

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ANTHROPOLOGIE
So schlau
waren die
Neandertaler

OKTOBER 2015

MEDIZIN

Tiergifte gegen
chronische Schmerzen

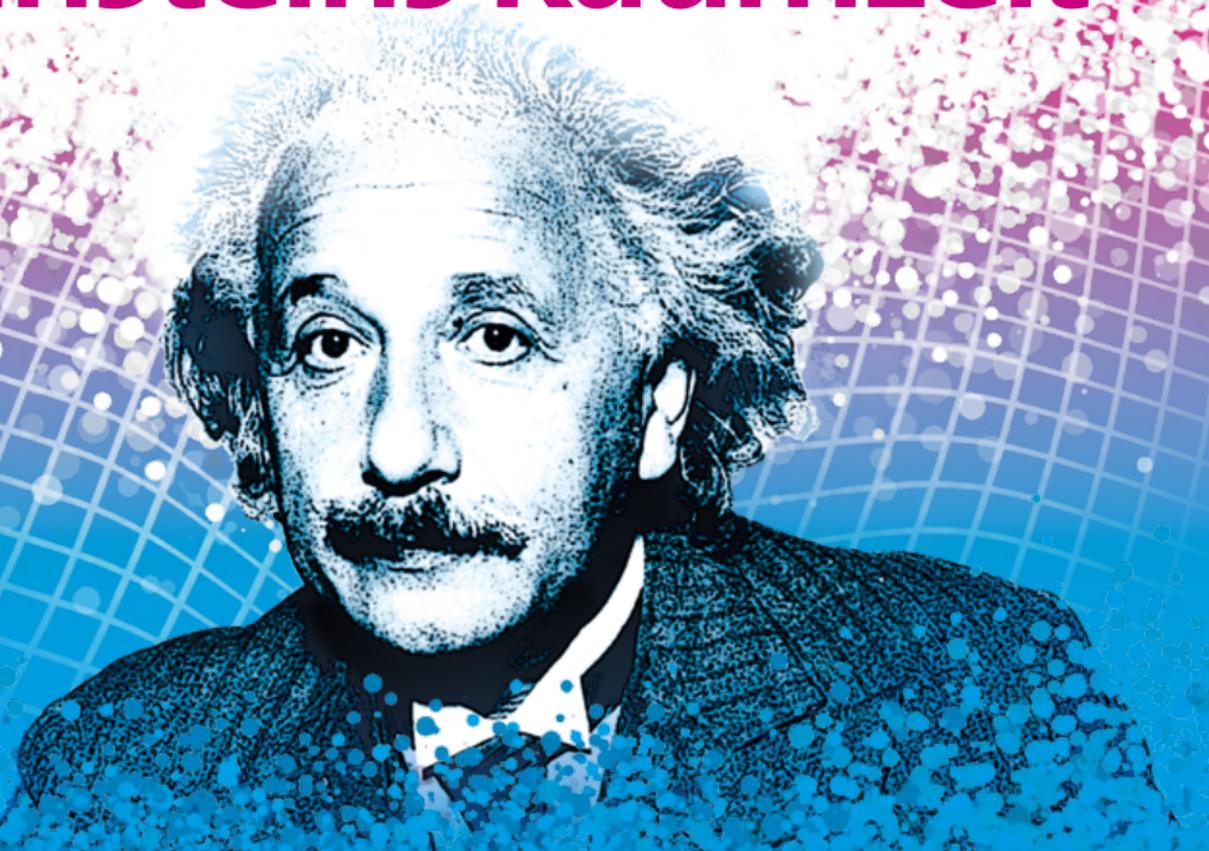
KLIMA

Zerstörerische
Wellen in der Arktis

TECHNOLOGIE

Ethisches Dilemma bei
autonomen Fahrzeugen

100 Jahre Einsteins Raumzeit

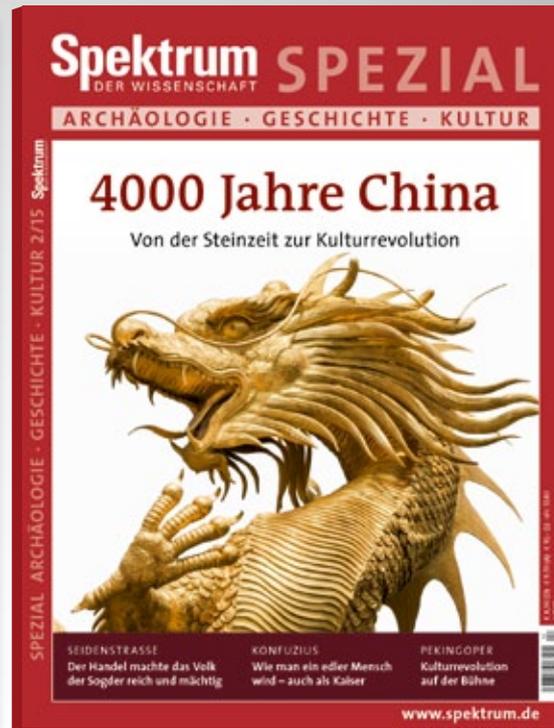
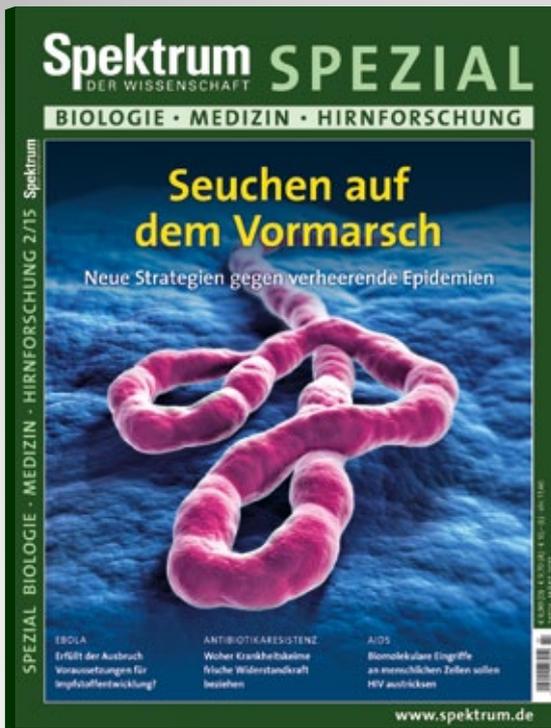


Die allgemeine Relativitätstheorie
revolutioniert die Physik – bis heute!

8,20 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E



DAS GANZE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT:
UNSERE SPEZIALREIHEN



Alle Hefreihen auch im Handel erhältlich!

JETZT IM
 ABO FÜR NUR
€ 7,40
 PRO HEFT
 BESTELLEN

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

So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/spezialabo
 Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Oder QR-Code
 per Smartphone
 scannen und
 Angebot sichern!





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Eine Theorie und ihr Nachhall

Drei spannende Jahre meines Lebens verbrachte ich mit Albert Einstein. In meiner Doktorarbeit analysierte ich Ende der 1990er Jahre die Wirkungen, die seine Arbeiten früh auf andere Bereiche der Gesellschaft, außerhalb der Physik, zeitigten. Vor 100 Jahren, am 25. November 1915, präsentierte der große Physiker erstmals den Kern seiner allgemeinen Relativitätstheorie in der Preußischen Akademie der Wissenschaften. Vