermutlich eine wichtige Voraussetzung für den späteren Landgang war.

Mclver und sein Team untersuchten Fossilien von 59 Wirbeltier-Gruppen aus der Zeit des Landgangs der Wirbeltiere vor etwa 400 Millionen Jahren. Dabei stellten die Forscher fest: Bei den Tieren, die am evolutionären Übergang zu Landlebewesen standen, verdreifachte sich innerhalb weniger Jahrmillionen die Größe der Augen. Zugleich wanderten diese von den Seiten des Kopfs nach oben zum Schädeldach. Wichtig sei, so die Forscher, dass die Entwicklungen stattfanden, bevor sich die Flossen der Fische in beinähnliche Glied-

maßen umformten. Die Veränderungen des Sehorgans gingen jenen des Fortbewegungsapparats also voraus.

Unter Wasser ist die Sicht meist äußerst eingeschränkt, unabhängig von den Abmessungen der Augen. In der Luft jedoch erweitert sich mit ihrer zunehmenden Größe der überblickbare Bereich dramatisch. Fischen im späten Devon, die mit vergrößerten Augen über die Wasserlinie schauten, dürfte das erleichtert haben, Wirbellose zu jagen, die sich nahe der Wasseroberfläche bewegten, etwa Insekten. Vermutlich lauerten die Fische ihnen zunächst am Ufer auf, wobei wie bei Krokodilen nur die Oberseite ihres Kopfes aus dem Wasser ragte.

Laut Mclver und seinen Kollegen gab die visuelle Wahrnehmung durch die Luft zudem entscheidende Impulse für die Hirnentwicklung. Denn während Wasserbewohner wegen der geringen Sichtweite auf schnelle Reflexe setzen müssen, um Beute zu jagen oder Feinden zu entkommen, bieten sich Landtieren wesentlich mehr Alternativen, zwischen denen es abzuwägen gilt. Dies habe, so die Forscher, zunehmend planerische Fähigkeiten erfordert und daher die Entwicklung komplexer Gehirne vorangetrieben.

Proc. Natl. Acad. Sci. 114, E2375–E2384, 2017

MONUMENTE I STEINERNE SYMBOLE EINER NEUEN ZEIT

Vor mehr als 11 000 Jahren schufen Menschen, die noch von der Jagd und dem Sammeln wilder Pflanzen lebten, monumentale Kultstätten wie die auf dem Göbekli Tepe. Forscher deuten sie als Ausdruck eines dramatischen gesellschaftlichen Wandels.



Die Archäologin **Marion Benz** erforscht die sozialen Veränderungen am Beginn des Neolithikums im Nahen Osten. Sie arbeitet außerdem als Journalistin.

» spektrum.de/artikel/1443899

»Als ich zum ersten Mal zwischen den riesigen Megalithen stand, kam ich mir klein und unbedeutend vor. Ich konnte kaum glauben, dass das hier 11 000 Jahre alt ist!« erinnert sich Oliver Dietrich. Der Berliner Archäologe gräbt seit zehn Jahren auf dem Göbekli Tepe (siehe Karte S. 14), doch die steinzeitliche Kultstätte hat für ihn nichts an Faszination eingebüßt. Schon der Berg ist etwas Besonderes: 800 Meter ragt er am nördlichen Rand der Haran-Ebene in Ostanatolien empor; bei gutem Wetter reicht der Blick bis nach Syrien. Auf dem Plateau haben deutsche und türkische Forscher in den letzten 20 Jahren sechs monumentale Anlagen freigelegt. Georadardaten weisen auf mindestens 14 weitere hin. Gewaltige Steinpfeiler

kamen zu Tage, manche mehr als fünf Meter hoch. Die meisten sind kunstvoll mit Hochreliefs verziert, von denen viele archaisch wirkende Tiere zeigen.

Was Prähistoriker verblüfft, ist vor allem das enorme Alter der Anlage. Der Göbekli Tepe liegt am Nordrand des Fruchtbaren Halbmonds, also an jenem Bogen von der südlichen Levante über Nordsyrien bis in den Irak hinein, in dem einst Ackerbau und Viehzucht ihren Anfang genommen haben. Doch das geschah erst etliche Jahrhunderte nach dem Bau des Bergheiligtums! Unter den Tierknochen vom Göbekli Tepe fand sich nicht ein einziges Haustier, dafür aber Gazellen, Auerochsen, Wildesel, Hirsche und Wildschweine, außerdem Reste diverser Wildpflanzen. Die Erbauer der Monumente sind demnach Jäger und Sammler gewesen – und denen hatte man dergleichen nicht zugetraut. Denn Bauprojekte solcher Größenordnung setzten die Versorgung einer großen Zahl von Arbeitern über einen längeren Zeitraum voraus sowie eine gesellschaftliche Struktur, die es ermöglichte, derartige Projekte zu koordinieren. Zudem haben nicht sesshafte Gruppen selten das Bedürfnis, Botschaften dauerhaft in Stein zu fixieren und eigene Ideen in Architektur umzusetzen.

Inzwischen wissen Forscher es besser und sprechen deshalb nicht mehr von »neolithischer Revolution«. Denn jener wirtschaftliche und gesellschaftliche Wandel erfolgte nach heutigem Wissen keineswegs abrupt, sondern in vielen, regional unterschiedlichen Schritten (siehe »Der lange Weg zur Landwirtschaft«, **Spektrum** Spezial Archäologie – Geschichte – Kultur 4/2014, S. 70). So lebten Jäger und Sammler im 10. Jahrtausend v. Chr. zwar von dem, was die Natur lieferte. Doch sie nutzten Wildpflanzen intensiv und hegten möglicherweise erstmals auch Wild-

Neue 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

Das Grabmal des Antiochos I. – Geniestreich oder Größenwahn?
von Jörg Wagner

Teil 3: Juli 2017

Kathedralen: Zeichen der Macht
von Matthias Untermann



Welchem Zweck dienten die gigantischen Kultanlagen auf dem Göbekli Tepe in Südanatolien? Riesige Pfeiler mussten dafür aus dem Kalkstein geschlagen, transportiert und verziert werden – eine beeindruckende Gemeinschaftsleistung.

ORIGINARBEITUNG DAVI NORDBECKER

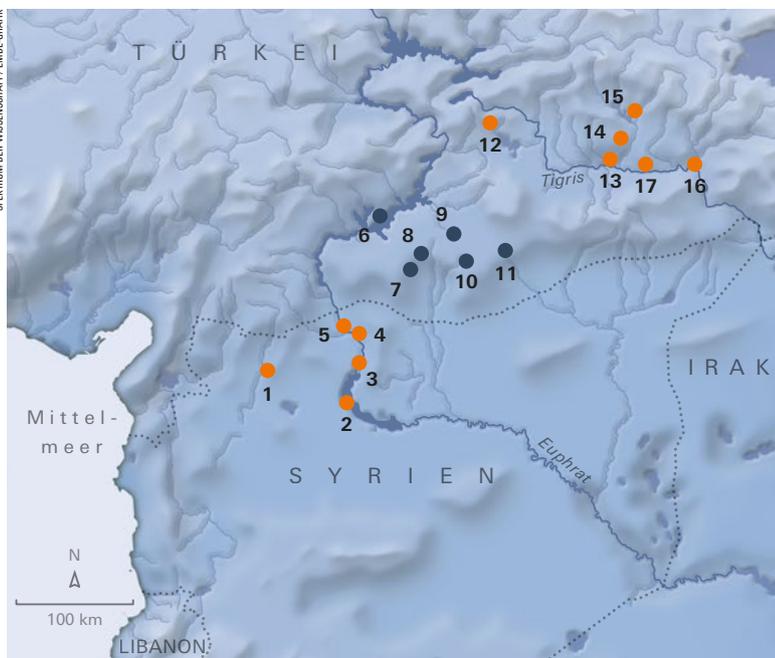
tiere. Dabei erwarben sie das Wissen, das für ein späteres Züchten von Nutzpflanzen und -tieren erforderlich war. Auch wohnten die Menschen bereits in festen Siedlungen, zumindest saisonal. Allerdings benutzten sie noch keine Tongefäße, um Nahrung aufzubewahren, zuzubereiten oder darzubieten. Die Anfänge des Bergheiligtums auf dem Göbekli gehören in diese Phase des »frühen akeramischen Neolithikums« (9600–8600 v. Chr.).

Aufschlussreiches Zeugnis des Scheiterns – ein misslungener Pfeiler

Anfangs mochten Prähistoriker kaum glauben, was die Archäologen unter der Leitung von Klaus Schmidt (1953–2014) und seinem Nachfolger Lee Clare vom Deutschen Archäologischen Institut da ans Licht gebracht hatten. Steinmetze und Maurer mussten Monate lang auf dem Plateau gearbeitet und gelebt haben, um diese Anlagen zu

schaffen. »Der für die Pfeiler verwendete Kalkstein liegt auf dem Berg in Schichten vor«, weiß Dietrich. »Am Plateaurand waren sie angeschnitten und damit von der Seite aus zugänglich. Wir haben ein Exemplar entdeckt, das zerbrach, während man versuchte, einen Rohling aus der Kalkbank herauszuarbeiten.«

Dieser Pfeiler hätte wohl sieben Meter hoch werden sollen. Dass er nicht gelang, war für die Archäologen ein Segen. Denn das Werkstück wies Arbeitsspuren auf, die Aufschluss über die verwendeten Techniken gaben. »Erst haben die Männer den T-förmigen Umriss aus dem Fels gemeißelt und dann die Rohlinge – vermutlich mit Hebeln – von der darunterliegenden Schicht abgehoben. Wie es weiterging, wissen wir nicht, aber wahrscheinlich hat man die Megalithen auf hölzernen Rollen zum Aufstellungsort transportiert.« Studierende der Universität Halle hatten andernorts versucht, einen vergleichbaren Pfeiler



Frühe Jungsteinzeit im nördlichen Mesopotamien:

Fundorte mit figürlichem Symbolsystem und/oder T-Pfeilergebäuden

- | | |
|---------------------|---------------------------------------|
| 1: Tell Qaramel | Höhenangaben: |
| 2: Mureybet | ■ 0–200m |
| 3: Jerf el Ahmar | ■ 200–500m |
| 4: Tell Dja'de | ■ 500–1000m |
| 5: Tell 'Abr 3 | ■ 1000–2000m |
| 6: Nevalı Çori | ■ > 2000m |
| 7: Hamzan Tepe | ● Siedlungen der frühen Jungsteinzeit |
| 8: Göbekli Tepe | ● Siedlungen mit T-Pfeilergebäuden |
| 9: Taşlı Tepe | heutige Landesgrenzen |
| 10: Karahan Tepe | |
| 11: Sefer Tepe | |
| 12: Çayönü | |
| 13: Körtik Tepe | |
| 14: Demirköy | |
| 15: Hallan Çemi | |
| 16: Gusir Tepe | |
| 17: Hasankeyf Höyük | |

Am Oberlauf von Euphrat und Tigris fanden Jäger und Sammler im 10. Jahrtausend v. Chr. so reichlich Wild und essbare Pflanzen, dass sie sesshaft wurden.

aus Kalkstein herauszuarbeiten. Ihren Hochrechnungen zufolge hätten an die 20 Personen mehrere Monate dafür benötigt.

Durch die T-Form erhielten die Monolithen ein menschähnliches Aussehen – das obere Querstück sollte wohl einen Kopf darstellen. Bei einigen Exemplaren arbeiteten Steinmetze zusätzlich aus dem Schaft angewinkelte Arme heraus. Außerdem verzierten sie einige Pfeiler mit Tierkulpturen und -reliefs. Dabei hatten die Künstler offenbar klare Vorstellungen davon, wie das fertige Stück aussehen sollte. »Die Hochreliefs sind so präzise gearbeitet, das können nur Spezialisten«, ergänzt Clare.

Auch die nächsten Schritte erforderten Erfahrung und ein gut koordiniertes Vorgehen. Die runden Anlagen waren bis zu zwei Meter eingetieft und oberhalb des Grundgesteins mit Mauern ausgekleidet worden. Wahrscheinlich halfen Rampen aus Erde, die Pfeiler dort hineinzuziehen. Mit Seilen könnte man sie dann aufgerichtet haben. Zwei besonders große kamen in die Mitte, die anderen in Nischen in der Wand. Für manche der zentralen Pfeiler hatte man regelrechte Fundamentgruben ausgehoben. Andere standen zwar in Vertiefungen, doch diese waren zu flach, um ausreichend Halt zu bieten. In solchen Fällen war eine Stützkonstruktion oder ein hölzernes Dach nötig.

Der Berliner Architekt und Bauhistoriker Dietmar Kurapkat gibt hierbei der Überdachung den Vorzug. Ansonsten hätten Herbst- oder Winterregen die eingetieften Anlagen seiner Meinung nach unter Wasser gesetzt. Ein weiteres Argument ist zudem der gute Erhaltungszustand der Reliefs – die Witterung hätte dem weichen Kalkstein weit stärker zugesetzt.

Bei den meisten Anlagen fehlen Zugänge. Zwar fand man Steinplatten, die Öffnungen aufwiesen, aber anscheinend keine davon an dem Ort, an dem sie ursprünglich verbaut waren. Nach Kurapkats Vorstellungen betrat man die Gebäude über Luken im Dach, gleich einem Gang in die Unterwelt. Das von Fackeln oder Feuern erhellte Halbdunkel ließ den Raum noch magischer wirken. In seiner Mitte erhoben sich die beiden großen Megalithen. Ihre Verzierung mit Gürteln, einem fuchs- oder pantherfellähnlichen Lendenschurz und einem über die Schulter gelegten Schal verlieh ihnen ein besonders würdevolles Aussehen. Die T-Köpfe der Pfeiler blieben aber anonym – vermutlich mit Absicht: Kein Mund, keine Augen verraten die Identität der steinernen Wesen. Niemand wird je wissen, ob die

AUF EINEN BLICK SCHLANGEN, VÖGEL UND SKORPIONE

- 1** Vor mehr als 11 000 Jahren errichteten Jäger- und Sammlergruppen in Vorderasien monumentale Kultstätten. Vermutlich spiegeln diese den sich abzeichnenden Wandel zu einem sesshaften Leben als Bauern.
- 2** Die Rituale, die auf dem Göbekli Tepe und in anderen Kultbauten durchgeführt wurden, sind zwar weitgehend unbekannt, aber bildliche Darstellungen weisen auf schamanistische Praktiken hin.
- 3** Viele der Ritualgebäude wurden wohl gezielt zerstört oder zugeschüttet, andernorts kleinere neue errichtet. Forscher deuten dies als Zeichen, dass sich die bäuerliche Wirtschaftsweise durchgesetzt hatte.

Kolosse Götter, Ahnen oder Helden darstellen sollten. Deshalb vermeiden Forscher inzwischen die Bezeichnung Tempel für die Anlagen auf dem Göbekli Tepe – Tempel waren per Definition Göttern geweiht. Eingelassen in die Umfassungsmauer standen weitere Pfeiler im Rund, übersät mit Tierreliefs: Da drohten beispielsweise Schlangen, Skorpione, Panther und Löwen. Aus den Wänden ragten ebenfalls Tierkörper. Im flackernden Feuerschein hätten all diese Figuren tanzende Schatten geworfen.

»Etwas so Gigantisches zu errichten, war immer auch eine Demonstration von Stärke«, versichert Joachim Bauer, Neurobiologe an der Universitätsklinik Freiburg. Er soll bei der Deutung der Kultstätte und ihrer Details helfen. »Überdies schweiß eine solche gemeinsame Anstrengung Menschen zusammen, inklusive all der Schaulustigen, die das Spektakel auf jeden Fall angezogen hat. Denn Teil einer Gemeinschaft zu sein, die so Großartiges leistet, ist in hohem Maße erstrebenswert.«

Allein die Versorgung der Arbeiter war eine logistische Herausforderung. Der Transport eines Pfeilers dürfte nach Schätzungen von Schmidt an die 300 Mann beschäftigt haben, der Bau einer einzelnen Anlage mit zwölf Pfeilern und Mauern wäre demnach ohne organisierte Gemeinschaftsleistung undenkbar. Ein solcher Aufwand muss einen wichtigen Nutzen gehabt haben: Das Bergheiligtum, so vermuten die Archäologen, sollte die im weiten Umkreis lebenden Gruppen als zentrale Kult- und Ritualstätte zusammenhalten.

Die Anlagen vom Göbekli Tepe waren jedoch nicht die einzigen steinzeitlichen Monumentalgebäude des Fruchtbaren Halbmonds, wenn auch bislang die imposantesten. Ende der 1950er Jahre hatte die britische Archäologin Kathleen Kenyon einen neun Meter hohen Turm aus jener Zeit in Jericho freigelegt. Er gilt bis heute als eines der ältesten Bauwerke, das von einer Gemeinschaft errichtet wurde.

»Sondergebäude« – die kleinen Geschwister des Bergheiligtums

In Nordsyrien am mittleren Euphrat entdeckten syrische und französische Archäologen weitere Kultbauten, die etwa zur gleichen Zeit wie die Steinkreise vom Göbekli Tepe entstanden und diesen erstaunlich ähneln. Danièle Stordeur, Prähistorikerin am Maison de l'Orient in Lyon, hat Ende der 1990er Jahre mehrere solcher »Sondergebäude« in Jerf el Ahmar ausgegraben. In Tell 'Abr 3, wenige Kilometer den Euphrat aufwärts, fand ihr syrischer Kollege Thaer Yartah entsprechende Ruinen. Fast zwei Meter tief lagen große, runde Häuser im Boden. Sie hatten jeweils nur einen Raum, in dem eine Bank entlang der Innenwand angebaut war. Typische Abnutzungsspuren bestätigen, dass darauf immer wieder Menschen saßen. Unter den Bänken entdeckten die Ausgräber außerdem Steingefäße, Tierknochen, Perlen und verzierte Steinplättchen.

Besonders aufschlussreich waren etliche Hohlräume sowie Putzreste. Offenbar waren Holzpfosten von bis zu 30 Zentimeter Durchmesser in die Bänke eingelassen worden, teilweise ragten sie über deren Vorderkante hinaus. Manche hatte man mit Lehm verkleidet. Sollte

Im Schutt einiger Häuser von Nevalı Çori kamen teils überlebensgroße Steinskulpturen zu Tage, von denen einige auch Gesichter zeigen. Ihre Bedeutung ist unbekannt. Der hier abgebildete Kopf ist etwa 30 Zentimeter hoch.



EPHRAIM ARCHIV HEIDELBERG

dieser Putz eine steinerne Anmutung schenken, dem Gebäude einen Hauch von Göbekli Tepe verleihen? Es scheint, dass die Menschen im 10. Jahrtausend v. Chr. im Norden Mesopotamiens durch ähnliche Riten und Symbole eng verbunden waren.

Ausgrabungen und Surveys der letzten 20 Jahre zeigen, dass die ganze Region recht dicht bewohnt war. Denn Jäger und Sammler fanden dort einen opulent gedeckten Tisch, weshalb es Vorteile bot, länger vor Ort zu bleiben. Die ersten Siedlungen lagen an den Ufern des Euphrat und Tigris und deren Zuflüssen. Dort wimmelte es von Wildtieren und Wasservögeln, die Gewässer waren reich an Fischen. Diese frühen Dörfer waren klein, wohl selten mehr als zwei Hektar groß und von jeweils 150 bis 300 Menschen bewohnt.

Hunderte von Reibsteinen und Mörsern belegen: Dort hatten sich Menschen dauerhaft niedergelassen. Denn solche schweren Steingeräte führte man sicher nicht auf langen Wanderungen bei sich. Sie sind außerdem ein wichtiges Indiz für die intensive Nutzung von Wildpflanzen. Pistazien, Eicheln, Mandeln und Grassamen lieferten notwendige Kalorien. Archäobotanische Untersuchungen der letzten Jahre deuten zudem darauf hin, dass am Körkik Tepe, einem der ältesten Dörfer am Tigris, möglicherweise sogar bereits Wildgetreide angebaut wurde. Genetische Analysen von heutigem Einkorn weisen ebenfalls in diese Gegend als Ursprungsregion unserer Getreide.

Die Nähe zum Wasser war aber nicht nur Segen, sondern auch Fluch: Kinder und Erwachsene von Körkik Tepe litten unter chronischer Mittelohrentzündung, wie Yilmaz Erdal vom Anthropologischen Institut in Ankara herausfand. Viele Kinder starben, Erwachsene wurden selten älter als 35 Jahre. Der Tod gehörte zum Alltag. Grabungsleiter Vecihi Özkaya und sein Team haben mittlerweile mehr als

800 Skelette unter den Fußböden der steinzeitlichen Behausungen entdeckt – eine ungewöhnlich hohe Zahl.

Manche dieser Verstorbenen waren mit einem ohrenbetäubenden Akt beigesetzt worden: Kostbare, aufwändig verzierte Steingefäße, Äxte und Keulenköpfe wurden absichtlich zerschlagen, um sie auf die Toten zu legen. Ein solches Ritual vergaß sicher niemand so schnell. Seltsam ist, dass in kaum einem der Sondergebäude bislang reguläre Bestattungen zu Tage kamen. In Jerf el Ahmar entdeckte Danielle Stordeur in einem der größten Gebäude zwei isolierte Schädel als eine Art Gründungsdepot. Sie waren in zwei übereinanderliegenden Pfostenlöchern des Kultbaus versenkt worden.



KÖRTIK TEPE, ARCHIV

Schamanen, Heiler oder Hexer? Darstellungen von menschlichen Wesen sind äußerst selten. Das Gefäß vom Körtik Tepe (oben) ist ein Unikat.



FOUILLE FRANÇOIS SYRÉNIE DE JERF EL AHMAR, COORDINATION DANIELLE STORDEUR ET BASSAM AHAMOUS, MUSEUM EL KOWM, MUSEUM DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES FRANCE

Solche nur wenige Zentimeter großen Steinplättchen trugen wohl symbolisch verschlüsselte Botschaften. Auf diese Weise ließ sich Wissen über weite Strecken verbreiten.

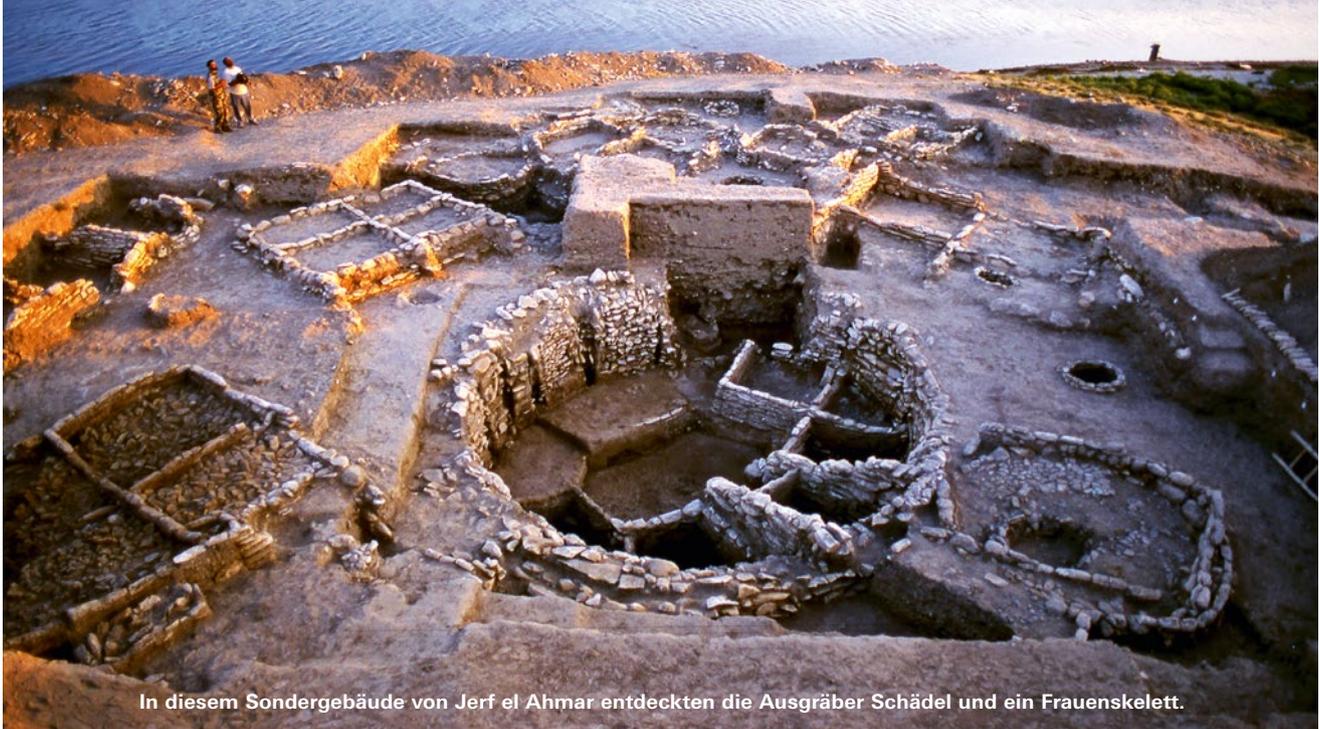
Ein dritter Totenkopf fand sich versteckt in einer Mauer-nische einer weiteren Anlage. Die große Überraschung aber waren, nur wenige Schritte entfernt, die Knochen einer jungen Frau. Sie lag – wie mitten in den Raum geworfen – auf dem Rücken mit ausgestreckten Armen und Beinen. Kurz darauf war das Gebäude in Flammen aufgegangen. Hatte man sie geopfert? War ihr Tod der Grund, das Haus niederzubrennen? Ein weiteres Rätsel: Dem Skelett fehlte der Kopf, doch alle Halswirbel befanden sich noch im Verband. Ein klarer Hinweis für Anthropologen, dass der Schädel erst dann entfernt wurde, als er nicht mehr mit den Wirbeln verbunden war. Mit anderen Worten: Jemand wusste lange nach dem Tod der Frau sehr genau, wo er den Schädel unter dem Brandschutt suchen musste.

Schmidt mutmaßte bereits, das Bergheiligtum auf dem Göbekli Tepe könnte neben anderen Aspekten auch eine besondere Bedeutung im Totenkult gehabt haben. Demnach bot man dort oben manchen Leichnam großen Raubvögeln zum Fraß dar. Einen solchen Bestattungsbrauch gab es später im Zoroastrismus, einer der ältesten monotheistischen Religionen, die vermutlich im 2. Jahrtausend v. Chr. in Zentralasien entwickelt wurde. Die meisten Anhänger dieser Glaubensrichtung leben heute im Iran, in Indien und den USA. Geier- und Rabenknochen im Füllmaterial des Bergheiligtums könnten Schmidts These untermauern, allerdings gibt es bislang kaum menschliche Skelettreste, was eher dagegenspricht.

Gefährliche Tiere – in Stein gebannt

Wozu also dienten all diese Sondergebäude, ob Rundhaus in einem Dorf oder monumentale Anlage auf einem Bergplateau? Stordeur nennt sie nur »Gemeinschaftsbauten«, denn Artefakte wie Reibsteine bezeugen zumindest, dass man dort gemeinsam Nahrung zubereitete und aß. Kleinere Kammern innerhalb einiger Gebäude könnten auf gemeinschaftliche Vorratshaltung hinweisen. Diese Minimaldeutung genügt vielen Forschern jedoch nicht. Dass die groß dimensionierten Konstruktionen vielmehr einen festen Platz in der Glaubenswelt des akeramischen Neolithikums hatten, machen bildliche Darstellungen deutlich. Wie auf den Pfeilern und einigen Kleinfunden vom Göbekli Tepe »bannte« man auch am Körtik Tepe Schlangen, Skorpione und Vögel auf Gegenstände, vom Steingefäß über Chloritplättchen bis zu Knochenanhängern.

Solche Tiere waren keine Beute der Jäger. Manche leben in anderen Sphären als der Mensch: Schlangen gelten als Begleiter in die Unterwelt, Vögel beherrschen die Lüfte, Wasservögel sogar beide Bereiche. Etliche sind gefährlich, etwa Eber oder Panther. Auch der Fuchs mag in den Augen der Jäger Nordmesopotamiens nicht nur Konkurrent gewesen sein; in manchen Mythen Ostasiens gilt er als Begleiter einer mächtigen Göttin und als zwielichtiger Dämon, den man durch Opfer besänftigen muss. Aber gerade die gefährlichen oder mystischen Tiere haben eine besondere Bedeutung im Schamanismus, wie ihn traditionell lebende Gruppen noch heute praktizieren. Mal agieren sie als Helfer und Wegbegleiter durch die Welt der Geister, mal verwandeln sich die Schamanen selbst in solche Tiere, um beispielsweise nach den Gründen einer



In diesem Sondergebäude von Jerf el Ahmar entdeckten die Ausgräber Schädel und ein Frauenskelett.

FOUILLE FRANCO-SYRIENNE DE JERF EL AHMAR, COORDINATION DANIELLE STORDEUR ET BASSAM JAMMOUS, MISSION EL KOWM, MUREYBEI DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES FRANCE

Erkrankung zu forschen. So zeigt ein Steingefäß aus Körtik Tepe möglicherweise das Bild eines als Vogel verkleideten Menschen. Auch Kranichdarstellungen vom Göbekli Tepe haben menschliche Beine, und noch Jahrtausende später, im 7. Jahrtausend v. Chr., findet man solche Darstellungen in Çatalhöyük (ausgesprochen Tschatalhöyük), einer steinzeitlichen Siedlung in der Zentraltürkei.

Zwar vermag heute niemand mehr zu sagen, wie die monumentale Architektur und die Skulpturen tatsächlich auf Menschen der Steinzeit gewirkt haben. »In einer an Bildern wesentlich ärmeren Welt hinterließen sie jedoch sicher einen starken Eindruck«, ist sich Dietrich sicher. Diese Darstellungen bildeten eine gemeinsame Symbolsprache, die jedermann in der Region zwischen oberem und mittlerem Euphrat und Tigris verstand und die tief im Denken jener Menschen verankert war.

Doch ihre Welt befand sich im Umbruch, ihre Traditionen waren bedroht. Denn die Dörfer wuchsen, was zu sozialen Spannungen führte. Man musste Vorräte anlegen, und das bedeutete auch, manch einen vom Konsum auszuschließen. Die steigende Zahl der Gruppenmitglieder brachte es mit sich, dass nicht mehr mit allen geteilt werden konnte. Die engen persönlichen Kontakte und damit das Vertrauen schwanden.

»Mit der Herausbildung der neuen Lebensform, die durch zunehmende Nahrungsproduktion bestimmt wurde, verloren Zentralorte der archaischen Järgergesellschaften wie der Göbekli Tepe ihre Bedeutung«, resümiert Harald Hauptmann, Ausgrabungsleiter von Nevalı Çori (ausgesprochen: Nevale Tschori), einem Dorf, das Zeugnis dieses Übergangs ablegt. Ende der 1980er Jahre kam dort bei Grabungen ein 188 Quadratmeter großer Bau zum Vorschein, der in den Hang eingetieft war. Wie am Göbekli Tepe zierten einst Steinpfeiler das Zentrum des Innenraums, in Wandnischen waren zudem noch weitere Stützen eingelassen. Dieses Sondergebäude entstand etwa in der Mitte des 9. Jahrtausends v. Chr., als schon Ackerbau betrieben wurde und man Schafe, Ziegen und Schweine hielt.

Zur religiösen Praxis gehörte es wohl, solche Kultgebäude immer wieder umzugestalten und sie schließlich regelrecht zu beerdigen: Viele wurden gesäubert und aufgegeben, manche abgebrannt, die Anlagen am Göbekli Tepe wohl zugeschüttet – anders als durch solch einen Verwitterungsschutz ist die außergewöhnlich gute Erhaltung der Skulpturen nach mehr als 11000 Jahren kaum zu erklären. Sollte der riesige Hügel, der das alte Bergheiligtum bedeckte, an die großen Zeiten der Jäger und Sammler erinnern?

In einer späteren Phase (8600–etwa 8000 v. Chr.) wurden außerhalb des geschützten Bereichs zwar neue Heiligtümer errichtet, jedoch gerieten diese deutlich weniger beeindruckend: Die Pfeiler maßen nur zwei Meter in der Höhe, die Bilder gefährlicher Tiere hat man wesentlich weniger aufwändig in den Stein gemeißelt. Auf fast jeder exponierten Bergkuppe rund um die Harran-Ebene stießen türkische Archäologen bei Oberflächenbegehungen zudem auf ähnliche, aber kleinere T-Pfeiler wie jene vom Göbekli Tepe. Offensichtlich waren die gewaltigen Gemeinschaftsleistungen nicht mehr nötig. Das Leben im Dorf hatte sich etabliert, Ackerbau und Viehzucht bestimmten jetzt den Alltag. Ein Zurück war undenkbar. ◀

QUELLEN

Benz, M., Bauer, J.: On Scorpions, Birds and Snakes - Evidence for Shamanism in Northern Mesopotamia during the Early Holocene. *Journal of Ritual Studies* 29, S. 1–24, 2015

Stordeur, D.: Le village de Jerf el Ahmar (Syrie 9500–8700 av. J. C.). L'architecture, miroir d'une société néolithique complexe. CNRS Editions, Paris 2015

Yartah, T.: Typologie de bâtiments communautaires à Tell 'Abr 3 (PPNA) en Syrie du Nord. *Neo-Lithics* 2/16, S. 29–49, 2016

LITERATURTIPP

Schmidt, K.: Sie bauten die ersten Tempel. C.H.Beck, München 2006

Klaus Schmidt schildert die Entdeckung der ältesten Kultbauten der Menschheit und versucht, die Geschichte ihrer Schöpfer zu rekonstruieren.

MONUMENTE II

DIE ÄLTESTE UNIVERSITÄT DER WELT

Im frühen Mittelalter Indiens war Nalanda eine Hochburg der Gelehrsamkeit. Mit dem Verschwinden des Buddhismus im 13. Jahrhundert geriet es jedoch in Vergessenheit.



Der Religionswissenschaftler **Max Deeg** lehrt Buddhist Studies an der Cardiff University. Derzeit forscht er als Gastwissenschaftler am Käte-Hamburger-Kolleg der Ruhruniversität Bochum. Einer seiner Schwerpunkte ist die Verbreitung des Buddhismus in Asien.

► [spektrum.de/artikel/1443901](https://www.spektrum.de/artikel/1443901)

► Jahrhundertlang ahnte niemand, dass ein Ruinenfeld im indischen Bundesstaat Bihar das wohl älteste Schulungszentrum der buddhistischen Lehre verbarg: Nalanda. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts untersuchten die britischen Laienarchäologen Francis Buchanan-Hamilton und Markham Kittoe zwar die noch sichtbaren Überreste und bezeichneten sie lapidar als Hügel. Tatsächlich aber war das im 4. oder 5. Jahrhundert n. Chr. gegründete Nalanda eine monumentale und äu-

ßerst erfolgreiche Lehranstalt des Buddhismus gewesen. Experten erkennen ihr den Rang einer Universität zu – der schieren Ausmaße und anspruchsvollen Architektur der Anlage wegen, aber auch auf Grund des umfassenden Kurrikulums und der Außenwirkung: Nalanda zog Studenten aus ganz Asien an, die das Gelernte in ihren Heimatländern verbreiteten.

Nur etwa zwölf Kilometer von der Ruinenstätte entfernt liegt heute die Kleinstadt Rajgir. Im 5. Jahrhundert v. Chr. war sie als Rajagriha gegründet worden, damals Hauptstadt des Reichs Magadha, dessen Machtbereich ungefähr dem heutigen indischen Bundesstaat Bihar entsprach. Wichtige Orte der Biografie Buddhas (gestorben 483 v. Chr.) lagen in Magadha: der Geiergipfel, auf dem der Religionsstifter gepredigt haben soll; das als Bambushain bezeichnete Kloster, das als eines der ältesten dieser Religion gilt; vor allem aber Bodhgaya, der legendäre Ort der Erleuchtung Buddhas. Wer zwischen den religiösen und wirtschaftlichen Zentren im Norden und Süden des Reichs unterwegs war, kam zwangsläufig an Nalanda vorbei.

Man muss Hamilton und Kittoe zugutehalten, dass europäische Forscher damals noch keine Schriftquellen kannten, die den Ort und seine Bedeutung erwähnten. Das änderte sich erst, nachdem der französische Sinologe Stanislas Julien 1853 die Biografie des chinesischen Mönchs Xuanzang (600/603–664) und vier Jahre später dessen Reisebericht übersetzt hatte. Xuanzang hielt sich zwischen 629 und 645 in Indien auf. Er besuchte heilige Stätten und studierte einige Jahre lang in Nalanda die Lehre und die Philosophie des Buddhismus. Nach seiner Rückkehr verfasste Xuanzang den »Bericht über die West-

AUF EINEN BLICK ERLEUCHTUNG ALS UNTERRICHTSFACH

- 1** Im 4. oder 5. Jahrhundert n. Chr. wurde das Klosterzentrum Nalanda als buddhistische Ausbildungsstätte gegründet. Sein Einfluss reichte bis nach China und Indonesien.
- 2** Mehrere tausend Mönche und Laien studierten auf dem Gelände die Lehren Buddhas und buddhistische Philosophie, aber auch nichttheologische Fächer wie Logik, Grammatik und Medizin.
- 3** Archäologen korrigieren und ergänzen das Bild, das zeitgenössische Texte von Nalanda zeichnen. So wurde die Einrichtung wohl nicht von Eroberern zerstört, sondern verfiel ab dem 13. Jahrhundert.



MIT FROL. GEN. VOM UNESCO WORLD HERITAGE CENTRE / RAJNEESH RAJ

lichen Regionen der Großen Tang-Dynastie«. Darin beschrieb er unter anderem das Kloster Nalantuo – die chinesische lautliche Wiedergabe von Nalanda. Seine Erlebnisse dort schilderte der Mönch Huili später in einer Biografie Xuanzangs.

»Die Klosterhöfe sind separat angeordnet und in acht Komplexe aufgeteilt.«

Julien Übersetzungen ermöglichten es, etliche buddhistische Stätten in Nordostindien aufzufinden und zu identifizieren. Der britische Regionalverwalter A. M. Broadley (1847–1916) brachte die besagten Ruinen 1872 mit Nalanda in Zusammenhang; er war es wohl auch, der das Kloster zum ersten Mal als Universität bezeichnete. Es sollte jedoch dem Pionier der indischen Archäologie, Alexander Cunningham (1814–1893), vorbehalten sein, das Areal zum ersten Mal genauer zu untersuchen. Cunningham hatte als britischer Ingenieuroffizier Indien bereist und sich mit den Zeugnissen der Vergangenheit befasst; er wurde der erste Direktor des Archaeological Survey of India (ASI). Nicht zuletzt über Inschriften, die den Namen des Klosters trugen, konnte er die Identität der Ruinen belegen. Später entdeckte Inschriften bestätigten dann den Status als »mahavihara«, als »großes Kloster«.

Huili schilderte den Ort in einem geradezu verklärten Licht (Zitat gekürzt): »Die Klosterhöfe sind separat angeordnet und in acht Komplexe aufgeteilt. Kostbar verzierte Plattformen sind aneinandergereiht wie Sterne, herrliche Gebäude ragen wie hohe Berggipfel auf, Tempel stehen Respekt heischend im Dunst. Die Mönchszellen der Klosterhöfe sind als vierstöckige Pavillons errichtet, mit Firstbal-

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK



Aus Stuck kunstvoll gestaltete Darstellungen des Buddha zieren noch heute eine Wand des Tempels Nr. 3 in Nalanda (oben). Die Ausbildungsstätte des frühen Buddhismus im heutigen indischen Bundesstaat Bihar lag nahe zu wichtigen religiösen Stätten wie Bodhgaya.

ken geformt wie gehörnte Drachen, und die Dachbalken sind in den Regenbogenfarben bemalt.«

Wie Xuanzang zog es noch andere chinesische Mönche Ende des 7. und im 8. Jahrhunderts nach Indien. Auch ihre Berichte verraten wertvolle Details über das Kloster; die ausführlichste Beschreibung stammt von Yijing (635–713). Sie weicht in den Details mitunter von den Schilderungen

Xuanzangs und Huilis ab (gekürzt): »Die Grundform des Klosters ist nahezu quadratisch mit geradlinigen Dachtraufen an allen vier Seiten, die rundum überdachte Korridore bilden. Alle Zellen sind aus Ziegelsteinen, drei Stockwerke hoch, wobei jedes Stockwerk über ein Zhang (*etwa 3,5 Meter; Anmerkung d. Red.*) hoch ist; die Querbalken sind mit Brettern bedeckt, wobei es keine Deckenbalken oder Dachziegel gibt, sondern alles mit Ziegelsteinen gedeckt ist. Auf jeder Seite gibt es neun Mönchszellen. Die Tore der Klosterhöfe sind nach Westen ausgerichtet; offene Pavillons ragen auf ihnen in die Höhe, schön gestaltet und mit sehr feinen Ausschmückungen versehen.«

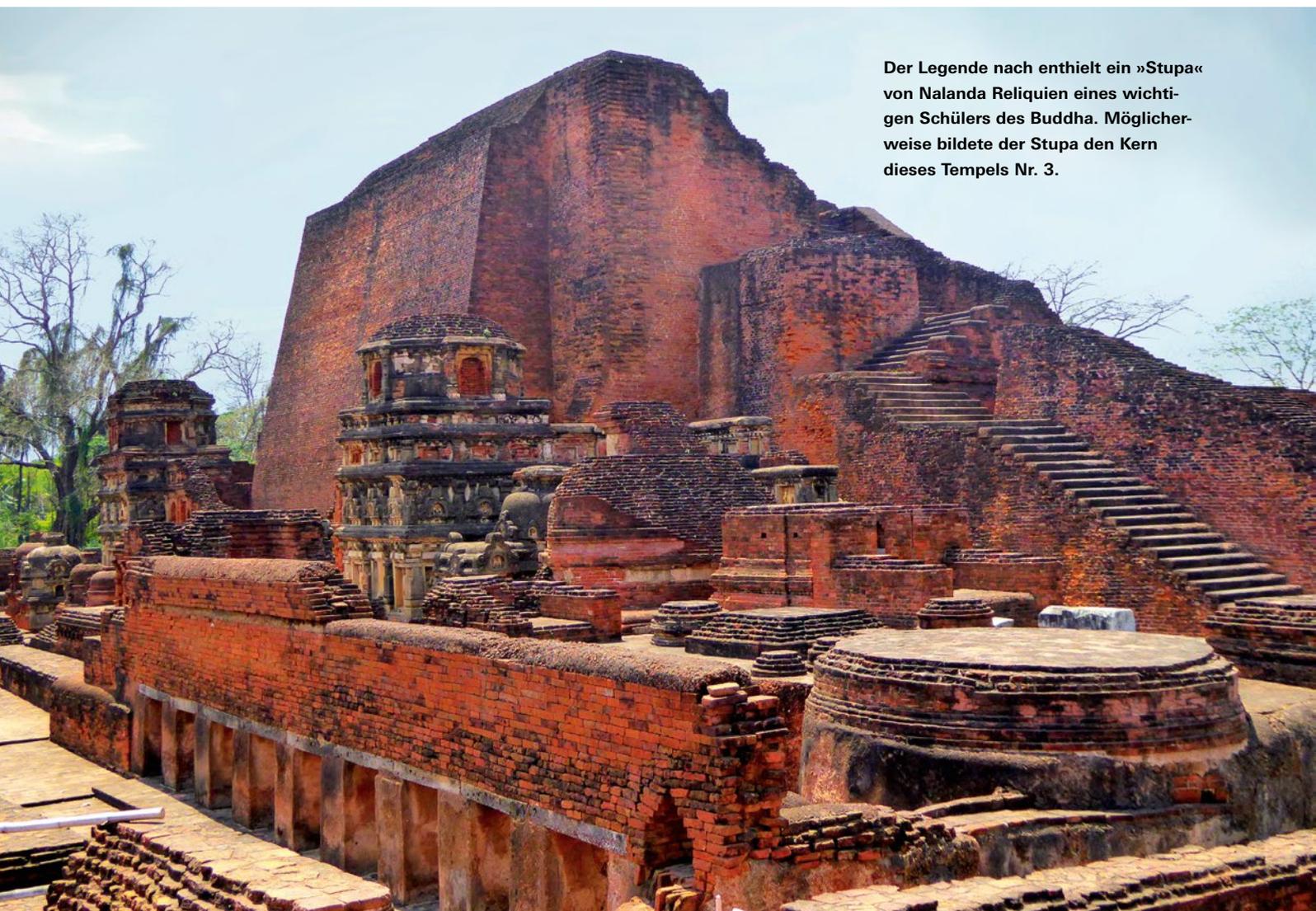
Nur ein Zehntel der Stätte ist ausgegraben

Laut Yijing lebten 3500 Mönche in der Anlage, und mehr als 200 Dörfer gehörten zum Klosterbesitz. Weiterhin erwähnte er zehn Badeteiche innerhalb einer äußeren Ringmauer. Noch heute existieren tatsächlich mehrere größere Wasserreservoirs, die er gemeint haben könnte, jedoch außerhalb des bislang untersuchten Ruinenbereichs. Baustrukturen und Artefakte jenseits der Ruinen

bestätigen ebenfalls: Das Kloster war im 7. und 8. Jahrhundert weit größer als gedacht.

Experten schätzen die Fläche des in den Quellen beschriebenen Campus anhand von Survey, Zufallsfunden und den erwähnten Wasserbecken auf etwa einen Quadratkilometer. Von 1915 bis 1937 und von 1974 bis 1983 wurden zirka zwölf Hektar davon systematisch frei gelegt, also etwas mehr als zehn Prozent. Danach erfolgten Ausgrabungen nur noch sporadisch. Zu Tage kamen elf Klostergebäude mit einfachem Grundriss, der dem anderer buddhistischer Klöster Indiens entspricht, sowie sechs mächtige Ziegeltempel. Auch wenn davon nur Ruinen geblieben sind, lassen architektonische Details und Fragmente des Dekors ihre Monumentalität erahnen – diese Bauwerke sollten beeindruckend sein. Auf dem gesamten Gelände fanden sich zudem Überreste von Stupas und Caityas, für den Buddhismus typischen Symbolbauten. Erstere sind größer und enthalten oft Reliquien, Letztere wurden von Pilgern gestiftet.

Die meisten Schriftquellen verweisen auf eine Gründung Nalandas bereits im 4. oder 5. Jahrhundert, als in



Der Legende nach enthielt ein »Stupa« von Nalanda Reliquien eines wichtigen Schülers des Buddha. Möglicherweise bildete der Stupa den Kern dieses Tempels Nr. 3.

MAX DEEG



ARCHAEOLOGICAL SURVEY OF INDIA / MINISTRY OF CULTURE, GOVERNMENT OF INDIA

Nalanda bestand im Kern aus einer Reihe von Klosterhöfen sowie verschiedenen Heiligtümern. Nur ein Zehntel der Anlage wurde bislang ausgegraben.

Nordindien die Gupta-Dynastie herrschte. Die älteste Ausgrabungsschicht bestätigt dies. Mitunter weicht der archäologische Befund von den Beschreibungen des 7. und 8. Jahrhunderts jedoch ab. So impliziert Xuanzangs Text, dass die Klostergebäude einen Ring formten, doch ihre Überreste – ausgenommen die südlichsten – reihen sich entlang einer Nord-Süd-Achse auf.

Auch die Zahl der bislang entdeckten Anlagen ist geringer als in den chinesischen Quellen erwähnt, wo von sieben, acht beziehungsweise neun »Klöstern« die Rede ist. Dass sie zwei- oder gar mehrstöckig gewesen sind, bestätigen Treppenanlagen und Löcher im Mauerwerk, die einst Deckenbalken aufnahmen. Sie dürften aus späteren Bauphasen stammen; eine genaue Datierung ist aber problematisch, da zu verschiedenen Zeiten entstandene Strukturen in- und aufeinanderliegen.

Nalanda war das Alexandria Indiens: Ein Ort umfassender Gelehrsamkeit

Die Texte verraten zudem, dass umfangreiches Wissen vermittelt wurde. Philosophie und mönchisches Leben standen ebenso auf dem Lehrplan wie beispielsweise brahmanisches Schrifttum, Linguistik, Logik und Medizin. Im 7. Jahrhundert war der Ort ein Zentrum des buddhistischen Idealismus, dem zufolge alle wahrgenommenen Dinge Kreationen des Geistes sind. Viele namhafte Gelehrte wirkten in Nalanda, darunter der indische Logiker Dignaga (etwa 480–540) und Shantideva, ein südindischer Königssohn, der laut Überlieferung im 8. Jahrhundert Mönch wurde und bedeutende Schriften verfasst hat.

Kunsthistoriker haben Bronzestatuen von Buddhas, Bodhisattvas und buddhistischen Schutzgottheiten sowie weitere Stein- und Bronzefiguren – auch aus der näheren Umgebung – untersucht. Sie kommen zu dem Schluss, dass das Kloster spätestens ab der Zeit des Yijing ebenfalls ein Zentrum des tantrischen Buddhismus gewesen

sein muss. Diese esoterische Schule lehrt neben der klassischen Meditation komplexe Rituale, um Erleuchtung zu erlangen, und integriert dabei einen ganzen Pantheon an Buddhas, Bodhisattvas (Sanskrit für »Wesen, denen die Erleuchtung bestimmt ist«) und anderen übermenschlichen Wesenheiten.

Noch der tibetische Geschichtsschreiber Butön Rinchen Drub (1290–1364) sprach in seiner »Geschichte des Dharma« Nalanda eine überregionale Bedeutung zu. Diese Jahrhunderte andauernde Wirkmacht wie auch das über die buddhistische Lehre hinausreichende Kurrikulum rechtfertigen die Bezeichnung Universität im gleichen Sinne, wie diese den großen islamischen Madrasas und den Hochschulen des mittelalterlichen Europas zugeschrieben wird. Allerdings war Nalanda dann die älteste solche Anstalt: Al-Zaytunah in Tunesien entstand erst 737, die Universität Bologna gar erst 1088.

Die vom Archaeological Survey of India verwaltete und betreute Stätte mit ihren rekonstruierten und konservierten Klosterhöfen und Stupas lässt die einstige Bedeutung noch erahnen. Stein- und Bronzestatuen, Münzen, Terrakottasiegel und Inschriften in verschiedenen Museen illustrieren, wie reich und komplex das religiöse Leben gewesen sein muss und wie eng verzahnt das Kloster mit seinem politisch-sozialen Umfeld einst war.

Als der Buddhismus im 11. bis 13. Jahrhundert aus Nordindien verschwand, entging auch Nalanda seinem Schicksal nicht. Quellen zufolge habe es der muslimische Eroberer Bakhtiyar Khilji 1193 zerstört. Zwar weist tatsächlich ein Bereich im südlichsten Klostergebäude Brandspuren in den archäologischen Schichten jener Zeit auf. Der relativ gute Zustand der sonstigen Ruinen legt aber eher einen langsamen Verfall nahe.

Nalanda blieb der buddhistischen Welt jenseits Indiens ein Begriff, wie verschiedene Quellen zeigen. Mit der Wiederentdeckung der imposanten Überreste im 19. Jahrhundert wurde es weltweit bekannt. Erneut entfaltete es Symbolkraft. Selbst im säkularen und eher von Hinduismus und Islam geprägten modernen Indien entstand 1951 nahe der Stätte das Nava Nalanda Mahavihara, das »Neue Großkloster Nalanda«, eine akademische Ausbildungsstätte für buddhistische Mönche. 2010 folgte die Nalanda University in Rajgir. Die ebenfalls monumental zu nennende Architektur des geplanten Campus mit Ziegeln, geraden Linien, stupa-ähnlichen Formen und künstlichen Wasserspeichern ist deutlich vom historischen Vorbild geprägt. Seit 2016 gehört die Klosterruine zum UNESCO-Weltkulturerbe. Es steht zu hoffen, dass diese Ehrung dazu beiträgt, die erste Universität der Menschheitsgeschichte im Gedächtnis zu behalten. ◀

QUELLEN

Asher, F. M.: Nalanda: Situating the Great Monastery. The Marg Foundation, Mumbai 2015

Misra, B. N.: Nalanda (3 Bände). B. R. Publishing Corporation, Delhi 1998

Stewart, M. L.: Nalanda Mahāvihāra: A Critical Analysis of the Archaeology of an Indian Buddhist Site. Manohar, Neu-Delhi 2017 (in Vorbereitung)

ANTHROPOLOGIE DIE ERSTEN TIBETER

Schon vor mindestens 40 000 Jahren, mitten in der letzten Kaltzeit, lebten auf dem tibetischen Hochland Menschen. Die heutigen Tibeter tragen noch Erbgut mehrerer alter Homininenarten sowie einer frühen, in Sibirien entdeckten Linie des *Homo sapiens* in sich.

Die ersten Menschen, die auf das »Dach der Welt« vordrangen, mussten sich mit einer der gnadenlosesten Umwelten arrangieren, in der unsere Spezies überhaupt noch zu siedeln vermag. Im Durchschnitt liegt die Hochebene von Tibet mehr als 4500 Meter hoch. Dort herrscht ein kaltes, trockenes Klima – bei halb so viel Sauerstoff wie auf Meeresebene. Bisher glaubten die Forscher, der Mensch habe sich vor frühestens 15 000 Jahren in diese unwirtliche Region vorgewagt. Doch neue genetische und archäologische Befunde deuten auf eine wesentlich ältere erste Besiedlung hin. Demnach erreichten Homininen Tibet bereits mitten während der letzten globalen Kaltzeit, vielleicht sogar schon vor etwa 60 000 Jahren. Diese Eiszeitphase setzte, grob gesagt, vor gut 100 000 Jahren ein und endete vor mehr als 10 000 Jahren.

Für eine große Studie haben Wissenschaftler um den Populationsgenetiker Shuhua Xu, der unter anderem bei der chinesischen Wissenschaftsakademie in Schanghai arbeitet, erstmals das komplette Genom von ethnischen Tibetern sequenziert – 38 an der Zahl. Diese Sequenzen verglichen die Forscher mit denen von Han-Chinesen und diversen anderen Ethnien aus aller Welt und rekonstruierten anhand dessen die Verwandtschaftsbeziehungen und zeitlichen Abstammungsverhältnisse. Laut Xu sprechen die Daten für komplex verwobene prähistorische Wanderbewegungen in der Region und verschiedenste daraus resultierende genetische Beiträge zur tibetischen Population. Am meisten staunten die Experten allerdings über das unerwartet hohe Alter mancher für Tibeter typischen Sequenzen. Diese Abschnitte lassen sich auf Vorfahren zurückführen, die irgendwann vor 62 000 bis vor 38 000 Jahren lebten und möglicherweise die ersten Siedler Tibets waren.

Nach jener ersten Einwanderung, als die Eiszeit das Hochland zunehmend härter in die Zange nahm, scheinen genetische Kontakte zwischen den damaligen Tibetern mit anderen Bevölkerungen für mehrere zehntausend Jahre praktisch aufgehört zu haben, und vermutlich gab es auch so gut wie keine neu zuwandernden Menschen. Eisschilde machten die Migrationsrouten auf lange Zeit selbst für die zähesten Jäger und Sammler unpassierbar, vermutet Xu. Aber nach dem Höhepunkt dieser Kaltzeit müssen in der Zeit vor etwa 15 000 bis vor 9 000 Jahren Menschen in Scharen wieder in das Gebiet vorgedrungen sein. »Das war die Einwanderungswelle, die den Genpool der heutigen Tibeter vor allem prägt«, erklärt Xu. Dieses Ergebnis

GETTY IMAGES / SINO IMAGES, KLEINES FOTO: GETTY IMAGES / EDWINA DEACON



passt zu unabhängig gewonnenen Befunden zur Höhenanpassung der Tibeter, wonach sich genetische Mutationen, die ihnen das Leben in der dünnen Luft erleichterten, vor 12 800 bis 8 000 Jahren zu etablieren begannen.

Der Anthropologe und Archäologe Marc Aldenderfer von der University of California in Merced, ein Experte für menschliche Höhenanpassung und Tibetkenner, zeigt sich von der Arbeit seiner chinesischen Kollegen beeindruckt. Die Studie schlüsselt im Einzelnen auf, wie aus dem genetischen Beitrag von Menschengruppen ganz verschiedener Herkunft die spätere Bevölkerung der Tibeter erwuchs – ein völlig anderes Szenario als nach der bisherigen Auffassung, wonach die Tibeter erst spät aus Chinesen und einigen Himalajabewohnern hervorgegangen sein sollen.

Der neuen Analyse zufolge macht der Erbgutanteil der Tibeter, der vom so genannten modernen Menschen kommt, also dem *Homo sapiens*, 94 Prozent aus. Das übrige Erbgut stammt von längst verschwundenen Homininen, darunter von Neandertalern, Denisovanern sowie bisher noch nicht bekannten früheren Menschenarten.

Betrachtet man allein den »modernen« Anteil, so ähnelt er zu 82 Prozent Genomen von ostasiatischen Menschen. 11 Prozent davon verweisen nach Mittelasien sowie Sibirien und 6 Prozent nach Südasien. Mutmaßlich geht das meiste *H.-sapiens*-Erbgut auf den erwähnten großen Einwanderungsschub am Ende der letzten Kaltzeit zurück. Jedoch fanden sich auch »moderne« genetische Spuren, die auffallend DNA-Sequenzen des vor rund 45 000 Jahren



Die heutigen Bewohner Tibets sind auch Nachfahren von Menschen, die schon mitten in der letzten Kaltzeit dort lebten. Damals kam bei diesen Ahnen Erbgut von Neandertalern, Denisovanern und frühen modernen Sibiriern zusammen.

verstorbenen Manns von Ust-Ischim ähneln, von dem 2008 in Westsibirien ein fossiler Oberschenkelknochen gefunden wurde. Dies ist bislang der älteste moderne Mensch, dessen DNA man vollständig sequenziert hat.

Hypothetischer Hybridmensch SUNDer

Genauer gesagt fanden die Forscher einen äußerst markanten, für Tibeter typischen DNA-Abschnitt, der auf eine enge Abstammungsverwandtschaft – eine nahe Homologie – sowohl mit dem Ust-Ischim-Mann als auch mit den erwähnten älteren Menschenarten hinweist. Besagter Abschnitt unterscheidet sich bei den Tibetern deutlich von anderen heutigen menschlichen Populationen. Er enthält acht Gene, von denen mindestens eines zur Anpassung an große Höhe entscheidend beiträgt. Die Population, die in Tibet während der letzten Kaltzeit existierte, könnte laut Xu aus Hybriden all der oben erwähnten ausgestorbenen Arten und frühen modernen Linien hervorgegangen sein. Diese hypothetische hybride Menschenform taufte die Forscher SUNDer, nach den Anfangsbuchstaben für Sibirier, Unknown (englisch für unbekannt), Neandertaler und Denisovaner.

Verblüfft hat das Team um Xu, dass seine Daten von der ersten Besiedlung des Hochplateaus an bis heute eine deutliche genetische Kontinuität aufweisen, also eine fortlaufende Weitergabe von Erbgutsequenzen. Das bedeutet: Tibet war über all die Jahrzehntausende und sogar während der härtesten eiszeitlichen Phasen durchgehend von Menschen bewohnt. Bisher gingen Anthropologen

davon aus, dass sie die strengsten Zeiten dort nicht überstehen konnten. Aldenderfer und einige seiner Kollegen malen sich dagegen Szenarien aus, in denen das doch möglich gewesen wäre. Zum Beispiel seien die großen Flusstäler auf dem Plateau wohl weniger unwirtlich gewesen als viele andere Gebiete, und mancherorts gab es vermutlich immer warme Quellen.

Im Sommer 2016 stellten chinesische Archäologen in Peking auf dem 33. Internationalen Geografischen Kongress neue Daten zur frühen Besiedlung der südöstlichen tibetischen Hochebene vor, welche die genetischen Ergebnisse untermauern. Ihnen zufolge reichen die bisher ältesten Besiedlungsspuren Tibets zwischen 39000 und 31000 Jahre zurück. Die Fundstätte am Ufer des Flusses Saluen, der in Osttibet in 5500 Meter Höhe entspringt und nach 3000 Kilometern in den Indischen Ozean mündet, birgt viele Steinwerkzeuge und Tierknochen. Aldenderfer weiß, dass dies nur erste Puzzleteile sind. Wesentlich mehr Ausgrabungen sind nötig, um zu verstehen, wie und wo Menschen auf dem tibetischen Hochplateau die letzte Kaltzeit meisterten. ◀

Jane Qiu ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in London.

QUELLE

Lu, D. et al.: Ancestral Origins and Genetic History of Tibetan Highlanders. In: The American Journal of Human Genetics 99, S. 580–594, 2016

NANOOPTIK LICHTMIKROSKOPIE AUF MOLEKULARER EBENE

Biophysiker haben zwei verwandte Techniken der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie miteinander kombiniert. Damit können sie selbst einzelne Farbstoffteilchen erkennen und bringen die Methode so an eine neue fundamentale Grenze.

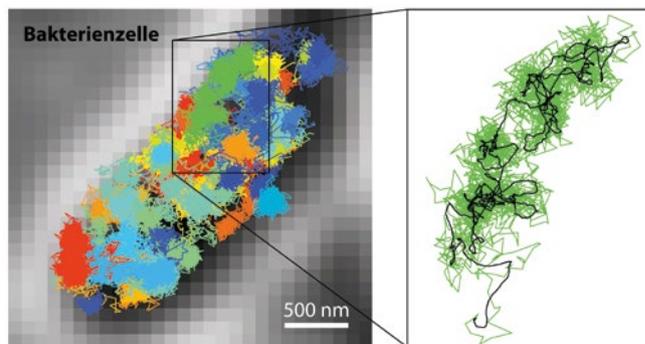
► Bis vor etwa zwei Jahrzehnten waren sich die meisten Experten einig: Die Wellennatur des Lichts beschränkt die mögliche Auflösung optischer Mikroskope. Strukturen kleiner als die halbe Wellenlänge des sichtbaren Lichts – das ergibt rund 200 Nanometer – lassen sich nicht als getrennt voneinander wahrnehmen. Der Physiker Ernst Abbe hatte diese Gesetzmäßigkeit 1873 formuliert. Konventionelle Lichtmikroskope können daher zwar Zellen und deren Organellen darstellen, doch deutlich kleinere Details wie beispielsweise einzelne Proteine oder molekulare Prozesse bleiben ihnen verborgen. In jene Bereiche dringen nur alternative Techniken wie die Elektronenmikroskopie vor, mit denen aber lebende Zellen kaum mehr beobachtbar sind. Die Einschränkung war für Biologen ein großes Problem.

Um die Jahrtausendwende entwickelte Stefan Hell mit seinen Kollegen vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen einen raffinierten Trick. Ihre damals unter dem Akronym STED (stimulated emission depletion) vorgestellte Methode überwand die Abbe-Grenze fundamental. Mit ihr ist es heute möglich, zehnmal kleinere Strukturen in der Größenordnung von 20 Nanometern darzustellen – sogar in lebenden Organismen. STED und ähnliche Verfahren werden unter dem Sammelbegriff der superauflösenden Fluoreszenzmikroskopie zusammengefasst. 2014 erhielt Hell gemeinsam mit zwei weiteren Forschern den Nobelpreis für Chemie für die Einleitung einer neuen Ära der Lichtmikroskopie.

Ein Team um Hell stellte nun die Technik MINIFLUX (minimal emission fluxes) vor, welche die Auflösung erneut etwa um das Zehnfache steigert. Sie ermöglicht Werte von einem Nanometer, das entspricht der Größe der einzelnen Farbstoffmoleküle.

Diese »Fluorophore« markieren bestimmte Bereiche der Probe, und eingestrahktes Licht regt die Moleküle zum Leuchten an. Doch wie bei allen herkömmlichen Lichtmikroskopen gilt auch hier zunächst die von Abbe formulierte Grenze. Kommen sich zwei fluoreszierende Moleküle näher als auf 200 Nanometer, verschwimmen die beiden Signale für den Betrachter zu einem.

Die entscheidende Strategie besteht darin, derart eng beieinanderliegende Fluorophore nicht gleichzeitig leuchten zu lassen, sondern nacheinander. Dann liegt die eigentliche Quelle des Signals im Mittelpunkt des leuchtenden Flecks – egal, wie groß er erscheint. Aus der Gesamt-



YVAN EILERS, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOPHYSIKALISCHE CHEMIE

Die Forscher haben in einer Bakterienzelle einzelne fluoreszenzmarkierte Moleküle sichtbar gemacht. Der Ausschnitt stellt die Bewegung eines der Partikel dar.

heit sehr vieler Einzelaufnahmen berechnet ein Computer schließlich eine Abbildung.

Die von Hell erfundene STED-Technik bringt mittels kombinierter Laserstrahlen ausschließlich die Farbstoffmoleküle in einem genau definierten Bereich zum Leuchten: Ein Strahl schaltet sie an; ein zweiter, der den ersten ringförmig überlagert, schaltet sie aus. So bleibt nur ein winziger Bereich im Zentrum dieses »Donuts« übrig, in dem die Moleküle Licht aussenden können. Der Nutzer steuert präzise die Position der Strahlen von außen und weiß daher im Voraus, wo sich die aufleuchtenden Moleküle befinden. Allerdings lässt sich der mittlere Bereich des Laserstrahls in der Praxis meist nicht genau genug kontrollieren, um wirklich nur ein einzelnes Farbstoffmolekül anregen zu können.

Das Beste aus den Stärken zweier Methoden

Die beiden anderen am weitesten verbreiteten Strategien STORM (stochastic optical reconstruction microscopy) und PALM (photo-activated localization microscopy) funktionieren ebenfalls mit Fluorophoren. Ihr Grundprinzip ist jedoch ein anderes. Sie fokussieren nicht auf einen engen Bereich, sondern schalten mit einem Lichtblitz in einem größeren Areal der Probe zufällig einige wenige Moleküle an. Die Intensität dieser Aktivierung wird gerade so eingestellt, dass für zwei eng beieinanderliegende Farbstoffmoleküle die Wahrscheinlichkeit klein ist, gleichzeitig zu fluoreszieren. Computeralgorithmen rekonstruieren dann aus vielen Bildern mit ganz unterschiedlichen Kombinationen von einzelnen leuchtenden Molekülen deren exakte Positionen. Das Problem hier: Die Fluorophore liefern nicht ausreichend Signal, um die prinzipiell mögliche maximale Auflösung zu erreichen. Denn je heller ein Lichtfleck eines Moleküls, desto besser lässt sich dessen Mitte bestimmen. Außerdem bleichen die Moleküle nach einiger Zeit aus und lassen sich dann nicht mehr anregen.

STED unterscheidet sich von PALM beziehungsweise STORM also dadurch, dass man im ersten Fall die Position des Farbstoffmoleküls genau kennt, während man sie bei den anderen beiden Methoden erst rekonstruieren muss. Hell hatte nun die Idee, die Prinzipien miteinander zu

verknüpfen. Zunächst schaltet MINFLUX einzelne Moleküle in der Probe zufällig verteilt an. Um dann ihren Ort genauer zu bestimmen, tastet ein donutförmiger Laserstrahl ihre unmittelbare Umgebung ab. Im Gegensatz zu STED knipst der ringförmige Strahl die Moleküle allerdings nicht aus, sondern regt sie zum Leuchten an. Je näher sein Zentrum dabei dem Molekül kommt, desto weniger Licht sendet dieses aus, denn im Mittelpunkt des Donuts ist die Intensität der Anregung null. Wenn das Mikroskop an mehreren nahe beieinanderliegenden Stellen – in der Praxis genügen vier – das Fluoreszenzlicht misst, kann ein Algorithmus anhand der jeweiligen Stärke des Signals sehr präzise die Position des Moleküls rekonstruieren. So gelingt letztlich schon mit wenigen eingefangenen Photonen eine genaue Ortsbestimmung, für die bei PALM oder STORM eine viel höhere Leuchtintensität nötig wäre.

Wegen des geringeren Lichtbedarfs lässt sich die Probe schneller scannen. Darum können die Forscher mit MINFLUX erheblich mehr Molekülpositionen pro Sekunde ermitteln und etwa die Bewegung von Molekülen innerhalb lebender Zellen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung filmen (siehe Bild links).

Derweil haben Wissenschaftler um Vahid Sandoghdar vom Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen mit einer Strategie namens COLD (cryogenic optical localization in three dimensions) die Trennschärfe durch einen anderen Trick verbessert. Wie bei STORM und PALM regten sie zufällig die Fluorophore in der Probe an. Doch die Forscher machten sich zu Nutze, dass fotochemische Prozesse bei rund minus 270 Grad Celsius deutlich langsamer ablaufen als bei Raumtemperatur. Infolgedessen behalten die fluoreszierenden Stoffe ihre Leuchtkraft länger. Die Forscher konnten daher insgesamt stärkere Signale messen – die Auflösung wurde besser. So rekonstruierten sie erstmals mit einem COLD-Lichtmikroskop submolekulare Strukturen eines Proteins unterhalb eines Nanometers. Die Methode ist damit laut Sandoghdar ideal für strukturbiochemische Untersuchungen geeignet. Wegen der unwirtlichen Temperaturen sind der Technik jedoch keine Prozesse in lebenden Zellen zugänglich. Der Forscher betont deshalb, wie wichtig die Kombination unterschiedlicher Herangehensweisen sei: »Derzeit ist keine Mikroskopiemethode in der Lage, wirklich alles zu sehen. Verschiedene Strategien werden daher – zumindest vorerst und wie auch bislang – stets komplementär zusammenarbeiten.« ◀

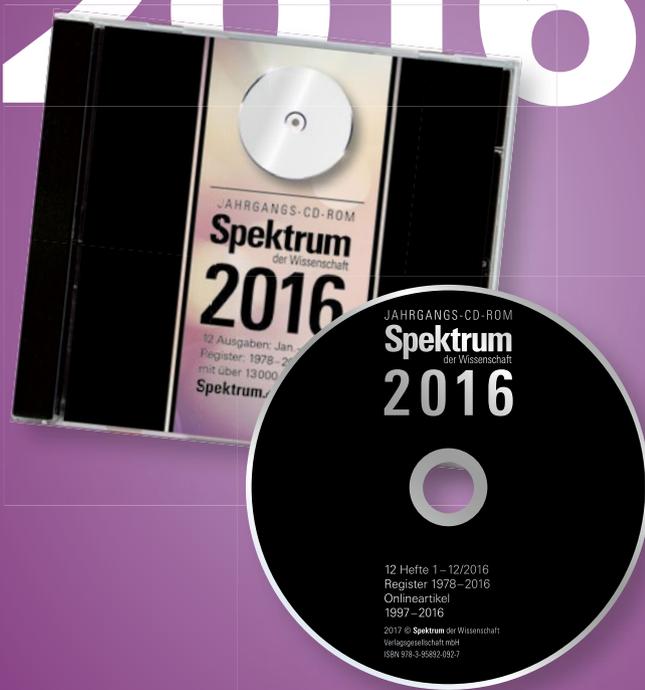
Janosch Deeg ist Physiker und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

QUELLEN

Balzarotti, F. et al.: Nanometer Resolution Imaging and Tracking of Fluorescent Molecules with Minimal Photon Fluxes. In: *Science* 355, S. 606–612, 2017

Weisenburger, S. et al.: Cryogenic Optical Localization Provides 3D Protein Structure Data with Angstrom Resolution. In: *Nature Methods* 14, S. 141–144, 2017

JAHR GANGS 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**

ONKOLOGIE SCHÜTZENDES X-CHROMOSOM

Männer leiden häufiger an Krebs als Frauen und sterben auch öfter daran. Ursachen dafür liegen auf den Geschlechtschromosomen.

Fast jeder zweite Deutsche kämpft mindestens einmal im Leben mit einer Krebserkrankung. Männer sind dabei stärker betroffen: Im Jahr 2013 stellten sie laut dem Zentrum für Krebsregisterdaten am Robert Koch-Institut 252 600 von 482 500 Krebspatienten. Umgerechnet auf 100 Erkrankte ergibt das ein Geschlechterverhältnis von 52 Männern zu 48 Frauen. Klammert man geschlechtsspezifische Tumorleiden – Wucherungen in Sexualorganen oder im Brustgewebe – aus, sind sogar 59 von 100 Krebspatienten männlich. An fast allen Krebsarten erkranken Männer häufiger, seien es Tumoren im Magen (drei von fünf Patienten männlich) oder in der Leber (vier von fünf). Entsprechend stirbt etwa jeder dritte Mann an Krebs, aber nur jede vierte Frau.

Gründe dafür suchten die Mediziner lange im unterschiedlichen Lebensstil. Männer trinken mehr Alkohol, rauchen häufiger und ignorieren öfter Frühwarnzeichen, die auf eine Erkrankung hindeuten können. Doch dies scheint ihr erhöhtes Krebsrisiko nicht vollständig zu erklären. Hinweise auf zusätzlich benachteiligende Faktoren haben Wissenschaftler nun im Genom gefunden: Frauen könnten durch ihre geschlechtsspezifischen Erbanlagen besser vor Tumorerkrankungen geschützt sein.

Doppelt hält besser

Andrew Lane von der Harvard Medical School und seine Mitarbeiter vermuten, dass Gene auf dem X-Chromosom daran mitwirken, bösartige Krebsleiden zu verhindern. Frauen tragen in jeder Körperzelle zwei Exemplare des X-Chromosoms. Gibt es auf beiden davon ein Gen, welches das Krebsrisiko herabsetzt (etwa ein Tumorsuppressor), dann ist die entsprechende Zelle doppelt geschützt. Männliche Körperzellen dagegen haben nur ein X-Chromosom und tragen folglich nur eine Genkopie. Wird diese beschädigt, etwa durch Mutation, gibt es keinen Ersatz. Dann steigt das Risiko, dass die Zelle entartet und einen Tumor hervorbringt – so die These der Forscher.

Allerdings ergibt sich daraus eine weitere Frage. Denn obwohl Frauen in jeder Zelle zwei X-Chromosomen zur Verfügung haben, sind diese nicht gleichzeitig aktiv. Eines davon schaltet die Zelle ab, damit nicht die Erbanlagen von beiden abgelesen und dadurch zu viele Proteine produziert werden. Mittlerweile ist aber klar, dass manche Gene dieser Inaktivierung entgehen können. Zu ihnen gehören wahrscheinlich solche, die das Krebsrisiko mindern, vermuten Lane und seine Kollegen. Die Forscher bezeichnen diese mysteriösen Gene als »Exits« und be-

gannen, im Erbgut von Krebspatienten nach ihnen zu suchen.

Insgesamt analysierte das Team die DNA von mehr als 4100 menschlichen Tumoren 21 verschiedener Krebsarten. Im Fokus standen dabei Mutationen, die zu einem Funktionsverlust X-chromosomaler Gene führen und in männlichen Tumorproben öfter vorkommen als in weiblichen. Die Forscher wurden fündig: Sechs Gene fischten sie aus dem Datenpool. Umgekehrt fanden sie keine X-chromosomalen Erbanlagen, die in weiblichem Tumorgewebe häufiger beschädigt sind als in männlichem. Die sechs identifizierten Gene stellen also gute Kandidaten für Exits dar. Vier von ihnen standen schon zuvor im Verdacht, bei bestimmten Krebserkrankungen eine Rolle zu spielen.

In weiteren Experimenten konzentrierten sich die Forscher auf zwei Krebsarten: Kopf-Hals-Karzinome und bösartige Nierentumoren. Männer sind hier mehr als doppelt so oft betroffen wie Frauen. Neben DNA-Mutationen untersuchte das Team auch, wie aktiv die zuvor entdeckten Exits-Gene in einzelnen Tumoren waren. Dazu ermittelten sie die Menge der jeweiligen Boten-RNA, die in der Zelle als Vorlage für die Proteinherstellung dient. In einigen Tumoren waren diese Erbanlagen zwar nicht mutiert, aber weniger aktiv; das betraf jedoch fast ausschließlich Männer. Das ist ein weiterer Hinweis darauf, dass inaktivierte Exits-Gene eine Rolle im Krebsgeschehen bei Männern spielen.

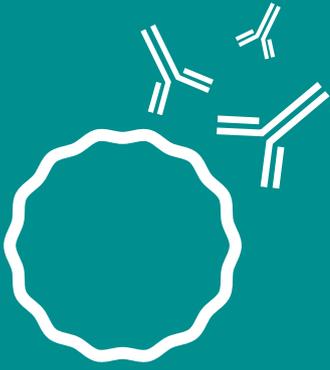
Während Frauen pro Körperzelle zwei X-Chromosomen tragen, besitzen Männer neben einem X- ein deutlich kleineres Y-Chromosom. Dieses enthält weniger Gene, doch es finden sich auf ihm einige Erbanlagen, die zumindest eine ähnliche DNA-Sequenz wie X-chromosomale Gene haben und möglicherweise gleichartig funktionieren.

Drei der entdeckten Exits kommen, in abgewandelter Form, auch auf dem Y-Chromosom vor. Lane und sein Team überprüften deshalb, ob diese für inaktivierte Exits auf dem X-Chromosom einspringen können. Wären sie ein wirksamer Ersatz, dann müsste eine Krebszelle sie loswerden, um entarten zu können. Der Vergleich zeigte aber, dass dies nicht geschieht: Männliche Krebszellen mit mutierten Exits-Genen verloren das Y-Chromosom nur in jedem zehnten Fall. Das Y-Chromosom scheint die Krebszellen also nicht zu behindern.

Geschlechtschromosomen, die im Alter abhandenkommen

Zusammen bestimmen X- und Y-Chromosom, ob ein Fötus männlich oder weiblich wird. Aber nicht alle männlichen Körperzellen enthalten ein Y-Chromosom; besonders im Alter geht es in mehr und mehr Blutzellen verloren. Forschern ist dies schon seit den 1960er Jahren bekannt, doch dass dieser Verlust sich aufs Krebsrisiko auswirkt, wurde ihnen erst vor wenigen Jahren klar.

Wissenschaftler um Jan Dumanski von der Universität Uppsala (Schweden) analysierten Daten einer Langzeitstudie mit 1153 Männern im Alter von 70 bis 84 Jahren. Fast einer von zehn der getesteten Probanden wies einen



Unsere Vision: Nicht der Tumor wächst, sondern die Überlebenschancen.

Als eines der führenden Gesundheitsunternehmen gehen wir in der Krebstherapie auch einen neuen, personalisierten Weg – mit der Immunonkologie. Dabei stärken wir das Immunsystem in der Fähigkeit, Krebszellen zu entdecken und zu bekämpfen. Unser Ziel ist es, mit dieser innovativen Therapie möglichst viele Tumorarten zu behandeln und dem Leben so neue Perspektiven zu ermöglichen.

Weitere Informationen finden Sie auf: immunonkologie.de

© 2017 MSD SHARP & DOHME GMBH, Lindenplatz 1, 85540 Haar. www.msd.de



deutlichen Mangel an Y-Chromosomen auf: Mehr als 18 Prozent der weißen Blutzellen besaßen kein solches Chromosom mehr. Die betroffenen Männer trugen ein doppelt so hohes Risiko, an Krebs zu erkranken, und sogar ein viermal so hohes, daran zu sterben, wie die Forscher herausfanden. Die Studienteilnehmer mit den höchsten Y-Verlusten (mehr als 35 Prozent ihrer weißen Blutzellen enthielten das Chromosom nicht mehr) hatten eine um durchschnittlich 5,5 Jahre kürzere Lebenserwartung.

Blutzellen als Indikator des körperlichen Gesamtzustands

Erstaunlich fanden die Forscher, dass nicht nur die Blutzellen dieser Männer häufiger entarteten, sondern dass die Tumorraten in allen Organen mehr als zweieinhalbfach erhöht waren. In ihren weißen Blutzellen spiegelte sich also das Gesamtkrebsrisiko wider – je weniger Y-Chromosomen sich darin nachweisen ließen, desto wahrscheinlicher war es, dass eine Krebserkrankung auch außerhalb der Blut bildenden Organe entstehen würde.

Eine andere Forschergruppe um Lars Forsberg, ebenfalls von der Universität Uppsala, untersuchte den Zusammenhang zwischen dem Verlust von Y-Chromosomen in Blutzellen und einem bekannten Krebsrisikofaktor: Rauchen. Ihre Studie an mehr als 6000 Männern ergab, dass ältere Raucher häufiger von einem solchen chromosomalen Verlust betroffen sind. Erstaunlicherweise galt das jedoch nur für aktive Raucher: Diejenigen, die aufgehört hatten, zeichneten sich durch einen annähernd normalen Gehalt an Y-Chromosomen aus.

Männer entwickeln besonders oft Krebserkrankungen, die mit Zigarettenkonsum in Verbindung stehen. Dazu zählen Lungenkrebs, Mund- und Rachenkrebs, aber auch Nierenzell-, Leberzell- oder Magenkarzinome. Daher fragen sich Forsberg und sein Team, ob Rauchen das Krebsrisiko unter anderem deshalb erhöht, weil es den Verlust von Y-Chromosomen begünstigt. Weitere Untersuchungen werden hier hoffentlich für mehr Klarheit sorgen.

Alles in allem verdichten sich die Hinweise darauf, dass Männer in Sachen Krebsrisiko genetisch benachteiligt sind. Welche Rolle Exits-Gene und verlorene Y-Chromosomen genau spielen, wie Männer sich besser schützen können und wie der Chromosomenverlust mit anderen Faktoren zusammenwirkt, ist noch weitgehend unbekannt. ◀

Michaela Maya-Mrschtik ist promovierte Biochemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

QUELLEN

Dumanski, J. P. et al.: Smoking is Associated with Mosaic Loss of Chromosome Y. In: *Science* 347, S. 81–83, 2015

Dunford, A. et al.: Tumor-Suppressor Genes that Escape from X-Inactivation Contribute to Cancer Sex Bias. In: *Nature Genetics* 49, S. 10–16, 2017

Forsberg, L. A. et al.: Mosaic Loss of Chromosome Y in Peripheral Blood is Associated with Shorter Survival and Higher Risk of Cancer. In: *Nature Genetics* 46, S. 624–628, 2014

EXOPLANETEN SIEBEN ERDGROSSE WELTEN

Im Orbit des Sterns Trappist-1 ziehen sieben Felsplaneten ihre Bahnen. Auf vier von ihnen könnte sogar Wasser fließen. Ob es dort auch Leben gibt, ist allerdings fraglich.

▶ Selten haben Planeten außerhalb des Sonnensystems die Fantasie der Öffentlichkeit so stark befeuert wie die Welten von Trappist-1. Gleich sieben Himmelskörper kreisen um den gleichnamigen Stern, wie ein internationales Astronomenteam um Michaël Gillon von der Universität de Liège in Belgien Ende Februar 2017 berichtete. Zeitgleich stellte die NASA eine Homepage mit künstlichen Würdigungen ins Netz: Neben einem Poster, das einen Sonnenuntergang über einem extraterrestrischen Ozean im Trappist-1-System zeigt, gibt es auf der Website www.trappist.one auch zwei Kurzgeschichten und einen Comic. Ein Astrophysiker hat sogar ein Gedicht geschrieben, um die Entdeckung zu feiern.

Bei all dem kann man leicht vergessen, wie wenig Forscher bisher über das etwa 39 Lichtjahre entfernte System wissen. Außer Größe, Umlaufdauer und einer Schätzung ihrer Masse ist bisher fast nichts über die Planeten von Trappist-1 bekannt. Zugegeben, allein diese Informationen lassen aufhorchen. Alle sieben Planeten sind vermutlich aus Gestein und haben Umlaufdauern im Bereich von 1,5 bis 20 Tagen. Vier von ihnen bewegen sich in der »habitablen« Zone des Sterns, in der flüssiges Wasser denkbar ist – und damit theoretisch Leben.

Die umfassende Würdigung von Trappist-1 dürfte auch auf den Aufwand zurückgehen, den Astronomen betreiben mussten, um die sieben Welten zu entdecken. Zunächst nutzte das Team um Gillon die beiden Trappist-Teleskope in Chile und Marokko, deren Name für »Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope« steht. Mit den auf die Exoplanetensuche spezialisierten Geräten hatten die Forscher bereits 2016 drei Planeten im Orbit des Sterns entdeckt, genannt Trappist-1 b, c und d.

In den Monaten danach hielten sie den fahlen rötlichen Punkt im Sternbild Wassermann weiter im Blick, wobei fünf weitere Teleskope auf der Erde zum Einsatz kamen. Schließen nutzten die Wissenschaftler auch das Spitzer-Weltraumteleskop der NASA, das im Herbst 2016 mehr als 20 Tage nahezu kontinuierlich auf den Stern gerichtet war. Die Analyse dieser neuen Daten enthüllte die Signatur von insgesamt sieben Planeten: den drei bereits bekannten und die von Trappist-1 e, f, g und h.

Die Forscher setzten dabei auf die so genannte Transitmethode. Damit sie anwendbar ist, muss die Sichtlinie eines Teleskops genau in der Bahnebene der Planeten liegen, was nur für einen kleinen Teil der Planetensysteme in unserer Galaxie zutrifft. In diesem Fall fängt ein Exo-



NASA / R. HURT / T. PYLE (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO17060/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Nicht zu heiß und nicht zu kalt: Vier der Planeten werden von ihrer Sonne just so stark erwärmt, dass es auf ihrer Oberfläche Ozeane geben könnte, wie diese künstlerische Darstellung andeutet.

planet immer dann, wenn er aus Sicht der Erde vor seinen Stern tritt, einen kleinen Teil des Sternlichts ab. Aus der Dauer und der Frequenz dieser kleinen Verdunklung können die Forscher die Umlaufdauer des Exoplaneten berechnen und daraus seinen Abstand zu seinem Zentralgestirn. Der Anteil des abgefangenen Sternlichts verrät ihnen den Durchmesser des Planeten. Und sofern mehrere davon dicht um einen Stern kreisen, können Wissenschaftler anhand von kleinen, durch gegenseitige Anziehung hervorgerufenen Schwankungen der Umlaufdauern außerdem die Massen der Körper abschätzen.

Haben die Planeten überhaupt Atmosphären?

Die so charakterisierten Begleiter von Trappist-1 zählen auf den ersten Blick zu den erdähnlichsten der etwa 3500 inzwischen bekannten Exoplaneten. Dennoch ist es wohl ein wenig hochgegriffen, von »Schwesterplaneten« der Erde zu reden. Denn dafür muss ein Planet nicht bloß so groß sein und ungefähr so viel Sonnenlicht abbekommen wie unsere Heimat. Er muss auch eine Reihe weiterer Besonderheiten aufweisen. Damit es Flüsse, Seen und Ozeane geben kann, benötigt eine Welt zum Beispiel eine ausreichend dichte Atmosphäre. Die Lufthülle würde einen Teil der von der Planetenoberfläche reflektierten Wärmestrahlung davon abhalten, ins All zu entweichen. Ohne diesen Treibhauseffekt läge die Durchschnittstemperatur auf der Erde bei frostigen Minusgraden.

Ob die Trappist-Planeten Atmosphären haben, weiß bisher niemand. Eine Selbstverständlichkeit ist das nicht: Nur wenn die Planeten sich in größerem Abstand von ihrem Stern gebildet haben, könnten sie ihre Gashüllen bewahrt haben, schätzen die Forscher. Sind die Welten hingegen dort entstanden, wo sie heute kreisen, stünde es schlecht für mögliche Atmosphären. Denn dann hätte vermutlich die Strahlung des jungen Sterns, die nach seiner Geburt noch stärker war als heute, bereits früh Gasmoleküle von den sich formenden Felskörpern ausgetrieben.

Simulationen von protoplanetaren Staubscheiben legen ein für Atmosphären verträgliches »Migrationsszenario« nahe, argumentiert Gillons Team. Demnach hätte in den

Kindertagen von Trappist-1 die Schwerkraft der sich auflösenden Scheibe die Planeten erst nach innen auf ihre heutigen Umlaufbahnen gezogen. Damit könnte genügend Zeit für die Bildung dichter Atmosphären geblieben sein.

Im Sonnensystem würden die Orbits der Trappist-1-Planeten alle innerhalb der Merkurbahn liegen. Das System wirkt damit so, als hätte jemand unser eigenes um den Faktor 50 geschrumpft. Dass die Welten trotz der großen Nähe zu ihrer Sonne keine glutheißen Höllen sind, verdanken sie deren Natur. Bei Trappist-1 handelt es sich um einen »ultrakühlen« Zwergstern, der gerade genug Masse aufbringt, um in seinem Inneren das stellare Feuer, die Wasserstofffusion, zu zünden. Er erreicht nur acht Prozent der Masse der Sonne, gerade einmal elf Prozent ihres Durchmessers und ist damit nur wenig größer als Jupiter.

In einem entscheidenden Punkt trägt allerdings der Vergleich mit einem geschrumpften Sonnensystem, dessen habitable Zone einfach näher am Stern liegt. Trappist-1 ist zwar deutlich kleiner und kühler als unsere Sonne. Aber er schießt ähnlich viel Röntgenlicht ins All, wie ein Team um Peter Wheatley von der University of Warwick unter Gillons Mitarbeit bereits 2016 anhand von Daten des Weltraumteleskops XMM-Newton ermitteln konnte.

Eine jüngst publizierte Nachfolgestudie zeigt: Wegen der großen Nähe zum Stern würde eine Atmosphäre, die unserer gleicht, früher oder später von Röntgen- und UV-Strahlung ins All geblasen. Bei den inneren Planeten Trappist-1b und c würde dieser Prozess ein bis drei Milliarden Jahre dauern, schätzen die Forscher. Für die in der habitablen Zone kreisenden Planeten d, e, f und g blieben immerhin 5 bis 22 Milliarden Jahre. Das ist einerseits ein sehr langer Zeitraum, der genügend Zeit für die Entwicklung von Leben lassen könnte. Andererseits würde der ständige Beschuss mit ionisierender Strahlung die Entwicklung eines Ökosystems vermutlich erschweren.

Die Nähe der Planeten zu ihrem Stern wirkt sich noch auf andere Weise aus. Wie der Mond der Erde wenden die Trappist-1-Planeten ihrem Stern sehr wahrscheinlich stets die gleiche Seite zu – Astrophysiker sprechen von einer »gebundenen Rotation«. Bei ihr entspricht eine Drehung um die

Planetenachse (also ein Tag) genau einem Umlauf um den Stern (einem Jahr). Die Ursache sind Gezeitenkräfte, die eine ursprünglich schnellere Rotation im Lauf der Zeit abbremsten.

Die Folgen für einen Planeten sind beträchtlich. Während auf seiner einen Seite der Stern unverrückbar am Firmament stünde, würde die andere Hemisphäre in Kälte und Dunkelheit verharren. Eine Atmosphäre könnte zwar für einen Temperaturengleich sorgen. Auch ist denkbar, dass Organismen in der Zone zwischen Tag und Nacht, im ewigen Zwielicht, gedeihen könnten. Zutraglich für ein Ökosystem ist eine gebundene Rotation aber wohl nicht.

Selbst wenn der Keim des Lebens unter solchen Bedingungen vor vielen Millionen Jahren auf einem der Trappist-1-Planeten entstanden ist: Um sich zu entfalten, bräuchte das Leben vermutlich viel Zeit, in welcher der Planet auf einer stabilen Bahn um seinen Stern kreist. Mit Blick auf Trappist-1 können die Wissenschaftler nicht sicher sagen, ob diese Voraussetzung dort gegeben ist. Da die Bahnen der Planeten viel kompakter sind als im Sonnensystem, ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass sich zwei der Himmelskörper ins Gehege kommen und beispielsweise kollidieren.

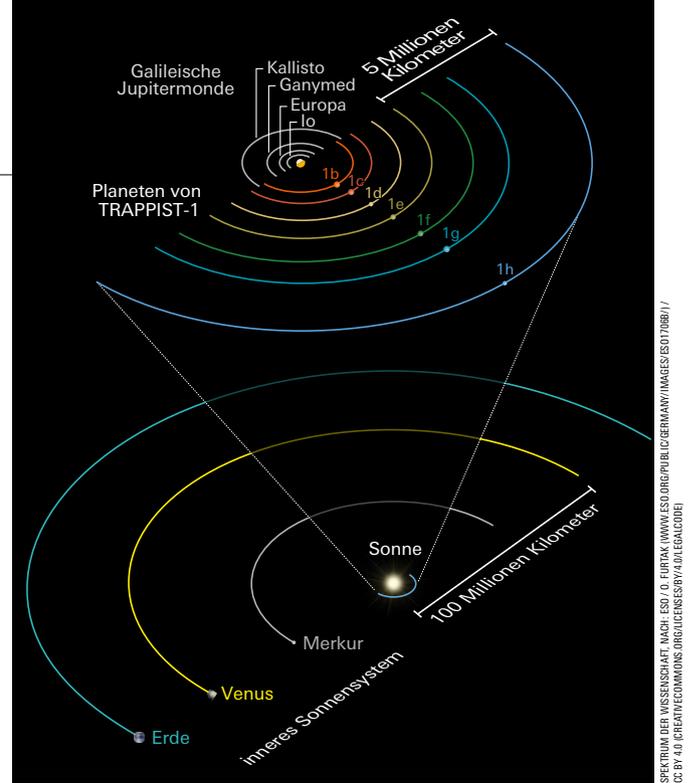
Etwas Zuversicht in dieser Frage bieten immerhin kürzlich veröffentlichte Daten des Kepler-Weltraumteleskops, denen zufolge das Trappist-1-System mit drei bis acht Milliarden Jahren viel älter ist als anfangs gedacht und daher seine turbulente Jugend bereits hinter sich hat.

Neue Teleskope könnten »Biomarker« identifizieren

Insgesamt scheint die Aussicht auf lebensfreundliche Bedingungen im Trappist-1-System nach wie vor zweifelhaft. Aber wer weiß schon, welche Formen von Leben sich unter anderen Verhältnissen bilden können? Vielleicht haben sich ja Mikroorganismen entwickelt, die der starken Röntgenstrahlung widerstehen. Oder es gibt bei den äußeren Planeten zwar kein flüssiges Wasser auf der Oberfläche, wohl aber unter einem Eispanzer, wie es bei einigen Monden in unserem Sonnensystem vermutlich der Fall ist. Und möglicherweise wird das System von weiter außen kreisenden, noch unbekanntem Planeten stabilisiert.

Trappist-1 und seine Begleiter werden für viele weitere Studien zur Verfügung stehen. Damit bieten sie die bisher beste Chance, eine der zentralen Fragen der Exoplanetenforschung zu beantworten: ob Felsplaneten in der habitablen Zone kühler Sterne Atmosphären besitzen können, und wenn ja, woraus diese bestehen. Eine Gashölle würde dem Lichtspektrum des Sterns während eines Planetentransits eine charakteristische Signatur in Form zusätzlicher Spektrallinien aufprägen. Fänden sich in diesen Linien so genannte »Biomarker« wie Wasser, Ozon, Sauerstoff, Kohlendioxid oder Methan – insbesondere als Kombination –, wäre das ein Hinweis auf biologische Aktivität.

Ozon würde sich als Linie bei einer Wellenlänge von 9,6 Mikrometern zeigen, also im Bereich des infraroten Lichts. Das James-Webb-Weltraumteleskop (JWST), das unter Federführung der NASA gebaut wird und Ende 2018 ins All starten soll, könnte eine solche Signatur nachweisen. Je nachdem, wie deutlich die Spektrallinie ist, muss-



Das Planetensystem von Trappist-1 ist äußerst kompakt, und seine Dimensionen ähneln demjenigen von Jupiter mit den vier Galileischen Monden. Es ließe sich bequem innerhalb der Umlaufbahn des sonnennächsten Planeten Merkur platzieren.

ten dafür jedoch viele Transits beobachtet werden, was Zeit kostet. Bei einem Zwilling der Erde, der einen sonnenähnlichen Stern umkreist, würde zwischen zwei Transits ein Jahr liegen. Aussagekräftige Spektren wären selbst mit dem JWST erst nach vielen Jahren möglich.

Dank der kurzen Umlaufzeiten der Planeten um Trappist-1 werden Forscher dort deutlich schneller Atmosphärenspektren messen können. Da das Planetensystem der Erde viel näher liegt als viele vergleichbare Exoplaneten, etwa vom Weltraumteleskop Kepler entdeckte Gesteinsplaneten, kann man zudem auf direkte Bilder der Planeten hoffen – in Form eines Lichtpünktchens neben dem Stern. Solche Aufnahmen könnte die nächste Generation von Großteleskopen ab Mitte der 2020er Jahre liefern, etwa das europäische Extremely Large Telescope. Jenseits aller Spekulationen über außerirdisches Leben zeigen diese Möglichkeiten, warum die Entdeckung der Planeten um Trappist-1 so bedeutsam ist. ◀

Jan Hattenbach ist Physiker sowie Astronom und arbeitet als Wissenschaftsjournalist.

QUELLEN

Bourrier, V. et al.: Reconnaissance of the TRAPPIST-1 Exoplanet System in the Lyman- α Line. In: *Astronomy & Astrophysics* 599, L3, 2017

Gillon, M. et al.: Seven Temperate Terrestrial Planets around the Nearby Ultracool Dwarf Star TRAPPIST-1. In: *Nature* 542, S. 456–460, 2017

Wheatley, P. et al.: Strong XUV Irradiation of the Earth-Sized Exoplanets Orbiting the Ultracool Dwarf TRAPPIST-1. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters* 465, L74–L78, 2017



SPRINGERS EINWÜRFE ZUKUNFTSTECHNIK SUCHT SPENDABLE KUNDEN

Wann Quantencomputer heutigen Rechnern überlegen sein werden, steht in den Sternen. Große IT-Anbieter verkaufen aber bereits Nutzungsrechte.

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

» spektrum.de/artikel/1443917

Es kommt nicht alle Tage vor, dass ein seriöses Unternehmen eine Technik auf den Markt wirft, die es noch gar nicht gibt. Nur närrische Millionäre buchen schon jetzt ihre künftige Weltraumreise oder ein Tiefkühlfach, um per Kryotechnik in ferner Zukunft zu erwachen. Doch nun kündigt ein in der Informationstechnik (IT) führender Konzern noch für dieses Jahr einen praktikablen Quantencomputer an, auf dem ab sofort jedermann gegen Gebühr Rechenzeit reservieren kann (*Nature 543, S. 159, 2017*).

Da immerhin IBM dieses Versprechen macht, dürfte es sich kaum um einen bloßen Werbegag handeln – aber ein bisschen gesunde Skepsis ist wohl angebracht. Bisher bestehen Quantencomputer aus ein paar Atomen in einer Vakuumkammer oder aus winzigen supraleitenden Schaltkreisen bei wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt. Die Prototypen kommen der-

Wer bekommt da nicht Lust, an den Innovationen mitzuwirken?

zeit über Rechenkunststücke der Art »zwei mal zwei ist vier« kaum hinaus.

Wann solche extrem empfindlichen und fehleranfälligen Geräte gängigen Rechnern das Wasser reichen, geschweige ihnen überlegen sein werden, ist noch völlig offen. Was derzeit wirklich Fortschritte macht, sind die speziellen Algorithmen für künftige Quantencomputer. Der Verdacht liegt nahe, dass IBM mit der Ankündigung den Zweck verfolgt, weltweit Experten für die Weiterentwicklung des mathematischen Formalismus einzuspannen – während die Firma zugleich aus der Art des verwendeten Geräts ein großes Geheimnis macht.

Gleichzeitig präsentiert der Internetgigant Google seinen Fahrplan zur kommerziellen Quantenmaschine – wobei die Entwickler um Chefwissenschaftler Masoud Mohseni vom Google Quantum Artificial Intelligence

Laboratory in Venice (Kalifornien) immerhin zugeben, dass es bis dahin mindestens zehn Jahre dauern wird (*Nature 543, S. 171–174, 2017*).

Wie IBM verlangt Google quasi Eintrittsgeld für die Teilnahme an der Entwicklungsarbeit, indem man zahlenden Kunden verspricht, sie könnten demnächst Vorformen echter Quantencomputer ausprobieren. Der Trick erinnert ein wenig an Mark Twains Tom Sawyer, der verdonnert wird, einen langen Zaun anzustreichen: Er zelebriert seine Pinselführung so spektakulär, dass vorbeikommende Jungen ihm sogar Tauschwaren anbieten, um an seiner Stelle arbeiten zu dürfen.

Ähnlich spekulieren Googles Forscher öffentlich über Mischformen von klassischen und Quantencomputern und malen fantasievoll aus, was solche Hybriden vielleicht schon in wenigen Jahren leisten könnten. Geschickt ziehen sie Vergleiche mit der Geschichte der künstlichen Intelligenz, die erst jahrzehntelang stagnierte und jetzt einen Durchbruch nach dem anderen erzielt, jüngst sogar den Sieg über Profis im Pokerspiel. Nicht auszudenken, so die Forscher, wie die KI erst vorankäme, wenn ihr Quantencomputer zur Verfügung stünden!

Wer bekommt da nicht Lust, an solch spannenden Innovationen mitzuwirken – und zahlt dafür Google gern einen Mitmach-Obolus? Das Geld sei auch unter kaufmännischen Gesichtspunkten hervorragend angelegt, betonen Mohseni und sein Team. Denn wer den ersten halbwegs funktionierenden Quantencomputer erstet, hat damit gegenüber der IT-Konkurrenz einen Wettbewerbsvorsprung, den das Google-Team schlicht als »exponentiell« bezeichnet. Universitäten, Privatfirmen und Regierungsstellen werden animiert, an dem Abenteuer teilzunehmen.

Ein schönes Modell haben sich IBM und Google da ausgedacht: Wer mag und dafür zahlt, darf gerne mitmachen, aber das Ergebnis – das Patent auf einen echten Quantencomputer – gehört dann natürlich dem Konzern.

ÖKOLOGIE INVASION DER PLATTWÜRMER

Bestimmte Strudelwürmer – exotische Landplanarien – breiten sich durch den Menschen weltweit aus. Die gefräßigen Tiere bedrohen in Europa das eingespielte Bodenleben, indem sie etwa Regenwürmer dezimieren.



Ronald Sluys hat eine Forschungsprofessur am Museum Naturalis Biodiversity Center, vormals Nationaal Natuurhistorisch Museum, in Leiden. Er zählt zu den weltweit führenden Experten von Planarien.

► spektrum.de/artikel/1443903

Der Strudelwurm *Platydemus manokwari* aus Neuguinea zählt laut Weltnaturschutzunion (IUCN) zu den 100 bedrohlichsten invasiven Arten. 2013 entdeckte Jean-Lou Justine vom Muséum National d'Histoire Naturelle in Paris diesen Landplattwurm erstmals in Frankreich – in der Normandie bei Caen – und damit zugleich erstmals in Kontinentaleuropa. Bis dahin wusste man nur von der problematischen Ausbreitung des bis zu

gut sechs Zentimeter langen flachen Wurms auf einigen indopazifischen Inseln. Doch seitdem fand der Pariser Experte ihn nun auch in der Karibik und in Florida (siehe »Bald allgegenwärtig?«, S. 35).

Das räuberische Tier ist dafür bekannt, dass es Ökosysteme regelrecht umgestaltet, weil es Regenwürmer und Schnecken dezimiert. Leider stellt es beileibe nicht die einzige Art der Landplattwürmer oder Landplanarien dar, die Ökologen Sorgen bereitet. Die Mehrzahl der Strudelwürmer lebt zwar im Wasser. Biologen kennen inzwischen aber auch mehr als 900 bodenbewohnende Spezies, die typischerweise in tropischen oder gemäßigten Wäldern heimisch sind. In der Erde importierter Gewächse, oft Zierpflanzen, gelangen sie in andere Länder. Allzu leicht entkommen sie dann in die Natur, wo sie als gefräßige Spitzenprädatoren von Bodenorganismen Nährstoffkreisläufe durcheinanderbringen, heimische nützliche Arten gefährden und sogar Pflanzengemeinschaften verändern. Der bis zu 20 Zentimeter lange Neuseelandplattwurm *Arthurdendyus triangulatus* hat in Großbritannien nachweislich schon in den 1980er Jahren ganze Regenwurmpopulationen in landwirtschaftlichen Böden schwer geschädigt.

Die Landplanarien, deren Vorfahren sich von den Salz- und Süßwasserformen bereits vor hunderten Jahrmillionen abgespalten haben, sind außerordentlich anpassungsfähig. Anscheinend haben sie praktisch keine natürlichen Feinde. Bemerkenswert ist ihre Fortpflanzung: Einerseits legen sie Eier, andererseits vermehren sie sich auch asexuell, indem der Körper auseinanderbricht. Die fehlende

AUF EINEN BLICK LANDPLANARIEN AUF DEM VORMARSCH

- 1 Die meisten terrestrischen Plattwürmer leben in warmen, feuchten südlichen Gefilden. In Europa und Nordamerika fühlen sie sich besonders in Gewächshäusern und Gärtnereien wohl.
- 2 Mit Topfpflanzen wurden und werden sie eingeschleppt. Wenn sie ins Freie entkommen, beeinträchtigen sie das Bodenleben radikal, bedrohen etwa einheimische Regenwürmer und Schnecken.
- 3 Völlig wird man die gefräßigen Strudelwürmer wohl nicht wieder los. Doch es könnte gelingen, ihre Invasion zumindest einzudämmen.

Bipalium kewense war der erste fremde Landplattwurm, auf den Forscher aufmerksam wurden. Sie entdeckten diesen Strudelwurm aus Südostasien zuerst 1878 in den Kew Gardens, einer ausgedehnten botanischen Anlage südwestlich von London. Anfang des 20. Jahrhunderts fand man ihn erstmals auch in Gewächshäusern Nordamerikas.



Kopf von
Bipalium kewense

NATURE PICTURE LIBRARY / MYN / GIL WIZEN

Hälfte, sogar der Kopf, wächst dann binnen etwa zwei Wochen nach. Gleiches geschieht, wenn man einen Wurm in der Mitte durchtrennt.

Bis vor einigen Jahren waren die Landplanarien ein rechtes Stiefkind der Forschung, und bis heute wissen wir längst noch nicht genug über sie. Nur wenige Forscher, darunter ich, haben ihre Arten und ihre Verbreitung erfasst. Das änderte sich durch Justines Entdeckung. Nun gibt es allortigen Meldungen von invasiven terrestrischen Strudelwürmern. Diverse Arten dieser anpassungsfähigen Tiere scheinen tatsächlich in immer mehr Gebiete der ganzen Welt vorzudringen. Es wäre dringend geboten, ihrer Herr zu werden. Nur wie?

Ihr außerordentliches Regenerationsvermögen faszinierte schon Charles Darwin

Kein Geringerer als Charles Darwin (1809–1882) sammelte auf seiner Weltreise in Chile und Tasmanien landlebende Planarien und war von ihnen fasziniert. Er schrieb, sie ähnelten äußerlich kleinen Nacktschnecken, wären jedoch viel schmäler, und manche Arten hätten Längsstreifen in wunderschönen Farben. Es gelang ihm sogar, einige Tiere zwei Monate lang am Leben zu halten, die, wenn man sie nur anfasst, oft einfach zu Schleim werden. Und er experimentierte bereits mit ihrem erstaunlichen Regenerationsvermögen.

Dass Landplanarien aus südlichen Regionen sich einmal auf der Nordhalbkugel ausbreiten würden, stellte sich Darwin vermutlich nicht vor. Doch 1878, noch zu seinen Lebzeiten, entdeckten Forscher eine bis dahin unbekannt

Art in einem Gewächshaus der Kew Gardens südwestlich von London, einem der ältesten botanischen Gärten. Sie erhielt den wissenschaftlichen Namen *Bipalium kewense*. Vertreter der Gattung *Bipalium* kannte man sonst nur von Indien, Südostasien und Madagaskar. Wie sich allerdings schon bald erwies, hatte sich dieser bis zu 35 Zentimeter lange Wurm bereits auf der ganzen Welt, auch in Deutschland, in Gewächshäusern und Gärtnereien eingefunden. Von dort aus besiedelte er bald Gärten beispielsweise in US-Südstaaten und auf den Westindischen Inseln.

Die Individuen aller *Bipalium*-Arten sind Zwitter, besitzen also sowohl Hoden wie Eierstöcke. Allerdings vermag sich *B. kewense* im gemäßigten Klima meist nicht sexuell fortzupflanzen. Stattdessen vermehrt sich das Tier in unseren Breiten offensichtlich durch Teilung und Regeneration. Und fast jedes Jahr scheint diese Art als blinder Passagier in Pflanzgefäßen neue Orte zu erobern. Erst kürzlich fand man Exemplare auf den Azoren und auf einer Insel im Golf von Guinea.

Auf den Britischen Inseln verzeichnen Biologen und Naturfreunde seit den 1960er Jahren zunehmend weitere Landplanarienarten von der Südhemisphäre, die wahrscheinlich zumeist aus Neuseeland oder Australien stammen, darunter den Australischen Plattwurm *Australoplana sanguinea*. Ihre Anzahl stieg in den folgenden Jahrzehnten auf inzwischen 15 nicht heimische Spezies an. Viele der neuen Arten entdeckte man zuerst in Gewächshäusern, aber die meisten tauchen längst auch im Freien auf. Sicherlich trug die bekannte Gartenleidenschaft vieler Briten, die mit Vorliebe exotische Gewächse aus aller Welt kultivierten,

vieren, das ihre hierzu bei. Der eingangs erwähnte Neuseelandplattwurm *A. triangulatus* hat es mittlerweile sogar bis auf die Färöer-Inseln zwischen Schottland und Island geschafft.

Darwin hatte angenommen, dass Landplanarien morsches Holz fressen. In Wirklichkeit ernähren sie sich als räuberische Generalisten unter anderem von Regenwürmern, Nackt- und Gehäuse-schnecken, Insektenlarven, Asseln, Springschwänzen und diversen anderen Gliederfüßern. Nicht selten ist ihre Beute wesentlich größer als sie selbst. Peter Ducey von der State University of New York in Cortland beobachtete, wie Vertreter der Art *Bipalium adventitium* Regenwürmer vom 100-Fachen ihrer eigenen Körpermasse überwältigten.



CDC / JAMES GATHANY

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Dabei kombiniert der Strudelwurm Körperkraft mit einigen speziellen Tricks, wie dem Einsatz eines klebrigen Schleims, mit dem er sich an die Beute anheftet. Beim Fressen nutzt er dann ein aggressives Verdauungsssekret. Er spuckt es auf das noch lebende Opfer und leitet es durch seinen ausstülpbaren Schlund in dessen Inneres, wozu er diesen in das Opfer einführt. Der Schlund oder Pharynx ist eine muskulöse Struktur, die in den Magen mündet und beim Fressen wie ein Rüssel in der Mitte der Bauchseite hervortritt. Durch ihn saugt der Plattwurm seine Beute mit peristaltischem Pumpen der Schlundmuskulatur regelrecht Stück um Stück aus.

Manche Arten vertilgen sogar speziell andere Landplanarien, wie Piter K. Boll von der Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Brasilien) kürzlich nachwies. Normalerweise bemerkt der Angegriffene die Gefahr sofort. Sobald er die Berührung spürt oder auf eine verräterische Schleimspur trifft, sucht er mit allen Mitteln zu entkommen (siehe das Video: <https://youtu.be/-kTUR1t6ZyU>). Es gibt überdies auf Plattwürmer spezialisierte Spezies, die ihrerseits wieder von einer anderen Planarienart gefressen werden.

Zu den verheerendsten Auswirkungen der weltweiten Plattwurminvasion zählen Biologen die Dezimierung der Regenwürmer, die vielerorts für die Bodenökologie sehr wichtig sind. Schon 1970 erkannte der Bodenbiologe Daniel Dindal von der State University in New York, dass *B. adventitium* in Nordamerika kommerziellen Regenwurmzuchten schwer zusetzt. Und wie Ducey zudem aufzeigt, findet man diesen Plattwurm dort bereits in größerer Zahl besonders in der Nähe von Gärten mit exotischen Zierpflanzen.

Man könnte nun einwenden, das sei speziell für die nordamerikanischen Ökosysteme nicht so tragisch.

Schließlich haben erst die Europäer viele der heute auf dem Kontinent vorhandenen Regenwurmart eingeschleppt und teils sogar absichtlich für ihre Verbreitung gesorgt. Als die letzte Vereisung vor rund 12 000 Jahren zu Ende ging, die weite Teile Kanadas und der nördlichen USA mit einem dicken Eisschild bedeckt hatte, gab es in der Region so gut wie keine Regenwürmer mehr. Manche Arten konnten sich zwar von Süden her langsam wieder nach Norden ausbreiten, doch insbesondere viele nördliche Waldgebiete blieben bis zur Ankunft der Europäer regenwurmfrei, und einige sind es offenbar heute noch. Pflanzen und Tiere haben sich darauf eingestellt. Für diese Ökosysteme ist eine dicke Schicht aus nur langsam verrottem Pflanzenmaterial typisch, das sich über Jahre aufhäuft und das Substrat vieler Keimlinge bildet.

Jenes eingespielte System stören die invasiven Regenwürmer massiv, weil sie die toten Blätter und Pflanzenreste in die Tiefe befördern und damit keimenden Bäumen und Kräutern den Nährboden entziehen. Dieser Wald bildet dann praktisch keinen Unterwuchs mehr. Dass die europäischen Würmer so großen Schaden anrichten, hängt auch damit zusammen, dass einige in Nordamerika vorherrschende Bäume recht weiche Blätter haben, mit denen die invasiven Regenwürmer gut fertigwerden. Die Neulinge machen heute etwa ein Drittel der nordamerikanischen Arten aus. Zunächst kamen sie wohl meist in der Erde von Pflanzen und mit Schiffsballast ins Land, später zudem gezielt als Köder zum Angeln. Besonders über Siedlungen und entlang von Straßen haben sie sich bald verbreitet. Heute geschieht das auch etwa über die Räder schwerer Waldarbeitsfahrzeuge.

Ihre weitere Ausbreitung versucht man inzwischen mit verschiedensten Maßnahmen einzudämmen. Ob die invasiven Landplattwürmer dabei helfen könnten, indem sie die unerwünschten Regenwürmer fressen, ist allerdings fraglich. Niemand weiß, ob sie den in den Südstaaten einheimischen Regenwürmern ebenfalls schaden würden. Die eingeschleppten Plattwürmer *Bipalium pennsylvanicum* und *B. adventitium* mögen sich gegen die Ringelwurmpflage zwar als nützlich erweisen. Doch ein anderer Neuling, *B. vagum*, frisst lieber Schnecken. Ducey befürchtet daher, dass er seltene amerikanische Mollusken dezimiert.

Ein erster Aufruf zur Plattwurmjagd in Großbritannien: Unter Steinen, Hölzern, Plastikfolien ...

Ganz andere Sorgen haben die Briten. In Europa sorgen nicht zuletzt Regenwürmer für fruchtbare Böden und unterstützen somit den Feldanbau. Gefürchtet ist etwa *Australoplana sanguinea*, der sich ausschließlich von den Ringelwürmern ernährt. Dass der Neuseelandplattwurm *Arthurdendyus triangulatus* auf landwirtschaftlichen Flächen Nordirlands Schaden anrichtet, da er sowohl die Anzahl als auch den Artenreichtum der Regenwürmer verringert, wies Rod Blackshaw, damals beim Landwirtschaftsamt von Nordirland tätig, schon in den 1990er Jahren in mehreren Studien nach. Angesichts dieser Bedrohung rief ein Team um Hugh D. Jones, der heute am Natural History Museum in London arbeitet, 1995 zur landesweiten Platt-

Bald allgegenwärtig?

Zu den bedrohlichsten invasiven Arten zählt der Neuguineaplattwurm, *Platydemus manokwari*. Noch vor wenigen Jahren dachten Biologen, sein Vorhandensein beschränke sich auf die indopazifische Region, doch schon 2014 erwies er sich als wesentlich weiter verbreitet (blaue Punkte). Mehr Nachweise kamen 2015 hinzu (rote Punkte). Der Wurm auf dem Foto frisst gerade eine Schnecke: Er stülpt seinen Schlund aus der Bauchmitte hervor und weidet sein Opfer quasi aus.



KARTE: AMERICAN SCIENTIST; MACH: JUSTINE, J. ET AL.: THE INVASIVE NEW GUINEA FLATWORM *PLATYDEMUS MANOKWARI* IN FRANCE: THE FIRST RECORD FOR EUROPE. TIME FOR ACTION IS NOW! IN: PIERRE, J. 2014, FIG. 8; FOTO: JUSTINE, J. ET AL.: THE INVASIVE NEW GUINEA FLATWORM *PLATYDEMUS MANOKWARI* IN FRANCE: THE FIRST RECORD FOR EUROPE. TIME FOR ACTION IS NOW! IN: PIERRE, J. 2014, FIG. 8; URL: https://www.researchgate.net/publication/2711765140_INVASIVE_NEW_GUINEA_FLATWORM_IN_FRANCE

Auf der Tagung stellten die Forscher die wesentlichen Wissenslücken von der Ausbreitung der Landplanarien zusammen und überlegten außerdem, wie Invasoren nachzuweisen wären und wie man sie bekämpfen könnte. Der später veröffentlichte Tagungsband gilt bis heute als maßgebliches Werk über terrestrische Plattwürmer und speziell ihre invasiven Arten. Die britischen Forscher haben die Planarieninvasion in ihrem Land anschließend weiterverfolgt und Maßnahmen dagegen angestrengt. Doch anderswo fehlten dazu meist die Experten und, wegen der bislang geringen Funde, teils die Motivation.

Unwissentlich eingeschleppt mit Schiffsladungen von exotischen Pflanzen

Zu der Zeit wussten Biologen allerdings schon von einigen landlebenden Strudelwürmern, die wahrscheinlich bereits im 19. Jahrhundert mit Pflanzen nach Kontinentaleuropa und Nordamerika gelangt waren. Dazu zählt *B. kewense* ebenso wie die indomalaiische Art *Dolichoplana striata*, die erstmals 1943 in Nordamerika nachgewiesen wurde. Drei Jahre vorher hatte man in Texas bei Blumen, die per Schiff aus Mexiko kamen, die australische Planarie *Parakontikia ventrolineata* aufgespürt. Sie ist mittlerweile in kalifornischen Gärten sowie an der Ostküste anzutreffen, oft zusammen mit der gleichfalls australischen Art *Caenoplana coerulea*.

Als nun immer mehr Landplanarien in Ländern auftauchten, wo sie nicht hingehören, nahm die Aufmerksamkeit der Biologen schließlich doch zu. Jean-Lou Justine entdeckte in Frankreich nicht nur den eingangs erwähnten fingerlangen Neuguineawurm *P. manokwari*, sondern auch *C. coerulea*, den Australischen Blauen Gartenplattwurm.

wurmjagd auf. Gärtner sollten die Planarien unter Steinen, Brettern, Baumstämmen, Plastiksäcken und dergleichen aufstöbern und einsammeln. Mehr als 300 Leute machten bei der Aktion mit. Wie sich hierbei zeigte, haben der Australische und der Neuseelandplattwurm bereits viele Gebiete auf den Britischen Inseln erobert, zumeist auf dem Weg über eingetopfte Pflanzen.

Um das Ausmaß der weltweit zunehmenden Plage zu erkennen, trafen sich die Experten 1998 in Christchurch (Neuseeland) an der University of Canterbury. Die Tagung wurde von der OECD, der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, finanziert. Neuseeland gilt als einer der Hotspots für terrestrische Plattwürmer, und von dort stammen gleich mehrere der bedrohlichen Arten auf den Britischen Inseln. Bisher kennen die Forscher gut 80 neuseeländische Spezies. Wahrscheinlich existieren aber mehr als 100, nur hat die übrigen noch niemand wissenschaftlich beschrieben. Dagegen dürften Europa und Nordamerika zusammen höchstens eine Hand voll einheimische Arten aufweisen. Schon von daher erwarten die Fachleute dort weitere Invasionen – was Brian Boag vom Schottischen Institut für Nutzpflanzenforschung in Dundee ironisch »Rache der Kolonie« nennt.

Ersterer, der heute vielerorts im indopazifischen Raum wütet und bereits in Florida und Puerto Rico lebt, alarmiert die Ökologen wie gesagt besonders. Vermutlich stammt diese Art ursprünglich tatsächlich aus Neuguinea. Sicherlich hat in diesem Fall der Mensch den Wurm unabsichtlich mit Pflanzen nach Polynesien, Mikronesien, Hawaii

und Australien verfrachtet. Nach Japan, auf die Malediven oder die Philippinen brachte man den Neuguineawurm allerdings gezielt. Er sollte dort eine andere, zunächst versehentlich mit Schiffen und später oft auch als Nahrungsmittel eingeschleppte Plage eindämmen: die gefährliche Große Achatschnecke oder Ostafrikanische Riesen-

Daheim in der Fremde

Die hier aufgeführten und viele andere Landplanarien haben den Weg in entfernte Weltregionen gefunden. Manche davon bedrohen bereits die Tier- und Pflanzenwelt ihrer zweiten Heimat.

Wissenschaftlicher Name der Art	Trivialname	Heimat	Neue Verbreitung
 <i>Arthurdendyus triangulatus</i>	Neuseelandplattwurm	Neuseeland	Färöer-Inseln, Irland, Großbritannien
 <i>Artioposthia exulans</i>		Neuseeland	Großbritannien
 <i>Australoplana sanguinea</i>	Australischer Plattwurm	Australien	Großbritannien
 <i>Bipalium adventitium</i>		unbekannt	USA
 <i>Bipalium kewense</i>		Indochina	weltweit, auch Großbritannien und USA
 <i>Bipalium multilineatum</i>		Japan	Frankreich, Italien, Südkorea?
 <i>Bipalium pennsylvanicum</i>		unbekannt	USA
 <i>Bipalium vagum</i>		unbekannt	Bermuda, USA
 <i>Caenoplana bicolor</i>		Australien	Italien, Spanien, Niederlande, Großbritannien
 <i>Caenoplana coerulea</i>	Australischer Blauer Gartenplattwurm	Australien	Argentinien, Frankreich, Neuseeland, Norfolk-Inseln, Spanien, Großbritannien, USA
 <i>Dolichoplana striata</i>		Indomalaysien	Spanien, Großbritannien, Frankreich, USA
 <i>Kontikia andersoni</i>		Neuseeland	Großbritannien
 <i>Marionfyfea</i> sp.		Neuseeland	Frankreich, Niederlande, Großbritannien
 <i>Obama nungara</i>		Brasilien	Italien, Spanien, Frankreich, Großbritannien
 <i>Parakontikia ventrolineata</i>		Australien	Frankreich, Irland, Mexiko, Neuseeland, Südafrika, Großbritannien, Vereinigte Staaten
 <i>Platydemus manokwari</i>	Neuguineaplattwurm	Neuguinea	viele Inseln im Südostpazifik, Japan, Karibik, Florida, Frankreich; (siehe »Bald allgegenwärtig?«, S. 35)

schnecke *Achatina fulica*. Mit ihrem 20 Zentimeter langen Gehäuse und einer Körperlänge von bis zu 30 Zentimetern ist sie die größte Landschnecke der Welt. Auf den Pazifikinseln verdrängt sie manche nur dort lebenden Schneckenarten. Aber leider frisst der Neuguineawurm diese kleineren Mollusken ebenso gern und dezimiert ihre Bestände, richtet gegen die Achatschnecke aber nicht viel aus.

In den letzten Jahren holen neue Meldungen aus Kontinentaleuropa jene aus Großbritannien ein. Eine Reihe Plattwürmer, die Forscher zuerst auf den Britischen Inseln gefunden hatten, wurden mittlerweile ebenfalls insbesondere in West- und Südeuropa entdeckt. In den Niederlanden etwa ist *Caenoplana bicolor* aufgetaucht. Die japanische Art *Bipalium multilineatum* scheint sich in Frankreich und Italien wohl zu fühlen, um nur einige Fälle zu nennen. Meine Kollegen und ich glauben, dass die zunehmenden Meldungen nicht nur auf die modernen Kommunikationswege und die verstärkte Mitarbeit von Naturfreunden zurückgehen. Für uns sieht es so aus, als ob die Plattwurminvasion gegenwärtig tatsächlich infolge der Globalisierung zunimmt.

Manchmal entdecken wir hier zu Lande sogar noch nie beschriebene exotische Arten. 2012, auf dem 12. Internationalen Symposium zur Biologie der Plattwürmer in Stockholm, merkten Hugh Jones und ich, dass er in Großbritannien und ich in den Niederlanden dieselbe neue Art gefunden hatten. Wir arbeiteten dann heraus, dass dies ein weiterer Vertreter der Gattung *Marionfyfea* sein muss, deren Namen Leigh Winsor von der James Cook University in Queensland (Australien) prägte. Die andere Spezies lebt auf Campbell Island südlich von Neuseeland. Leider kommt es öfter vor, dass irgendwo neue Arten auftauchen, deren Herkunft und ökologische Eingliederung unbekannt sind. Da machen sich die großen Lücken in der Systematik der Landplanarien bemerkbar.

Zugezogen aus Brasilien: Fremdlinge mit dem Tupi-Namen *Obama*, »Blatt-Tier«

In Europa stammen solche neuen Fremdlinge normalerweise aus Südostasien, Australien oder Neuseeland. Die Heimat von *Obama nungara* hingegen ist Brasilien. (In der Sprache der Tupi hieß »oba« Blatt und »ma« Tier.) Diesen Strudelwurm hat man bereits in Frankreich, Spanien, Italien und auf den Britischen Inseln gefunden. Äußerlich ähnelt er der schon länger bekannten Art *O. marmorata*. Doch genetische und mikroskopische Untersuchungen verweisen auf eine eigene neue Spezies. In Südamerika leben beide womöglich sogar nebeneinander, und man findet sie häufig in brasilianischen Parks und Gärten, Gärtnereien, Regenwurmzuchten und Wiesen. Ihr eindrucksvollster Verwandter ist der bis zu knapp 30 Zentimeter lange, größte südamerikanische Landplattwurm *Obama eudoximariae* (siehe Bild oben).

Auch wenn in Europa und Nordamerika neue Strudelwürmer bisher zunächst meist im Umfeld von Anzuchten, Obst- und Blumengärten entdeckt werden, darf man nicht hoffen, dass es dabei bleibt. Durch menschliches Tun verbreiten sich die widerstandsfähigen Würmer, die in der



FERNANDO CARBAJO, MIT FRÜHL. GEN. VON RONALD SLUIJS

Die meisten Landplanarien werden höchstens fingerlang. Doch die brasilianische Art *Obama eudoximariae* erreicht fast 30 Zentimeter Länge. Der Gattungsname bedeutet auf Tupi »Blatt-Tier«. Die kürzlich entdeckte Spezies *O. nungara* kommt schon in mehreren Gegenden Europas vor.

Regel gut mit neuen Verhältnisse zurecht kommen, nur zu leicht. In Großbritannien machen das der Neuseeland- und der Australische Plattwurm schon vor.

Effektive Gegenmaßnahmen wären daher jetzt immens wichtig, sind allerdings schwierig zu konzipieren, zumal die Tiere versteckt leben, sich rasant vermehren und man noch nicht genügend über sie weiß. Eine biologische Kontrolle der Landplanarien dürfte ausscheiden, denn diese Spitzenprädatoren des Bodenlebens haben selbst in ihrer Heimat vermutlich kaum natürliche Feinde. Laut Leigh Winsor, der sie gekostet hat, schmecken sie abscheulich. Manche Experten empfehlen gegen den Neuseelandplattwurm, Pflanzenballen fest mit Plastik zu umhüllen und dann mindestens fünf Minuten lang in 34 Grad Celsius warmes Wasser zu tauchen. Eine Stunde später ist angeblich keiner der Würmer mehr am Leben. Das Erdreich zu erwärmen, könnte ähnlich gut wirken. Um den Neuseelandplattwurm zu bekämpfen, seien jedoch wenigstens 43 Grad Celsius erforderlich, testete 2008 Shinji Sugiura, der damals am Forstwissenschaftlichen Institut in Tsukuba (Japan) arbeitete. Sehr viel mühsamer ist es, die Würmer schlicht einzusammeln, die sich an dunklen, feuchten Stellen, also beispielsweise unter Töpfen und Steinen, Folien und Erdbrocken verkriechen.

Zwar machen verschiedene private und öffentliche Stellen, etwa Landwirtschaftsämter, Pflanzenschutzorganisationen und Gartenexperten, Vorschläge zur Bekämpfung der Plattwürmer, aber klare durchgreifende Regelungen haben die meisten betroffenen Länder Europas bisher keine. Denn etwaige Vorschriften zum Umgang mit invasiven Organismen führen die Strudelwürmer gewöhnlich nicht auf. Dabei wären strenge Verordnungen dringend nötig, gerade weil man bei fremden Arten nie im Voraus weiß, welche von ihnen ökologische Probleme bereiten werden.

Zumindest in Großbritannien ist es mittlerweile verboten, bestimmte Landplanarien wie den Neuseeland- und

Forschung und Naturschutz helfen

Wer eine Landplanarie findet, kann dreierlei tun.

- Man macht, möglichst mit irgendeinem Maßstab, ein Foto von dem Tier und postet das Bild auf einem geeigneten Portal wie iNaturalist (www.inaturalist.org) zusammen mit dem Datum und dem geografischen Standort.
- Man informiert eine zuständige Umweltbehörde.
- Man konserviert den Wurm und schickt ihn einem Experten, von denen es aber noch nicht viele gibt. Sie können die Sendung adressieren an: Dr. Ronald Sluys, Naturalis Biodiversity Center, P.O. Box 9517, 2300 RA Leiden, Niederlande; Ronald.Sluys@naturalis.nl

Man sollte den Wurm nicht anfassen, sondern vorsichtig mit einem Blatt oder weichen Künstlerpinsel aufnehmen und in einen Behälter geben. Wenn er sich ausstreckt, übergießt man ihn rasch mit heißem Wasser. Das tote Tier gibt man in ein fest verschließbares Gefäß mit 70-prozentigem Alkohol, Wundbenzin oder Brennspritus. In das Gefäß hinein kommt ein Zettel mit Datum, Fundort und dem eigenen Namen sowie der Adresse, mit Bleistift geschrieben.

Manche Landplanarien sind farbenprächtig. Hier ein Vertreter einer *Bipalium*-Art aus Südostasien. Der Gattungsname charakterisiert den breiten »Kopf«. Scherzhaft heißen diese Arten Hammerkopfwürmer.



den Australischen Plattwurm wissentlich zu verbreiten. Für andere Staaten gibt es hierzu lediglich Richtlinien ähnlich denen, wie sie etwa die Pflanzenschutzorganisation für Europa und den Mittelmeerraum EPPO für den Neuseelandplattwurm formuliert. In ein EU-Gesetz haben diese Empfehlungen noch nicht Eingang gefunden. Ähnlich deprimierend ist die Gesetzeslage in Australien und Neuseeland. Und selbst die strengen Vorschriften der Vereinigten Staaten für den Transport und die Verbreitung von Organismen nennen Strudelwürmer nicht explizit. Von offizieller Seite heißt es dort aber, als allgemeine Prädatoren würden diese Tiere dennoch unter die biologischen Kontrollregularien fallen, und weil sie den Regenwürmern schaden, könne man sie auch als indirekte Pflanzenschädlinge einstufen.

Es gibt viele Beispiele dafür, dass eingeschleppte fremde Organismen eingespielte Ökosysteme ruinieren. Wenn wir nicht wollen, dass invasive Landplanarien zur drohenden globalen Vereinheitlichung der Tier- und Pflanzenwelt beitragen, müssen wir dringend etwas gegen sie unternehmen. Mit ungenügenden Hygienemaßnahmen und laschen Kontrollen von Pflanzenimporten an den Außen- und Binnengrenzen Europas wird sich eine weitere Invasion und Ausbreitung von exotischen Strudelwürmern

bei uns nicht verhindern lassen. Selbst von wesentlich effektiveren Quarantänevorschriften darf man sich meines Erachtens allenfalls erhoffen, dass die Anzahl neuer Plattwurmart stark zurückgeht und dass die hier schon vorhandenen Spezies einigermaßen in Schranken gehalten werden können.

Meine Kollegen und ich werden auch zukünftig weltweit ein Auge auf neue Eindringlinge haben. Erst 2016 entdeckten Forscher in Großbritannien eine weitere Art aus Neuseeland: *Artioposthia exulans*. Sie dürfte nicht die letzte sein. ◀

QUELLEN

Álvarez-Presas, M. et al.: Diversity of Introduced Terrestrial Flatworms in the Iberian Peninsula: A Cautionary Tale. In: *PeerJ* 2, e430, 2014

Jones, H. D., Sluys, R.: A New Terrestrial Planarian Species of the Genus *Marionfyfea* (Platyhelminthes: Tricladida) Found in Europe. In: *Journal of Natural History* 50, S. 2673–2690, 2016

Justine, J.-L. et al.: The Invasive New Guinea Flatworm *Platydemus manokwari* in France, the First Record for Europe: Time for Action is now. In: *PeerJ* 2, e297, 2014

© American Scientist

Starke Standpunkte.

Die Haltung von Angela Merkel versus Donald Trump im FOCUS.

POLITIK

„Es gibt zwei Möglichkeiten, auf diese Situation zu reagieren: Ich schotte mich ab. Ich versuche, einfache Antworten auf das zu finden, was zu kompliziert erscheint. Oder wir treten ein dafür, dass wir unsere Werte mit den europäischen Partnern und den Vereinigten Staaten von Amerika gemeinsam in die Welt tragen“

Kanzlerin Angela Merkel am Mittwoch im Bundestag

Die Merkel-Raute
Diese vielleicht berühmteste Politikergeste Europas ist zum Symbol ihres nüchternen und besonnenen Regierungsstils geworden und war sogar Plakatmotiv im vergangenen Wahlkampf

FOCUS 48/2016

„Sie haben die Person ausgewählt, die Deutschland ruiniert“

Donald Trump im Dezember 2015 über Angela Merkel, nachdem sie vom „Time“-Magazin zur „Person des Jahres“ gewählt worden war

Die Trump-Faust
Eigentlich ein Zeichen der kämpferischen Arbeiterschaft, hat Trump die Geste einfach okkupiert. Ob Milliardär oder Proletarier: Die Faust steht für grimmige Entschlossenheit

Raute oder Revolte?

Angela Merkel tritt wieder an, weil sie die westliche Welt am Scheideweg sieht. Ihre letzte Mission: den weltweiten Vormarsch der Populisten stoppen. Die Bundestagswahl 2017 wird die schwerste ihrer Karriere

FOCUS 48/2016

Menschen im



MEDIZIN

VERSTOPFUNG IM ZELLSTOFFWECHSEL

Lysosomale Speicherkrankheiten können verheerende Auswirkungen haben, unter anderem auf das Zentralnervensystem. Mehrere neue Therapieansätze haben sich als Erfolg versprechend erwiesen. Einige davon überwinden sogar die Blut-Hirn-Schranke.



Sarah DeWeerd arbeitet als Wissenschaftsautorin in Seattle, Washington.

► spektrum.de/artikel/1438959

► »Die reinste Magie« – so erinnert sich Tim Cox, Facharzt für Stoffwechselstörungen an der University of Cambridge, an die Wirkung, als er zum ersten Mal die Enzymersatztherapie an einem Patienten anwendete. Der Betroffene litt am Gaucher-Syndrom. Leber und Milz des Geschäftsmanns waren massiv vergrößert, und er benötigte Bluttransfusionen in kurzen Abständen. Dies hatte ihn mit weniger als 50 Jahren an den Rollstuhl gefesselt und dazu gezwungen, vorzeitig in Rente zu gehen.

Das Gaucher-Syndrom entsteht, wenn der Organismus das Enzym Glucocerebrosidase nicht mehr herstellt. Es kommt zu einer gefährlichen Anreicherung des Lipids Glucocerebrosid in Immunzellen, die im Blutkreislauf zirkulieren, was die beschriebenen Krankheitssymptome verursacht. Vor rund 25 Jahren, als der Geschäftsmann bei Cox in Behandlung war, gab es nur ein einziges anerkanntes Therapieverfahren, nämlich die Knochenmarktransplantation. Für den Patienten kam sie allerdings nicht in Frage, da sich keine seiner drei Schwestern als geeignete Spenderin erwies. Deshalb orderte Cox ein innovatives Medikament aus den USA: funktionstüchtige Glucocerebrosidase-Moleküle, gewonnen aus menschlicher Plazenta. Der Mediziner verabreichte sie dem Geschäftsmann per Infusion in die Venen.

Es war der erste Fall im Vereinigten Königreich, bei dem ein Gaucher-Patient eine Enzymersatztherapie erhielt. Die Wirkung war dramatisch. Schon nach wenigen Monaten konnte der Mann sowohl auf die Bluttransfusionen als auch auf den Rollstuhl verzichten. »Er lebt bis heute ohne Rückfall«, beschreibt Cox. »Ohne die Therapie wäre er

SCHWERPUNKT

Lysosomale Speicherkrankheiten

Teil 1 / S. 40

Verstopfung im Zellstoffwechsel
Sarah DeWeerd

Teil 2 / S. 48

Mehr als der Mülleimer der Zelle
Kelly Rae Chi

schon vor langer Zeit an einer Blutung oder an anderen Komplikationen gestorben.«

Die Einführung der Enzymersatztherapie Anfang der 1990er Jahre löste nicht nur eine Revolution in der Behandlung des Gaucher-Syndroms aus, sie läutete auch für andere lysosomale Speicherkrankheiten (LSK) ein neues Zeitalter der Arzneistofftherapien ein. LSK bilden ein breites Spektrum von rund 50 vererbten Stoffwechselleiden, bei denen der Körper bestimmte Moleküle nicht mehr richtig abbauen kann, woraufhin diese sich in toxischen Konzentrationen anreichern und schwere Gesundheitsprobleme verursachen (siehe Infografik S. 44/45).

Heute stehen Enzymersatztherapien für mehr als ein halbes dutzend LSK zur Verfügung. Die Behandlungsmöglichkeiten haben sich stark erweitert und schließen Arzneistoffe mit sehr unterschiedlichen Wirkmechanismen ein.



Die 13-jährige Michelle Hopkins leidet an der lysosomalen Speicherkrankheit MPS I. Zu den Symptomen gehören Skelett- und Organfehlbildungen sowie Minderwuchs.

Einige Substanzen blockieren die Herstellung potenziell schädlicher Moleküle im Körpergewebe, andere sorgen für den funktionalen Ersatz ausgefallener Enzyme. Doch trotz dieses immer breiteren Behandlungsspektrums ist es nach wie vor schwierig, Wirkstoffe ins Zentralnervensystem einzuschleusen, um jene neurologischen Symptome zu behandeln, die zu den gefürchtetsten Begleiterscheinungen vieler LSK gehören. Mediziner hoffen, dass manche von den derzeit in Entwicklung befindlichen Arzneistoffen diese Barriere endlich überwinden werden.

Kreuzweiser Austausch von Enzymen lässt Krankheitsanzeichen verschwinden

Wie so vieles in der Wissenschaft gehen auch die Enzymersatztherapien auf eine Zufallsentdeckung zurück. In den 1960er Jahren vermischten Wissenschaftler um Elizabeth Neufeld, heute an der University of California in Los Angeles, versehentlich die Zellen zweier Patienten, die an verschiedenen LSK aus der Gruppe der Mukopolysaccharidosen litten: Morbus Hurler und Morbus Hunter. Erstaunlicherweise hatte das zur Folge, dass beide Zellsorten ihre Krankheitsanzeichen verloren. Wie Neufeld und ihre Kollegen herausfanden, sonderte jede Zellsorte genau das Enzym ab, das bei der jeweils anderen ausgefallen war, und nahm die ihr selbst fehlende Enzymvariante von den Nachbarn auf – ein Vorgang namens Kreuzkorrektur.

Den Befund griff Roscoe Brady vom National Institute of Neurological Disorders and Stroke in Bethesda (Maryland) auf, der sich auf die Erforschung und Diagnostik des Gaucher-Syndroms spezialisiert hatte. Brady und sein Team veränderten die Glucocerebrosidase so, dass sie ein Zuckermolekül namens Mannose auf der Oberfläche trug. Das half dem Enzym, in Makrophagen einzudringen, jene Fresszellen des Immunsystems, die am stärksten von der Gaucher-Krankheit betroffen sind. Mit den so veränderten Molekülen führte das Team eine der ersten Studien zur Enzymersatztherapie am Menschen durch.

Sich bei diesen frühen Arbeiten auf Morbus Gaucher zu konzentrieren, sei eine sehr gute Entscheidung gewesen,

sagt Carla Hollak, Stoffwechselmedizinerin am Amsterdam Lysosome Centre in den Niederlanden. Denn die Krankheit schreite bei vielen Patienten nur langsam fort, und einige ihrer Auswirkungen ließen sich rückgängig machen. »Deshalb bieten sich gute Behandlungsmöglichkeiten.« Andere LSK nähmen einen viel schnelleren Verlauf und verursachten irreversible Schäden.

Das Unternehmen Genzyme, heute ein Tochterunternehmen von Sanofi, entwickelte gemeinsam mit Brady dessen Enzymvariante zu dem Medikament Ceredase weiter. 1991 ließ die US-Arzneimittelbehörde FDA das Mittel für die Behandlung des Gaucher-Syndroms zu. Mittlerweile wurde das Präparat durch Cerezyme ersetzt, welches mit Hilfe von gentechnisch veränderten Bakterien produziert wird.

Derzeit gibt es Enzymersatztherapien für ein ganzes Spektrum von Erkrankungen, darunter Morbus Gaucher, Morbus Fabry und Morbus Pompe, zudem vier verschiedene Mukopolysaccharidosen sowie Erkrankungen infolge von Defekten in dem Enzym lysosomale saure Lipase. Weitere Wirkstoffe befinden sich in Entwicklung, einschließlich solcher zur Behandlung der Mukopolysaccharidose Typ VII und einer Variante der Niemann-Pick-Krankheit.

Die Ersatztherapie hat jedoch auch ihre Schattenseiten. Das Enzym muss lebenslang alle paar Wochen durch Infusion in die Venen verabreicht werden, was manche Patienten als sehr belastend empfinden. Zudem ist die Behandlung teuer: Die Kosten liegen bei ungefähr 250 000 US-Dollar je Patient und Jahr, denn Proteine sind viel schwieriger herzustellen als kleinmolekulare Wirkstoffe. Weiterhin kann sich die Wirksamkeit sehr stark unterscheiden; beispielsweise schlagen Enzymersatztherapien bei Gaucher-Patienten besser an als beim Fabry-Syndrom, denn obwohl dabei verwandte Enzyme betroffen sind, schädigen die Erkrankungen unterschiedliche Organsysteme. Und bei manchen LSK empfiehlt sich eine Enzymersatztherapie überhaupt nicht. So sind an der Niemann-Pick-Krankheit Typ C und an der jugendlichen Form der Batten-Krankheit bestimmte Proteine der Lysosomenmembran beteiligt. Solche Membranproteine lösen sich aber nicht in Wasser, so dass man sie nicht intravenös verabreichen kann.

Der vielleicht größte Schwachpunkt der Enzymersatztherapie besteht allerdings darin, dass die verabreichten Enzyme die Blut-Hirn-Schranke nicht überwinden – und damit nicht verhindern, dass sich bestimmte Moleküle in den Neuronen in schädlichen Konzentrationen anreichern. Manche Wissenschaftler arbeiten an Verfahren, um die Enzyme direkt ins Zentralnervensystem (ZNS) einzubringen, etwa indem man sie hinreichend häufig ins Gehirn oder ins Rückenmark verabreicht. Aber hierfür muss man zunächst chirurgisch einen entsprechenden Zugang zum ZNS schaffen, was die Gefahr einer Infektion birgt. Das ist bei kleinen Kindern, die von neurologischen Symptomen am stärksten betroffen sind, ein besonders schwer wiegendes Problem.

Die meisten Proteine sind zu groß, um die Blut-Hirn-Schranke zu passieren. Viele Forscher versuchen daher,

AUF EINEN BLICK VIELGLEISIGE FORSCHUNG

- 1** Wenn die Lysosomen, die Verdauungsorgane der Zelle, nicht mehr richtig funktionieren, können schwere Stoffwechselerkrankungen entstehen – die so genannten lysosomalen Speicherkrankheiten.
- 2** Verursacht werden diese Leiden oft von Defekten im Genom, die zu fehlerhaften Enzymen führen und so die Verdauungstätigkeit der Lysosomen beeinträchtigen.
- 3** Forscher haben mittlerweile zahlreiche Behandlungsverfahren entwickelt. Einige verändern enzymatische Aktivitäten in der Zelle; andere verhindern, dass sich Stoffwechselzwischenprodukte gefährlich anreichern.



MIT FRIEDL GERL VON INGRID ERNESTO DEL AGUIA

Ellen Sidransky (links) sucht nach Chaperon-Proteinen, die sich zur Behandlung lysosomaler Speicherkrankheiten eignen.

kleinmolekulare Wirkstoffe zu entwickeln, die diese Grenze besser überwinden. Ein tiefer gehendes Verständnis davon, wie LSK entstehen, hat zu Fortschritten auf diesem Gebiet beigetragen. »Wir wissen jetzt genauer, was in den betroffenen Zellen schief läuft, und finden allmählich heraus, wie wir es beheben können«, sagt Beverly Davidson, wissenschaftliche Leiterin am Children's Hospital of Philadelphia in Pennsylvania.

Punktgenaue Stoffwechselhemmung

Statt defekte oder fehlende Enzyme zu ersetzen, zielen kleinmolekulare Wirkstoffe darauf ab, den Zellmetabolismus trotz funktionaler Beeinträchtigung zu stabilisieren. Ein Ansatz hierfür ist die so genannte Substratreduktion: Man drosselt gezielt die Produktion jener Moleküle, die bei der jeweils vorliegenden LSK nicht weiterverarbeitet werden können, und verhindert auf diese Weise, dass sie sich gefährlich anreichern. Die Substratreduktion ist in anderen Bereichen der Medizin bereits gut etabliert – Statine beispielsweise senken den Cholesterinspiegel im Blut, indem sie ein Enzym hemmen, das an der Cholesterinsynthese mitwirkt. Substratreduktionstherapien unterbinden die Herstellung der jeweiligen Substanz nicht völlig, und das wäre auch nicht wünschenswert. Denn viele Moleküle, die sich bei LSK anreichern, sind für den Organismus lebenswichtig, selbst wenn sie in zu hoher Konzentration giftig werden.

Damit eine solche Behandlung funktioniert, muss der Organismus noch in der Lage sein, die verbleibende Restmenge des Substrats abzubauen. Was häufig zutrifft. »Bei den meisten lysosomalen Speicherkrankheiten ist eine rudimentäre enzymatische Aktivität vorhanden«, erläutert John Marshall, wissenschaftlicher Leiter beim Biotechnologieunternehmen Sanofi Genzyme in Cambridge, Massachusetts. Außerdem, fügt er hinzu, gebe es oft nicht nur einen einzigen biochemischen Mechanismus, um die fragliche Substanz abzubauen oder aus der Zelle zu beför-

dern, so dass die Zelle den Ausfall eines Enzyms in gewissen Grenzen kompensieren könne.

Derzeit sind zwei Substratreduktionstherapien auf dem Markt. Der Arzneistoff Miglustat, ein Iminozucker, ist zur Behandlung der Gaucher-Krankheit zugelassen – doch nur bei Patienten, für die eine Enzymersatztherapie nicht in Frage kommt, weil sie allergische Reaktionen zeigen oder eine intravenöse Arzneistoffgabe bei ihnen nicht möglich ist. In manchen Ländern der Europäischen Union, aber nicht in den USA, darf Miglustat auch zur Therapie der Niemann-Pick-Krankheit Typ C verwendet werden. Der Iminozucker wirkt gegen die Gaucher-Krankheit weniger gut als die Enzymersatztherapie und hat starke Nebenwirkungen, darunter Zittern und Magen-Darm-Beschwerden. Er bietet allerdings den Vorteil, als Tablette eingenommen werden zu können.

Die zweite Substratreduktionstherapie stützt sich auf den Wirkstoff Eliglustat, der ebenfalls zur Behandlung der Gaucher-Krankheit zugelassen ist. Er hat weniger Nebeneffekte als Miglustat und wirkt beinahe so gut wie die Enzymersatztherapie. »[Eliglustat] übertraf alle Erwartungen«, meint Facharzt Tim Cox, der in den 1990er Jahren mehrere klinische Studien mit Miglustat leitete, jedoch nicht an der Entwicklung von Eliglustat beteiligt war. Der Wirkstoff bietet möglicherweise noch weitere Vorteile. Tierversuche deuten darauf hin, dass er B-Zell-Lymphomen und Myelomen vorbeugen könnte, verbreiteten Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems, die häufig infolge des Gaucher-Syndroms auftreten.

Miglustat und Eliglustat lassen sich oral verabreichen, was die Behandlung für den Patienten angenehmer macht. Sie sind aber teuer: Eine Eliglustat-Therapie der Gaucher-Krankheit kostet jährlich ähnlich viel wie eine Enzymersatztherapie, nämlich einen sechsstelligen Betrag. Und obwohl die kleinmolekularen Wirkstoffe die Blut-Hirn-Schranke im Prinzip überwinden können, tun sie das in der Praxis nicht sehr verlässlich.

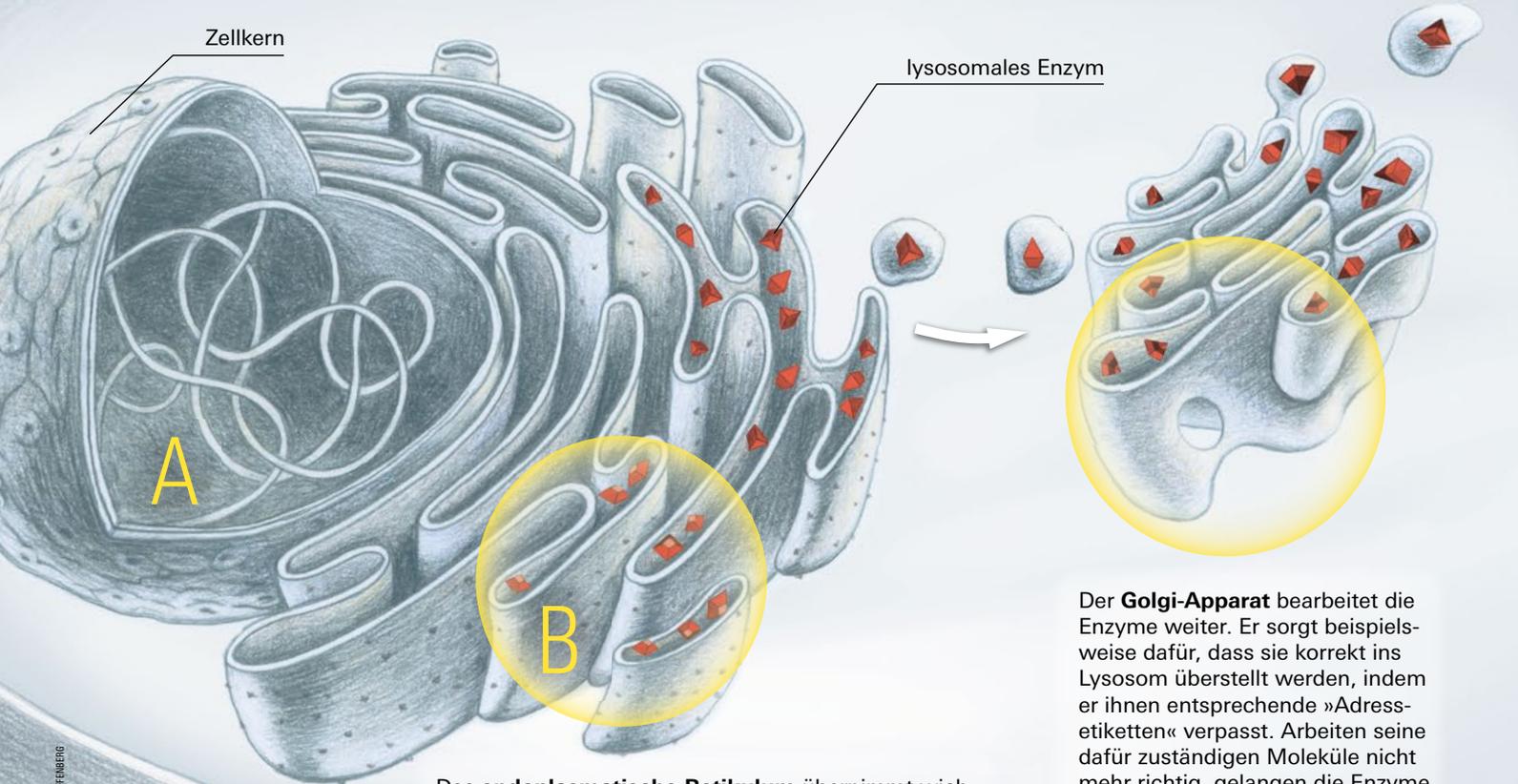
Andere Wirkstoffe für die Substratreduktionstherapie, die sich noch in Entwicklung befinden, dürften hier deutliche Verbesserungen bringen. John Marshall und seine Kollegen arbeiten bei Sanofi Genzyme an einem Molekül mit der vorläufigen Bezeichnung Genz-682452, das bei Tierversuchen nachweislich ins Gehirn gelangt. Die Substanz hemmt den ersten Schritt in der Synthese von so genannten Glycosphingolipiden und könnte deshalb helfen, verschiedene LSK aus der Gruppe der Sphingolipidosen zu behandeln. Davon profitieren könnten Patienten, die am Fabry-, am Gaucher- und am Tay-Sachs-Syndrom leiden. Sanofi Genzyme testet den Wirkstoff in einer klinischen Phase-II-Studie mit Fabry-Patienten und versucht ihn so weiterzuentwickeln, dass er sich auch zur Therapie der Gaucher-Krankheit eignet.

Auf die richtige Form kommt es an

Eine dritte Strategie, um LSK zu behandeln, besteht darin, beschädigte Enzyme zu »retten«. Bei vielen Patienten – ihr Anteil variiert zwischen den verschiedenen LSK-Varianten – betreffen die Mutationen in den jeweiligen Genen nicht das aktive Zentrum lysosomaler Enzyme, sondern

LYSOSOMALE SPEICHERKRANKHEITEN

Mit Hilfe spezialisierter Enzyme verdauen Lysosomen zellfremdes Material und helfen der Zelle dabei, beschädigte Proteine und Zellorganellen wiederzuverwerten. Wenn sie nicht mehr richtig funktionieren, etwa weil die Gene ihrer Enzyme mutiert sind, können lysosomale Speicherkrankheiten entstehen.



Zellkern

lysosomales Enzym

A

B

Das **endoplasmatische Retikulum** übernimmt wichtige Schritte beim Herstellen und Bearbeiten lysosomaler Enzyme, etwa die Proteintranslation, -faltung und -qualitätskontrolle. Sind diese Arbeitsabläufe gestört, können zahlreiche Enzyme ausfallen. Das ist beim multiplen Sulfatasemangel der Fall.

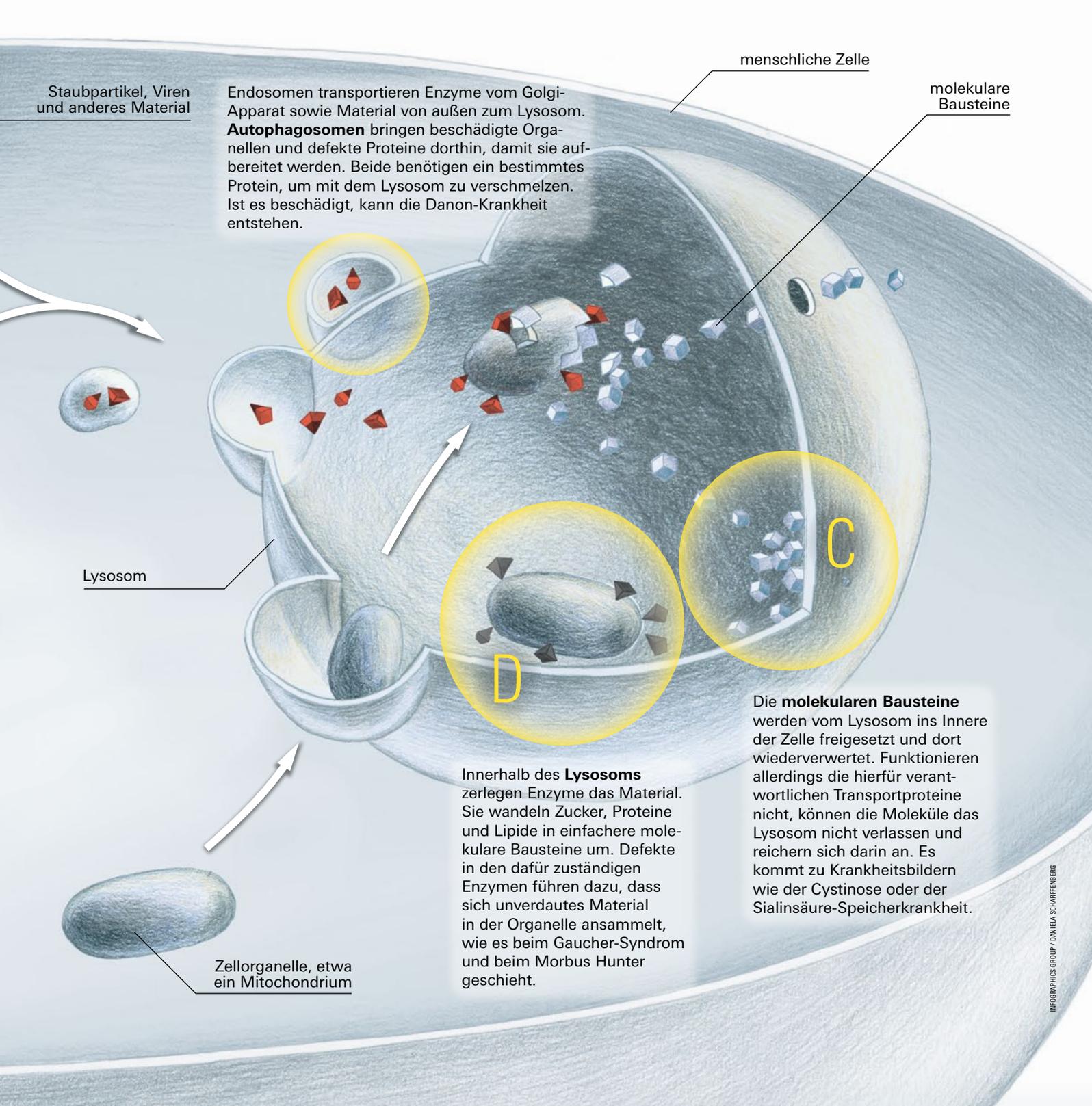
Der **Golgi-Apparat** bearbeitet die Enzyme weiter. Er sorgt beispielsweise dafür, dass sie korrekt ins Lysosom überstellt werden, indem er ihnen entsprechende »Adressetiketten« verpasst. Arbeiten seine dafür zuständigen Moleküle nicht mehr richtig, gelangen die Enzyme nicht an ihr Ziel und es kann sich etwa das Krankheitsbild der Mukopolidose II ausprägen.

Neue Therapieansätze

In den zurückliegenden 25 Jahren haben Mediziner Behandlungen entwickelt, die die Lebensqualität der Patienten verbessern. Die meisten Verfahren zielen darauf ab, die betroffenen Zellen zu reparieren, indem sie in deren Stoffwechsel eingreifen. Eine Ausnahme sind Knochenmarktransplantationen, bei denen der Patient eine vollständig neue Stammzellausstattung erhält.

A Gentherapien bringen intakte, nicht mutierte Gene ins Zellgenom ein, die beispielsweise für korrekt arbeitende lysosomale Enzyme kodieren und so die Ursache der lysosomalen Speicherkrankheiten beseitigen. Diese Technik ist allerdings noch in Entwicklung.

B Chaperon-Therapien stabilisieren die räumliche Faltung mutierter Enzyme oder stellen sie wieder her. Dies bewahrt die Enzyme davor, im endoplasmatischen Retikulum abgebaut zu werden, und stellt sicher, dass sie das Lysosom erreichen.



Staubpartikel, Viren und anderes Material

Endosomen transportieren Enzyme vom Golgi-Apparat sowie Material von außen zum Lysosom. **Autophagosomen** bringen beschädigte Organellen und defekte Proteine dorthin, damit sie aufbereitet werden. Beide benötigen ein bestimmtes Protein, um mit dem Lysosom zu verschmelzen. Ist es beschädigt, kann die Danon-Krankheit entstehen.

menschliche Zelle

molekulare Bausteine

Lysosom

Zellorganelle, etwa ein Mitochondrium

Innerhalb des **Lysosoms** zerlegen Enzyme das Material. Sie wandeln Zucker, Proteine und Lipide in einfachere molekulare Bausteine um. Defekte in den dafür zuständigen Enzymen führen dazu, dass sich unverdautes Material in der Organelle ansammelt, wie es beim Gaucher-Syndrom und beim Morbus Hunter geschieht.

Die **molekularen Bausteine** werden vom Lysosom ins Innere der Zelle freigesetzt und dort wiederverwertet. Funktionieren allerdings die hierfür verantwortlichen Transportproteine nicht, können die Moleküle das Lysosom nicht verlassen und reichern sich darin an. Es kommt zu Krankheitsbildern wie der Cystinose oder der Sialinsäure-Speicherkrankheit.

INFOGRAPHICS GROUP / DANIELA SCHARFFENBERG

C **Substrat-Reduktions-Therapien** blockieren die Herstellung von Substanzen, die sich sonst im Lysosom ansammeln würden, weil dort die entsprechenden abbauenden Enzyme fehlen.

D Bei **Enzym-Austausch-Therapien** ersetzen die Mediziner fehlende oder beschädigte Enzyme durch künstlich hergestellte. Diese werden von der Zelle aufgenommen und gelangen in das Lysosom, wo sie ihre Funktion ausüben.

Konventionelle Therapie

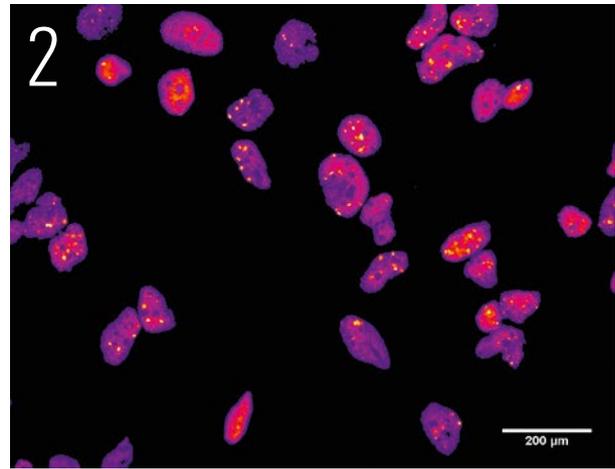
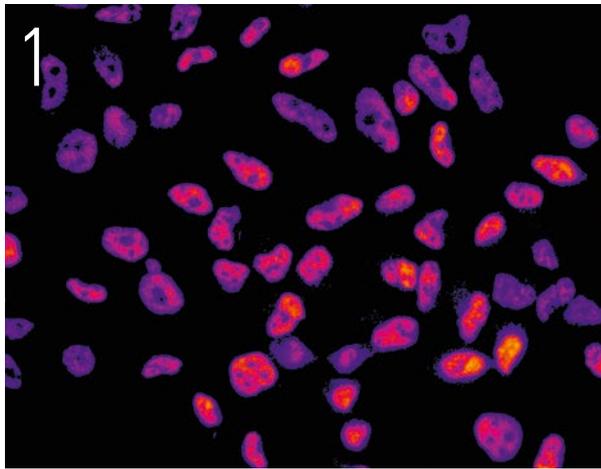
Knochenmarkstransplantation
Bei diesem massiven Eingriff zerstören Mediziner die Blutstammzellen des Patienten mittels Chemotherapie. Anschließend ersetzen sie diese durch gesunde Zellen von Spendern.

Schocktaktik

Lysosomale Speicherkrankheiten, die von falsch gefalteten Proteinen verursacht werden, lassen sich mit Chaperonen behandeln, die den Molekülen zur richtigen Gestalt verhelfen. Der Arzneistoff Arimoclomol aktiviert zu diesem Zweck das Hitzeschockprotein HSP70, ein natürliches Chaperon

des Körpers. In Zellen, die nicht unter Stress stehen (1), ist der Hitzeschockproteinaktivierende Transkriptionsfaktor HSF1 (in den Abbildungen gelb) über den Zellinnenraum verteilt. Geraten die Zellen jedoch unter Stress (2), findet sich HSF1 zunehmend in Stresskörperchen (nuclear stress

bodies, nSBs) wieder – ein Zeichen dafür, dass die Produktion von Hitzeschockproteinen angelaufen ist. Arimoclomol verlängert diesen Aktivierungszustand und fördert die Bindung von HSF1 an Hitzeschockelemente auf der DNA, so dass entsprechende Proteine vermehrt entstehen.



CLAUS BORNHAGES UND LUKASCH M. SÖLLAND: MIT FRDL GEN. VON ORPHAZYME APS

wirken sich nur auf die räumliche Gestalt der Moleküle aus. »Die betroffenen Enzyme erfüllen ihre Funktion nicht, obwohl sie aktiv sind; um dem abzuweichen, müssen wir sie lediglich dazu bringen, sich in die richtige Form zu falten«, sagt Thomas Kirkegaard, wissenschaftlicher Leiter am Biotechunternehmen Orphazyme in Kopenhagen. Fehlfaltete Proteine baut die Zelle meist rasch ab. Wenn sie jedoch in die korrekte Gestalt gebracht und dann an die richtige Stelle in den Lysosomen gelotet werden, können sie ihren Aufgaben dort nachkommen.

Wirkstoffe, die das vollbringen, nennt man pharmakologische Chaperone. Wie die Arzneistoffe bei der Substratreduktionstherapie haben auch sie meist eine geringe Molekülgröße und somit das Potenzial, die Blut-Hirnschranke zu überwinden. Chaperontherapien zur Behandlung von LSK sind relativ neu, werden aber in anderen Bereichen der Medizin bereits genutzt. Zwei Wirkstoffe dieses Typs sind für die Behandlung der Mukoviszidose zugelassen.

Gegen lysosomale Speicherkrankheiten lassen sich zwei Chaperontypen einsetzen, wie die Neurogenetikerin Ellen Sidransky vom National Human Genome Research Institute in Bethesda, Maryland, erläutert: inhibitorische und nichtinhibitorische. Erstere binden an das aktive Zentrum ihres Zielenzym und stabilisieren es während des Transports zu den Lysosomen. Dort angekommen,

lösen sie sich ab, so dass das Enzym seine Tätigkeit aufnehmen kann.

Die erste Chaperontherapie gegen LSK, die 2016 auf den europäischen Markt kam, basiert auf einem solchen inhibitorischen Mechanismus. Der Wirkstoff heißt Migalastat und besitzt einen chemisch ähnlichen Aufbau wie Miglustat. Er ist zugelassen zur Behandlung von Personen, die am Fabry-Syndrom erkrankt sind und bei denen sich das Enzym Alpha-Galactosidase A auf Grund einer genetischen Mutation falsch faltet. Die Betroffenen machen immerhin 35 bis 50 Prozent aller Fabry-Patienten aus.

Inhibitorische Chaperone sind allerdings chemisch schwer zu handhaben und kompliziert zu dosieren, sagt Sidransky. Deshalb fahndet die Neurogenetikerin nach nichtinhibitorischen Chaperonen, die nicht am aktiven Zentrum eines Enzyms binden, um es zu stabilisieren, sondern an anderen Stellen des Moleküls. Mit solchen Wirkstoffen sei einfacher umzugehen, sie seien aber schwerer zu finden. Sidransky und ihre Kollegen haben 250 000 Substanzen auf ihre potenzielle Eignung geprüft und sind dabei auf einige viel versprechende Kandidaten gestoßen.

An Neuronen und Makrophagen, die aus umprogrammierten Hautzellen von Gaucher-Patienten gewonnen worden waren, wiesen Sidransky und ihr Team nach: Das nichtinhibitorische Chaperon NCGC607 befähigt mutierte

Glucocerebrosidase dazu, das Innere von Lysosomen zu erreichen und dort angereicherte Glucocerebroside abzubauen. Das Entscheidende dabei ist, dass der Wirkstoff die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden scheint. »Derzeit ist keinerlei Therapie verfügbar für jene Varianten der Gaucher-Krankheit, die das Gehirn beeinträchtigen«, erläutert die Neurogenetikerin. Mit dem neuen Wirkstoff könnte sich dies vielleicht ändern. Die Ergebnisse der Experimente legen sogar nahe, dass NCGC607 zur Behandlung einer viel häufigeren neurologischen Störung beitragen könnte – der Parkinsonkrankheit.

Chaperontherapien haben allerdings den Nachteil, dass man die meisten von ihnen nur bei einigen wenigen oder sogar nur bei einer einzigen LSK anwenden kann – ja vielleicht sogar nur bei ganz bestimmten Mutationsmustern eines LSK-Typs. Jede lysosomale Speicherkrankheit kann vermutlich von dutzenden oder hunderten verschiedenen Mutationsmustern hervorgerufen werden, die sich phänotypisch alle gleich äußern. Es ist nicht praktikabel, für jedes davon geeignete Chaperone zu entwickeln.

Heilsame Stressreaktion

Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, forscht Thomas Kirkegaard über Wirkstoffe, welche die Aktivität der natürlichen Chaperone des Organismus hochfahren, der Hitzeschockproteine nämlich. Therapieansätze, die darauf basieren, könnten theoretisch gegen dutzende Krankheiten helfen, einschließlich vieler LSK. »Behandlungskonzepte, die auf Hitzeschockproteinen gründen, sind breit einsetzbar – insbesondere gegen Störungen, die aus falsch gefalteten Proteinen resultieren«, sagt Kirkegaard. In klinischen Studien erwies sich kürzlich der Wirkstoff Arimoclolomol, der ein Hitzeschockprotein namens HSP70 aktiviert, als viel versprechende Arznei gegen eine entzündliche Muskelkrankheit (Myositis), die freilich nichts mit den Lysosomen zu tun hat. Mediziner testen zudem, wie gut Arimoclolomol gegen die amyotrophe Lateralsklerose (ALS) wirkt, eine degenerative Erkrankung des motorischen Nervensystems.

Andere Fachleute zeigen sich skeptisch gegenüber solchen weit gefassten Ansätzen. Schon früher habe man versucht, über das System der Hitzeschockproteine die Huntingtonkrankheit zu behandeln, erzählt Beverly Davidson vom Children's Hospital of Philadelphia. Bei dieser erblichen Hirnerkrankung sammelt sich ein fehlerhaftes Protein in Neuronen, die infolgedessen zu Grunde gehen. Der Versuch, dem mit Hitzeschockproteinen entgegenzuwirken, habe sich in Zellkulturen als verheißungsvoll erwiesen, so Davidson, die klinischen Studien seien jedoch alles andere als überwältigend verlaufen. »Es ist für mich schwer erkennbar, wie das gegen ein breites Spektrum lysosomaler Speicherkrankheiten helfen soll.«

Kirkegaard dagegen ist überzeugt, dass sich Arimoclolomol zum Behandeln von Sphingolipidosen eignen könnte (siehe »Schocktaktik«, links). Der Grund: Das von dem Arzneistoff aktivierte Hitzeschockprotein HSP70 bindet in den Lysosomen an ein Lipidmolekül, das seinerseits die enzymatische Zerlegung von Sphingolipiden intensiviert. Bei gesteigerter HSP70-Aktivität sollten Sphingolipide

deshalb vermehrt abgebaut werden. Kürzlich hat Orphazyme eine klinische Phase-III-Studie mit Kindern gestartet, die an Niemann-Pick Typ C erkrankt sind. Etwa 95 Prozent von ihnen prägen auf Grund genetischer Mutationen fehlgefaltete Enzyme aus, die einer Chaperontherapie gegenüber zugänglich sind. Die Studie soll in Europa und den USA mindestens 46 Patienten einschließen und ist auf eine Dauer von ein bis zwei Jahren angelegt. Fallen die Ergebnisse positiv aus, wird das Unternehmen die Behandlungsmethode auch bei anderen Sphingolipidosen erproben.

Therapien, die sich gegen viele LSK einsetzen lassen, sind gewissermaßen der heilige Gral der Mediziner. Eine Arbeitsgruppe um den Genetiker Andrea Ballabio vom Telethon-Institut für Genetik und Medizin in Neapel geht beispielsweise der Frage nach, ob man durch Manipulation des Masterproteins TFEB die Aktivität der Lysosomen allgemein verstärken und so die Ansammlung gleich mehrerer Molekülsorten verhindern kann.

Andere Forscher wollen die Produktion fehlerhafter Enzyme verhindern, die Marshall zufolge 10 bis 15 Prozent aller LSK verursachen. Der Proteinsyntheseapparat der Zelle lässt sich mit verschiedenen Techniken dazu bringen, vorzeitige Stoppsignale in Genen zu ignorieren, die verstümmelte Moleküle entstehen lassen. Der experimentelle Wirkstoff Ataluren zielt darauf ab. Er dient zur Behandlung der Duchenne-Muskeldystrophie, die infolge einer solchen Nonsense-Mutation im Dystrophin-Gen entstehen kann, und wird derzeit klinisch getestet als Arzneistoff gegen das Hurler-Syndrom.

»Der Vorteil dieser vielgleisigen Forschung ist, dass die verschiedenen Therapieansätze sich gegenseitig ergänzen«, betont Kirkegaard. Demnach liegt die Zukunft der LSK-Behandlung vielleicht nicht in einer bestimmten Wirkstoffklasse, sondern in der Kombination mehrerer. Freilich müssen hierfür erst die hohen Kosten der Arzneistoffe sinken. Wenn aber die Enzymersatztherapie, die Substratreduktionstherapie, die Chaperontherapie und andere Ansätze jeweils für sich zu einer geringfügigen Besserung führen, dann könnten sie gemeinsam vielleicht sehr gute klinische Erfolge bewirken. ◀

QUELLEN

Adnan, H. et al.: Endoplasmic Reticulum-Targeted Subunit Toxins Provide a New Approach to Rescue Misfolded Mutant Proteins and Revert Cell Models of Genetic Diseases. In: PLoS One 11, e0166948, 2016

Kirkegaard, T. et al.: Heat Shock Protein-Based Therapy as a Potential Candidate for Treating the Sphingolipidoses. In: Science Translational Medicine 8, 355ra1118, 2016

Marshall, J. et al.: CNS-Accessible Inhibitor of Glucosylceramide Synthase for Substrate Reduction Therapy of Neuronopathic Gaucher Disease. In: Molecular Therapy 24, S. 1019–1029, 2016

Shemesh, E. et al.: Enzyme Replacement and Substrate Reduction Therapy for Gaucher Disease. In: The Cochrane Database of Systematic Reviews 27, CD010324, 2015

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 537, S. S154–S157, 22. September 2016

BIOLOGIE

MEHR ALS DER MÜLLEIMER DER ZELLE

Störungen der Lysosomen verursachen nicht nur spezielle, eher seltene Stoffwechselerkrankungen. Sie tragen auch zu häufigeren Störungen wie Alzheimer und Parkinson bei – ja spielen sogar eine Rolle bei Ebolainfektionen.



Kelly Rae Chi arbeitet als Wissenschaftsautorin in Cary, North Carolina.

» [spektrum.de/artikel/1438958](https://www.spektrum.de/artikel/1438958)

Die Niemann-Pick-Krankheit Typ C ist eine seltene lysosomale Speicherkrankheit, die einen von 150 000 Menschen betrifft. In fast allen Fällen – etwa 95 Prozent – wird sie von einem Defekt im *NPC1*-Gen verursacht. Die Mutation führt dazu, dass sich im gesamten Organismus Cholesterin ansammelt, und zwar in den Lysosomen – jenen Zellorganellen, deren Aufgabe darin besteht, Moleküle zu verdauen und in ihre Monomere zu zersetzen. Die Cholesterinanhäufung hat

verheerende Folgen: Betroffene werden nur selten älter als 20 Jahre.

Auf den ersten Blick scheint die Niemann-Pick-Krankheit kaum etwas mit dem Ebolafieber zu tun zu haben, das durch Körperflüssigkeiten übertragen wird und zwischen 2014 und 2016 in Westafrika mehr als 11 000 Menschen tötete (siehe **Spektrum** November 2016, S. 38). Wie sich aber herausgestellt hat, gibt es eine Verbindung zwischen den beiden, und sie birgt vielleicht die Chance, die Übertragung des Virus zu unterbinden: Menschliche Zellen, denen das *NPC1*-Gen fehlt, sind gegen Ebola immun.

Es war eine riesige Überraschung, als sich im Jahr 2011 herausstellte: Der Rezeptor, an den das Ebolavirus andockt, sitzt nicht auf der Zelloberfläche. Er befindet sich in der Zelle, und zwar sogar innerhalb der Lysosomen, wie die Zellbiologin Fran Platt von der University of Oxford dargelegt hat. Noch vor zehn Jahren galten diese Zellorganellen als wenig bemerkenswert; Wissenschaftler sahen in ihnen kaum mehr als einen Behälter für Verdauungsenzyme. Das hat sich grundlegend geändert.

»Die Bedeutung der Lysosomen erscheint heute in völlig anderem Licht als früher«, sagt der Neurowissenschaftler Steven Walkley vom Albert Einstein College of Medicine in New York, der sowohl über lysosomale Speicherkrankheiten (LSK) als auch über Ebola forscht. Die Organelle sei einer der wichtigsten Akteure im zellulären Geschehen. In den zurückliegenden Jahren ist den Wissenschaftlern klar geworden, dass Lysosomen nicht nur unerwünschte Moleküle und alte Zellbestandteile verdauen, sondern ebenso für den Zellstoffwechsel und das Detektieren von Aminosäuren von Bedeutung sind.

AUF EINEN BLICK ENTSORGUNGSZENTRUM UND SCHALTSTELLE

- 1 Lysosomen sind Zellorganellen, die überschüssiges Material verdauen und dafür sorgen, dass es wieder zellulär aufgearbeitet wird. Wissenschaftler sahen in ihnen früher kaum mehr als eine Recyclingstation.
- 2 Funktionieren jene Organellen nicht richtig, können Krankheiten entstehen. Diese sind erblich bedingt und treten relativ selten auf.
- 3 Neueren Studien zufolge sind Lysosomen außerdem stark in zelluläre Signalprozesse eingebunden. Vermutlich wirken sie so an sehr viel mehr Erkrankungen mit, etwa an Hirnstörungen und am Ebolafieber.

Lysosomen sind deshalb möglicherweise an weit mehr Krankheiten beteiligt als bisher bekannt. Tatsächlich bezeichnen Mediziner die Niemann-Pick-Krankheit vom Typ C manchmal als kindlichen Alzheimer, weil sie mit der klassischen Alzheimerdemenz viele Symptome und Krankheitsmechanismen gemeinsam hat. Bei Kindern, die an dieser Form der LSK leiden, sammeln sich in den Neuronen große Mengen Tau-Protein an, ganz ähnlich wie bei erwachsenen Alzheimerpatienten.

Einfache Defekte im Genom führen zu sehr komplexen Krankheitsverläufen

In den kommenden Jahren wird die Erforschung seltener LSK wahrscheinlich Erkenntnisse bringen, die dabei helfen, auch andere Krankheiten zu behandeln. Man kennt mehr als 50 Formen lysosomaler Speicherkrankheiten, und jede wirkt sich anders auf die Zelle aus. Manche stören das Kalziumgleichgewicht, andere intensivieren den oxidativen Stress und kurbeln Entzündungsreaktionen an, wieder andere beeinflussen den intrazellulären Lipidtransport. Die zellbiologischen Mechanismen dahinter mögen komplex sein, die Ursache ist es häufig nicht: Viele LSK resultieren aus Mutationen in einzelnen Genen. Diese zu untersuchen, könnte deshalb ein relativ einfacher Weg sein, um herauszufinden, wie Lysosomen zu häufigeren und komplexeren Erkrankungen beitragen.

Die neue Sicht der Dinge ist insbesondere von zwei Forschungsrichtungen beeinflusst worden. Die eine nahm ihren Anfang im Jahr 2008, im Labor von David Sabatini am Whitehead Institute for Biomedical Research in Cambridge, Massachusetts. Sabatinis Team experimentierte mit jenem Molekül, an das der immunsystemhemmende Stoff Rapamycin bei Säugern bindet: »mTOR« (mechanistic target of Rapamycin) ist ein Enzym, das an zahlreichen menschlichen Erkrankungen mitwirkt. Mit bestimmten anderen Proteinen bildet mTOR einen Komplex namens mTORC1. Trifft dieser auf Aminosäuren, also die Bausteine der Proteine, signalisiert er der Zelle, die Proteinherstellung anzukurbeln.

Wie Sabatini und seine Kollegen feststellten, enthalten Zellen, denen es an Aminosäuren mangelt, mTORC1-Komplexe in ihrem Zytoplasma. Gaben die Forscher nun Aminosäuren hinzu, wanderten die Komplexe auf die Oberfläche der Lysosomen. Dies legte die Vermutung nahe, die Lysosomen gehörten zu einem baustofferkennenden System – eine These, die allseits auf Erstaunen stieß. »Es lag plötzlich auf der Hand, dass diese Zellorganelle, die man bis dahin nur für eine Recyclingstation oder einen Mülleimer gehalten hatte, mit dem Rest der Zelle kommuniziert«, erinnert sich Sabatini.

Etwa zeitgleich kratzte auch ein Team um den Molekulargenetiker Andrea Ballabio vom Telethon-Institut für



Kann die Erforschung lysosomaler Speicherkrankheiten dazu beitragen, Ebolaepidemien wie die 2014 in Westafrika zu vermeiden?

PICTURE ALLIANCE / AP PHOTO / ABBAS DULLER

Genetik und Medizin in Neapel an dem Bild, Lysosomen seien wenig interessante, weitgehend unveränderliche Organellen. Wie die Forscher belegten, sind sie vielmehr dynamisch, reagieren auf Veränderungen in der Umwelt und hängen mit der Aktivität zahlreicher Erbanlagen zusammen. Ballabio und seine Mitarbeiter durchforsteten Datenbanken und fanden hunderte Gene, die mit lysosomalen Funktionen assoziiert sind. Deren Netzwerk bezeichneten die Wissenschaftler als »CLEAR« (»coordinated lysosomal expression and regulation«, koordinierte lysosomale Expression und Regulation). Wie sich herausstellte, werden die CLEAR-Gene von einem Masterprotein namens Transkriptionsfaktor EB (TFEB) reguliert.

Im Jahr 2012 führten zwei unabhängige Studien die Erkenntnisse von Sabatini, Ballabio und ihren Kollegen zusammen. Die eine davon, entstanden in Kollaboration beider Forscher, lieferte Belege dafür, dass TFEB und mTORC1 auf der Oberfläche der Lysosomen interagieren. Unter normalen Umständen sorgt mTORC1 dort dafür, dass TFEB inaktiv bleibt. Bei Nährstoffmangel jedoch hört mTORC1 damit auf, worauf TFEB in den Zellkern wandert und die Produktion neuer lysosomaler Proteine ankurbelt.

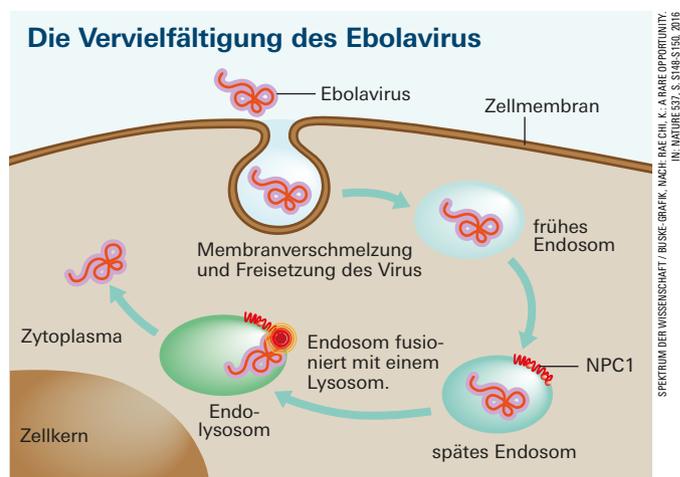
Die andere Studie, geleitet von dem Zellbiologen Shawn Ferguson von der Yale University in New Haven, Connecticut, wies die Anwesenheit von TFEB auf der Oberfläche der Lysosomen anhand mikroskopischer Beobachtungen nach. Ferguson erkannte, dass die Zellorganellen über das Zusammenspiel mit einem Transkriptionsfaktor die Genexpression beeinflussen.

Es begann sich eine wichtige Erkenntnis durchzusetzen: Lysosomen sind ein Teil aktiver Signalübertragungsprozesse und nicht etwa deren Endpunkt. »Die Zellorganellen regulieren mTORC1, und mTORC1 reguliert die Organellen«, fasst Sabatini zusammen. »Das Ganze ist eher eine Schleife als eine Einbahnstraße.«

Die Studien haben dazu beigetragen, dass Mediziner in lysosomalen Erkrankungen heute mehr sehen als ein simples Speicherproblem. Weil die Organellen nicht nur verdauen, sondern der Zelle auch molekulare Bausteine zum Herstellen neuer Verbindungen liefern, stellen lysosomale Störungen zugleich Mangelerkrankungen dar.

Ungeheure Tragweite für die gesamte Medizin

Funktionsweise und Bedeutung von Lysosomen zu verstehen, ist von ungeheurer Tragweite für die ganze Medizin. Wissenschaftler gehen beispielsweise der Frage nach, ob ein verstärkter Moleküldurchsatz durch Lysosomen und andere Zellorganellen dazu beitragen kann, unerwünschte Substanzen aus der Zelle zu beseitigen. Vorteilhaft könnte das etwa bei der Behandlung der Niemann-Pick-Krankheit sein, die sich durch einen beeinträchtigten zellulären Molekültransport auszeichnet. Mehrere Arbeitsgruppen experimentieren derzeit mit Wirkstoffen, welche die Autophagie (die Selbstverdauung der Zelle) intensivieren – die also dabei mithelfen, mehr Moleküle und Zellorganellen in Lysosomen zu bringen, damit sie dort abgebaut werden. Das soll unter anderem beim Behandeln von Hirnerkrankungen helfen (siehe **Spektrum** Dezember 2016, S. 25).



Das Ebolavirus dringt in die Zelle ein und nutzt das Protein NPC1 als Einfallstor ins Zytoplasma. Dort missbraucht es die zelluläre Synthesemaschinerie, um sich selbst zu vervielfältigen. Bei der erblichen Niemann-Pick-Krankheit Typ C ist NPC1 jedoch sehr oft mutiert und liegt daher nicht in funktionierender Form vor. Die betroffenen Patienten sind gegenüber dem Ebolavirus immun.

Eine Möglichkeit, die Zelle zur Entsorgung schadhafter oder überzähliger Moleküle anzuregen, besteht darin, die intrazelluläre TFEB-Konzentration zu erhöhen. Dies führt zu mehr Lysosomen und mehr Autophagie und somit zum verstärkten Abbau von zellulärem Material. Außerdem treibt TFEB offenbar die so genannte lysosomale Exozytose an, bei der die Lysosomen ihren Inhalt in den Zellaußenraum ausstoßen, um überschüssiges Material loszuwerden.

Als Transkriptionsfaktor steuert TFEB die Aktivitäten hunderter Gene. Damit bietet das Protein einen viel stärkeren Ansatzpunkt für Therapien, als wenn man auf ein einzelnes nachgeschaltetes Enzym abzielt. Allerdings birgt die Beeinflussung von TFEB genau deshalb auch ein Sicherheitsrisiko; es ist beispielsweise nicht ausgeschlossen, dass sie auf irgendeine Art die Tumorentstehung fördert. Daher wollen Ballabio und seine Kollegen herausfinden, wie man den lysosomalen Signalübertragungsprozess gefahrlos aktivieren kann und wie sich insbesondere TFEB reversibel anschalten lässt. Die Forscher nehmen dabei auch molekulare Ziele ins Visier, die TFEB in der Signalkette nachgeschaltet sind, und hoffen, hier auf neue therapeutische Ansatzpunkte zu stoßen.

Versuche an Tieren und Zellkulturen haben bereits belegt, dass man mittels Beeinflussung von TFEB zumindest theoretisch ein breites Spektrum von Krankheiten behandeln kann, darunter Parkinson, Krebs und Fettleibigkeit. »Sogar Infektionen mit Bakterien oder Parasiten lassen sich auf diese Weise bekämpfen«, sagt Ballabio.

Seltene Leiden wie die Niemann-Pick-Krankheit zu erforschen, könnte zudem neue Möglichkeiten eröffnen, um die Mechanismen hinter neurologischen Erkrankungen zu verstehen. Das Gehirn ist gegenüber Defekten in Lysosomen und anderen Zellorganellen besonders anfällig, weil sich Neurone nicht teilen können. Schon kleine Ungleich-

gewichte in zellulären Recyclingsystemen machen sich hier mit der Zeit bemerkbar. Selbst in gesunden Gehirnen sammeln sich mit fortschreitendem Alter immer mehr Ablagerungen an. Körperzellen werden dagegen ihren Abfall los, indem sie sich teilen und ihn dabei verdünnen.

Genetische Studien haben entsprechende Zusammenhänge bereits aufgedeckt und dabei Beziehungen offengelegt zwischen seltenen Erkrankungen im Kindesalter und häufigen Leiden bei Erwachsenen. Ein Beispiel ist das Gaucher-Syndrom, eine erbliche Stoffwechselstörung, die zu schweren Entwicklungsstörungen bei Kleinkindern führt. Verursacht wird sie von einer Mutation in dem Gen, das die Bauanleitung für das lysosomale Enzym Glukocerebrosidase enthält, welches am Lipidstoffwechsel mitwirkt. Heute weiß man, dass dieselbe Mutation auch ein bedeutender Risikofaktor für die Parkinsonkrankheit ist.

Unerwartete Zusammenhänge zwischen seltenen und häufigen Erkrankungen

Ein weiteres Beispiel betrifft das Protein Progranulin, das an Entzündungsprozessen und der Wundheilung beteiligt ist. Forscher um Matt Baker vom Mayo Clinic College of Medicine haben 2006 herausgefunden, dass Menschen mit nur einer funktionierenden Kopie des Progranulin-Gens ein erhöhtes Risiko tragen, an einer spät auftretenden neurodegenerativen Störung des Stirn- oder Schläfenlappens zu erkranken. 2012 beschrieben andere Mediziner den Fall von Zwillingen, denen beide funktionsfähigen Kopien des Gens fehlten. Diese Geschwister bekamen schon in jungen Jahren eine lysosomale Speicherkrankheit, die neuronale Ceroid-Lipofuszinose. Wie sich herausstellte, kommt Progranulin auf den Lysosomen vor, und seine Herstellung in der Zelle hängt vom Masterprotein TFEB ab.

Viele Forscher vermuten, dass funktionelle Störungen der Lysosomen einem ganzen Spektrum von Erkrankungen zu Grunde liegen. Wahrscheinlich treten schwere Defekte wie die LSK im Leben schon früh zu Tage, während die milderen sich erst später manifestieren. Die oben geschilderten Fälle deuten darauf hin: Der Schweregrad einer solchen Krankheit hängt davon ab, wie stark lysosomenassoziierte Gene abgelesen werden. »Noch vor fünf Jahren haben wir das nicht einmal geahnt«, erklärt Ferguson. Mittlerweile besuchen Experten für seltene Krankheiten und solche für häufige dieselben Tagungen, weil die Verbindungen zwischen beiden so offensichtlich sind.

2010 entdeckte der Neurowissenschaftler Ralph Nixon von der New York University: Bei Patienten, die früh an Alzheimer erkranken, zeigt sich ein bestimmtes Gen häufig mutiert, und ebendieses (unmutierte) Gen benötigen Lysosomen, um normal arbeiten zu können. Es enthält die Bauanleitung für das Protein Presenilin, das es einem großen Proteinkomplex namens vATPase ermöglicht, sich auf der Lysosomenmembran zusammenzufügen und das Innere der Organelle mit Säure anzureichern – unerlässlich für deren Funktionen. Laut Nixon könnten Mutationen im Presenilin-Gen den Ausbruch der Alzheimerkrankheit beschleunigen, indem sie lysosomale Speicherprobleme im Gehirn verursachen. Anfangs stieß diese These auf große Skepsis bei Alzheimerexperten – besonders bei

jenen, die fehlgefaltete Beta-Amyloid-Peptide für den Auslöser der Erkrankung hielten. »(Alzheimer) hat mit Beta-Amyloiden zu tun«, räumt Nixon ein, »aber die neu erkannten Zusammenhänge zwischen Genen und lysosomalen Funktionen machen es nicht mehr zwingend erforderlich, die Amyloide als Ursache des Leidens anzusehen.« Mit weiteren Ergebnissen haben er und seine Kollegen diese Sichtweise 2015 untermauert.

Seither haben Forscher sechs weitere Hirnerkrankungen identifiziert, an denen sowohl die vATPase als auch die Lysosomen beteiligt sind. Die These, Presenilin-Proteine (oder vielmehr ihre defekten Formen) könnten ganz wesentlich zur Entstehung der Krankheit beitragen, ist mit Nixons Worten »nicht mehr länger weit hergeholt«. Der Forscher ist überzeugt davon, künftig werde sich bei noch weiteren häufigen Krankheiten herausstellen, dass sie auf Fehlfunktionen von Lysosomen beruhen.

Immer deutlicher wird zudem der Zusammenhang zwischen Ebola und der Niemann-Pick-Krankheit Typ C. Studienergebnisse, die 2016 publiziert wurden, lassen keinen Zweifel daran: Das vom *NPC1*-Gen kodierte Protein interagiert direkt mit der Außenhülle des Virus (siehe »Die Vervielfältigung des Ebolavirus«, links). Hier ergibt sich ein Ansatzpunkt für eine Ebolatherapie. Ein Team um den Mikrobiologen Kartik Chandran vom Albert Einstein College of Medicine sucht bereits nach Wirkstoffen, um *NPC1* zu hemmen. Gelänge das, erklärt der Forscher, wäre das so, als würde man in der behandelten Person vorübergehend die Niemann-Pick-Krankheit erzeugen. Keine schöne Maßnahme, aber sie könnte Mitarbeiter des Gesundheitssystems, die akut mit Ebolaviren in Kontakt kommen, besonders wirksam vor einer Infektion schützen. Und da andere Filoviren (zu denen Ebola gehört) ebenfalls auf *NPC1* angewiesen sind, um Körperzellen zu infizieren, lässt sich mit diesem Ansatz vielleicht auch ihnen entgegenwirken – einschließlich des gefürchteten Marburgvirus.

Familien, die von der Niemann-Pick-Krankheit Typ C betroffen sind, haben die Entwicklung neuer Therapien gegen das Ebolafieber mit vorangebracht – vor allem, indem sie Probenmaterial zur Verfügung stellten. Umgekehrt könnten auch sie von der Ebolaforschung profitieren. Das demonstriert sehr gut, wie nützlich es sein kann, die Untersuchung seltener und häufiger Erkrankungen miteinander zu verknüpfen. Patienten, die an exotischen Störungen leiden, laufen so weniger Gefahr, aus dem Blickfeld der Forschung zu geraten. ◀

QUELLEN

Herbert, A. S. et al.: Niemann-Pick C1 Is Essential for Ebolavirus Replication and Pathogenesis in Vivo. In: *mBio* 26, e00565-15, 2015

Lee, J. H. et al.: Presenilin 1 Maintains Lysosomal Ca²⁺ Homeostasis via TRPML1 by Regulating vATPase-Mediated Lysosome Acidification. In: *Cell Reports* 12, S. 1430–1444, 2015

Settembre, C. et al.: A Lysosome-to-Nucleus Signalling Mechanism Senses and Regulates the Lysosome via mTOR and TFEB. In: *EMBO* 31, S. 1095–1108, 2012

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 537, S. S148–S150, 22. September 2016

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN INTELLIGENTE FENSTER AUS BERLINER BLAU

Mit einem schon vor mehr als 300 Jahren erstmals hergestellten Pigment lässt sich Glas elektrisch abdunkeln und wieder aufhellen. Das gelingt sogar im Heimversuch.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

► spektrum.de/artikel/1432740

Elektrochrome Gläser, die sich stufenlos elektrisch abdunkeln oder aufhellen lassen, finden etwa bei Flugzeugfenstern kommerzielle Verwendung. Andere Einsatzgebiete sind Gebäudeverglasungen und selbstabdunkelnde Autorückspiegel.

► Energiesparen ist eine wichtige Methode, der weltweiten Klimaerwärmung entgegenzuwirken. Viel Energie verbraucht zum Beispiel das Heizen oder Kühlen von Gebäuden. Das gilt insbesondere für solche mit modernen, großflächigen Verglasungen, durch die im Sommer das Sonnenlicht fällt und im Winter Wärme nach draußen entweicht. Hier werden heute schon vielfach »intelligente Fensterscheiben« eingesetzt, die sich elektrisch abdunkeln oder aufhellen lassen. Solche »smart windows«, wie sie auf Englisch heißen, können die Durchlässigkeit für Sonnenlicht von 77 auf 8 Prozent und für Wärme von 56 auf 6 Prozent verringern. Dadurch lässt sich der Energieverbrauch eines Gebäudes teils um mehr als 30 Prozent senken.

Grundlage intelligenter Fensterscheiben sind so genannte elektrochrome Materialien, die beim Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Farbe ändern. Sie werden auf das Glas aufgetragen. Dieses muss allerdings Strom leiten, was für normales Fensterglas, das im Wesentlichen aus Siliciumdioxid besteht, nicht zutrifft. Deshalb wird es mit transparenten, elektrisch leitenden Oxiden wie Indiumzinnoxid (ITO, nach englisch: indium tin oxide) oder neuerdings fluordotiertem Zinnoxid (FTO) beschichtet, das kostengünstiger und thermisch stabiler ist.

Insgesamt existiert eine große Anzahl elektrochromer Materialien, organische ebenso wie anorganische. Zu ersteren zählen etwa Polypyrrol und Polyanilin, zu letzteren Wolframtrioxid (WO_3), Vanadiumpentoxid (V_2O_5), Titandioxid (TiO_2) und Hexacyanoferrate ($\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-/3-}$), besser bekannt unter dem Sammelbegriff Berliner Blau. Ebenso gibt es eine Reihe unterschiedlicher Beschichtungsmethoden. Die wichtigsten sind Eintauchen (dipping), Rotieren (spin coating), Aufdampfen und die elektrochemische Abscheidung durch Oxidation oder Reduktion einer Vorläufersubstanz. In diesem Beitrag möchten wir uns auf die elektrolytische Abscheidung von Berliner Blau aus einer wässrigen Lösung auf ein FTO-Glas beschränken.

Ein molekulares Chamäleon

Berliner Blau (auch Pariser Blau, Eisencyanblau, Turnbills Blau, Bronzeblau genannt) ist ein lichtechtes, tiefblaues, mineralisches Pigment. Anfang des 18. Jahrhunderts erstmals hergestellt, war es der erste moderne synthetische Farbstoff. Als Farbton wird es auch als Preußischblau, Stahlblau oder Miloriblau bezeichnet. Berliner Blau kristallisiert in einem kubischen Gitter, in dem auf den Ecken eines Würfels jeweils im Wechsel die Eisen-Ionen Fe^{2+} und Fe^{3+} sitzen. Erstere sind von den Kohlenstoff- und letztere von den Stickstoff-Atomen der Cyanid-Liganden (CN^-) umgeben. Ein leerer Platz in der Mitte des Würfels erlaubt die Einlagerung von Eisen- und Kalium- oder anderen einfach positiv geladenen Ionen.

Schichten von Berliner Blau mit einer Dicke von 20 bis 500 Nanometern lassen sich durch elektrochemische Reduktion von Berliner Braun gewinnen, einem braunen wasserlöslichen Eisentricyanid-Komplex ($\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_3$ oder $\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$), der beim Zusammengeben einer Lösung von Eisen(III)sulfat und Kaliumhexacyanoferrat(III) (auch rotes Blutlaugensalz genannt) entsteht. Dabei läuft an der Kathode die folgende Reaktion ab:

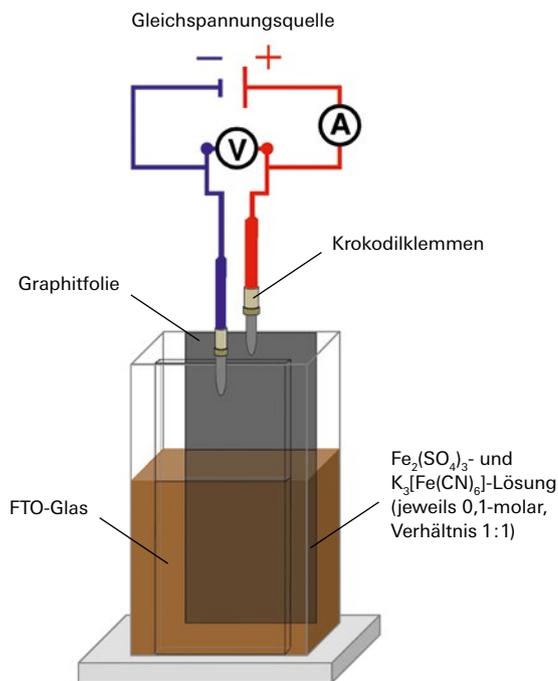
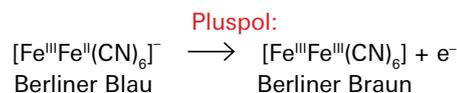
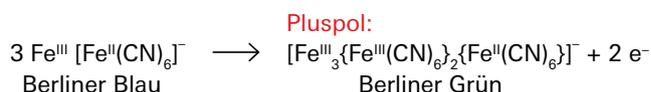


Zum Ladungsausgleich werden Kalium-Ionen in das Berliner-Blau-Gitter eingelagert.



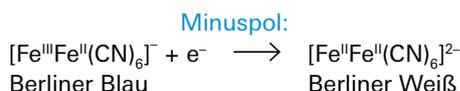
Eine solche Ein- oder Auslagerung (Interkalation oder Deinterkalation) von Kationen findet bei allen hier aufgeführten Redoxreaktionen statt. Der Einfachheit halber lassen wir sie im Folgenden jedoch meist weg.

Das abgeschiedene Berliner Blau kann seinerseits elektrochemisch oxidiert oder reduziert werden. Bei der Oxidation ergibt sich zunächst Berliner Grün und schließlich wieder Berliner Braun.



Um auf einem leitfähigen FTO-Glas, das mit fluordotiertem Zinnoxid (FTO) beschichtet ist, Berliner Blau abzuscheiden, taucht man es in eine wässrige Lösung von Eisen(III)sulfat und Kaliumhexacyanoferrat(III) und verbindet es mit dem Minuspol einer Batterie. Als Gegenelektrode dient eine an den Pluspol angeschlossene Graphitfolie.

Durch kathodische Reduktion von Berliner Blau entsteht Berliner Weiß (Everitts-Salz), das als dünne Schicht transparent erscheint:



Auf Basis von Berliner Blau können Sie auch selbst ein kleines, vereinfachtes Modell eines elektrochromen Fensters herstellen. Dazu müssen Sie ein Scheibchen FTO-Glas in einer galvanischen Zelle mit einer Lösung von Eisen(III)-sulfat und Kaliumhexacyanoferrat(III) als Elektrolyten an den Minuspole einer Gleichstromquelle anschließen und eine Spannung von etwa 0,3 Volt anlegen, wobei eine Graphitfolie mit dem Pluspol verbunden ist (Bild S. 53). Die genaue Versuchsbeschreibung und Angaben zu den Bezugsquellen der erforderlichen Materialien finden Sie in einer ausführlicheren Fassung dieses Artikels unter www.spektrum.de/artikel/1432740.

Während der Elektrolyse überzieht sich die elektrisch leitende Seite des FTO-Glases mit einer Schicht von Berliner Blau, die mit der Zeit immer dicker wird. Nach zehn Minuten erscheint das Glas intensiv blau und ist fast nicht mehr transparent. Als optimal für ein »smart window« erweist sich eine Elektrolysezeit von 90 Sekunden. Die Farbschicht ist dann dunkel genug, aber noch durchsichtig. Die chemische Reaktion während der Elektrolyse entspricht der oben schon beschriebenen kathodischen Reduktion von Berliner Braun.

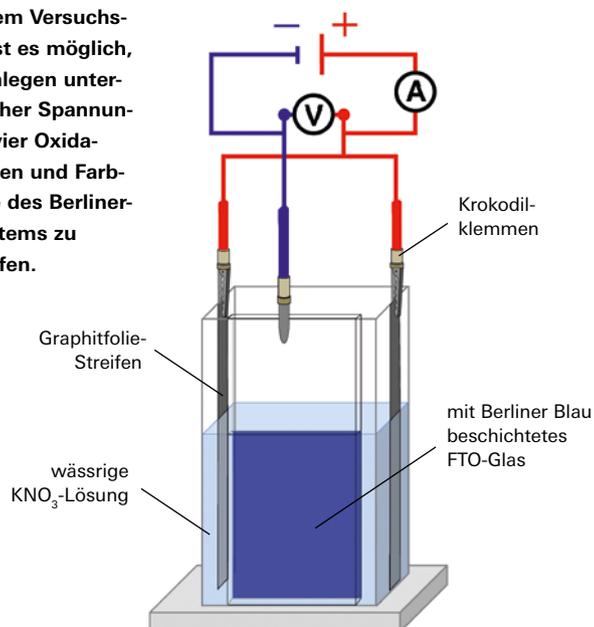
Farbe, wechsele dich!

Das mit dem Farbstoff beschichtete FTO-Glas bietet nun die faszinierende Möglichkeit, die Funktionsweise eines elektrochromen Fensters im Heimversuch nachzuvollziehen. So können Sie es zunächst entfärben. Dazu müssen Sie das FTO-Glas in eine Kaliumnitrat-Lösung tauchen und als Minuspole schalten, während wiederum eine Graphitfolie als Pluspol dient (Bild oben). Wenn Sie eine Spannung von 1,7 Volt anlegen, verwandelt sich das Berliner Blau in farbloses Berliner Weiß.

Je nach Oxidationsgrad des Eisens – er nimmt hier von links nach rechts zu – zeigt ein mit Berliner Blau beschichtetes FTO-Glas in wässriger Kaliumnitrat-Lösung verschiedene Farben. Beim rein weißen $\text{K}_2\text{Fe}^{\text{II}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$ liegt das Metall in der Oxidationsstufe II vor. Das blaue $\text{KFe}^{\text{II}}[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$ und das grüne $\text{K}[\text{Fe}^{\text{III}}_3\{\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6\}_2\{\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6\}]$ enthalten jeweils sowohl zwei- als auch dreiwertiges Eisen. Im braunen $[\text{Fe}^{\text{III}}\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$ hat das Metall dagegen komplett die Oxidationsstufe III.



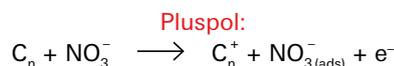
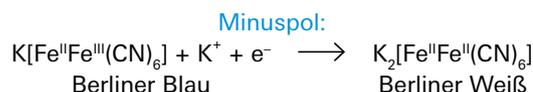
Mit diesem Versuchsaufbau ist es möglich, durch Anlegen unterschiedlicher Spannungen die vier Oxidationsstufen und Farbzustände des Berliner-Blau-Systems zu durchlaufen.



MARCO OETIKEN

Was geschieht dabei auf molekularer Ebene genau? Am Minuspole gehen Elektronen auf das Eisenhexacyanoferrat über und reduzieren die darin vorkommenden Fe^{3+} -Ionen dadurch zu Fe^{2+} -Ionen. Damit die Verbindung elektrisch neutral bleibt, werden zugleich Kalium-Ionen aus der wässrigen Kaliumnitrat-Lösung in die »Röhrenstruktur« des Kristallgitters eingebaut.

Die außerdem im Elektrolyten vorhandenen Nitrat-Ionen wandern zur positiven Graphitfolie und lagern sich daran an. Die Elektrodenreaktionen lassen sich also wie folgt formulieren (ads steht für adsorbiert):

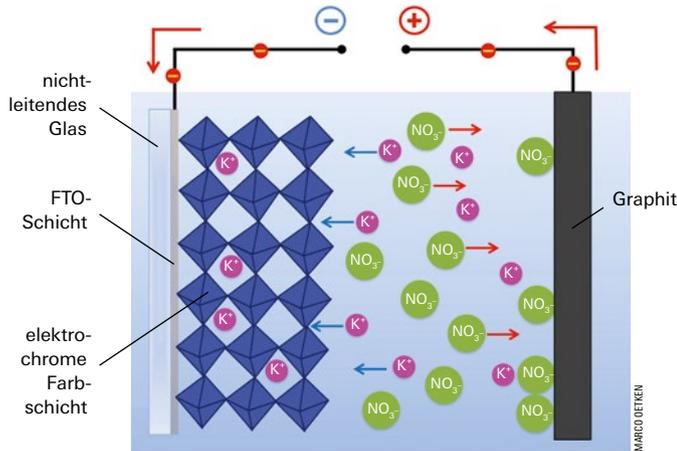


Die Entfärbung können Sie anschließend rückgängig machen, indem Sie den Stromfluss umkehren. Wenn Sie das FTO-Glas als Pluspol und die Graphitfolie als Minuspole schalten und eine Spannung von 0,5 Volt anlegen, laufen alle geschilderten Vorgänge in entgegengesetzter Richtung ab, und nach wenigen Minuten kehrt die Blaufärbung zurück, weil das Berliner Weiß wieder zum Berliner Blau oxidiert wird.

Wie wir oben gesehen haben, bietet das Hexacyanoferrat-System mit seinen verschiedenen Oxidationsstufen aber noch ein weit größeres Farbspektrum, das Sie mit dem beschichteten FTO-Glas komplett durchlaufen können. Dabei erhalten Sie innerhalb weniger Minuten jeweils klar abgegrenzt die einzelnen Farbstufen. Die ersten beiden, nämlich weiß und blau, haben wir bereits realisiert.

Um auch die nächste Stufe zu erreichen, müssen Sie, während das FTO-Glas wie zuvor als Pluspol und die Graphitfolie als Minuspole geschaltet ist, die Spannung auf etwa

Beim Entfärben von Berliner Blau in wässriger Kaliumnitrat-Lösung an einem FTO-Glas als Minuspol laufen die hier dargestellten molekularen Vorgänge ab. An der Kathode werden Elektronen in die elektrochrome Schicht gepumpt. Diese lagert zum Ladungsausgleich Kalium-Ionen ein. Zugleich wird das dreiwertige Eisen zum zweiwertigen reduziert (nicht gezeigt), wodurch sich das Berliner Blau in Berliner Weiß verwandelt. Nitrat-Ionen wandern zum Pluspol und lagern sich dort an, so dass die Lösung elektrisch neutral bleibt.



ein Volt erhöhen. Dadurch wird das Berliner Blau weiter oxidiert – zum Berliner Grün ($[\text{Fe}^{\text{III}}_3\{\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6\}_2\{\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6\}]$). Der entsprechende Farbumschlag lässt sich nach ein paar Minuten deutlich erkennen.

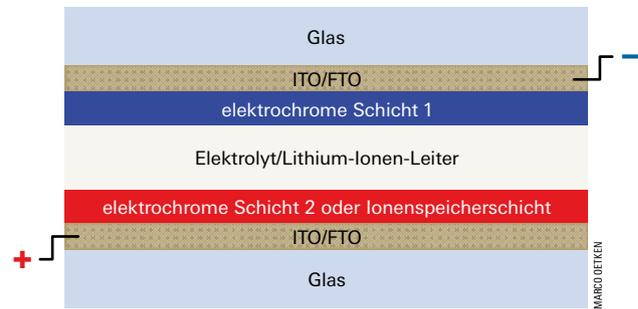
Erhöhen Sie die Spannung danach auf ungefähr 1,7 Volt, färbt sich das FTO-Glas schließlich gelbbraun. Damit sind Sie bei der höchsten Oxidationsstufe angelangt: Im Berliner Braun ($\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$) liegen alle Eisen-Atome als dreifach positiv geladene Ionen vor.

Polen Sie nun um und legen nacheinander Spannungen von 0,7, 1,2 und 1,7 Volt an, durchlaufen Sie das Farbenspektrum in der umgekehrten Richtung. Dieses Spiel können Sie mehrmals wiederholen.

Für kommerzielle elektrochrome Fensterscheiben hat sich allerdings nur der Farbwechsel zwischen Berliner Weiß und Berliner Blau als geeignet herausgestellt. Die zusätzlichen Kationen, die bei der Weiteroxidation zu Berliner Grün oder Braun zum Ladungsausgleich aufgenommen werden, beschädigen nämlich das Ionengitter mit der Zeit. Der Vorgang lässt sich deshalb nicht sehr oft wiederholen. Eine lange Betriebsdauer ist bei dem kommerziellen Einsatz als »smart window« jedoch von entscheidender Bedeutung.

Mit einer einfachen Smartphone-App (zum Beispiel Physics Toolbox Light Sensor) können Sie auch direkt messen, wie die Transmission beim Abdunkeln und Aufhellen des FTO-Glases zurückgeht und wieder zunimmt. Wenn Sie die Scheibe zwischen Lichtquelle und Handy halten, erscheint auf seinem Display eine Kurve der ab- oder zunehmenden Belichtungsstärke in Lux.

Kommerziell kommen »smart windows« inzwischen nicht nur in Gebäudeverglasungen, sondern auch in Flugzeugfenstern und selbstabblendenden Autorückspiegeln



Bei einem kommerziellen elektrochromen Fenster bestehen beide Elektroden aus Glas, das mit einem transparenten leitenden Material wie FTO oder ITO (Indiumzinnoxid) beschichtet ist. Als Elektrolyt dient ein Lithium-Ionen-Leiter. Die zweite Elektrode hat entweder ebenfalls eine Beschichtung aus elektrochromem Material oder eine aus einem Ionenspeicher, der Lithium-Ionen aufnehmen und abgeben kann.

zum Einsatz (Bild S. 52). Diese Systeme unterscheiden sich von unserem vereinfachten Modell darin, dass die Gegenelektrode in die Fensterscheibe integriert ist (Bild oben rechts). Sie muss daher gleichfalls farblos und transparent sein. Entweder besteht sie auch aus FTO-Glas oder aus einer leitfähigen Mischverbindung von Cer- und Titandioxid. Um den Farbeffekt zu verstärken, ist die Gegenelektrode zudem oft ebenfalls mit einem elektrochromen Material beschichtet. Dieses muss dann allerdings entgegengesetzt auf eine elektrische Spannung reagieren, damit die Farbänderungen an beiden Elektroden gleichsinnig erfolgen: Dunkelt das Material an der als Pluspol geschalteten Elektrode ab, an der eine Oxidation stattfindet, sollte dasselbe am reduzierenden Minuspol passieren und umgekehrt.

Als Elektrolyt fungiert bei kommerziellen »smart windows« gewöhnlich ein Lithium-Ionen-Leiter. Deshalb müssen beide Elektroden Lithium-Ionen einlagern und wieder abgeben können. FTO ist dazu in der Lage. Fehlt es an der Gegenelektrode, muss eine farblose Ionenspeicherschicht (IS) diese Aufgabe übernehmen. ◀

QUELLEN

Ellis, D. et al.: Electrochromism in the Mixed-Valence Hexacyanides. 1. Voltammetric and Spectral Studies of the Oxidation and Reduction of Thin Films of Prussian Blue. In: Journal of Physical Chemistry 85, S. 1225–1231, 1981

Itaya, K. et al.: Electrochemistry of Polynuclear Transition Metal Cyanides: Prussian Blue and its Analogues. In: Accounts of Chemical Research 19, S. 162–168, 1986

Kraft, A.: On the Discovery and History of Prussian Blue. In: Bulletin for the History of Chemistry 33, S. 61–67, 2008

Mortimer, R. J.: Electrochromic Materials. In: Chemical Society Reviews 26, S. 147–156, 1997

Rowley, N. M., Mortimer, R. J.: New Electrochromic Materials. In: Science Progress 85, S. 243–262, 2002

Somani, P. R., Radhakrishnan, S.: Electrochromic Materials and Devices: Present and Future. In: Materials Chemistry and Physics 77, S. 117–133, 2002

KOSMOLOGIE GEGENWIND FÜR DIE DUNKLE MATERIE

Große Himmelsobjekte bewegen sich anders als nach den Gravitationsgesetzen vorhergesagt. Die meisten Kosmologen machen dafür die Wirkung noch unbekannter Teilchen verantwortlich. Ein theoretischer Physiker widerspricht – und belebt mit seinem neuen Ansatz eine alte Debatte.



Natalie Wolchover ist Journalistin und Physikerin in New York. Sie schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

» spektrum.de/artikel/1443905

Seit nunmehr acht Jahrzehnten rätseln Wissenschaftler über eine Substanz, die sie nicht sehen können, deren Schwerkraft sie aber benötigen, um die Bewegungen der Galaxien zu erklären. Diese so genannte Dunkle Materie sollte sogar fünfmal so viel Masse besitzen wie alle übrigen Objekte im All zusammen. Wir kennen demnach nur einen Bruchteil unseres Universums – obwohl Tausende von Physikern nach den Teilchen fahnden, aus denen die Dunkle Materie bestehen könnte. Da sie sich nur durch ihre Gravitationskraft bemerkbar macht, sendet sie kein Licht aus und absorbiert keines. Es ist also unmöglich, sie in Teleskopen direkt zu sehen. Dennoch glaubt die Mehrzahl der Astronomen an ihre Existenz.

Am Ausgangspunkt ihrer Überlegungen steht dabei eine zentrale Annahme: Wir wissen genau, wie sich Himmelskörper bewegen. Dort, wo sie sich nicht so verhalten wie erwartet, verrät sich demnach die Dunkle Materie als Einfluss einer verborgenen Masse. Was allerdings, wenn die grundlegenden Theorien über die Bahnen von Objekten im Universum falsch sind? Was, wenn die Schwerkraft auf sehr großen Skalen anders funktioniert? Dann wären womöglich gar keine unsichtbaren Bausteine nötig, um eigenartige Befunde zu erklären, sondern vielmehr neue Gesetze.

Dieses Argument vertritt nur eine Minderheit der Kosmologen, dennoch wird es in Fachkreisen seit einiger Zeit

wieder intensiv diskutiert. Anlass dafür war ein Vorschlag von Erik Verlinde, einem theoretischen Physiker an der Universität Amsterdam. Er ist für seine kühnen und weit-sichtigen, mitunter nicht ganz ausgereiften Ideen bekannt. Am 7. November 2016 veröffentlichte Verlinde online einen 51 Seiten langen Artikel. Darin erklärt er die Gravitation zu einem Produkt quantenmechanischer Wechselwirkungen. Die zusätzliche Schwerkraft, die man der Dunklen Materie zuschreibt, ist seiner Ansicht nach ein Effekt der so genannten Dunklen Energie, die in das raumzeitliche Gefüge des Universums eingewoben ist und dessen beschleunigte Expansion antreibt (siehe **Spektrum** September 2016, S. 12). Dunkle Materie sei nicht eine Ansammlung unsichtbarer Teilchen, sondern ein Wechselspiel zwischen gewöhnlicher Materie und Dunkler Energie.

Für seine Beweisführung bedient sich Verlinde einer radikal neuen Sichtweise auf die Gravitation, die für zahlreiche führende Theoretiker derzeit besonders vielversprechend ist. Diesen Überlegungen zufolge ist Gravitation ein emergentes Phänomen, geht also auf großen Skalen aus dem Zusammenspiel kleinster Elemente hervor. Sowohl die Raumzeit als auch die Materie sind in der modernen Interpretation so etwas wie ein Hologramm, das von einem Netz quantenmechanischer Information erzeugt wird (siehe **Spektrum** Februar 2017, S. 20).



Der Niederländer Erik Verlinde erklärt Phänomene, wie sie in Spiralgalaxien beobachtet werden, mit der Quantenmechanik.

ILVY NJOKIKTJEN FÜR QUANTA MAGAZINE

Verlinde geht von dieser Vorstellung aus und führt die Dunkle Energie ebenfalls auf die Eigenschaften jener »Qubits« zurück, welche die Quanteninformation kodieren. Im Hologramm wechselwirke die Dunkle Energie auf großen Skalen mit den darin enthaltenen Massen. Das erzeuge die Illusion einer Dunklen Materie.

Bei seinen Berechnungen stieß Verlinde auf eine Gleichung, die bereits von der »Modifizierten Newtonschen Dynamik« (kurz MOND) bekannt ist. Bei diesem Ansatz handelt sich um einen mathematischen Eingriff in das quadratische Abstandsgesetz der newtonschen Gravitationstheorie. Er wurde speziell mit dem Ziel durchgeführt, die Dunkle Materie aus den Gleichungen zu verbannen, und erstmals 1983 vom israelischen Physiker Mordehai Milgrom vorgeschlagen (siehe den Artikel von Milgrom in **Spektrum** Oktober 2002, S. 34). Rechnet man mit den veränderten Formeln, ist es zumindest für einige Phänomene nicht mehr nötig, eine Dunkle Materie anzunehmen. Lange war fraglich, warum ein solcher Behelf überhaupt funktionieren sollte. »Ich habe nun einen Weg gefunden, um MOND aus einer grundlegenden Sicht heraus zu verstehen«, meint Verlinde.

Seine Kollegen loben die Arbeit als bedenkenswert, wenn auch bisweilen schwer nachvollziehbar, und darum bleibt es abzuwarten, ob die Argumente einer sorgfältigen

Prüfung standhalten. Sicher war der Zeitpunkt der Veröffentlichung glücklich gewählt. Denn eine neue Untersuchung, die Stacy McGaugh von der Case Western Reserve University in Cleveland und zwei weitere Astrophysiker am 9. November 2016 publizierten, stärkte die Position von MOND gegenüber der Dunklen Materie. Die drei Forscher haben Bewegungsdaten von 153 Galaxien unterschiedlichster Art analysiert und dabei gemessen, wie schnell die sichtbare Materie in einem gegebenen Abstand zum Zentrum der Galaxie rotiert. Dann berechneten sie, wie viel sichtbare Materie sich innerhalb dieses Radius befindet.

Überraschenderweise sind die beiden Größen für alle untersuchten Galaxien durch einen offenbar universellen Zusammenhang verbunden. Im Rahmen der MOND-Theorie überrascht das nicht weiter, da keine andere Ursache außer der sichtbaren Materie die Rotation der Galaxie antreibt – obwohl die Gravitation etwas anderen Gesetzen folgt als denen von Newton und Einstein. Für die Befürworter der Dunklen Materie ist ein solch enger Zusammenhang zwischen der Gravitationswirkung auf die sichtbare Materie und der Schwerkraft, die von dieser ausgeht, schwerer zu erklären.

Unterdessen berichteten niederländische Astronomen im Rahmen von Seminaren und in einer Veröffentlichung bei den »Monthly Notices of the Royal Astronomical

AUF EINEN BLICK COMEBACK EINES AUSSENSEITERS

- 1 Galaxien und große Strukturen im All verhalten sich anders, als es allein anhand der sichtbaren Materie und der Gravitationsgesetze zu erwarten wäre.
- 2 Die meisten Astronomen führen die beobachteten Phänomene auf unbekannte Teilchen zurück, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar machen und nicht mit Licht oder anderen Feldern wechselwirken.
- 3 Alternative Ansätze modifizieren die Gleichungen der Gravitation – jedoch fehlte dafür bislang eine theoretische Grundlage. Diese liefert nun ein Physiker. Aber sein Konzept ist kompliziert und umstritten.

Society« von einem ersten Test der Theorie von Verlinde. Margot Brouwer von der Universität Leiden und ihre Kollegen verglichen Verlindes Formeln mit den Daten von mehr als 30 000 Galaxien. Demnach sagt die Theorie korrekt die schwerkraftbedingte Verzerrung der Galaxienbilder voraus. Diese so genannten Gravitationslinsen waren ein weiteres Phänomen, das bislang vor allem den Auswirkungen der Dunklen Materie zugeordnet wurde. Allerdings hatte bereits der Begründer von MOND Ähnliches gezeigt: Milgrom demonstrierte, dass seine Theorie mit den Beobachtungen von Gravitationslinsen in Einklang steht. So gesehen ist das Ergebnis des Teams um Brouwer nicht überraschend. Um wirklich zu punkten, müsste Verlindes Modell deshalb darüber hinaus Phänomene beschreiben können, bei denen die ursprüngliche Variante von MOND versagt.

Kathryn Zurek, die am Lawrence Berkeley National Laboratory an der Theorie der Dunklen Materie forscht, sieht Verlindes Ansatz zumindest als Hinweis darauf, solche Konzepte ernster zu nehmen. »Am meisten hat der modifizierte Gravitation eine fehlende Theorie zu schaffen gemacht, welche die neuen Eigenschaften der Schwerkraft nachvollziehbar erklären würde«, sagt sie. »Wenn Verlindes Arbeit dafür einen Rahmen liefert, dann reicht das vielleicht schon aus, um einer intensiveren Auseinandersetzung mit MOND-Varianten neues Leben einzuhauchen.«

In den Theorien von Newton und Einstein nimmt die Anziehungskraft zwischen zwei Massen mit dem Quadrat ihres Abstands ab. Sterne, die ihre Bahnen in einer Galaxie ziehen, sollten also umso weniger Anziehungskraft spüren und entsprechend langsamer kreisen, je weiter sie vom Zentrum entfernt sind. Tatsächlich fallen die Geschwindigkeiten der Sterne im inneren Bereich von Galaxien nach außen hin so ab, wie es die quadratische Abnahme der Schwerkraft vorhersagt. Doch ab einer gewissen Distanz bleiben die Geschwindigkeiten nahezu konstant, anstatt weiter zu sinken. Diese Diskrepanz hatte die Astronomin Vera Rubin in den 1970er Jahren entdeckt. Sie gilt als ein

wichtiger Hinweis auf die Existenz der Dunklen Materie. Nach der gängigen Vorstellung hüllt diese die Galaxien in gewaltige »Halos« aus unsichtbarer Masse und verpasst so den weiter am Rand kreisenden Sternen eine zusätzliche gravitative Beschleunigung (siehe »Das Rätsel der galaktischen Umlaufbahnen«, rechts).

Aus welcher Art von Teilchen könnten diese Halos bestehen? Das versuchen Physiker mit immer empfindlicheren Detektoren weltweit zu ergründen. Als wahrscheinlichste Kandidaten gelten einerseits die WIMPs (englisch für weakly interacting massive particles, schwach wechselwirkende massereiche Teilchen) und andererseits so genannte Axionen. Mit diversen, speziell dafür ausgelegten Experimenten suchen Physiker nach beiden – bislang erfolglos (siehe **Spektrum** November 2015, S. 42).

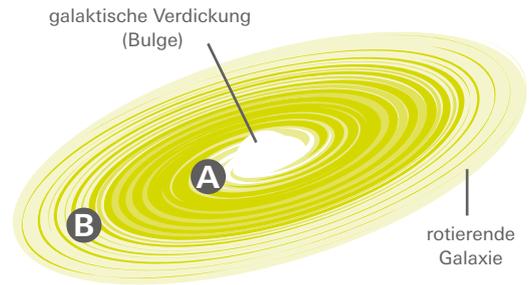
Bei kleinen Beschleunigungen scheint sich Materie plötzlich anders zu verhalten

Bereits seit den 1970er Jahren arbeiten Theoretiker wie Milgrom an alternativen Erklärungen. Viele der frühen Versuche, die Gravitation abzuändern, ließen sich leicht widerlegen. Doch Milgrom stieß auf ein Erfolgsrezept: Wenn die auf einen Stern wirkende Gravitationsbeschleunigung unter einen bestimmten Wert sinkt – 0,0000000012 Meter pro Sekundenquadrat, das ist rund 100 Milliarden Mal schwächer als die Schwerebeschleunigung auf der Erdoberfläche –, dann wechselt die Gravitation ihm zufolge von der quadratischen Abnahme zu einem eher linearen Verlauf. »Es gibt eine Art magische Grenze«, sagt McGaugh, »bis zu der alles normal und newtonisch ist. Jenseits von ihr wird es seltsam. Die Theorie sagt uns leider nicht, wie man von dem einen Bereich in den anderen gelangt.«

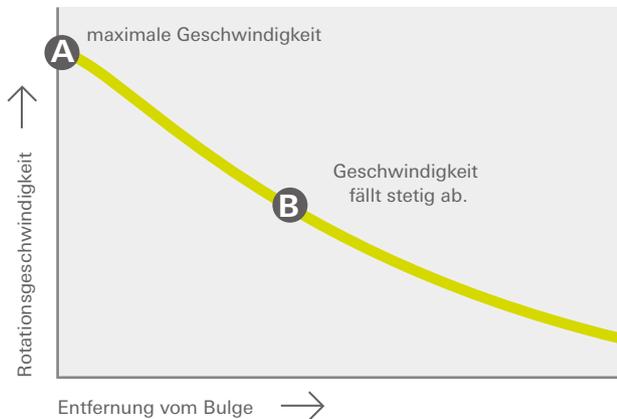
Da Physiker keine Magie mögen, vor allem aber, weil weitere kosmologische Beobachtungen sich viel bequemer mit Dunkler Materie erklären ließen als mit MOND, verwarfen sie den alternativen Entwurf. Jetzt ist er zurück im Gespräch. Denn Verlindes Theorie liefert einen Anhaltspunkt, wie der Zaubertrick funktionieren könnte.

Der 1962 geborene Verlinde hat sich in Fachkreisen um technisch anspruchsvolle Berechnungen in der Stringtheorie verdient gemacht. Die Ideen hinter seiner neuesten Arbeit skizzierte er erstmals 2010. Damals hatte er die Gravitation rundheraus für nicht existent erklärt. Verlinde übernahm seinerzeit mehrere Überlegungen, die eben erst aus den Ideenschmieden der theoretischen Physik hervorgegangen waren und verflocht sie miteinander. Sein Ergebnis: Die Gravitation sei ein emergenter thermodynamischer Effekt und hänge eng mit einer Zunahme der Entropie zusammen, einem Maß für die stets wachsende Unordnung eines Systems. Darauf folgten fruchtbare Diskussionen, in denen sich dieses spezielle Konzept von emergenter Gravitation zwar als fehlerbehaftet erwies. Doch ähnliche Gedankengänge wie die, von denen Verlinde ausging, brachten andere Theoretiker zur modernen holografischen Beschreibung von Raum und Zeit. Verlinde hat diese Herangehensweise wiederum in seine neue Arbeit eingebaut und erklärt die gekrümmte Raumzeit zu einer geometrischen Verkörperung von Quanteninformation.

Das Rätsel der galaktischen Umlaufbahnen



Das Problem



GEMÄSS EINSTEIN UND NEWTON

Die Anziehungskraft nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Sterne, die weit vom massereichen Zentrum entfernt sind (B), sollten also sehr viel weniger Gravitation spüren – und entsprechend langsamer rotieren – als Sterne näher am Zentrum (A).

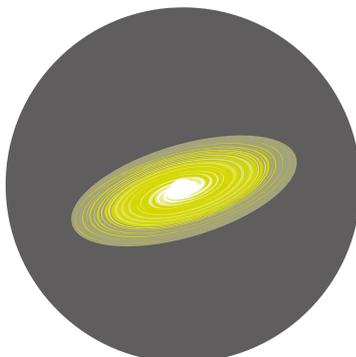


BEOBACHTETES VERHALTEN

Die Geschwindigkeiten der Sterne nehmen zunächst wie von Newton und Einstein vorhergesagt ab, doch jenseits einer bestimmten Entfernung bleiben sie auf mysteriöse Weise nahezu konstant.

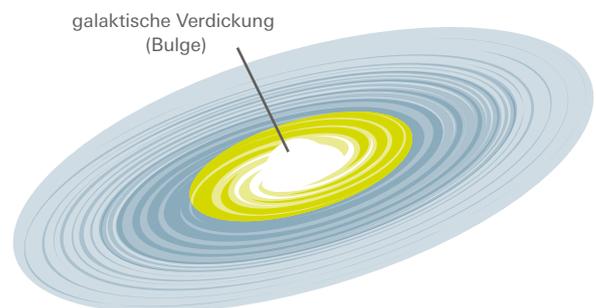
Mögliche Lösungen

Ein Halo aus Dunkler Materie hüllt die Galaxie ein.



DUNKLE MATERIE

Große Halos aus Dunkler Materie geben den weiter außen rotierenden Sternen eine zusätzliche Gravitationsbeschleunigung und flachen so die Rotationskurven ab.



- Gesetz der quadratischen Abnahme
- neues Gesetz

MOND-THEORIE

In der Modifizierten Newtonschen Dynamik (MOND) wechselt die Schwerkraft unterhalb eines bestimmten Grenzwerts von der quadratischen Abnahme zu einem Verhalten, das flache Rotationskurven reproduziert.

Im Gegensatz zu klassischen, binären Bits befinden sich Qubits in einer Überlagerung mehrerer Zustände. Zudem können sie miteinander verschränkt sein. Das bedeutet, ein Qubit ist mit einem zweiten verbunden, unabhängig davon, wie weit die beiden voneinander entfernt sind. Ob und nach welchen konkreten mathematischen Regeln sich aus der Verschränkung von Qubits eine Struktur der Raumzeit ergibt, ist Gegenstand aktueller Forschung. »Dieser holografische Ansatz ist gegenwärtig der beste Weg, um sich einem Verständnis der Quantengravitation anzunähern«, bekräftigt Mark Van Raamsdonk, Physiker an der University of British Columbia im kanadischen Vancouver, der einflussreiche Arbeiten auf diesem Gebiet verfasst hat.

Auch mathematisch lassen sich solche holografischen Universen inzwischen immer besser beschreiben, allerdings nur in seltsamen und künstlichen Geometrien, den »Anti-de-Sitter-Räumen« (AdS). Wir leben hingegen in einem so genannten De-Sitter-Raum mit einer anderen Struktur. Und die erweist sich nach wie vor als harte Nuss. Womöglich rufen gerade die speziellen Eigenschaften der De-Sitter-Geometrie die Illusion der Dunklen Materie hervor. Das zumindest ist eine Spekulation in Verlinde's jüngerer Arbeit.

De-Sitter-Raumzeiten wie unser Universum dehnen sich beschleunigt aus. Damit das passieren kann, muss man der Raumzeit einen kleinen Schuss Hintergrundenergie zuführen. Verlinde modelliert diese Dunkle Energie quasi als thermischen Effekt, als brächte Hitze unser Universum in einen Zustand der Expansion. Für ihn hängt diese thermische Energie mit einer Verschränkung zwischen Qubits über große Distanzen zusammen. Die Erwärmung würde Paare von ihnen gewissermaßen auseinandertreiben. Die Anwesenheit von Materie, so argumentiert Verlinde weiter, zerstört die Verschränkung. Dadurch verschwindet Dunkle

Alles steht und fällt mit der Frage, ob die neue Theorie für Phänomene gilt, an denen die alte Theorie gescheitert war

Energie in diesen Regionen der Raumzeit. Sie versucht jedoch, wieder einzudringen und übt so eine Art elastische Rückwirkung aus. Diese würde uns wie eine gravitative Anziehung erscheinen. Durch die Reichweite der Verschränkung spielt der Mechanismus eine umso wichtigere Rolle, je größer das betroffene Volumen der Raumzeit ist. Verlinde's Berechnungen zufolge lässt der Effekt die Rotationskurven von Galaxien gerade an dem Punkt von der Vorhersage Newtons und Einsteins abweichen, der dem Wert aus Milgroms MOND-Theorie entspricht.

Verlinde's Idee sei »fraglos richtungsweisend«, so Van Raamsdonk. Seiner Ansicht nach ist es noch zu früh, um zu entscheiden, ob alles in Verlinde's Arbeit – die sich bei Konzepten aus Quanteninformationstheorie, Thermodyna-

mik, kondensierter Materie, Holografie und Astrophysik bedient – wirklich so zusammenpasst. Dennoch: »Ich finde die Überlegungen interessant, und allein der Versuch, ihre Stimmigkeit zu überprüfen, dürfte uns weiterbringen.«

Kann die neue Theorie Beobachtungen erklären, die den Ausschlag für Dunkle Materie gaben?

Brian Swingle, der in den USA an der Harvard University und der Brandeis University über Holografie forscht, kritisiert, Verlinde fehle ein konkretes Modelluniversum ähnlich jenem, das andere Forscher im AdS-Raum konstruieren. Das gebe ihm zu viel Spielraum für Spekulationen. »Aber um fair zu sein, machen wir unsere Fortschritte in einem stärker begrenzten Bereich, der für das reale All erst einmal weniger relevant ist«, gesteht er mit Blick auf den AdS-Raum. »Wir müssen uns mit Universen befassen, die mehr wie unseres aussehen. Deshalb erhoffe ich mir von Verlinde's Arbeit zusätzliche Hinweise, in welche Richtung wir gehen sollten.«

Vielleicht trifft Verlinde mit seiner neuen Arbeit den Zeitgeist wie schon 2010 mit der entropischen Gravitation. Vielleicht liegt er falsch. Alles steht und fällt mit der Frage, ob seine verbesserte MOND-Theorie für Phänomene gilt, an denen die alte gescheitert ist. Denn mehrere Beobachtungen gaben für die meisten Experten den Ausschlag für das Konzept der Dunklen Materie.

Ein Beispiel dafür liefert der »Bullet-Cluster« (Geschosshaufen, siehe Bild rechts), in dem zwei Galaxienhaufen frontal kollidieren. Das sichtbare Gas prallt aufeinander und wird dabei gebremst. Untersucht man, wie die Schwerkraft des Bullet-Clusters das Licht von Galaxien im Hintergrund ablenkt, zeichnet dieser Gravitationslinseneffekt ein anderes Bild: Ein großer Teil der Masse wandert demnach ungestört durch den Ort des Zusammenstoßes hindurch. Das Verhalten entspricht dem, was viele Physiker von Dunkler Materie erwarten, die außer durch die schwache Gravitationskraft nicht mit sichtbarer Materie wechselwirkt. Für viele Astronomen war diese Beobachtung aus dem Jahr 2006 ein entscheidendes Indiz für die Existenz Dunkler Materie.

Verlinde ist überzeugt davon, dass seine Theorie die Beobachtungen im Bullet-Cluster und ähnliche Befunde in anderen kollidierenden Galaxien erklären kann. Die Raumzeit ließe sich unter dem gravitativen Einfluss der Dunklen Energie nicht so leicht deformieren wie bei klassischer Materie. Darum würde sich das sichtbare Gas im Verlauf des Zusammenstoßes von der unsichtbaren Struktur der Raumzeit trennen.

Ein besonderer Erfolg für Verlinde's Theorie wäre, wenn sie gewisse Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung begründen könnte. Bei dieser handelt es sich um ein Foto des Universums kurz nach dem Urknall: Strahlung, die damals frei wurde, erreicht uns heute noch aus allen Richtungen des Weltalls. Aus ihren kleinen Fluktuationen lesen Kosmologen, wie Materie in der kosmischen Frühzeit wiederholt aufeinander zustürzte, zusammenprallte und daraufhin expandierte. Dunkle Materie hätte sich hingegen ausschließlich verdichtet, da hier die abstoßenden Wech-



MONTAGSMEETING

**WIRTSCHAFT JEDEN MONAT
ANDERS – MIT CAPITAL.**

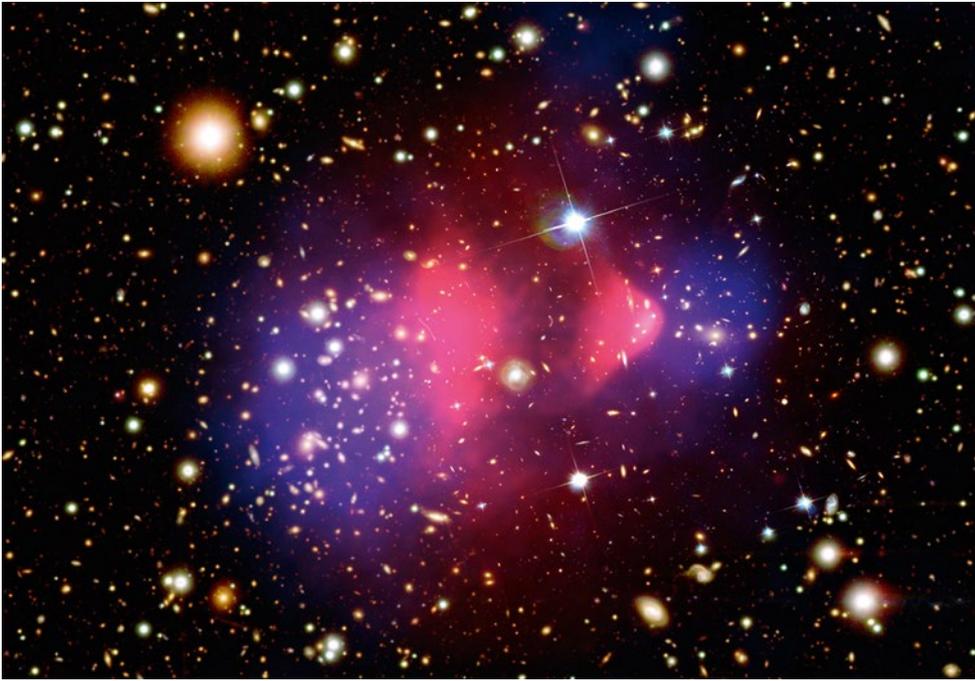
Überraschende Perspektiven, hochwertige Optik und große Reportagen.

Capital

WIRTSCHAFT IST GESELLSCHAFT



Auch als digitale Ausgabe erhältlich.



Der »Bullet-Cluster« besteht aus zwei Galaxien, die sich nach einer Kollision durchdrungen haben. Das sichtbare Gas (rot) wurde dabei abgebremst. Die Gravitation lenkt das Licht von Hintergrundgalaxien ab. Dessen Analyse zeigt: Der Großteil der jeweiligen Massen (blau) bewegte sich fast ungestört weiter. Astronomen interpretieren die Vorgänge im Bullet-Cluster als eine Trennung sichtbarer von Dunkler Materie.

selwirkungen fehlen. Das sollte die Ausschläge der Strahlung genau so verändern, wie man es in der Hintergrundstrahlung heute beobachtet. Verlinde erwartet, dass seine Theorie hier funktioniert – wiederum, weil Materie und der gravitative Effekt der Dunklen Energie unabhängig voneinander sind und sich entsprechend unterschiedlich verhalten. »Wobei ich das noch nicht komplett durchgerechnet habe«, räumt er ein.

Die Verfechter der Dunklen Materie kalkulieren ihre Modelle angesichts der nun aufgetauchten Argumente ebenfalls neu durch. Beispielsweise versuchen sie, eine Erklärung für den von McGaugh und seinen Kollegen entdeckten Zusammenhang zwischen der Rotationsgeschwindigkeit und der Menge an sichtbarer Materie von Galaxien zu finden. Bereits im Oktober 2016 reagierten zwei Astronomenteams auf eine Vorabveröffentlichung der Arbeit und erläuterten unabhängig voneinander, wie sich dieser Zusammenhang mit der Existenz Dunkler Materie in Einklang bringen lasse. Ihre Menge in einem Halo lege fest, wie viel sichtbare Materie eine Galaxie bei ihrer Entstehung erhält. Wenn dem so wäre, dann würde die Rotationsgeschwindigkeit sowohl mit Dunkler als auch mit sichtbarer Materie korrelieren, da beide nicht so unabhängig voneinander sind wie gedacht.

Computersimulationen der Galaxienentstehung deuten keineswegs auf eine solche Verbindung beider Materieformen. Die Fachleute sind nun damit beschäftigt, diverse Szenarien durchzuprobieren. Sollte es nicht gelingen, das Verhalten der Galaxien im Datensatz von McGaugh und seinen Kollegen zu reproduzieren, wäre das Wasser auf die Mühlen der Gegner der Dunklen Materie. »Es handelt sich hier offensichtlich um etwas, mit dem wir uns sehr sorgfältig befassen müssen«, sagt Kathryn Zurek. McGaugh jedenfalls ist skeptisch. Selbst wenn sich die Simulationen passend trimmen ließen, sei es doch un-

gläubwürdig, würden Dunkle und sichtbare Materie an jedem Ort des Universums zufällig die Vorhersage der MOND-Theorie erfüllen. »Käme jemand zu Ihnen und würde behaupten, im Sonnensystem gelte gar nicht das bekannte quadratische Abstandsgesetz, sondern ein ganz anderes, aber zusätzlich seien unsichtbare Objekte gerade so verteilt, dass sich die gewohnte Himmelsmechanik ergibt – dann würden Sie ihn für verrückt erklären«, sagt er. »Genau so etwas verlangen wir hier für die Dunkle Materie.«

Mit Blick auf die vielfältigen indirekten Hinweise auf Dunkle Materie und den weit gehenden Konsens unter Physikern über ihre Existenz hält Zurek sie zwar immer noch für recht wahrscheinlich. »Davon abgesehen muss man stets prüfen, ob man nicht einfach nur einer populären Meinung hinterherläuft«, ergänzt die Forscherin. »Selbst wenn dieses Paradigma alle Phänomene erklärt, könnte da ja noch etwas anderes vorgehen.« ◀

QUELLEN

Brouwer, M. M. et al.: First Test of Verlinde's Theory of Emergent Gravity Using Weak Gravitational Lensing Measurements. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 466, S. 2547–2559, 2017

McGaugh, S. S. et al.: Radial Acceleration Relation in Rotationally Supported Galaxies. In: Physical Review Letters 117, 201101, 2016

Verlinde, E. P.: Emergent Gravity and the Dark Universe. In: arXiv, 1611.02269, 2016



Nach der redigierten Fassung aus »Quantomagazine.org«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus der Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

Spektrum gibt es auch digital.



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

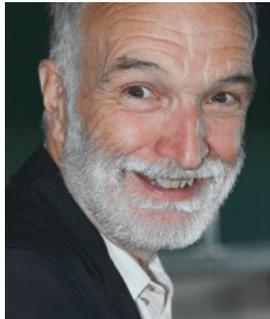
Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

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

www.spektrum.de/digitalabo



SCHLICHTING! ELEKTRISIERENDER SAND



Sandkörner in einem Sturm können sich bei Zusammenstößen gegenseitig aufladen und starke elektrische Felder erzeugen.

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/1443907

► »Der Elektriker Siemens bestieg einmal die Cheops-
pyramide, schon unterwegs hatten ihm die Ge-
sichter seiner Begleiter nicht gefallen. Oben blieb
wenig Zeit, die Aussicht zu bewundern, denn die Bedui-
nen griffen zur Pistole, plünderten Siemens aus. Aber
dieser, dem schon lange die elektrische Ladung der
Wüstenluft aufgefallen war, warf in höchster Schlaueit
seinen Gummimantel unter die Füße, hob den durch-
nästen Finger in die Luft und senkte ihn, gerade als der
Scheich vor ihm stand, langsam auf dessen Nasenspitze.
Ein Funke fuhr aus der lebenden Leidner Flasche hinü-
ber. Die Beduinen rannten schreiend davon ...« So
beschrieb der Philosoph Ernst Bloch (1885–1977) ein
Erlebnis des Erfinders und Industriellen Werner von
Siemens (1816–1892). Ganz so wird es sich kaum zuge-
tragen haben, doch wenn man von den Ausschmü-
ckungen absieht, hat der Bericht einen wahren Kern.
Siemens selbst erzählt davon in »Poggendorff's Annalen
der Physik und Chemie«, einem zur damaligen Zeit
bedeutenden naturwissenschaftlichen Journal: »Dabei
war ein leises, kaum auffallendes Prickeln der dem
Winde entgegengerichteten Hautfläche des Fingers
bemerkt. Ich konnte diese von uns allen constatirte
Thatsache nur als eine elektrische Erscheinung deuten,
und als solche erwies sie sich auch in der That.«

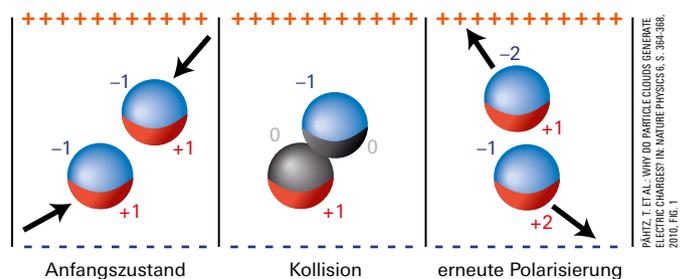
Elektrische Felder durch Sandstürme, bei denen es
mitunter zu starken Entladungen kommt, sind aus zahl-
reichen Reiseberichten bekannt. Durch Experimente
etwa von Siemens' Zeitgenossen Michael Faraday weiß
man, dass dabei Spannungen von mehreren Millionen
Volt im Spiel sind. Es ist eine faszinierende Frage, wie
ein an sich nicht leitfähiger Stoff wie der profane und
sprichwörtlich träge Sand solche drastischen Phäno-
mene hervorrufen kann.

Spontane Aufladung ist nicht nur von Wüstenstürmen
bekannt. Aschewolken bei Vulkanausbrüchen führen oft

zu heftigen Gewittern. Entladungen zwischen in der Luft
verteilten Partikeln verursachen auch in der industriellen
Fertigung manchmal Staubexplosionen.

Die naturwissenschaftliche Forschung hat sich dieser
Erscheinungen früh angenommen. Bis heute ist die
Aufladung von granularen Medien jedoch nicht in allen
Einzelheiten verstanden – noch immer erscheinen phy-
sikalische Publikationen dazu. Vor allem zwei gut doku-
mentierte Tatsachen fordern die Wissenschaftler nach
wie vor heraus: Isolatoren transportieren große Ladungs-
mengen, obwohl sie definitionsgemäß keine freien
Ladungsträger besitzen, und selbst identische Materi-
alien wie Sandkörner laden sich gegenseitig durch
bloßen Kontakt auf.

Bei einem Wüstensturm gerät Sand in den Luftstrom,
wird fortgetragen, schlägt auf dem Untergrund auf,
katapultiert neue Körner heraus und so weiter. Dabei
kommt es zu zahlreichen Kollisionen. Die führen zur
Aufladung, deren Verlauf und Stärke von mehreren
Vorgängen abhängt.



Ein äußeres elektrisches Feld polarisiert nicht leitende Teilchen wie Sandkörner (vereinfacht kugelförmig dargestellt). Bei einem Zusammenstoß tauschen nur die kollidierenden Hälften Ladungsträger aus. Eine neuerliche Polarisation durch das Feld verstärkt die anfängliche Aufladung.

PHILTZ, T. ET AL.: WHY DO PARTICLE CLOUDS GENERATE NET CHARGES? IN: NATURE PHYSICS 6, S. 394–398, 2010, FIG. 1



ISTOCK / PAVLIHA

In der Wüste wirbeln Winde Wolken aus Sand und Staub oft in beträchtliche Höhen, so wie bei diesem Sturm, der bei einer Siedlung in Marokko aufzieht.

Einerseits findet das permanente Bombardement in einem elektrischen Feld statt, das sich unter dem Einfluss der Sandkörnerdynamik aufschaukelt. Der Erdboden ist nämlich gegenüber der Atmosphäre negativ geladen. Das irdische Feld verschiebt die vorhandenen Ladungsträger im eigentlich neutralen und nicht leitenden Sandkorn, so dass sie sich nicht mehr kompensieren, sondern in der unteren Hälfte eine positive und in der oberen eine negative Teilladung entsteht (Illustration links).

Andererseits kann sich die vorhandene Polarisierung verstärken, wenn die Körner aufeinanderprallen. Dann tauschen die kollidierenden Hälften ihre entgegengesetzte Ladung aus und neutralisieren sich. Anschließend kann das elektrische Feld erneut Ladungsträger verschieben. Das Teilchen, das eine positive Ladung übernommen hat, ist nunmehr in der unteren Hälfte zweifach positiv und in der oberen einfach negativ geladen. Das andere trägt in der oberen Hälfte zwei negative Ladungen und in der unteren eine positive.

Natürlich treten in realen Situationen komplexere Konfigurationen und geometrische Verhältnisse auf. Aber sie führen nicht zu wesentlich anderen Ergebnissen als dieses einfache Modell.

Ein solcher Ladungsübertrag kann bei jeder Kollision stattfinden. So werden im Endeffekt positive Ladungen mit dem Sand nach unten und negative nach oben gepumpt, und die Aufladung nimmt mit der Zahl der Stöße zu. Die positiven Ladungen in der Nähe des Erdbodens ziehen die dortigen negativen Ladungsträger an. Dadurch steigert sich deren Konzentration lokal, und das elektrische Feld zwischen Boden und Atmosphäre nimmt im Bereich des Sandsturms zu. Das wiederum bewirkt eine umso ausgeprägtere Polarisierung.

Dieser Prozess kann nicht beliebig weitergehen. Gleichartig geladene Teilchen stoßen sich schließlich ab. Um sich weiter anzunähern und somit aufzuladen, brauchen die einzelnen Körner deswegen mehr Bewegungsenergie, und diese wächst mit der mittleren Windgeschwindigkeit.

Da immer wieder Sand landet und sich neuer vom Boden löst, ist das Ganze eher ein periodisches Geschehen, das zu einem insgesamt stationären Ladungszustand im Sturm führt. Die Forscher verstehen die einzelnen Mechanismen noch nicht im Detail. Alles in allem erscheint so jedoch erklär-

bar, wie heftige Sandstürme zu großen Ladungsdifferenzen führen können, die man sonst nur von Gewittern kennt, mit entsprechend gewaltigen Ausgleichsvorgängen – also Blitzen.

In eine solche Situation ist damals offenbar Siemens geraten. Er hat schnell begriffen, dass man in einem starken elektrischen Feld mit einfachen Mitteln so etwas wie einen Kondensator konstruieren kann. Indem er sich gegen den Boden isolierte und so ein Abfließen der Ladung durch seinen Körper von oben nach unten verhinderte, konnte er sie über einen geerdeten Menschen durch einen überspringenden Funken abführen.

Ist etwa die Luft so elektrisch, wie die See salzig ist? Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

QUELLEN

Bloch, E.: Spuren. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1985

Pähtz, T. et al.: Why Do Particle Clouds Generate Electric Charges? In: Nature Physics 6, S. 364–368, 2010

Siemens, W.: Beschreibung ungewöhnlich starker elektrischer Erscheinungen auf der Cheops-Pyramide bei Cairo während des Wehens des Chamsin. In: Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie 185, S. 355–359, 1860



NEAR PROJECT, JHU/APL (NSSDC.GSFC.NASA.GOV/PLANETARY/MISSION/NEAR/NEAR_EROS.HTML)

ASTRONOMIE FELSBROCKEN IM ALL

Astronomen erforschen Asteroiden, um mehr über die Entstehungsgeschichte unseres Planetensystems zu lernen. Außerdem beobachten sie wachsam, ob einer von ihnen der Erde eines Tages zu nahe kommen könnte.



Detlef Koschny promovierte auf dem Gebiet der Planetenphysik an der Technischen Universität München und arbeitet seit 1997 bei der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA. Dort leitet er seit 2009 die Abteilung für erdnahe Objekte. Seinen ersten Asteroiden hat er 2004 mit einem Amateurteleskop im Erzgebirge beobachtet.

► spektrum.de/artikel/1443909

► Als vor 4,5 Milliarden Jahren eine interstellare Wolke aus Gas und Staub durch ihre eigene Schwerkraft in sich zusammenfiel, entstand in ihrem Zentrum die Sonne. Die Überreste dieser Materiewolke umrundeten den jungen Stern als so genannte protoplanetare Scheibe.

Die Staubteilchen darin wuchsen mit der Zeit durch Kollisionen zu immer größeren Brocken an und formten schließlich daraus die erdähnlichen Planeten und vermutlich auch die Kerne der großen Gasplaneten. Doch nicht alles Material ging darin auf. Bei einigen Klumpen stagnierte das



Zwei sehr verschiedene erdnahe Asteroiden: Die Oberfläche des etwa 25 Kilometer großen Eros (links) erinnert an jene des Erdmonds. Der rund 500 Meter lange Itokawa (rechts) hingegen, von dem die japanische Hayabusa-Mission Staubproben zur Erde gebracht hat, ähnelt eher einem Geröllhaufen.

ISAS / JAXA (SPACEINFO.JAXA.JP/HAYABUSA/PHOTO/)

Wachstum, oder sie brachen bei besonders starken Kollisionen wieder auseinander. Nahe der Sonne entstanden felsartige Objekte – die Asteroiden. In größerer Entfernung konnten flüchtige Stoffe wie Wasser oder leichtere Kohlenstoffverbindungen auskondensieren. Vermischt mit Staub, gefroren diese zu Kometen. Indem wir diese Himmelskörper erforschen, können wir eine Menge über die Entstehungsgeschichte des Sonnensystems lernen.

Die meisten der Asteroiden befinden sich im so genannten Asteroiden- oder Hauptgürtel auf Bahnen zwischen Mars und Jupiter. Ihr Abstand zur Sonne beträgt typischerweise zwei bis vier Astronomische Einheiten (AE; 1 AE ist der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne: 150 Millionen Kilometer). Wir kennen dort mittlerweile rund 700 000 Objekte mit Größen zwischen wenigen hundert Metern und Hunderten von Kilometern. Vermutlich existieren zudem noch sehr viel kleinere Brocken, die allerdings nicht genug Licht reflektieren, um sie mit unseren Teleskopen beobachten zu können.

Vor allem die Riesenplaneten Jupiter und Saturn können diese Himmelskörper mit ihrer Schwerkraft beeinflussen und in Richtung Erdbahn ablenken. Nähert sich ein Objekt der Erde bis auf mindestens 0,3 AE, klassifizieren es die Weltraumforscher als »erdnah« oder NEA (von englisch: near-Earth asteroid). Seit 1990 gibt es Beobachtungsprogramme, hauptsächlich von den USA finanziert, die gezielt nach NEAs suchen. Denn abgesehen davon, dass Asteroiden interessante Forschungsobjekte sind, kön-

nen sie, wenn auch sehr selten, eine Gefahr für die Erde darstellen. Derzeit sind fast 16 000 NEAs bekannt. Die Kleinsten unter ihnen sind nur zu sehen, wenn sie der Erde besonders nahe kommen, und besitzen Durchmesser von wenigen Metern. Der größte bekannte NEA, (1036) Gany-med, misst dagegen etwa 35 Kilometer.

Den ersten Asteroiden überhaupt, nämlich Ceres, entdeckte der italienische Astronom Giovanni Piazzi am

AUF EINEN BLICK KOSMISCHER SCHOTTER

- 1** Asteroiden sind Überreste aus der Frühzeit des Sonnensystems. Um diese Himmelskörper und damit auch unsere Vergangenheit zu erforschen, schicken Forscher Raummissionen zu ihnen.
- 2** Die herumfliegenden Brocken können zu einer Gefahr für die Erde werden. Zudem wecken sie aber auch wirtschaftliche Interessen.
- 3** Die größeren Raumfahrtbehörden befassen sich mit verschiedenen Möglichkeiten, das Einschlagsrisiko zu minimieren, etwa indem sie versuchen, einen Asteroiden von seiner Bahn abzulenken.

Zu Besuch bei Asteroiden

1991: (951) Gaspra	Vorbeiflug der Galileo-Raumsonde
1993: (243) Ida	Vorbeiflug der Galileo-Raumsonde
1997: (253) Mathilde	Vorbeiflug der NEAR-Shoemaker-Sonde
1999: (9969) Braille	Vorbeiflug von Deep Space 1
2000–2001: (433) Eros	Erkundung des ersten NEAs durch NEAR Shoemaker
2002: (5535) Annefrank	Vorbeiflug der Stardust-Sonde
2005: (25143) Itokawa	Erkundung des NEAs durch die japanische Hayabusa-Sonde; Bodenberührung und Probenentnahme. 2010 Rückkehr zur Erde mit ca. 1500 Staubteilchen des Asteroiden
2008: (2867) Šteins	Vorbeiflug durch Rosetta
2010: (21) Lutetia	Vorbeiflug durch Rosetta
2011–2012: (4) Vesta	Erkundung durch die Dawn-Sonde
2012: (4179) Toutatis	Vorbeiflug an diesem NEA durch die chinesische Chang'e-2-Sonde
2015 bis jetzt: (1) Ceres	Erkundung durch die Dawn-Sonde

ersten Januar 1801 durch sein Fernrohr, als er an einem Sternatlas arbeitete. Ceres fiel ihm durch seine Bewegung am Himmel relativ zum Fixsternhintergrund auf. Im 20. Jahrhundert wurden dann die meisten Asteroiden mit Hilfe von Fotoplatten entdeckt. Dazu lichtete man im Abstand von einigen Dutzend Minuten oder einigen Stunden mehrmals ein und dieselbe Himmelsregion ab. Zeigten sich auf den Fotoplatten desselben Gebiets Lichtpunkte, die innerhalb der kurzen Zeit immer weiter wanderten, waren dies Kandidaten für Asteroiden.

Mittlerweile stehen für die optische Beobachtung Digitalkameras zur Verfügung. Mittels spezieller Computerprogramme lassen sich die genaue Position und der Bewegungsverlauf neu entdeckter Asteroiden ermitteln. Um deren Bahn hinreichend genau zu bestimmen, muss man allerdings die Position des Objekts in der Regel über mehrere Tage hinweg verfolgen. Ist die Umlaufbahn bekannt, lässt sich daraus auch der Abstand zur Erde bestimmen und beurteilen, ob es sich um einen NEA handelt.

Anhand der Entfernung können wir zudem die Größe des Objektes abschätzen, wenn wir seine so genannte Albedo berücksichtigen – also das Maß, wie stark es Licht zurückwirft. Die Albedo liegt typischerweise zwischen 4 und 40 Prozent. Angenommen ein Asteroid reflektiert im Mittel 14 Prozent des einfallenden Sonnenlichts. Das 1-Meter-Teleskop der ESA auf Teneriffa kann dann ein nur ein Meter großes Objekt in Mondentfernung (384 000 Kilometer) bei einer Belichtungszeit von 30 Sekunden erken-

nen. Jedoch sind Asteroiden in der Regel weniger als einen Tag lang so nahe bei uns. In einer Entfernung von 30 Millionen Kilometern müsste der Felsbrocken schon 40 Meter groß sein, damit man es beobachten kann. Wäre ein derartiges Objekt auf Kollisionskurs, dann könnten wir es rund drei Wochen vor seinem Aufschlag aufspüren, vorausgesetzt wir blicken im richtigen Moment in die richtige Richtung.

Vor einigen Jahren leistete das Weltraumteleskop NEOWISE einen wichtigen Beitrag zur Größenbestimmung von Asteroiden. Es misst die Helligkeit von Objekten in zwei Wellenlängenbereichen im infraroten Bereich des Spektrums. Daraus erhält man die Temperatur des Asteroiden. Sie hängt davon ab, wie viel Licht seine Oberfläche absorbiert. Je dunkler das Objekt, umso wärmer ist es. Kombiniert man diese Messungen nun mit der visuellen Helligkeit, lässt sich die Albedo des Asteroiden ermitteln und damit die Größe viel genauer bestimmen.

Asteroidenerkundung – vom Foto bis zur Materialprobe im Labor

Kommt ein Asteroid der Erde näher als ein paar Millionen Kilometer und steht er in der richtigen Richtung am Himmel, können ihn auch die von der NASA finanzierten Radarsysteme erfassen. Derzeit sind die Goldstone-Antenne in Arizona und das 300 Meter große Arecibo-Radioteleskop für solche Beobachtungen im Einsatz. Leider stimmt die Geometrie nur in wenigen Fällen, so dass sich bisher nur wenige hundert NEAs auf diese Weise beobachten ließen. Gelingt dies aber, lässt sich beispielsweise die Größe des Objekts auf wenige Meter exakt bestimmen. Auch kann man die Oberflächenzusammensetzung dann recht genau untersuchen und insbesondere erkennen, ob es sich um einen Eisenasteroiden handelt.

Ergänzend verrät uns das Spektrum noch mehr Details über die mineralogische Zusammensetzung des Objekts, etwa ob die Oberfläche, wenn nicht aus Eisen, aus Olivin oder Pyroxen besteht. Das Material sagt zum einen etwas über die Entstehungsgeschichte des Asteroiden aus. Zum anderen gibt es Aufschluss über die Dichte des Objekts, und die ist wiederum bei der Asteroidenabwehr wichtig. Denn ein Eisenasteroid ist viel schwerer und damit gefährlicher als ein Gesteinsasteroid derselben Größe. Allerdings lassen sich spektroskopische Untersuchungen lediglich mit größeren Teleskopen durchführen, wie sie für die Asteroidenbeobachtung nur selten zur Verfügung stehen.

Die beste, aber auch teuerste Methode, einen Asteroiden zu erforschen, ist, eine Raumsonde zu ihm zu schicken. So besuchte die Mission NEAR Shoemaker der NASA im Jahr 2004 den NEA Eros. Die Bilder von ihm zeigen eine mit Einschlagskratern übersäte, mondähnliche Oberfläche.

Viel lieber als gute Fotos oder die Möglichkeit, Asteroiden oder auch Kometen vor Ort zu erkunden, hätten Wissenschaftler gerne eine Materialprobe dieser Himmelskörper in ihrem irdischen Labor. Denn auch wenn die Sonde Rosetta und der Lander Philae gut ausgestattet waren: Auf der Erde verfügen wir nach wie vor über Messgeräte, welche die Qualität von Instrumenten auf Satelliten

bei Weitem übertreffen – schon allein deshalb, weil sie viel größer und schwerer sein können. Bestimmte Messungen wie die Altersbestimmung von Gestein nach der Radioisotopenmethode lassen sich mit satellitengestützten Instrumenten noch gar nicht durchführen.

Japanische Forscher haben bereits 2005 mit ihrer Mission Hayabusa zumindest ein paar kleine Staubteilchen des Asteroiden Itokawa eingesammelt, die 2010 auf der Erde eintrafen. Aktuell wird das Material in Laboren auf der ganzen Welt untersucht.

Interessanterweise zeigte Itokawa ein völlig anderes Erscheinungsbild als Eros. Er erinnert vielmehr an einen Geröllhaufen. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre dürfte ein solcher Brocken wohl relativ schnell zerbrechen und sich damit ganz anders verhalten als ein kompakter Körper.

Leider sind bis dato erst drei NEAs von Raumsonden untersucht worden. Bei den großen Raumfahrtbehörden denkt man darum über kleine Vorbeiflugmissionen nach, mit denen sich weitere NEAs relativ kostengünstig erkunden lassen sollten.

Seit 2016 ist die NASA-Mission OSIRIS-REx auf dem Weg zum Asteroiden Bennu, um von dort einige Dutzend Gramm Material zur Erde zu bringen. Die Sonde soll den Asteroiden 2018 erreichen und ihn für einige Zeit vor Ort erkunden, bevor sie im Juli 2020 eine Probe von der Oberfläche nehmen wird. Mit einer Erdrückkehrkapsel wird diese Probe dann im September 2023 zur Erde gelangen.

Außerdem hat sich die NASA in ihrem Discovery-Programm kürzlich gleich für zwei wissenschaftliche Missio-

nen zu Asteroiden entschieden. Die Sonde Lucy soll insgesamt sechs so genannte Jupiter-Trojaner ansteuern. Diese Objekte hat Jupiter mit seiner Schwerkraft eingefangen, und sie kreisen nun in der gleichen Entfernung wie der Gasriese um die Sonne. Wir wissen nicht, woher sie stammen – möglicherweise aus dem jenseits der Neptunbahn liegenden Kuipergürtel. Mit dieser Mission könnten wir also die Entstehungsgeschichte des äußeren Sonnensystems erforschen. Die zweite Sonde, Psyche, ist nach ihrem Zielasteroiden benannt, der nach jetzigem Wissen hauptsächlich aus Eisen besteht. Möglicherweise handelt es sich dabei um das Überbleibsel des Kerns eines ehemaligen kleinen Planeten.

Kommerzieller Bergbau im All?

Insbesondere in den USA bekunden seit einigen Jahren Privatunternehmer ihr Interesse daran, auf Asteroiden als Rohstoffquelle zurückzugreifen. Sie spekulieren darauf, dort seltene Erden abzubauen und zur Erde zu schaffen. Das wäre allerdings ziemlich teuer. Allein die OSIRIS-REx Mission der NASA, die nur 100 Gramm Asteroidenmaterial zur Erde bringen soll, kostet viele hundert Millionen Dollar. Zudem besitzen wir noch lange keine geeigneten Technologien für einen solchen Asteroidenbergbau.

Mittlerweile konzentrieren sich die Pläne der »Asteroid Miners« darauf, Treibstoff oder einfach Wasser auf einem Asteroiden oder auch auf unserem Mond zu erzeugen. Denn Letzteres ist in Asteroidengestein zu mehreren



Die ESA plant derzeit mit dem NEO Survey Telescope (NEOSTEL) ihr eigenes Suchinstrument. Mit vier dieser Teleskope könnte man den gesamten Himmel in einer Nacht nach Objekten der Größe des Tunguska-Asteroiden absuchen.

ESA / A. BAKER (WWW.ESA.INT/SPACE/IMAGES/2017/02/16/NEO_SURVEY/01.DR)

Prozent eingeschlossen und ließe sich verhältnismäßig einfach durch Erhitzen extrahieren. Wasserdampf könnte dann als Treibstoff den Rückflug des Satelliten sicherstellen.

Zwar ist das noch Zukunftsmusik, aber immer mehr Firmen und auch Weltraumbehörden beschäftigen sich mit diesem Thema. Selbst die Politik ist aktiv. So hat Luxemburg Anfang 2016 angekündigt, durch Steuervorteile und staatliche Aufträge verstärkt Industriebranchen anzuziehen, die sich mit der Ressourcengewinnung im Weltraum befassen.

Bedrohung aus dem All: Das Risiko für einen verheerenden Einschlag ist extrem gering

Neben dem wissenschaftlichen und dem wirtschaftlichen Wert stellen Asteroiden aber auch eine Gefahr für die Erde dar. Immer wieder treffen solche Objekte auf die Oberfläche unseres Heimatplaneten. Glücklicherweise geschieht das umso seltener, je größer sie sind. So hat ein Asteroid von zehn Kilometer Durchmesser vor rund 65 Millionen Jahren mindestens die Hälfte aller damaligen Tierarten ausgelöscht, darunter die Dinosaurier. Statistisch gesehen kommt ein solches Ereignis allerdings nur einmal etwa alle 100 Millionen Jahre vor. Dagegen können wir uns an kleinere Einschläge sehr wohl noch selbst erinnern.

Im Februar 2013 ist ein 20 Meter großer Brocken aus dem All in der Atmosphäre über der sibirischen Stadt Tscheljabinsk zerplatzt. Die Schockwelle hat gewaltigen Schaden an Gebäuden angerichtet. Über 1500 Personen wurden verletzt, vor allem durch die herumfliegenden Splitter zerberstender Fensterscheiben. 2008 sagten Astronomen den Eintritt eines sieben Meter großen Objekts in die Atmosphäre über dem Sudan vorher und konnten diesen dann auch beobachten. Es richtete keinerlei Schaden an. Die nach einer gezielten Suche gefundenen Bruchstücke davon boten den Wissenschaftlern erstmals die Gelegenheit, direkt die Beobachtungen des Asteroiden im Weltraum mit Labormessungen desselben Materials nach seinem Niedergang auf die Erde zu vergleichen.

Ein nur ein Meter großer Gesteinsbrocken schlug 2007, ohne vorher zu zerbrechen, im Hochland von Peru ein und erzeugte einen Krater mit 14 Meter Durchmesser. Auch dort entstand glücklicherweise kein signifikanter Schaden. 1947 ging über Sibirien ein Eisenasteroid auf die Erde nieder, der mehrere metergroße Krater erzeugte. Noch heute kann man Überreste davon unter dem Namen Shikote-Alin bei Meteoritenhändlern kaufen. Das größte Ereignis, das mit relativ modernen Messmethoden registriert wurde, ist das Tunguska-Ereignis von 1908. Die Größe des Objekts schätzen Forscher auf etwa 30 bis 40 Meter. Anscheinend brach es in der Atmosphäre komplett auseinander, denn man hat keine Meteoriten gefunden. Wohl aber legte die Schockwelle mehr als 2000 Quadratkilometer Waldfläche um. Träte ein solches Ereignis – das statistisch gesehen alle paar hundert Jahre stattfindet – über einer Stadt ein, dürften viele Tote zu beklagen sein.

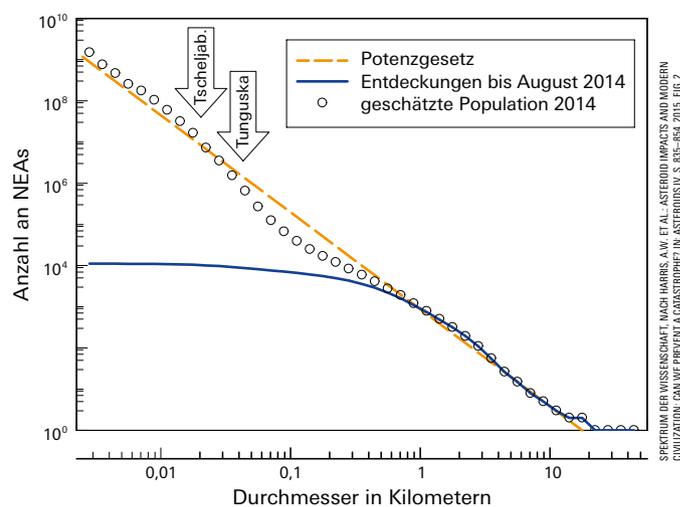
Diese Zahlen zeigen zwar: Das Risiko, beim unaufmerksamen Überqueren einer Straße zu verunglücken, ist we-

sentlich größer, als von einem Asteroiden getroffen zu werden. Allerdings könnten bei einem tatsächlichen Einschlag mit einem Mal sehr viele Menschen zu Schaden oder gar ums Leben kommen. Damit vergleichbar wäre die Flutwelle, die bei Fukushima 2011 ein Kernkraftwerk beschädigte, ein Ereignis, das statistisch gesehen nur alle 1500 Jahre vorkommt.

Im Unterschied zu Erdbeben oder anderen Naturkatastrophen können wir einen Asteroideneinschlag aber vorhersehen, indem wir die Positionen möglichst vieler Asteroiden bestimmen und ihre Bahnen vorherberechnen. Und wenn ein solches Objekt mit Kurs auf die Erde kleiner als etwa 500 Meter ist, könnten wir es sogar von seiner Bahn ablenken und die Bedrohung abwenden.

Bereits seit Anfang der 1990er Jahre sucht die NASA systematisch nach NEAs. Mit dem Catalina Sky Survey (CSS), der 1998 startete, stieg die Entdeckungsrate rapide. Im Januar 2000 waren ungefähr 900 NEAs bekannt, mittlerweile sind es fast 16000. Seit 2009 beteiligt sich die ESA im Rahmen ihres Programms zur Weltraumlageerfassung (Space Situational Awareness, SSA) daran. Mit dem 1-Meter-Teleskop auf Teneriffa führt sie vor allem Nachbeobachtungen, die für die genaue Bahnbestimmung neu entdeckter Asteroiden wichtig sind. Außerdem unterstützt die ESA andere Sternwarten in Europa wie die Klet'-Sternwarte in Tschechien oder die Calar-Alto-Sternwarte in Spanien finanziell.

Zudem entwickelt die ESA derzeit ein eigenes Suchteleskop. Dieses wird einen Hauptspiegel mit einem Durchmesser von 1,2 Metern besitzen und damit ein Gesichtsfeld am Himmel abdecken, das mehr als 120-mal so groß ist wie jenes des Vollmonds. Vier solcher Teleskope könnten in einer Nacht den gesamten Himmel absuchen. Ein Objekt wie den Tunguska-Asteroiden könnte es rund drei Wochen vor seinem eventuellen Einschlag entdecken.



Das Modell für die Größenverteilung von erdnahen Objekten (NEAs) sagt annähernd ein Potenzgesetz vorher. Ein Vergleich mit den bereits entdeckten NEAs zeigt, dass es vor allem von den kleineren unterhalb 100 Meter Größe noch wesentlich mehr geben sollte, als wir bisher kennen.



NASA und ESA planen, gemeinsam eine Einschlagssonde (AIDA) und einen Beobachtungssatelliten (AIM) zu dem Doppelasteroiden Didymos zu schicken und ein Ablenkmanöver zu testen. Die Finanzierung von AIM (ESA) ist aber nicht gesichert.

Bislang ist eines dieser Teleskope finanziert und sollte in den nächsten ein bis zwei Jahren in Betrieb gehen. Über den Aufstellungsort wird noch beraten.

Außerdem betreibt die ESA das NEODyS-System (Near-Earth Objects Dynamic Site), bisher an der Universität Pisa ansässig und künftig bei der ESA-Niederlassung in Frascati. Dort werden die Bahnen von sämtlichen NEAs, die das amerikanische Minor Planet Center sammelt, bis 100 Jahre in die Zukunft vorausberechnet. Kommen diese der Erde besonders nahe, berechnet NEODyS unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten eine Einschlagswahrscheinlichkeit. Falls diese größer als null ist, kommen die Kandidaten auf eine Risikoliste (<http://neo.ssa.esa.int/risk-page>).

Bei einem Objekt mit hoher Einschlagswahrscheinlichkeit vergleichen die europäischen Astronomen zunächst ihre Daten mit jenen ihrer amerikanischen Kollegen vom Sentry System am Jet Propulsion Laboratory, bevor sie diese veröffentlichen – und umgekehrt.

Asteroidenabwehr als internationale Angelegenheit

Für eventuell notwendige Abwehrmaßnahmen steht die NASA mit der US-amerikanischen Katastrophenschutzbehörde FEMA (Federal Emergency Management Agency) in Verbindung, die ESA mit den Europäischen Katastrophenschutzbehörden. Im Ernstfall würde die ESA Informationen über Ort, Zeitpunkt und eine mögliche Schadensabschätzung an die lokalen Einrichtungen weitergeben. Letztere würden dann Maßnahmen zum Bevölkerungsschutz einleiten. Wäre beispielsweise ein Objekt wie bei Tscheljabinsk im Anflug, würde man die Bevölkerung über Rundfunk und Fernsehen anweisen, sich von Fensterscheiben fernzuhalten. Denn hätte man das Objekt damals rechtzeitig erkannt, hätten sich auf diese Weise wohl fast alle Verletzungen vermeiden lassen.

Bei einem Objekt zwischen 50 und 100 Metern könnte man bei entsprechender Vorlaufzeit den Asteroiden mit einem so genannten Kinetic Impactor von seiner Bahn ablenken. Dieser recht schwere Satellit würde mit hoher

Geschwindigkeit auf den Asteroiden zufliegen und ihn durch den Aufprall etwas aus seiner Bahn bringen, so dass er die Erde verfehlt. Würden wir zum Beispiel feststellen, dass der Asteroid Apophis bei seinem Vorbeiflug an der Erde im Jahr 2036 zur Gefahr würde, müssten wir etwa zehn Jahre vorher einen Satelliten der Größe von Rosetta auf ihn schießen, um ihn auf eine sichere Bahn zu lenken.

In Zusammenarbeit mit der NASA hatte die ESA dazu bereits eine Testmission vorgestellt, die zwei Sonden zu einem Asteroiden fliegen sollte. Dabei sollte die NASA den Kinetic Impactor AIDA (Asteroid Impact Deflection Assessment) bauen. Die ESA wollte ursprünglich einen Beobachtungssatelliten namens AIM (Asteroid Impact Mission) beisteuern.

Bei einem Start im Jahr 2020 würde dieser Impactor den Binärasteroiden Didymos erreichen und auf dem kleineren der beiden Objekte (genannt Didymoon) einschlagen. Das würde die Bahn des Systems nicht verändern, wohl aber die Umlaufperiode von Didymoon um Didymos, was sich sogar von der Erde aus beobachten ließe. Leider hat die letzte Ministerratskonferenz der ESA die finanziellen Mittel für AIM nicht bewilligt. Selbst wenn es nicht gelingen sollte, AIM doch noch zu bauen, wäre der amerikanische Teil der Mission sinnvoll und würde uns zeigen, ob wir tatsächlich in der Lage wären, eine Asteroidenabwehrmission durchzuführen.

Allerdings wirft ein derartiges Szenario auch viele Fragen auf. Was passiert etwa, wenn die Ablenkung nicht oder nur teilweise funktioniert, und der Asteroid dadurch in einem anderen Land als vorausberechnet niedergeht und beide Staaten zudem verfeindet sind? Wer sollte so eine Mission finanzieren? Wäre eine solche Aktion rechtlich überhaupt erlaubt?

Mittlerweile befassen sich sehr viele Staaten mit der möglichen Bedrohung durch Asteroiden. Da dies eine internationale Angelegenheit ist, haben sich unter dem Dach der Vereinten Nationen kürzlich zwei Arbeitsgruppen dazu gebildet: das International Asteroid Warning Network (IAWN) und die Space Mission Planning Advisory Group (SMPAG). Bei IAWN haben sich alle Beobachter und Bahnmodellierer zusammengeschlossen. Sie sind es letztlich, die eine Einschlagswarnung herausgeben können. SMPAG bietet eine Plattform für alle weltraumfahrenden Nationen, sich zum Thema Asteroidenabwehr auszutauschen.

Glücklicherweise ist aber derzeit kein Asteroid bekannt, der innerhalb der nächsten 100 Jahre für die Menschheit zur Bedrohung werden könnte. So können sich die Forscher auch weiterhin sorgenfrei mit der Entstehungsgeschichte des Sonnensystems und dem Ursprung von Leben befassen, statt mit dessen Auslöschung. Denn Asteroiden scheinen eine wichtige Quelle für das Wasser auf der Erde zu sein, ohne das Leben gar nicht möglich wäre. ◀

LITERATURTIPP

Mokler, F.: *Asteroiden im Visier.* In: *Spektrum August 2015 S. 50–55*
In diesem Artikel erfahren Sie mehr über internationale Aktivitäten zur Asteroidenabwehr.

TECHNIK

ENERGIEREVOLUTION

FÜR AFRIKA

Sinkende Kosten für Energie aus erneuerbaren Quellen könnten vielen afrikanischen Ländern den Sprung in eine saubere Zukunft ermöglichen. Damit würde sich der Kontinent den Umweg über die klassischen schmutzigen Quellen sparen.



Erica Gies ist Journalistin in Victoria, British Columbia (Kanada).

» spektrum.de/artikel/1443911

► In der Nähe von Ouarzazate in Marokko, am Rand der Sahara, stehen in einem Tal rund 500 000 Parabolspiegel in Reih und Glied und folgen der Bewegung der Sonne über den Himmel. Das 620 Millionen Euro teure Solarkraftwerk hat im Februar 2016 seinen Betrieb aufgenommen – und wird nicht lange das einzige seiner Art bleiben. Marokko hat sich verpflichtet, bis zum Jahr 2020 volle 42 Prozent seines elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energiequellen zu erzeugen.

Mehrere afrikanische Länder beginnen, aggressiv ihre Kapazitäten im Bereich Sonnen- und Windenergie auszubauen. Die Dynamik des Prozesses wirft die Frage auf, ob

ein großer Teil des Kontinents sich direkt in eine saubere Zukunft katapultieren kann, ohne den Umweg über die Energiegewinnung durch Verbrennung, mit der Europa, die USA, China und andere nach wie vor die Umwelt verschmutzen und das Weltklima gefährden.

»Die afrikanischen Nationen müssen sich gar nicht erst in die Hände der alten, kohlenstoffreichen Technologien begeben«, schrieb 2015 Kofi Annan, der frühere Generalsekretär der Vereinten Nationen. Annan ist Vorsitzender des »Africa Progress Panel«, eines informellen Zusammenschlusses von zehn prominenten Einzelpersonen. »Wir können jedermann Zugang zu Energie verschaffen, indem wir ein Entwicklungsstadium überspringen und direkt zu den neuen Technologien übergehen, die überall auf der Welt die Energieversorgung revolutionieren.«

Das ist eine mitreißende Botschaft, nicht nur für die Afrikaner, sondern für die gesamte Menschheit. Denn dass die Nachfrage nach elektrischer Energie auf dem Kontinent explodiert, kann den Rest der Welt nicht kalt lassen – ganz wörtlich gemeint. Die Bevölkerung Afrikas hat die höchste Wachstumsrate auf der Welt. Nach seriösen Prognosen wird sie sich bis 2100 vervierfachen. Mehr als die Hälfte der heute in Afrika lebenden 1,2 Milliarden Menschen haben noch keinen Zugang zu Elektrizität; das könnte sich bald ändern. Produziert man aber diese Energie aus Kohle, Öl und Erdgas, würde das die internationalen Anstrengungen zur Eindämmung der Erderwärmung zunichtemachen. Doch eine umweltverträglichere Lösung ist möglich und vielleicht sogar einfacher durchzusetzen als in den entwickelten Ländern. Denn die Afrikaner müssen die schmutzigen Kohlekraftwerke mitsamt der zugehö-

AUF EINEN BLICK

AFRIKA WIRD ELEKTRIFIZIERT

- 1 Noch hat mehr als die Hälfte aller Einwohner Afrikas keinen Zugang zu elektrischem Strom.
- 2 Sinkende Preise geben dem Kontinent die Gelegenheit, das Stadium der Verbrennungskraftwerke zu überspringen und ohne diesen Umweg eine Energieinfrastruktur mit erneuerbaren Quellen aufzubauen.
- 3 Der Ausbau erfordert dennoch gewaltige Geldmittel, die zum größten Teil durch private Investoren aufgebracht werden sollen.

rigen Infrastruktur gar nicht erst abschaffen, weil sie ohnehin kaum welche besitzen.

Mehrere Faktoren verleihen der Entwicklung Schwung. Mehr als ein Drittel der afrikanischen Nationen beziehen ihre Elektrizität im Wesentlichen aus Wasserkraftwerken, und Trockenperioden haben in den vergangenen Jahren diese Energiequellen unzuverlässig gemacht. In Ländern, die hauptsächlich von fossilen Brennstoffen abhängen, hatten die Betreiber von Kohle- und Ölkraftwerken mit Preisschwankungen und zunehmenden Umweltauflagen zu kämpfen. Gleichzeitig sind die Kosten für erneuerbare Energiequellen erheblich gesunken. Und wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass das Potenzial für Sonnen- und Windenergie auf dem Kontinent weit größer ist als vermutet – bis zum 3700-Fachen des gegenwärtigen Verbrauchs an elektrischer Energie.

All diese Faktoren haben das Interesse an umweltfreundlicher Energiegewinnung rasant ansteigen lassen. Forscher erstellen Karten der geeignetsten Standorte. Vorausschauende Unternehmen investieren in Sonnenenergieanlagen und Windfarmen. Und Regierungen arbeiten mit internationalen Entwicklungsbehörden zusammen, um ihre Regionen für private Unternehmen attraktiver zu machen.

Doch das reicht nicht, um Afrika den Weg in eine saubere, elektrifizierte Zukunft zu bahnen. Die Planer benötigen mehr Daten, um die besten Standorte für ihre Projekte

ausfindig machen zu können. Unternehmer zögern mit Investitionen – insbesondere in Ländern, die von Korruption und instabilen Regierungen geplagt waren. Und um die Infrastruktur der Energieversorgung aufzubauen, muss ein Land schon einen zweistelligen Milliardenbetrag auf den Tisch legen.

Diesen Hindernissen zum Trotz sind die grünen Ambitionen in Afrika größer denn je. Eddie O'Connor, Vorstandschef der Firma *Mainstream Renewable Power* in Dublin, die Sonnen- und Windkraftwerke in Afrika baut, sieht im Ausbau der erneuerbaren Energien in Afrika eine »einmalige geschäftliche Chance für mutige Unternehmen«.

Die Stauseen Afrikas laufen leer

Für viele afrikanische Länder gehören Stromausfälle zum Alltag. Aber *Sambia* hat es im vergangenen Jahr so schlimm getroffen wie kaum ein anderes Land. Häufige und lang andauernde Ausfälle lähmten die Wirtschaft des Landes. Die Trinkwasserversorgung der Hauptstadt *Lusaka* brach zusammen, Betriebe mussten ihre Produktion drastisch reduzieren, Massenentlassungen waren die Folge.

Ursache dieser Probleme ist die schlimmste Dürreperiode im südlichen Afrika seit 35 Jahren. *Sambia* bezieht fast seinen gesamten Strom aus Wasserkraftwerken, hauptsächlich von drei großen Staudämmen. Und dort ist der Wasserspiegel dramatisch gesunken. Auch die Nachbar-



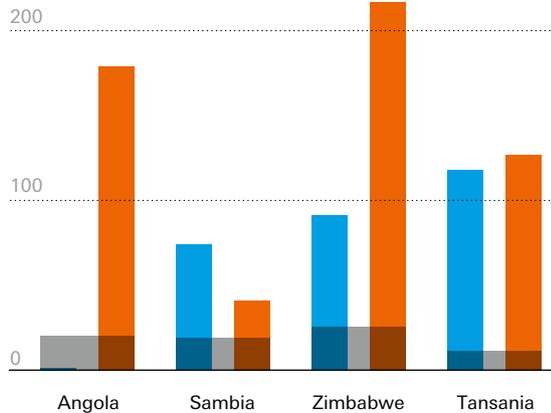
Die Jeffreys Bay Wind Farm an der windreichen Südküste Südafrikas westlich von Port Elizabeth liefert reichlich 50 Megawatt elektrische Energie im Jahresdurchschnitt – ausreichend für 100 000 Haushalte.

MIT FOTOL. GEL. VON MAINSTREAM RENEWABLE POWER

Erneuerbare Energien in Afrika

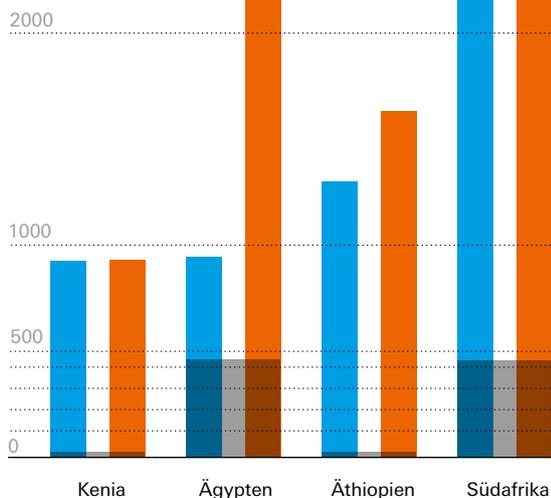
Gelegenheit, aus Wind und Sonne Strom zu erzeugen, gibt es reichlich in Afrika – weit mehr, als dessen Einwohner in absehbarer Zukunft verbrauchen werden.

500 Terawattstunden pro Jahr



■ Windkraft
■ Fotovoltaik
■ geschätzte Nachfrage 2030

3000 Terawattstunden pro Jahr



länder Simbabwe, Südafrika und Botswana waren gezwungen, ihre Stromproduktion zu senken. Und die Wasserknappheit könnte sich noch verschlimmern. Nach aktuellen Klimaprognosen werden durch die Erderwärmung in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts die Regenfälle im südlichen Afrika weiter abnehmen.

Erneuerbare Energiequellen könnten beizeiten die Lücke füllen, denn Windkraft- und Solaranlagen lassen sich weitaus schneller errichten als Wasser-, Kern- oder konventionelle Verbrennungskraftwerke. Und da jede einzelne Anlage relativ klein ist, kann man ihren Ausbau relativ genau dem wachsenden Bedarf anpassen. Vorreiter sind zurzeit Ägypten, Äthiopien, Kenia, Marokko und Südafrika.

Das größte Hindernis ist der Mangel an Daten. Was es an Karten zu Windrichtungen, Windstärke und Sonnenscheindauer gibt, ist nicht hinreichend genau, um Unternehmen die Auswahl geeigneter Standorte zu ermöglichen, sagt Grace Wu, Energieforscherin an der University of California in Berkeley. Ein Gemeinschaftsprojekt des Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) und der in Abu Dhabi ansässigen International Renewable Energy Agency (IRENA) soll diesem Mangel abhelfen. Der 100-seitige Bericht, den Wu gemeinsam mit vier weiteren Autoren verfasst hat, ist nach ihrer Aussage für die meisten der 21 untersuchten Länder die bislang umfassendste Kartierung. Er führt die verfügbare Sonnen- und Windenergie in den einzelnen Ländern auf (Karte S. 76), dazu Daten wie die Nähe zum bestehenden Stromnetz und zu potenziellen Abnehmern sowie mögliche soziale und ökologische Auswirkungen. »Die IRENA-LBNL-Untersuchung ist die einzige, die eine konsistente Methodik auf eine große Region in Afrika anwendet«, betont Wu.

Bis dahin hatten hauptsächlich Forscher im Regierungsauftrag oder Unternehmen solche kleinteiligen Messungen der Wind- und Sonnenverhältnisse durchgeführt – und ihre Ergebnisse sorgsam unter Verschluss gehalten. Die Forscher von IRENA und LBNL verwendeten Satellitendaten und Messungen am Erdboden, die sie von Vaisala, einem auf Umweltüberwachung spezialisiertem Unternehmen in Finnland, eingekauft hatten. Inzwischen hat Vaisala die Daten im von IRENA herausgegebenen »Global Atlas for Renewable Energy« öffentlich zugänglich gemacht. Das Team hat außerdem Daten wie die Lage von Straßen, Städten und Stromtrassen eingearbeitet, die für eine Standortentscheidung relevant sind. »Niemand will einen Wald abholzen, um dort ein Sonnenkraftwerk zu bauen«, so Koautor Ranjit Deshmukh, der ebenfalls zum Thema Energieversorgung an der University of California forscht.

Die verfügbare Menge an grüner Energie in Afrika ist gewaltig (siehe »Erneuerbare Energien in Afrika«, links). Die Autoren eines weiteren IRENA-Berichts ermittelten aus den Daten von sechs regionalen Untersuchungen ein Potenzial von 300 Millionen Megawatt für Sonnenenergie sowie 250 Millionen Megawatt für Windenergie. Im Gegensatz dazu betrug die nominale Kapazität aller Kraftwerke auf dem Kontinent Ende 2015 gerade einmal 150 000 Megawatt. Und lediglich 3,6 Prozent davon entfallen auf Sonnen- und Windkraftwerke.

»Die Schätzungen der verfügbaren Windenergie waren eine große Überraschung«, sagt Oliver Knight, erfahrener

Experte für Energietechnik beim Energy Sector Management Assistance Program der Weltbank in Washington. Dass Afrika mit reichlich Sonneneinstrahlung gesegnet ist, war nicht unbedingt eine Neuigkeit. Aber Wind? »Vor zehn Jahren hätte einem jeder gesagt, es gebe doch gar keinen Wind in Regionen wie Ostafrika.«

Inzwischen führt die Weltbank ihre eigenen Untersuchungen durch, bei denen in ausgewählten Gebieten einiger Länder Windgeschwindigkeiten und Sonneneinstrahlung alle zehn Minuten erfasst werden. Sie wird die Regierungen bitten, ihre eigenen Geodaten beizusteuern, und alle Informationen in einem nutzerfreundlichen und leicht verständlichen Format veröffentlichen. »Jeder kleine Sachbearbeiter in einem Entwicklungsland soll online gehen und mit den Daten herumspielen können«, sagt Knight.

Wer privates Kapital hereinholen will, muss den Investoren Sorgen nehmen

In der Halbwüste Karoo in Südafrika erhebt sich ein Ensemble weiß leuchtender Windkraftanlagen 150 Meter über das hügelige Grasland. Mainstream Renewable Power hat die Anlage im Juli 2016 in Betrieb genommen, 17 Monate nach Baubeginn. Die 35 Windräder erzeugen 80 Megawatt für Südafrikas Stromversorgung, genug für 70 000 Haushalte. Die Noupoot Wind Farm ist nur eine von 100 Anlagen, die in den vergangenen vier Jahren in Südafrika entwickelt wurden, als die Kosten für Strom aus Wind und Sonne unter diejenigen der fossilen Konkurrenz fielen und sich der Bau von zwei neuen großen Kohlekraftwerken verzögerte. Südafrika ist für den schnellen Ausbau der erneuerbaren Energiequellen gut gerüstet, nicht zuletzt, weil das Land in Daten investiert hat.

Die Umweltforscherin Lydia Cape arbeitet für das Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), ein nationales Forschungszentrum in Stellenbosch. Sie und ihr Team haben Karten für die Planung großer Windkraft- und Solaranlagen und die Weiterentwicklung des Stromnetzes produziert. Sie bewerteten die Qualität möglicher Standorte nicht nur nach der dort verfügbaren Sonnen- oder Windenergie, sondern auch nach Kriterien wie Nähe zum Abnehmer oder zumindest zum vorhandenen Hochspannungsnetz, wirtschaftlichen Vorteilen für die Region und Umweltverträglichkeit. Die Regierung Südafrikas folgte den Empfehlungen des CSIR und wies acht besonders geeignete Zonen mit insgesamt 80 000 Quadratkilometern, deutlich mehr als die Fläche Bayerns, als Vorranggebiete aus. Dort wurde das Prüfverfahren zur Umweltverträglichkeit für Projekte im Bereich erneuerbarer Energie und den Bau von Stromtrassen gestrafft.

Doch damit die afrikanischen Nationen sich in großem Umfang grünen Energiequellen zuwenden können, muss viel Geld fließen. Allein um die Nachfrage nach Energie in den Staaten südlich der Sahara zu befriedigen, sind nach Schätzungen der Weltbank pro Jahr 38 Milliarden Euro aufzuwenden. Aber das gesamte Bruttosozialprodukt des Kontinents beträgt nur das 16-Fache dieser Summe. Aus öffentlichen Kassen kommt allenfalls ein kleiner Bruchteil des Notwendigen; umso wichtiger ist es, privates Kapital herbeizuschaffen. In den Augen vieler Investoren gelten afrikanische Länder jedoch als riskant, nicht zuletzt, weil

Vereinbarungen dort erst nach langen, komplizierten Verhandlungen zu erzielen und die Kapitalkosten hoch sind. »Es ist eine große Herausforderung«, sagt Daniel Kammen, Sonderbeauftragter für Energie des US-Außenministeriums und Energieforscher an der University of California in Berkeley. »Die Kreditwürdigkeit vieler dieser Länder wird nicht gerade hoch bewertet.«

Elham Ibrahim, Kommissarin für Infrastruktur und Energie der Afrikanischen Union, empfiehlt den Ländern daher geeignete Schritte, um privaten Investoren die Sorgen zu nehmen. Am wichtigsten sei es, dass ein Land eine eindeutige Gesetzeslage zu Gunsten erneuerbarer Energien und die jahrelange Einhaltung kommerzieller Vereinbarungen

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ANETT BAKOS / STOCK.ADOBE.COM

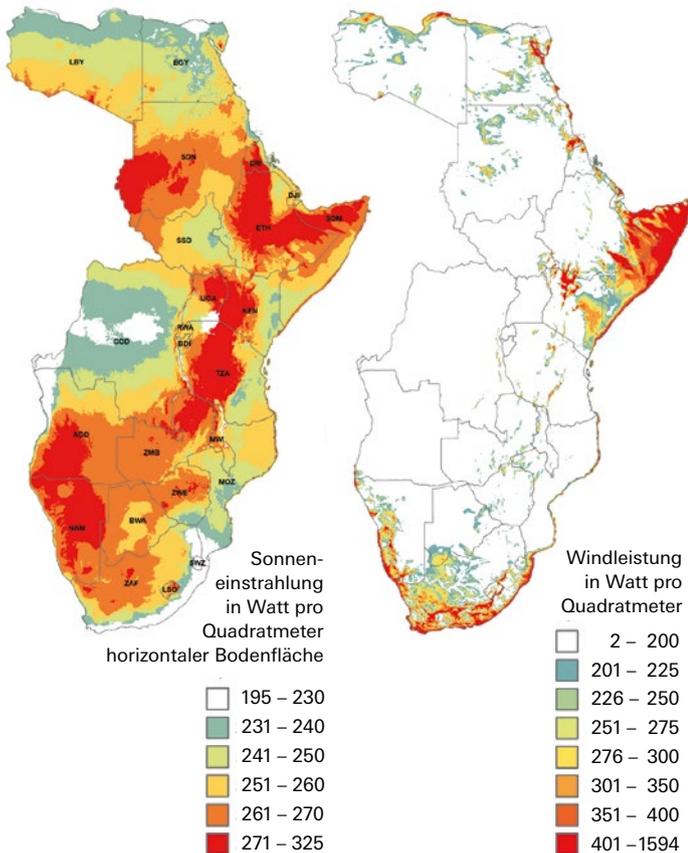
und Gesetze vorweisen könne. Südafrika geht mit gutem Beispiel voran. 2011 führte das Land ein transparentes Verfahren für Projektausschreibungen ein, das Renewable Energy Independent Power Producer Procurement Programme (REIPPPP). Das Programm hat bereits private Investitionen von mehr als 13 Milliarden Euro herbeigeführt, die ihrerseits Wind- und Solarkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 6327 Megawatt finanzieren.

Mainstream Renewable Power hat den Zuschlag für den Bau von sechs Windfarmen und zwei Fotovoltaikkraftwerken erhalten. »Das Programm ist makellos«, sagt O'Connor. »Sie veröffentlichen ihre Ergebnisse. Sie geben staatliche Garantien. Sie verschleppen nicht über Gebühr.« Obwohl der größte Netzbetreiber des Landes erneuerbare Energien nur zögernd unterstützt, halte die Regierung an dem Programm fest. »Ich würde sagen, das Risiko für eine Investition in erneuerbare Energien ist in Südafrika geringer als in England.«

Für Länder mit weniger glänzenden Aussichten hat die Weltbank im Januar 2015 das Projekt Scaling Solar aufgelegt. Mit einer ganzen Reihe von Garantien verringert es das Risiko für Investoren, erläutert Yasser Charafi, leitender Investitionsbeauftragter für afrikanische Infrastruktur der zur Weltbank gehörenden International Finance Corporation (IFC) in Dakar. Die IFC bietet günstige Darlehen an, die Weltbank garantiert, dass die Regierungen die produzierte Energie abnehmen, und die ebenfalls zur Weltbankgruppe gehörende Multilateral Investment Guarantee Agency bietet Versicherungen gegen Kriege und Unruhen an.

In Sambia, dem ersten Land, das Zugang zu Scaling Solar erhielt, wurden zwei Solarenergieanlagen mit zusammen 73 Megawatt bewilligt. Senegal und Madagaskar folgten mit Vereinbarungen zum Bau von Anlagen mit 200 beziehungsweise 40 Megawatt. Jüngst kam Äthiopien

Sonne und Wind in Afrikas Osten



Für den Ostteil Afrikas haben die Autoren von IRENA und LBNL kleinräumig die verfügbare Sonnen- und Windenergie kartiert. Die Zahlen sind Jahresdurchschnittswerte.

hinzu, und die IFC will schon bald zwei weiteren Ländern Zugang zu dem Programm gewähren. Insgesamt sollen in den ersten fünf Jahren Anlagen mit einer Leistung von 1000 Megawatt entstehen.

Doch all der erzeugte Strom ist nutzlos, wenn er nicht zum Kunden gelangt. Dem Kontinent fehlen stabile Stromnetze und Überlandleitungen, die große Leistungen innerhalb eines Landes und über dessen Grenzen hinaus transportieren könnten.

Der Mangel wiegt schwer – und bietet zugleich Chancen. Wo es eine umfangreiche Infrastruktur und die damit verbundenen wirtschaftlichen Interessen nicht gibt, steht sie auch einem raschen und zweckmäßigen Ausbau des Netzes nicht im Wege. Ähnlich war es bei der Telekommunikation: Das Mobilfunknetz wuchs auch deswegen so schnell heran, weil es kein nennenswertes Festnetz gab.

Nach Meinung von Experten wird die Stromversorgung Afrikas in der Zukunft deutlich anders aussehen, als wir es gewohnt sind. Einige Kunden werden ihren Strom über das Netz erhalten; Menschen in ländlichen Gegenden oder städtischen Slums werden auf kleine Sonnen- und Windenergieanlagen und Mininetze zurückgreifen, weil sie eine Netzanbindung nicht bezahlen können.

Gleichwohl bleibt das klassische Stromnetz sowohl für Stadtbewohner als auch für die industrielle Entwicklung von entscheidender Bedeutung, so Ibrahim. Und damit erneuerbare Energien zu einer wichtigen Säule der Energieversorgung werden können, muss das Versorgungsnetz so ausgebaut werden, dass es mit der typischen Unbeständigkeit von Sonne und Wind zurechtkommt. Dazu könnten sich die afrikanischen Länder anschauen, wie beispielsweise Deutschland und Dänemark solche Probleme gelöst haben. Es gibt im Wesentlichen drei Möglichkeiten: Wasserkraftwerke an Stauseen füllen die Lücken, die bei Windstille und bedecktem Himmel entstehen; man gleicht den Mangel an einem Ort mit Überfluss an einem anderen aus, indem man Strom bei Bedarf weiträumig umverteilt; und zu Spitzenlastzeiten reduziert man die Stromlieferung an viele Kunden um eine kleine, unmerkliche Menge (»Lastmanagement«).

Solche innovativen Methoden erfordern allerdings eine intelligente Steuerung und Fernleitungen zum Stromaustausch. Derartige Verbindungen sind bislang in Afrika noch sehr lückenhaft. Vier große Überlandtrassen mit insgesamt 16 500 Kilometern neuer Leitungen sind geplant, zu einem Preis von mehr als 17 Milliarden Euro, sagt Ibrahim. Auch die regionalen Stromnetze vieler Länder müssten zu diesem Zweck nachgerüstet werden.

All das macht die Entwicklung der Energiewirtschaft in Afrika zu einer Herausforderung. Prosper Amuquandoh ist Inspekteur der Ghana Energy Commission und Vorstandsvorsitzender der Smart and Green Energy Group, eines Energiemanagement-Unternehmens in Accra. In Ghana, so sagt er, »gehen demnächst viele Kraftwerke ans Netz«. Das Land plane, im Rahmen des West African Power Pool einen Elektrizitätshandel mit seinen Nachbarn aufzubauen, doch das derzeitige Netz sei nicht in der Lage, bei Bedarf große Mengen an Strom durchzuleiten. Aber diese Herausforderungen können Amuquandohs Begeisterung nicht bremsen: »Die Aussichten sind großartig!«

Mit sinkenden Kosten für erneuerbare Energien breitet sich dieser Optimismus in Afrika immer weiter aus. Die Elektrifizierung des Kontinents sei für jeden ein moralischer Imperativ, sagt Charafi: »Wir können uns im 21. Jahrhundert doch nicht damit zufriedengeben, dass viele hundert Millionen Menschen ohne Strom dastehen.«

QUELLEN

Africa Progress Panel (Hg.): Power, People, Planet. Seizing Africa's Energy and Climate Opportunities, 2015
www.africaprogresspanel.org/publications/policy-papers/2015-africa-progress-report/

IRENA (Hg.): Africa Power Sector: Planning and Prospects for Renewable Energy, 2015
www.irena.org/documentdownloads/Publications/IRENA_Africa_Power_Sector_synthesis_2015.pdf

Wu, G. et al.: Renewable Energy Zones for the Africa Clean Energy Corridor. International Renewable Energy Agency (IRENA) und Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), LBNL-187271, 2015
<http://mapre.lbl.gov/download/859>

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature 539, S. 20–22, 3. November 2016

SciViews

Die besten Wissenschaftsvideos im Netz.



unsplash / Anna Demianenko / CCO

SciViews ist das neue Videoportal von **Spektrum der Wissenschaft**. Hier finden Sie die besten Webvideos rund um Wissenschaftsthemen, ausgewählt von unseren Redakteuren und vorgestellt von Fachjournalisten und Wissenschaftsbloggern.

www.SciViews.de

Spektrum
der Wissenschaft

Mit den besten Videos unserer nationalen und internationalen Medienpartner:



Max-Planck-Institut
für Festkörperforschung



dasgehirn.info
Der Kosmos im Kopf



HZB Helmholtz
Zentrum Berlin



LINDAU
NOBEL LAUREATE
MEETINGS

nature

UNGLEICHHEIT GESPALTENE GESELLSCHAFT

SERIE: DIE ZUKUNFT DER MENSCHHEIT In den Industrienationen wächst die Sorge über die wachsende Kluft zwischen Arm und Reich. Soziale Spannungen, verschärft durch Zuzug, Flucht und Migration, gefährden den Zusammenhalt der Zivilgesellschaft.



Angus Deaton ist emeritierter Professor of Economics and International Affairs an der Princeton University. 2015 erhielt er den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften für seine Analyse von Konsum, Armut und Wohlfahrt. Er besitzt die britische und die amerikanische Staatsbürgerschaft.

» spektrum.de/artikel/1443913

► Gegenwärtig häufen sich die sozialen Probleme überall auf der Welt. Zwei Bollwerke des Wohlstands – die Europäische Union und die Vereinigten Staaten – werden von inneren und äußeren Konflikten erschüttert. Der syrische Bürgerkrieg treibt Scharen von Flüchtlingen nach Europa und droht die anfangs großzügige Aufnahme-

bereitschaft zu überfordern. Die Medien berichten von Gräueltaten im Nahen Osten, stagnierendem Wachstum in China und den drohenden Folgen der globalen Erwärmung. Für große Teile der europäischen und der amerikanischen Bevölkerung hat sich der Lebensstandard seit Jahren kaum erhöht, und viele Bürger kehren einer Politik, die ihnen so wenig gebracht hat, enttäuscht den Rücken.

In den reichen Ländern sinkt die Wachstumsrate des Pro-Kopf-Einkommens, und zugleich nimmt die Ungleichheit von Einkommen und Vermögen überall zu. Fast jede der oben genannten Bedrohungen hängt direkt oder indirekt mit dem Problem der Ungleichheit zusammen.

Geht die Welt also unweigerlich den Bach runter? Um unsere Zukunft realistisch einzuschätzen, darf man nicht nur vom derzeitigen Zustand ausgehen. Wir sollten zurückschauen und sehen, wie weit wir gekommen sind.

Die Lage ist ernst, aber kein Grund für Schwarzmalerei
Zunächst einmal: Die Bewohner der reichen Welt und viele Menschen in ärmeren Ländern sind heute wesentlich begüterter und gesünder als zu irgendeinem historischen Zeitpunkt.

Unter Wohlstand versteht man üblicherweise Kaufkraft, aber menschliches Wohlbefinden erfordert viel mehr als bloß materiellen Besitz. Ein Vermögen ist wenig wert, wenn man tot, behindert oder chronisch krank ist. Gute Bildung steigert die Einkünfte und damit das materielle Auskommen, aber sie ermöglicht auch ein reichhaltigeres und besseres Leben. Neben Geld, Gesundheit und Bildung gehört zum Wohlbefinden auch Freiheit – die Freiheit, an der Zivilgesellschaft teilzunehmen, Freiheit der Bewegung

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
Der unsterbliche Mensch
von Hillary Rosner

Apokalypse oder Aufbruch?
von David Grinspoon

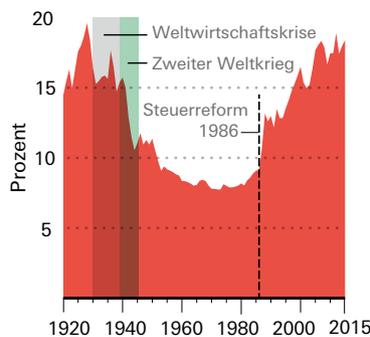


Längst haben wir uns an den Anblick von Bettlern und Obdachlosen in unseren Städten gewöhnt. Doch in letzter Zeit mehren sich Proteste gegen wachsende soziale Ungleichheit.

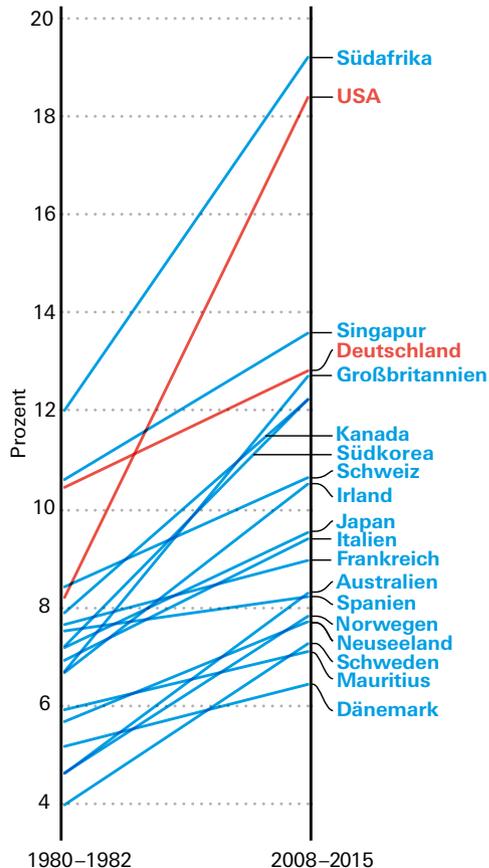
Wachsende Kluft

In den Industriestaaten nimmt die ungleiche Verteilung der Einkommen seit Jahrzehnten deutlich zu. Der Anteil am Bruttonationaleinkommen, den das reichste Prozent der Bevölkerung einstreicht, ist in den USA am stärksten gewachsen. Gewinne durch den Verkauf von Privatvermögen sind in den Zahlen nicht berücksichtigt.

Anteil des reichsten Hundertstels der US-Bürger am Nationaleinkommen



Anteil des reichsten Hundertstels der Bevölkerung am Nationaleinkommen



TIFANY FARRANT-GONZALEZ, NACH FACINDO ALVAREZ, ANTHONY B. ATKINSON, THOMAS PAKETTY, EMMANUEL SAEZ, AND GABRIEL ZUCMAN: THE WORLD WEALTH AND INCOME DATABASE (WIDWORLD), JULI 2016

sowie Freiheit von Diskriminierung, Gewalt, willkürlicher Festnahme und Gefangenschaft. Noch nie galten all diese Freiheiten so allgemein wie heutzutage.

Erst vor 250 Jahren, in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, befreiten sich einige Länder aus einem Zustand, in dem Armut und Krankheit die Regel waren. Früher starben viele Kinder vor dem fünften Geburtstag. Immerfort drohten Seuchen. Erst mit der industriellen Revolution und mit dem Aufkommen der wissenschaftlichen Medizin wurden dauerhaftes Wirtschaftswachstum und allgemeine Gesundheit erreichbare Ziele.

Doch selbst dann verbesserte sich das Leben zunächst nur in wenigen Ländern. Erst ganz allmählich und ungleichmäßig erfasste der Wandel auch den Rest der Welt. Der Fortschritt schuf neue Ungleichheit. So stieg in London und Amsterdam der Lebensstandard viel schneller als in Jakarta und Peking. Im Nordwesten Europas nahm die Lebenserwartung zu, und zugleich sank die Kindersterblichkeit – aber nicht in Afrika und Asien. Dieser große Unterschied wirkt bis heute nach, obwohl Indien und China wirtschaftlich aufholen und in den Entwicklungsländern die Lebenserwartung stark zugenommen hat. Das Pro-Kopf-Einkommen in den USA ist viermal so hoch wie in China, zehnmal so hoch wie in Indien oder Nigeria, fast 20-mal höher als in Kenia und mehr als 90-mal größer als in der Zentralafrikanischen Republik, wenn man die niedrigeren Lebenshaltungskosten in den ärmeren Ländern berücksichtigt. Die enorme internationale Ungleichheit, eine Folge ungleichzeitiger Fortschritte, gefährdet die künftige Entwicklung der Menschheit (siehe »Reiche Welt – arme Welt« von Mara Hvistendahl, **Spektrum** März 2017, S. 72).

Die Wurzeln des Fortschritts:

Aufklärung und industrielle Revolution

Wahrscheinlich werden sich die Historiker nie ganz über die Ursachen der industriellen Revolution einigen, aber gewiss war die Aufklärung ein entscheidender Vorläufer – vor allem mit der Idee des nützlichen Wissens. Solches Wissen beruht auf der Befragung der Natur und der Entwicklung der Grundlagenforschung; es liefert Techniken, Maschinen und Kenntnisse, die das Leben verbessern und das Streben nach Glück unterstützen. Neues Wissen fällt nicht vom Himmel, sondern ist geprägt von der sozialen Umgebung und aktuellen Bedürfnissen. Auch Marktmechanismen spielen eine Rolle. Wenn eine Ressource teuer ist, sind die Menschen bestrebt, Verfahren zu erfinden, die weniger davon verbrauchen. In England schufen die vor der industriellen Revolution relativ hohen Löhne einen Anreiz, menschliche Arbeitskraft durch Maschinen zu ersetzen.

Politische und geistige Freiheit förderte den wirtschaftlichen Aufschwung. Erfindungen bewirken oft »schöpferische Zerstörung«, wie das der österreichische Nationalökonom Joseph Schumpeter (1883–1950) nannte. Neue Techniken zerstören nicht nur traditionelle Verfahren, sondern auch die Lebensgrundlage der davon abhängigen Menschen. Darum stößt technischer Wandel oft auf erbitterten und – bei entsprechender politischer Unterstützung – erfolgreichen Widerstand. Dieser Streit lässt sich nur durch politische Vereinbarungen regeln.

Warum vollzog sich der dauerhafte Aufschwung damals in Europa und nicht in China? Ein Grund: Die politische Aufspaltung Europas erlaubte den Vertretern neuer und unerwünschter Ideen oder Religionen, dem örtlich herrschenden Regime zu entfliehen und sich anderswo anzusiedeln. Heutzutage, in der Ära der Globalisierung, lassen sich Güter, Dienstleistungen und in geringerem Maß Menschen leicht und billig rund um die Erde bewegen. Nicht zuletzt dadurch ist es Indien und China gelungen, der schlimmsten Not zu entkommen.

Doch ist auf das seit 1750 herrschende Wachstum weiter unbegrenzt Verlass? Oder zeigen die schwarzen Wolken am Horizont an, dass die Quelle des Wohlstands versiegt? Nur weil die vergangenen 250 Jahre eine Ära des Fortschritts waren – freilich mit einigen schrecklichen Unterbrechungen –, dürfen wir nicht glauben, dass das ewig so weitergeht.

Vielfältige Folgen sozialer Unterschiede

Ich betrachte Ungleichheit nicht von vornherein als schädlich. Mein Wohlbefinden ändert sich nicht bloß deshalb, weil sonst jemand gewinnt oder verliert. Ungleichheit ist manchmal nur ein anderes Wort für Anreize. Wer etwas erfindet, das allen nützt, wird oft mit großem Reichtum belohnt, doch das allein gefährdet noch nicht den gesellschaftlichen Zusammenhalt. Erst die indirekten Auswirkungen der Ungleichheit bedrohen unsere Zukunft.

In den Industrieländern pendelte die Wachstumsrate des jährlichen Pro-Kopf-Einkommens lange um etwa 2 Prozent, doch nun sinkt sie. Hinzu kam 2008 der Absturz durch die Finanzkrise, von der sich die USA und Europa bestenfalls teilweise erholt haben. Ist diese massive Rezession nur eine vorübergehende Episode der Marktwirtschaft – oder ein Vorbote noch schlimmerer Krisen?

Das Wachstum des Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukts bleibt ein zwar unvollkommener, aber dennoch verlässlicher Indikator für steigenden Wohlstand. Bei 3 Prozent pro Jahr verdoppeln sich die Einkommen in 25 Jahren, das heißt im Lauf einer einzigen Generation; bei jährlich 2 Prozent Wachstum dauert es 35 Jahre, bei 1 Prozent 70 Jahre. In den USA und Europa haben viele Familien jedoch nicht nur die Chance verloren, es besser zu haben als ihre Eltern, sondern müssen sogar gegen sozialen Abstieg ankämpfen. Mit versiegenderem Wachstum nimmt politischer Streit zu. Solange der gesamte Kuchen wächst, kann jeder ein größeres Stück bekommen; ist das nicht mehr der Fall, lässt sich eine Portion nur auf Kosten anderer vergrößern. Das Gleiche gilt für öffentliche Güter wie Gesundheitsversorgung, Sozialversicherungssysteme, Bildung und Infrastruktur. Nur bei prosperierender Wirtschaft können diese Güter erhalten und erweitert werden, ohne dass jemand Einbußen erleidet; andernfalls sind soziale Opfer fällig.

Bei stagnierendem Wachstum entstehen Gruppen, die ihre Mitglieder auf Kosten der Gesamtbevölkerung bereichern, indem sie Gesetze und Vorschriften erzwingen, die nur deren Einkommen erhöhen oder sie anderweitig protegieren. Dadurch verschlechtert sich das Innovationsklima, und das Wachstum stagniert erst recht. Ökonomen nennen

AUF EINEN BLICK RISKANTE UNGLEICHHEIT

- 1** In den vergangenen Jahrzehnten sind die Einkommensunterschiede in vielen Industrieländern stetig größer geworden.
- 2** Solche Unterschiede sind schädlich, wenn es kleinen, aber mächtigen Gruppen gelingt, die politischen und ökonomischen Regeln zum eigenen Vorteil zu verändern: Dann stagniert die Wirtschaft.
- 3** Auf Dauer lässt sich Prosperität nur erreichen, wenn die Ungleichheit gemildert wird. Andernfalls drohen wirtschaftliche Dauerkrisen und soziale Konflikte, welche die Demokratie gefährden.

dieses Streben nach staatlich garantierten Einkommensvorteilen Rent-Seeking; oft handelt es sich dabei um Lobbying oder simple Korruption. Wie der amerikanische Wirtschaftswissenschaftler Mancur Olson (1932–1998) meinte, führen diese Aktivitäten den Niedergang reicher Nationen herbei. Heutzutage lassen sich dafür leicht Beispiele finden. 2015 gab eine wichtige staatliche Forschungseinrichtung der USA, die Gesundheitsbehörde NIH (National Institutes of Health), eine erstaunliche Erklärung heraus: Sie würde keine Forschung finanzieren, deren Hauptziel darin bestünde, Kosten und Effizienz des Gesundheitssystems zu bewerten. Die NIH stand dabei unter massivem Druck des von der Gesundheitsindustrie großzügig geschmierten Kongresses, der die von Präsident Obama durchgesetzte Gesundheitsreform zutiefst ablehnte.

Wenn das vorhandene Wachstum nicht halbwegs gerecht verteilt wird, entstehen soziale Spannungen. Die Benachteiligten halten vielleicht still, solange sie wenigstens etwas bekommen, doch wenn ihr Einkommen stagniert oder schrumpft, werden sie unruhig. Ungleichheit wird zum politischen Problem. Im Idealfall führt Unzufriedenheit zu gesellschaftlichem Wandel. Doch wenn das politische System nur die Bedürfnisse der Reichen berücksichtigt, gerät die politische Stabilität in unmittelbare Gefahr. Falls die großen Parteien den Ausgegrenzten nichts anzubieten haben, wenden sich die Benachteiligten Strömungen zu, welche die repräsentative Demokratie bedrohen.

Viele Menschen erleben den Verlust des Wohlbefindens sehr konkret. In der Mitte der Gesellschaft stagnieren die Einkommen. In den USA herrscht eine Gesundheitskrise unter den nicht hispanoamerikanischen Weißen mittleren Alters, die sich häufig durch Drogen, Selbstmord und Alkohol zu Grunde richten. In den letzten Jahren hat die Lebenserwartung nur bei wohlhabenden Amerikanern zugenommen.

Warum stagniert das Wachstum? Über die Gründe besteht zwar keine Einigkeit, aber unstrittig ist, dass alle



Bei einer Volksabstimmung im Juni 2016 stimmte eine knappe Mehrheit der Briten für den Austritt ihres Landes aus der Europäischen Union. Viele Bürger gaben mit dem Brexit ihrer generellen Unzufriedenheit mit der ungleichen Verteilung des Wohlstands in England und in Europa Ausdruck. In der Bildmitte ist Nigel Farage zu sehen, Anführer der europakritischen UK Independence Party (UKIP).

direkten Ursachen mit zunehmender Ungleichheit zusammenhängen. In den USA verschlingt das Gesundheitswesen Unsummen – fast ein Fünftel des Bruttoinlandsprodukts, verglichen mit rund 11 Prozent in Deutschland – und ist dennoch wenig effektiv, wie die Entwicklung der Lebenserwartung zeigt. Das dafür erforderliche Geld bringen die Bürger letztlich mit ihren Löhnen und Einkommen auf. Dieses sündteure System wird heftig von denjenigen verteidigt, die Einkommen und Macht direkt oder indirekt aus den Gesundheitsausgaben beziehen.

Auch der Finanzsektor trägt an sich zu unserem Wohlergehen bei, aber er hat sich ungeheuer aufgebläht. Die enormen privaten Vergütungen, die er hervorbringt, übersteigen seinen sozialen Nutzen. Viele unserer besten Köpfe arbeiten in diesem Sektor, statt reale Dinge zu produzieren oder neue Heilverfahren zu entwickeln. Vor allem ist ein allzu großer Finanzsektor instabil und verursacht verheerende Wirtschaftskrisen.

Technischer Wandel bringt Vorteile – aber nicht für alle

Die schiere Größe des Gesundheits- und des Finanzsektors erschwert deren politische Kontrolle. Beide treiben die Ungleichheit voran, indem sie einer kleinen Minderheit riesige Einkommen verschaffen, während sie reales Wachstum und Innovationsbereitschaft lähmen. Demzufolge lässt sich erneute Prosperität nur dann erreichen, wenn wir gegen die schiefe Einkommensverteilung vorgehen und Verhaltensweisen vom Typ des Rent-Seeking bekämpfen, die zugleich Ursachen und Folgen der Ungleichheit sind.

Es wird nicht leicht sein, diese Ungleichheit zu mildern, denn derzeit nimmt sie generell in reichen Ländern zu – sogar in jenen, deren Sozial- und Steuerpolitik aktiv dagegen anzugehen versucht. Zusätzliche Probleme schafft der an sich begrüßenswerte technische Wandel: Automatisierung, Globalisierung und die Auslagerung von Produkti-

onsstätten erzeugten bislang zwar Arbeitslosigkeit – aber normalerweise nur vorübergehend, so dass auf Dauer spätestens die nächste Generation von höherem Lebensstandard und gesteigener Lebenserwartung profitieren kann. Nun scheint der technische Wandel nur noch anderen Ländern oder den Besitzern der Maschinen Vorteile zu bringen. Gewiss sollte man sich hüten, unter dem Eindruck der anhaltenden Weltwirtschaftskrise allzu pessimistisch zu werden. Doch die Befürchtungen sind begründet, und unter den Ökonomen wächst die Sorge.

Was lässt sich gegen den Pessimismus ins Treffen führen? Zum einen die Hoffnung, dass der unzureichend repräsentierte Teil der Bevölkerung auf demokratischem Weg Interessenvertreter installieren wird. Das mag schwierig sein und wird nicht ohne Gefahr für die Demokratie abgehen, aber unmöglich ist es nicht.

Die zweite, stärkere Hoffnung beziehe ich aus der Geschichte: Auf lange Sicht passen die Menschen die Lebensumstände ihren Bedürfnissen an. Es ist nicht so, als würde sich ein Asteroid der Erde nähern, der die Menschheit auszulöschen droht. Soziale Vereinbarungen lassen sich ändern, wenn es sein muss. Jedoch bin ich überzeugt, dass uns das derzeitige Ausmaß unproduktiver Bereicherung und die dadurch erzeugte extreme Ungleichheit zu Grunde richten werden, falls wir nichts dagegen unternehmen. ◀

QUELLEN

Deaton, A.: Der große Ausbruch: Von Armut und Wohlstand der Nationen. Klett-Cotta, Stuttgart 2017

Henderson, D. R.: Rent Seeking. In: The Concise Encyclopedia of Economics. Zweite Auflage. Liberty Fund, Indianapolis 2007
www.econlib.org/library/Enc/RentSeeking.html

Organization for Economic Co-operation and Development: Growing Unequal? Income Distribution and Poverty in OECD Countries. Paris 2008
www.oecd.org/els/soc/growingunequalincomedistributionandpovertyinoecdcountries.htm

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!

€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:

www.spektrum.de/kompakt



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



FREISTETTERS FORMELWELT KLEIN, ABER OHO!

Vom »Großen Satz von Fermat« hat fast jeder schon gehört. Doch es lohnt sich, auch einen Blick auf ein anderes Ergebnis des berühmten Mathematikers Pierre de Fermat (1607–1663) zu werfen.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.
 ► spektrum.de/artikel/1443915

Die Gleichung $a^n + b^n = c^n$ hat keine Lösung, wenn a , b , c und n positive ganze Zahlen sind und n größer als 2 ist. Dieser »Große Satz von Fermat« ist unter anderem deswegen so berühmt, weil es mehr als 350 Jahre dauerte, seine Gültigkeit zu beweisen, nachdem Pierre de Fermat ihn um 1640 als Randbemerkung niedergeschrieben hatte. Die bedeutendsten Mathematiker der letzten Jahrhunderte sind daran gescheitert, und der erst 1994 gefundene Beweis ist so kompliziert, dass er fast 100 Seiten Text umfasst.

Über den Großen Satz von Fermat wurden populärwissenschaftliche Bücher geschrieben, Fernsehdokumentationen gedreht, und Andrew Wiles, der britische Mathematiker, der den lang gesuchten Beweis endlich fand, erhielt reihenweise Auszeichnungen. Im Schatten dieses Ruhm steht der »kleine Satz von Fermat«, der folgendermaßen lautet:

$$a^p \equiv a \pmod{p}$$

In dieser Formel ist a eine beliebige ganze Zahl und p eine Primzahl. Der dreifache horizontale Strich in der Mitte ist kein falsch geschriebenes Gleichheitszeichen, sondern beschreibt etwas, was in der Mathematik »Kongruenz« genannt wird. Zwei Zahlen sind kongruent bezüglich einer zusätzlichen ganzen Zahl, des so genannten »Moduls«, wenn die beiden Zahlen bei der Division durch den Modul denselben Rest haben.

Fermats kleiner Satz besagt also, dass eine ganze Zahl a , die man zur Potenz p erhebt, kongruent bezüglich p (»modulo p «) zur ursprünglichen ganzen Zahl a ist. Berechnet man zum Beispiel die dritte Potenz von 4, dann ergibt das 64. Der Rest der Division von 64 durch 3 ist 1, genauso wie der Rest der Division von 4 durch 3. Beide Zahlen sind also wirklich kongruent.

Dieses Herumrechnen mit Kongruenzen ist nicht so weit hergeholt, wie es auf den ersten Blick scheinen mag. Genau dieses Prinzip verwenden wir ständig in

unserem Alltag. Warum steht um 20 Uhr der Stundenzeiger auf der 8? Weil Uhren die Stundenzahl generell modulo 12 angeben. In der Tat lässt 20 bei der Division durch 12 den Rest 8, ebenso wie die Zahl 8 selbst.

Fermats kleiner Satz musste bei Weitem nicht so lange auf einen Beweis warten wie sein großes Gegenstück. Den ersten publizierte 1736 kein Geringerer als der große Mathematiker Leonhard Euler. Und im Gegensatz zu seinem berühmten großen Bruder hat der kleine Satz sogar praktische Anwendung gefunden, zum Beispiel den »Miller-Rabin-Test«: Wer wissen will, ob eine Zahl p eine Primzahl ist, sieht nach, ob die Gleichung $a^p \equiv a \pmod{p}$ mit geeigneten Werten für a erfüllt ist. Wenn nicht, kann p keine Primzahl sein. Für die riesengroßen Zahlen, die bei modernen Kryptografieverfahren vorkommen, geht das weitaus schneller, als p zur Probe durch lauter kleinere Zahlen zu dividieren und zu sehen, ob ein Rest bleibt.

In meiner Jugend habe ich die Bücher über die spannende Geschichte von Fermats Großem Satz verschlungen, war fasziniert von den vielen fehlgeschlagenen Versuchen, ihn zu beweisen, und dem langen und mühsamen Weg, den Andrew Wiles gegangen ist. Heute freue ich mich ebenso, dass ich mittlerweile auch den weniger prominenten kleinen Satz kennen gelernt habe.

Die beiden Sätze von Fermat vereinen all das, was die Mathematik für mich so spannend und wichtig macht. Sie beschäftigen sich mit Zusammenhängen zwischen Zahlen – einer komplett abstrakten Disziplin, die der Philosophie fast schon näher steht als der Naturwissenschaft. Trotzdem ist der eine Satz heute Grundlage vieler realer Anwendungen und Produkte; der andere Satz hat über die Jahrhunderte hinweg die Menschen inspiriert und tut das bis heute noch.

Abstrakte Mathematik, angewandtes Wissen und inspirierende Geschichten: Mehr kann man sich von ein paar mathematischen Symbolen kaum wünschen.

REZENSIONEN

Möglicherweise gibt es nur noch 3500 frei lebende Schneeleoparden (*Panthera uncia*) auf der Welt. Sie sind sehr schwer zu filmen.



DAVID WILKES & POLYBAND, AUS MICHAEL GUNTON UND TOM HUGH-JONES: PLANET ERDE II, MIT FROLO, GEN. VON POLYBAND MEDIEN, MÜNCHEN 2017

Michael Gunton,
Tom Hugh-Jones
PLANET ERDE II
Eine Erde – viele Welten
Dokumentation Natur & Tierwelt
Polyband 2017, Laufzeit ca. 300
Minuten + 50 Minuten Bonus
€ 19,99 (DVD),
€ 20,99 (Blu-ray),
€ 39,99 (Blu-ray 4K Ultra HD)

TIERFILM SPEKTAKULÄRE BILDER AUS DER NATUR

Die BBC-Dokumentationsreihe »Planet Erde II« zeigt atemberaubende Szenen aus der Wildnis.

▶ Vor mehr als zehn Jahren kam die BBC-Dokumentationsreihe »Planet Erde« heraus, die neue Maßstäbe im Naturfilm setzte. Nun ist die zweite Staffel der Serie erschienen. Ihr Untertitel »Eine Erde – viele Welten« trifft voll und ganz zu, denn auf zwei DVDs erhalten die Zuschauer wunderbare Einblicke in diverse Naturwelten unseres Planeten. 22 Kameramänner haben auf 117 Reisen in 40 Ländern das außergewöhnliche

Filmmaterial zusammengetragen. Es ist in sechs Episoden gegliedert, die sich den Lebensräumen Inseln, Berge, Dschungel, Wüsten, Grasland und Städte widmen. Auf jede Episode folgt ein Making-of-Tagebuch als zusätzlicher Inhalt. Die Produzenten Michael Gunton und Tom Hugh-Jones möchten mit dieser zweiten Staffel der Doku-Reihe die »ungebrochene Schönheit« der Welt feiern, »aber auch unseren Umgang mit ihr kritisch hinterfragen«.



Ein Kameramann filmt einen Heuschrecken-Superschwarm.

BC 2016 & POLYBAND (FAULTIER) / ED CHARLES 2016 & POLYBAND (HEUSCHRECKENSCHWARM), AUS MICHAEL GUNTON UND TOM HUGH-JONES: PLANET ERDE II, MIT FRDL. GEN. VON POLYBAND MEDIEN, MÜNCHEN 2017



Zwergfaultiere (*Bradypus pygmaeus*) sind die kleinste Faultierart und gelten als bedroht.

Eindrucksvolle Aufnahmen aus der Tier- und Pflanzenwelt folgen dicht aufeinander. Die Leute von der BBC haben vor allem Jagdszenen, Überlebens-techniken und tierische Tricks eingefangen, die den Film durchweg spannend machen. Mit Hilfe von modernster Kamera- und Drohnentechnik kommt man Schneeleoparden im Hochgebirge nahe, verfolgt ein springendes Lemurenweibchen durch die Wälder Madagaskars, heftet sich an

einen fliegenden Steinadler oder ist einem Zwergfaultiermännchen auf den Fersen, das durch tiefes Wasser schwimmt, dem Lockruf eines Weibchens folgend.

Neu ist an der zweiten Staffel, dass sie das Leben vieler Tiere aus deren Perspektive darstellt. Als Zuschauer(innen) begleiten wir Wüstenbussarde und Wüstenfledermäuse, die zu Fuß am Boden jagen – unter anderem, weil Kakteen mit langen Stacheln sie daran hindern, die Beute

von oben zu ergreifen. Wir suchen mit männlichen Flughühnern und Nebeltrinker-Käfern nach Wasser und lernen dabei ihre verblüffenden Verhaltensweisen kennen. Wir erfahren, wieso Karminspinte (Insekten fressende Vögel) so nah wie möglich vor Afrikanischen Elefanten herfliegen und weshalb Bisons Schnee schaufeln.

Immer wieder bekommt man ungewöhnliche Jagdszenen zu sehen, etwa wenn riesige Flusswelse

sich Tauben schnappen oder ein Jaguar einen Brillenkaiman tötet. Auch verborgene Welten erblickt man, beispielsweise die der Araguaia-Delfine, die erst 2014 neu beschrieben wurden und zwischen den Kronen überschwemmter Dschungelbäume umher schwimmen. Dort, weit weg vom Meer, hatte niemand solche Tiere vermutet. Die Kameras haben zudem spektakuläre Naturgewalten aufgezeichnet, darunter einen Sandsturm, der auf den Betrachter zurast. Eine gewisse Ähnlichkeit damit hat die Szene eines Wüstenheuschrecken-Superschwarms, der sich erst am Boden und dann in der Luft wie ein riesiges Heer fortbewegt und das ganze Land zerstört. Aber auch sehr unterhaltsame Bilder bereichern die Filme – von Grizzlybären etwa, die sich an ihrem persönlichen Lieblingsbaum kratzen, um ihr Winterfell loszuwerden. Ein wahres Vergnügen!

»Planet Erde II« ist eine sehenswerte Doku-Reihe, die die erste Staffel gelungen fortsetzt. Sie besticht mit tollen Tieraufnahmen und großartigen Naturbildern. Quasi hautnah erlebt man, was wildes, ursprüngliches Leben bedeutet. Der Informationsgehalt der erklärenden Texte ist genau richtig: weder zu fachnah noch zu oberflächlich. Die atemberaubenden Bilder, die stimmige Geräuschkulisse und die grandiose Hintergrundmusik ergeben eine überzeugende Komposition, die Naturliebhabern nur zu empfehlen ist.

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

REZENSIONEN

RELIGION DER DOPPELTE JHWH

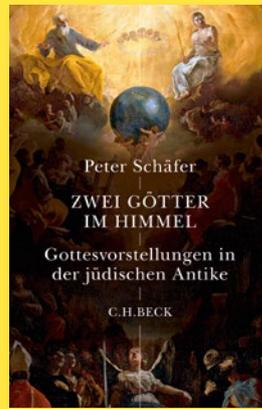
Juden- und Christentum waren ursprünglich keine monotheistischen Religionen, schreibt Judaist Peter Schäfer.

► »Höre Israel, der Herr ist unser Gott, der Herr allein« (Deuteronomium 6,4): Die These, das Judentum habe den Monotheismus erfunden, galt in der Religionswissenschaft lange Zeit als gut belegt – nicht zuletzt wegen dieser Bibelstelle.

Doch trifft das wirklich zu? Entstand vor gut 3000 Jahren irgendwo in

den Dörfern Galiläas und Judäas tatsächlich der Glaube an den einen Gott Jahwe – und lag hierin der Ursprung des Judentums? Nicht unbedingt, meint Peter Schäfer, Direktor des Jüdischen Museums Berlin. »Der jüdische Himmel begnügte sich keineswegs immer mit einem Gott, sondern war trotz aller gegenläufigen Tendenzen und trotz zahlreicher Versuche, diesen Trend aufzuhalten, oft auch mit zwei Göttern oder mit mehreren göttlichen Potenzen bevölkert.«

Ausgehend von der Erkenntnis, der Begriff »Monotheismus« (ein Kunstwort aus dem 17. Jahrhundert) beschreibe ein Ideal, das »immer wieder angestrebt,



Peter Schäfer
ZWEI GÖTTER IM HIMMEL
Gottesvorstellungen in der jüdischen Antike
C.H.Beck, München 2017
200 S., € 24,95

aber selten durchgesetzt wurde«, begibt sich Schäfer auf die Spurensuche nach diesen anderen göttlichen Kräften. Fündig wird der renommierte Judaist dabei in der hebräischen Bibel,

die er mit geschultem Blick einer textkritischen Analyse unterzieht.

Schäfer zeichnet ein vielschichtiges Bild von religiösen Vorstellungen im alten Israel, in denen verschiedene Götter nebeneinanderstanden und miteinander agierten. In der hebräischen Bibel beispielsweise, die die Christen das Alte Testament nennen, lässt sich nachweisen, dass JHWH, der Stammesgott Israels, zahllose andere Gottheiten des ugaritischen und kanaanäischen Pantheons neben sich hatte – darunter den alten Gott El und den jungen Kriegsgott Baal. Und Inschriften vom archäologischen Fundort Kuntillet 'Adschrud auf der Sinai-Halbinsel erwähnen



Hugh Aldersey-Williams
FLUT
Das wilde Leben der Gezeiten
Aus dem Englischen von
Chrisophe Fricke
Hanser, München 2017
368 S., € 24,-

MEERESKUNDE ERZÄHLUNG ALS SACHBUCH VERKLEIDET

Das Rätsel der Gezeiten: Eine Annäherung aus naturwissenschaftlicher, historischer und poetischer Sicht.

► Journalist Hugh Aldersey-Williams spürt in diesem Band nicht nur der Macht von Ebbe und Flut nach, wie der Buchtitel vermuten lässt. Die Gezeiten bilden vielmehr den thematischen Rahmen, in den er geschickt eine Fülle maritimer Aspekte einbindet. In 13 Kapiteln spannt der Autor einen enorm weiten Bogen: von der griechischen Mythologie über historische Schlachten bis zur frühen wissenschaftlichen Erforschung der Gezeiten, von Entdeckungsreisen über ökologische Betrachtungen bis hin zur aktuellen Klimadebatte. Man staunt, über Odysseus ebenso zu lesen wie über Galileo Galilei, Jules Vernes und Edgar Allen Poe, um an anderer Stelle von Opern und Gedichten zu erfahren, den Autor bei einer Wattwanderung zu begleiten oder das Laichverhalten tideabhängiger Fische in Kalifornien kennen zu lernen. Dass diese teils weit auseinanderliegenden Themen nur lose zusammengebunden werden, das Buch aber dennoch nicht überfrachten, macht den besonderen Reiz des Werks aus.

Packend schildert Aldersey-Williams, wie er verschiedenste Orte bereiste, etwa die Küste Neuschottlands, die Sperrwerke bei London sowie das europäische Nordmeer. Seine Beschreibungen sind sehr plastisch und vermitteln eine Menge Fakten. Beim Archipel der norwegischen Lofoten wagt der Autor eine Bootsfahrt über den sagenhaften »Mahlstrom« hinweg. Jules Vernes' berühmter Romanheld, Kapitän Nemo, berichtete hierüber: »Bekanntlich bilden die zwischen den Farör- und Loffoden-Inseln eingeeengten Gewässer zur Zeit der Flut einen Strudel mit unwiderstehlicher Gewalt, dem noch niemals irgend ein Schiff entronnen ist.« Dem Autor freilich ist dies gelungen. Ein Glück, sonst wäre dem Leser ein sehr kluges und spannendes Buch vorenthalten geblieben. Tim Haarmann

JHWH zusammen mit der Göttin Aschera, der Anfang des 7. Jahrhunderts v. Chr. im Tempel von Jerusalem gehuldigt wurde. Auch sei der in den Zehn Geboten überlieferte Satz »Ich bin Jahwe, dein Gott, du sollst keine anderen Götter haben neben mir« kein zwingender Beweis für eine monotheistische Gottesvorstellung, schreibt der Autor, da hier nur die ausschließliche Verehrung eines einzigen Gottes gefordert, aber nicht die Existenz anderer Götter bestritten werde.

Seit der Zeit der Könige (um 1000–587 v. Chr.) habe es einen ständigen Kampf zwischen verschiedenen Vorstellungen bezüglich des Pantheons gegeben, wobei sich keine davon durchzu-

setzen vermochte. Erst allmählich habe sich im Judentum der Monotheismus herausgebildet. Schäfer macht dies an der Erneuerung des Glaubens während des babylonischen Exils (587–539 v. Chr.) fest. Mit dem Verlust der Selbstständigkeit Israels, so der Autor, habe sich der Konflikt zwischen Mono- und Polytheisten zugespitzt. Ausgehend von der Frage nach der Wirksamkeit Gottes versuchten Priester und Gelehrte, die konkurrierenden Götter in JHWH aufgehen zu lassen.

Propheten wie Ezechiel verkündeten, dass Gott auf einem Thronwagen in die Fremde ziehe, JHWH also auch in Babylon gegenwärtig sei, ohne Tempel und ohne Opfergaben. Geleitet von dieser Überzeugung, wonach JHWH nicht mehr ortsgebunden, sondern ebenso in der Fremde

wirkmächtig sei, gewann der Eingottglaube stärker an Gewicht. Doch wie Schäfer schlüssig nachweist, gibt es selbst aus der Zeit nach dem Exil zahlreiche Hinweise auf eine göttliche »Zweiheit«. Die Wissenschaft hat für dieses Nebeneinander von zwei Weltenkern

den Begriff »binitarisch« entwickelt. Er soll ausdrücken, dass im Judentum religiöse Vorstellungen existierten, wonach neben dem (in der Regel älteren

Der Monotheismus ist eher ein religionsgeschichtlicher Idealtyp als eine historisch überprüfbare Realität

Gott ein weiterer, jüngerer existierte.

Diese zweite Gestalt, erstmals fassbar im biblischen Buch Daniel, hat viele Namen und viele Erscheinungsformen: »Menschensohn«, »Sohn des Höchsten« oder »Erstgeborener vor aller Schöpfung«. Schäfer verweist in

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)



REZENSIONEN

diesem Zusammenhang auf den Menschen Henoch, der laut Altem Testament zum zweiten Gott erhoben und von Gott selbst als solcher deklariert wird: »Du bist der Menschensohn, das heißt der zweite Gott neben mir, der Messias.« Hier ergeben sich für Schäfer interessante Parallelen zum Christentum, das seiner Meinung nach die Vorstellung, wonach es einen vergöttlichten Menschen neben Gott im Himmel gibt, von der jüdischen Tradition übernommen hat.

»Zwei Götter im Himmel« ist für jeden, der sich auf die Materie einlassen möchte, eine bereichernde Lektüre über Gottesvorstellungen der jüdischen Antike – der Komplexität des Themas wegen manchmal herausfordernd, aber immer anregend.

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

WISSENSCHAFTS- THEORIE EVOLUTION DER EVOLUTION

Die Evolutionstheorie ist nicht nur in der Biologie bedeutsam, sondern hat auch in die Sozial- und Geisteswissenschaften Einzug gehalten.

► Gerhard Vollmer ist promovierter Physiker, Philosoph und Mitbegründer der evolutionären Erkenntnistheorie. Er hat ein umfangreiches Sammelwerk geschaffen und darin 58 Disziplinen behandelt, die allesamt durch die Theorie beeinflusst worden sind. In diesem Buch nimmt er seine Leser mit auf eine ausgedehnte Reise durch solche Fachrichtungen: von Anthropologie über Didaktik, Finanztheorie, Psychologie und Soziologie bis hin zur Theologie.

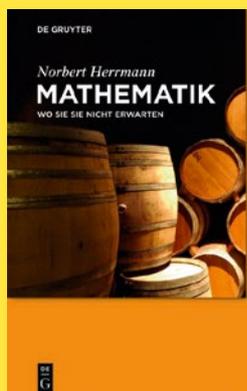


Gerhard Vollmer
IM LICHT DER EVOLUTION
Darwin in Wissenschaft
und Philosophie
Hirzel, Stuttgart 2017
613 S., € 39,-

Aufgeteilt ist das Werk in vier Abschnitte. Der erste »Über Evolution« handelt über die Theorie im Allgemeinen, der zweite »Darwin in den Wissenschaften« über den berühmten Naturforscher und den Evolutionsgedanken in den einzelnen wissenschaftlichen Fachgebieten. Besonderen Raum räumt Vollmer der Philosophie ein, indem er ihr die beiden letzten Teile »Darwin und die Philosophie« sowie »Darwin in der

Philosophie« widmet. Sie befassen sich beispielsweise damit, welche Beziehung Darwin zu dieser Wissenschaft hatte, und gehen auf die Teilgebiete der evolutionären Philosophie, evolutionären Metaphysik oder evolutionären Ethik sowie auf deren Verknüpfungen mit dem Evolutionsgedanken ein.

Vollmers Buch versteht sich mehr als Nachschlagewerk denn als durchgehend zu lesende Lektüre. Es gibt dem Leser die Freiheit, sich die für ihn relevanten Teilkapitel herauszusuchen. Diese stellen in sich geschlossene Einheiten dar; dennoch schafft der Physiker und Philosoph mit ihnen intellektuelle Bausteine, die sich in einen übergreifenden Kontext einfügen und auf erfrischende Weise Verbindungen zwischen einzelnen wissenschaftlichen Disziplinen herstellen, um dem Leser einen intellektuell anregenden Blick über den



Norbert Herrmann
MATHEMATIK, WO SIE SIE NICHT ERWARTEN
De Gruyter, Berlin 2016
148 S., € 19,95

MATHEMATIK SIMPSON-REGEL, RUBIK-WÜRFEL UND LOTTOGEWINN

Ein Exkurs in die angewandte Mathematik.

► Offensichtlich hat Norbert Herrmann in seinen langen Dozentenjahren an der Universität Hannover vornehmlich angewandte Mathematik betrieben. Mit kubischen Splines und der Simpson-Regel fürs Integrieren kennt er sich bestens aus, dort führt er uns die wesentlichen Argumente explizit und mit Formeln in voller Länge vor. Bei der Unstetigkeit der Bogenlängenfunktion macht er wenig Kompromisse an das Laienverständnis, ebenso bei den physikalischen Fragen »Warum fallen die Wolken nicht vom Himmel?« und »Warum fliegt ein Flugzeug?«. Dafür behandelt er aber andere Themen, die eher zum Standard der Unterhaltungsmathematik gehören, eingängig, unterhaltsam und mit der gebotenen Ausführlichkeit: nichttransitive Würfel, Gewinnwahrscheinlichkeit beim Lotto, Zerschneiden eines Rechtecks und Wiederzusammensetzen zu einem scheinbar größeren, Zurechtdrehen des Rubik-Würfels. Das alles ist gut dargestellt und richtig, von einzelnen Schludrigkeiten abgesehen; allerdings etwas inhomogen. Christoph Pöppe

Tellerrand zu gewähren. Hier zeigt sich, was Vollmer jahrelang als Wissenschaftler getan hat: verschiedene Disziplinen wie Philosophie und Naturwissenschaft zueinander in Beziehung setzen, um neue Zusammenhänge entstehen zu lassen.

Es ist faszinierend zu lesen, wie das Evolutionskonzept besonders in die nicht naturwissenschaftlich geprägten Disziplinen Einzug gehalten hat. So widmet der Autor ein Teilkapitel der evolutionären Politologie, die unter anderem untersucht, nach welchen Mechanismen der Aufbau eines Staats oder einer Gesellschaft funktioniert. Zum einen lassen sich diese Mechanismen anhand empirischer Methoden der Evolutionsbiologie

klare Hierarchie, mit einer fest zugeschriebenen gesellschaftlichen Rolle für jedes Individuum. In einer globalisierten Welt dagegen konkurrierten die Individuen viel stärker miteinander, die Zahl der Verlierer steige und somit auch die Zahl der Depressiven. Dies erklärt laut Vollmer eindrucksvoll, warum in den zurückliegenden Jahrzehnten Depressionen immer häufiger geworden sind, Schizophrenien jedoch nicht. Psychische Störungen ließen sich somit als »Extremvarianten evolutionär entstandener Anpassungen« verstehen.

Interessant auch das Teilkapitel über evolutionäre Kunst, einen Ansatz der bildenden Kunst, der Mitte der 1990er Jahre entstand

Die Mechanismen der Evolution sind auf diverse Prozesse anwendbar – nicht nur in der Biologie

erforschen. Zum anderen ist es möglich, Analogien zu Genetik und Vererbung herzustellen, die beispielsweise zu erklären vermögen, wie eine Gesellschaft wachsen kann.

Ein weiterer Abschnitt beschäftigt sich mit der evolutionären Psychiatrie. Hier stellt Vollmer die These auf, wir seien evolutionär (noch) nicht an die globalisierte Welt angepasst. Dem Psychiater John Price zufolge entwickelt der »Verlierer« eines Kampfes, sei dieser physischer oder sozialer Art, depressive Symptome. In Gemeinschaften vor der Globalisierung gab es laut Price eine

und von dem Künstler und Informatiker Günter Bachelier geprägt wurde. Die evolutionäre Kunst behandelt ihr jeweiliges Objekt, beispielsweise eine Porträt-darstellung, als »Ausgangspunkt für einen evolutionären Prozess« und variiert dieses in einzelnen (Mutations- und Rekombinations-)Schritten immer weiter. Den künstlerischen Schaffensprozess bestimmen somit evolutionäre Prozesse wie Variation und Selektion.

Diese beiden Mechanismen sind es denn auch, die Vollmer auf andere naturwissenschaftsferne Disziplinen anwendet, beispiels-

weise die Sprachwissenschaft, Pädagogik und Musikwissenschaft. Seine Leser lässt er mit der Erkenntnis zurück, dass die Gesetze der Evolution umfassend anwendbar sind – bei Weitem nicht nur in der Biologie.

»Im Lichte der Evolution« vermittelt einen Über-

blick über verschiedene natur- und geisteswissenschaftliche Disziplinen und ermöglicht es, Evolution einmal aus ganz ungewöhnlicher Perspektive zu betrachten – Querlesen ausdrücklich erwünscht.

Julia Schulz ist Veterinärmedizinerin und Journalistin.

SPORTMEDIZIN AKTIV FÜR DIE GESUNDHEIT

Dieser sportwissenschaftliche Ratgeber regt dazu an, sich mehr zu bewegen.



Klaus-Michael Braumann,
Jan Schröder
WIE BLEIBE ICH FIT
Einfache Übungen für den Alltag
Ellert & Richter, Hamburg 2017
160 S., € 14,95

Endlich den inneren Schweinehund überwinden: In diesem Fitnessratgeber animieren die Sportmediziner und Sportwissenschaftler Klaus-Michael Braumann und Jan Schröder sowohl Einsteiger als auch Fortgeschrittene dazu, sich mehr zu bewegen. Den Autoren gelingt es, die vorgestellten Übungen mit verständlichen Erklärungen und Fotos gut nachvollziehbar darzustellen. So

wirken sie dem bei solchen Ratgebern verbreiteten Problem entgegen, dass die Leser das Training falsch ausführen. Kurze Exkurse in die Sportmedizin erklären fachlich fundiert, warum mehr Bewegung wichtig ist. Die Autoren betonen hier, dass es vorrangig um Gesundheit und nicht um einen athletischen Körper geht. Als praktisch erweist sich das handliche Format – der Band lässt sich leicht unterwegs mitnehmen, was durchaus beabsichtigt ist, da die Autoren auch einige Übungen für das Büro vorstellen. Diese übersichtlich zusammenzufassen, hätte allerdings so manches Blättern vermieden. Sabrina Schröder

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt **wissenschaft in die schulen!**

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative **wissenschaft in die schulen!** Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt!

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projekts nicht möglich. Deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen wollen, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

Tausende Schüler sind schon dabei. Herzlichen Dank an unsere Sponsoren!



BSZ für Agrarwirtschaft und Ernährung
Dresden

INNO-TEC



Förderverein Eichsfeld-Gymnasium

1917

DIE ERFINDUNG DER ZEITLUPE

»Die Höchstgeschwindigkeit einer kinematographischen Aufnahme beläuft sich für gewöhnlich auf etwa 16 bis 20 Bilder in der Sekunde. Eine neue Erfindung von Dr. M. Lehmann gestattet eine Steigerung der Aufnahmen auf etwa 2–300. Das wichtige ist die Fähigkeit des neuen Apparates, die Aufeinanderfolge der Bilder bei ihrer Wiedergabe nach Belieben zu verlangsamen. Es ist also die Möglichkeit gegeben, daß Bewegungen 15 bis 20 mal langsamer gezeigt werden können, als sie aufgenommen wurden. Vor allem für wissenschaftliche Zwecke ergaben sich hieraus viele Vorteile.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik 16, S. 151*

ZIGARREN GEGEN DEN HUNGER

»Lange Zeit hat man angenommen, Hunger- und Durstgefühle hätten im Magen ihren Ursprung. Jetzt sieht man den oberen Teil der Speiseröhre als den eigentlichen Sitz an. Um sich von der Richtigkeit dieser Annahme zu über-

zeugen, hat man Rachen und Speiseröhre eines hungrigen Menschen durch Einspritzung einer Kokainlösung betäubt; sogleich verschwanden Hunger- und Durstgefühl vollkommen, und er konnte fünf Tage lang durch nichts dazu gebracht werden, irgendwelche Nahrung oder Flüssigkeit zu sich zu nehmen. Ebenso wie das Kokain wirkt auch das Nikotin. Ein Mensch, der an Hunger oder Durst leidet, kann sich mit einigen Zigarren dieses lästige Gefühl für ein paar Stunden vertreiben.« *Prometheus 1437, S. 512*

DER KRIEG UND DER KREISLAUF DER NATUR

»Viele Kriegssagen erzählen davon, daß auf den Gräbern Gefallener besonders schöne, seltene oder besonders viele Blumen wuchsen. So wird von der Schlacht bei Roncesvalles berichtet, daß man unter der Menge der Gefallenen Franken und Sarazenen nicht unterscheiden konnte; aber am nächsten Morgen wuchs bei jeder Sarazenenleiche ein Dornbusch und neben jedem Franken eine weiße Blume. Prof. v. Wettstein aus Wien hat 1916 in Westgalizien beobachtet, daß Soldatengräber nicht nur an dem üppigen Pflanzenwuchs kenntlich sind, sondern auch dadurch, daß dort Pflanzen in großer Menge vorkommen [, die] eine stickstoffreiche Nahrung verlangen.« *Die Umschau 21, S. 416*

1967

EFFIZIENTERE HAUSFRAUEN

»Die Arbeitsgemeinschaft Die Moderne Küche (AMK) [beauftragte] Lehrkräfte der Höheren Frauenfachschule in Hamburg mit der Durchführung einer vergleichenden Studie in einer Küche mit Möbeln und Geräten, wie noch häufig anzutreffen, und in einer modernen Anbauküche. Als Arbeitsprogramm war ein einfaches Mittagessen vorgesehen: Frikadellen, Salzkartoffeln, grüner Salat und Grießflammeri mit Kompott. Die Wege der Hausfrau wurden auf einer maßstabsgerechten Grundrißtafel mit einem Faden nachgezogen, jede Arbeitsposition wurde protokolliert und die Zeit mit einer Stoppuhr gemessen. Während die Hausfrau in der »alten« Küche 174 m laufen mußte, legte sie in der modernen nur 70,3 m zurück. Der Arbeitszeit von 69 Minuten standen nur 51 Minuten gegenüber, weil durch die übersichtliche Ordnung viele doppelten Handgriffe und Wege eingespart werden konnten. Angesichts der starken Überlastung eines Großteils der Hausfrauen bedeuten die Einsparung der Wege, die Verringerung der Arbeitszeit und die Beruhigung des Arbeitsbildes einen beachtlichen Gewinn.« *Die Umschau 10, S. 332*

AUSSERIRDISCHE DOWN UNDER



Meteor aus dem australischen Henbury-Kraterfeld.

»Der Vermessungsangestellte Bruce Wilson entdeckte bei der Ölsuche in der Nähe von Forrest in Westaustralien mehrere Nickel/Eisen-Massen. Die beiden größten werden auf 12 t und 5 t geschätzt. Die 12 t schwere Masse ist

kugelförmig und über 2 m groß. Schon einmal waren in Australien in größerer Zahl Eisenmeteorite entdeckt worden, nämlich 1930 in dem Kraterfeld von Henbury.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 5, S. 209

ÜBERFÄLLIGE EISZEIT

»Sie kommt irgendwann zwischen morgen und in 50 000 Jahren«, so Wilson in der 1964 aufgestellten Theorie zur Eiszeitenstehung. Danach wächst die Eisschicht so lange, bis sich die untersten Lagen unter dem steigenden Druck verflüssigen. Das Eis fließt dann in die Breite. Die resultierende Wasserverdrängung führt zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Die Eiskappe nimmt augenblicklich jedes Jahr um 3 g/cm² zu und nähert sich dem Punkt, an dem sie in Bewegung kommen muß. Hieraus kann auf eine bevorstehende Vereisung geschlossen werden.« *Kosmos 5, S. *148*

UMSCHREIBEN DER GESCHICHTSBÜCHER UNNÖTIG

Der Kernphysiker Manfred Popp untersuchte anhand der Originaldokumente, warum das »Dritten Reich« keine Atombombe entwickelt hat (»Störfall der Wissenschaftsgeschichte«, Spektrum Dezember 2017, S. 12).

Klaus Gottstein, München: Herr Popp gibt eine gut verständliche Darstellung der physikalischen Prinzipien von Uran- und Plutoniumbomben. Er wiederholt die bekannte Tatsache, dass eine Atombombe in Deutschland während des Zweiten Weltkriegs wegen der dazu notwendigen riesigen industriellen, ökonomischen und organisatorischen Erfordernisse, die unter den gegebenen Umständen nicht realisierbar waren, nicht gebaut werden konnte.

Als neue Erkenntnis bezeichnet er sein Untersuchungsergebnis, dass Heisenbergs im Auftrag des Heereswaffenamts durchgeführte Berechnungen nicht zum Bau der Bombe ausgereicht hätten, selbst wenn es die genannten äußeren Beschränkungen nicht gegeben hätte. Das sei ein zweiter, unabhängiger, von den Geschichtsbüchern bisher nicht gewürdigter Grund für den Nichtbau einer deutschen Atombombe. Popp berücksichtigt nicht, dass das bis dahin nur exploratorisch durchgeführte Projekt Atombombe bereits 1942 wegen seiner kurzfristigen Undurchführ-

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.

barkeit von Rüstungsminister Speer eingestellt wurde. Heisenberg war darüber sehr erleichtert und beschäftigte sich fortan mit dem Bau eines kleinen Testreaktors und seinen anderen physikalischen Interessen wie der Erforschung der kosmischen Strahlung und der Theorie der Elementarteilchen.

Seine Untersuchungen zur Atombombe setzte Heisenberg nicht fort, so dass man seine Kenntnisse von 1939 und 1940 nicht zum Maßstab für die Leistungen nehmen darf, die er hätte erbringen können, wenn er dazu bei einem fiktiven Wegfall der äußeren Beschränkungen genötigt worden wäre, sofern er sich dann nicht geweigert und als Saboteur sein Leben aufs Spiel gesetzt hätte. Er war zeitlebens froh, dass ihm diese Entscheidung erspart geblieben war. Wozu er in der Lage gewesen wäre, bewies er im August 1945 während seiner Internierung in Farm Hall, als er nach Empfang der Nachricht von der amerikanischen Hiroshimabombe innerhalb einer Woche eine brauchbare Theorie der Atombombe entwickelte und seinen Mitinternierten vortrug.

Das gibt auch Popp zu, schließt sich aber inkonsistent ausdrücklich dem überholten Urteil von Goudsmit in dessen Buch »Alsos« von 1947 an, dass die deutschen Physiker, insbesondere Heisenberg, die Bedeutung der

Spektrum
der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

Freie Mitarbeit: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

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

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

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, 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. Dirk Gassmann, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

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.



kritischen Masse und den Unterschied zwischen Bombe und Reaktor nicht verstanden hätten. Diese Meinung ist angesichts der bekannten Fakten nicht haltbar. Die Untersuchungen von Professor Popp zu den Einzelheiten von Heisenbergs frühen Berechnungen im Auftrag des Heereswaffenamts entsprechen den Ergebnissen anderer Autoren (siehe Meyer und Schwarz, Preprint 467 des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte, 2015), sind im Einzelnen durchaus von wissenschaftshistorischem Interesse, erzwingen aber kein Umschreiben der Geschichtsbücher.

MEHR SORGFALT BEI WIDERLEGUNGEN!

Ist die Theorie der Universalgrammatik des Linguisten Noam Chomsky überholt? Das jedenfalls behaupteten die Sprachforscher Paul Ibbotson und Michael Tomasello (»Ein neues Bild der Sprache«, Spektrum März 2017, S. 12).

Franz Januschek, Flensburg: Der Aufmacher zur angeblichen »Chomsky-Dämmerung« in der Linguistik ist viel zu reißerisch und der kurze entsprechende Aufsatz von Ibbotson und Tomasello ziemlich oberflächlich.

Auch wenn ich als Sprachwissenschaftler kein Anhänger von Chomskys Theorie der Universalgrammatik als Erklärung des kindlichen Spracherwerbs bin (wie bereits seit Jahrzehnten ein erheblicher Teil meiner Kolleginnen und Kollegen) und eher Tomasellos Überzeugungen zuneige, finde ich doch, dass man mit der Widerlegung von Chomskys Modellen ein bisschen mehr Sorgfalt walten lassen muss, und das vor allem dann, wenn man selbst zugibt, für die Komplexität und Vielfalt der menschlichen Sprachen und deren extreme Verschiedenheit von all dem, was wir bei Tieren je beobachten konnten, noch keine schlüssige Erklärung zu haben.

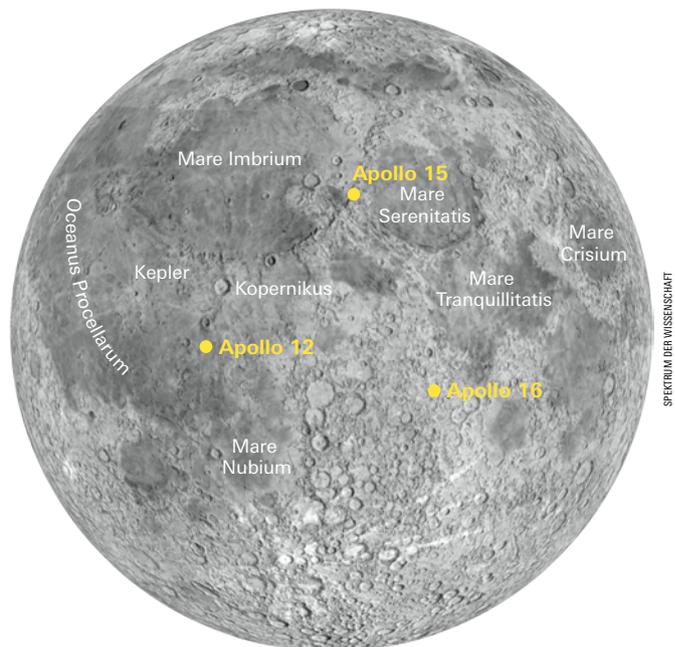
Ich glaube durchaus, dass die Annahme einer angeborenen Universalgrammatik zu widerlegen ist – aber das enthebt einen nicht von der wissenschaftlichen Pflicht, zu beschreiben, was denn stattdessen den Menschen »angeboren« ist und sie im Gegensatz zum Beispiel zu Menschenaffen befähigt, in einer menschlichen Gemeinschaft innerhalb weniger Jahre Zeichen- und Regelsysteme von einer Vielschichtigkeit zu erwerben, die sich in 1000-seitigen Grammatiken immer noch nicht erschöpfend präzise beschreiben lässt.

Der Artikel von Ibbotson und Tomasello bedient vor allem die Abneigung gegen die Mathematik, die so viele hegen, die sich gerne mit Kommunikation und kindlicher Entwicklung befassen möchten. Solche Leute atmen auf, wenn man eine mathematisch inspirierte Theorie widerlegt. Aber Erkenntnisse haben sie damit nicht wirklich gewonnen. Man bedenke im Übrigen: Mathematik ist eine Geisteswissenschaft.

ERRATA

»Supernova-Spuren vor der Haustür«, Spektrum Februar 2017, S. 50

Auf S. 57 muss es in der ersten Zeile der linken Spalte statt »2,6 Milliarden Jahren« »2,6 Millionen Jahren« heißen. Richard Wernig hat uns darauf aufmerksam gemacht. Im Bild auf S. 54 wurde die Landestelle von Apollo 16 falsch eingezeichnet, das ist die Landestelle von Apollo 11. Apollo 16 ist links weiter unten gelandet, wie uns Leser Martin Kaufmann schrieb (siehe Bild).



In Proben des Mondgesteins von den Apollo-Missionen 12, 15 und 16 haben Kernphysiker Radionuklide gefunden, die bei Sternexplosionen entstanden sind.

»Vorteilhafte Vielfalt«, Forschung aktuell, Spektrum Februar 2017, S. 31

Die Markierung mit ^{15}N und ^{13}C wurde in dem Artikel als radioaktiv bezeichnet. Diese Isotope sind jedoch stabil und werden massenspektroskopisch nachgewiesen, wie Bernd Liebermann zu Recht anmerkte.

»Demokratie mit Zusatzjoker«, Springers Einwürfe, Spektrum April 2017, S. 29

In der rechten Spalte ist der Verweis »Science 541, S. 532–535, 2017« angegeben. Es handelt sich jedoch um eine Veröffentlichung in »Nature«. Wir danken Ingeborg Strauß für den Hinweis.

futur III

Irgendwann geht alles kaputt

Besuch bei der Ersten Fragmentierten Kirche der Entropie.

Eine Kurzgeschichte von Steven Fischer

Am Zaun hängt ein Schild, aber ich weiß nicht, ob es den Namen wirklich verdient. Es gleicht mehr einer Collage, die ein Vorschulkind geklebt hat – mit aus Holo-Displays geklauten Buchstaben und antiken Markierungen, vermenschelt wie der Eintopf, den Mark jeden Freitagabend serviert. Die Worte auf dem Schild sind nur mühsam zu erkennen: »Erste Fragmentierte Kirche der Entropie«. Apropos Mark, wo zum Henker steckt er? Schließlich hat er mich dazu gebracht, herzukommen.

Ich mustere das Gebäude – bröckelnde Ziegel und zerbrochene Fenster – und suche den Eingang. Die Tür ist aus den rostigen Angeln gefallen und liegt im Unkraut neben dem Fußweg.

Das fängt ja gut an. So schlimm habe ich es mir dann doch nicht vorgestellt.

Ich trete ein und verliere fast das Gleichgewicht. Den Boden bedeckt

und sein Sohn Vasen mit einem Baseballschläger. Am anderen Ende des Raums stopft jemand, auf dessen T-Shirt »Maxwell« steht, kleine Kugeln in eine Hälfte eines unterteilten Plexiglasbehälters, während sein Freund, der sich als Teufel kostümiert hat, mit dämonischem Kichern eine Klappe in der Trennwand zwischen den beiden Hälften ständig auf- und zumacht.

Da entdecke ich Mark. Er räkelt sich auf einem halben Sofa neben einem Baumstumpf. Ich laufe zu ihm hin, wobei ich einen Bogen um ein Schwimmbecken machen muss, das offenbar hierhergehört. »Hallo!«, sage ich. Ich bin froh, an einem derart schrägen Ort ein vertrautes Gesicht zu finden.

Er küsst mich und grinst. »Na, was sagst du?«

»Nun ja, es ist schon ... allerhand.« Ich werfe einen Blick auf das Gewirr von Bildschirmen, Holo-Projektoren und alten Neonbuchstaben, die von

so redet. Ich möchte ihm erklären, dass Entropie mehr bedeutet als unordentliche Inneneinrichtungen und zerbrochene Gegenstände, doch er starrt mit breitem, albernem Grinsen zur Bühne.

»Es geht los«, flüstert er.

Der Raum verdunkelt sich – zumindest dort, wo die Beleuchtung funktioniert –, und zugleich explodiert ein ohrenbetäubender Lärm. Vermutlich könnte man den Krach Musik nennen, wenn er nicht so schrecklich anzuhören wäre.

Wie ich beim Rundumblick erkenne, hat sich die »Band« über das ganze Auditorium verteilt. Ein Typ steht oben auf der Bühne und hämmert auf einem überdimensionierten elektrischen Xylofon herum, aber gleich hinter uns hockt eine Dame und lässt den verstümmelten Motor eines Hoverbikes ohne das geringste Gespür für Takt und Rhythmus auf-

Jemand stopft Kugeln in eine Hälfte eines Plexiglasbehälters, während sein Freund, der sich als Teufel kostümiert hat, mit dämonischem Kichern eine Klappe in der Trennwand ständig auf- und zumacht

ein Durcheinander von Fliesen, Kunstfasern und etwas Grünem, das lebt.

Die Kirche ist rappellvoll. Sie besteht nur aus einem großen Raum, in dem hier und da Sitzgelegenheiten verstreut sind. Ich würde sie Stühle nennen, wenn ich wüsste, dass sie nicht bei der kleinsten Belastung zusammenbrechen würden. In einem Winkel zerschmettern ein Mann

der Decke baumeln. »Obwohl ich vermute, dass sie ein paar Bauvorschriften verletzen.«

Mark lächelt und zuckt mit den Schultern: »Irgendwann geht alles kaputt.«

In letzter Zeit sagt er das oft. Zwar gefällt mir seine plötzliche Sorglosigkeit, aber der angehende Wissenschaftler in mir schreit auf, wenn er

heulen. Ich könnte schwören, dass ich irgendwo eine Gans, ach was, einen halben Bauernhof höre, nur wo, kann ich nicht sagen.

Und dann hört es auf.

Ein bebrillter Greis erhebt sich aus seinem Sessel und schlurft auf die Bühne. Nicht gerade das, was ich mir unter einem Sektenführer vorgestellt habe. Pardon, nicht Sekte – Mark

kann das Wort nicht leiden –, sondern »fortschrittliche, aufgeklärte Gemeinde«.

»Guten Morgen«, spricht der Alte. Und dann erlebe ich das erste nor-

erwartungsvoll zu. »Also, was hat dich heute zu uns geführt?«

Ich zeige auf Mark. »Der da.« Da er der Grund ist, dass ich hier bin, soll er wenigstens die Schuld übernehmen.

Ich gebe mir Mühe, im Boden zu versinken, aber der Greis zeigt auf mich: »Willkommen! Warum kommst du nicht nach vorne?«

male Ereignis, seit ich angekommen bin: Alle erwidern den Gruß.

Der Greis lächelt, ergreift den digitalen Teleprompter und wirft ihn in die Luft. »Alles geht kaputt!«, verkündet er. Der Prompter zersplittert auf dem Boden, und alle applaudieren.

Und wir haben wieder nicht alle Tassen im Schrank.

Er wirft einen kurzen Blick auf die Menge, wobei seine zerzauste, schütterere Frisur ihm die Sicht zu versperren droht. »Wie ich höre, haben wir heute sogar einen neuen Gast in unserer Gemeinde.«

Ich gebe mir Mühe, im Boden zu versinken, aber er zeigt geradewegs auf mich. »Willkommen!«, ruft er. »Warum kommst du nicht nach vorne?«

Mark kichert vor Aufregung. Er packt meinen Arm und versucht, mich auf die Füße zu stellen. »Los, geh, Jan«, flüstert er. »Das wird lustig.«

Ich werfe ihm einen vernichtenden Blick zu und arbeite mich zur Bühne vor. Der Priester – oder Pastor? Chef-Thermodynamiker? – wendet sich mir

Der Greis schüttelt den Kopf.

»Nein, nein, nein. Was hat dich wirklich hergeführt?«

Ich ringe nach Worten. Dass ich mir Sorgen mache, weil mein bester Freund sich mit ein paar total ausgeflippten Typen eingelassen hat, erscheint mir als Antwort unpassend. »Ich meine, ich habe ein paar Fragen.«

Der ganze Raum applaudiert frenetisch. Warum eigentlich?

»Wohlan«, erwidert der weißhaarige Alte, »schieß los.«

Ich weiß, was Mark sagen würde. Dass ich voll gestresst bin und mit den Nerven fertig und immer unter Termindruck, und dass ich Tag und Nacht am Bildschirm hänge. Dass seine plötzliche Fähigkeit, das Leben leichtzunehmen, seit er hierher kommt, mich neugierig macht. Das stimmt zwar, aber ...

Ist dort an der Hintertür etwa ein Feuer ausgebrochen?

Jetzt reicht es mir. »Also gut. Ich frage mich, woher eine Kirche, die den Anspruch erhebt, die Unordnung anzubeten, sich das Recht nimmt, einmal pro Woche eine Gruppe zu versammeln, in einem bestimmten

Gebäude zu einem bestimmten Zweck, und sie über ein Thema zu belehren, das im Lauf der Jahrhunderte durch hochgradig reglementierte Gedanken und Experimente entdeckt worden ist. Sie erkennen die Ironie, nicht wahr?«

Ich erwarte, dass er etwas sagt, aber er starrt nur vor sich hin. Dann verlässt er die Bühne und schreitet schnurstracks durch den Eingang hinaus ins Freie. Einer nach dem anderen verlassen auch die übrigen Gemeindemitglieder den Raum, bis nur Mark und ich übrig bleiben.

Ich steige von der Bühne, nehme Mark bei der Hand, und wir folgen den anderen. »Das tut mir echt leid«, murmle ich. »Ich weiß, ich habe versprochen, mich anständig zu benehmen.«

Draußen reißt der alte Mann einen Buchstaben nach dem anderen vom Schild.

Mark zuckt die Achseln und grinst mich an. »Irgendwann geht alles kaputt.«

DER AUTOR

Steven Fischer ist Student und lebt im Süden Wisconsins. In seiner Freizeit schreibt er Sciencefiction und durchstreift die großen Wälder mit seiner Frau.

©Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 540, S. 162, 1. Dezember 2016

VORSCHAU

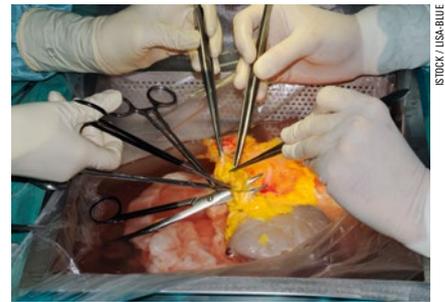
KOSMISCHE INFLATION IN DER KRITIK

Das Inflationsmodell gilt als Grundpfeiler der Kosmologie: Die meisten Physiker nehmen an, direkt nach dem Urknall habe sich das All schlagartig enorm aufgebläht. Doch jüngste astronomische Beobachtungen und theoretische Argumente erschüttern die Grundlagen dieser Theorie.



UNSTERBLICH ALS CYBORGS?

Vielleicht können wir tatsächlich irgendwann unser Bewusstsein auf einen Computer laden und damit beliebig lange am Leben erhalten. Aber diese Daseinsform brächte ganz neue Fragen und Probleme mit sich.



MENSCHLICHE ORGANE AUS TIEREN

Um dem Mangel an Spendern zu begegnen, möchten Biologen menschliche Organe in Tieren züchten. Durch Verpflanzen humaner Stammzellen in Tierembryonen entstehen Chimären mit zur Transplantation geeigneten Körperteilen.



ANTARKTISCHER 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.

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. Inlandporto (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.

Buch »Das 6. Sterben«

Ausgezeichnet mit dem Pulitzer-Preis. Wie keine andere Gattung zuvor haben wir Menschen das Leben auf der Erde verändert. In dem Bestseller erklärt uns Elizabeth Kolbert, wie das geschehen konnte.

Wählen Sie Ihr Geschenk

Taschenset ZIP Pocket »Airport« von LOOI

Design trifft auf Funktion: drei Täschchen, die mit unterschiedlichen Größen all Ihren Bedürfnissen gerecht werden. Extrem stabil, Wasser abweisend und waschbar. 3 verschiedene Größen: 23 x 13 cm / 27 x 20 cm / 32 x 25 cm



Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo

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)

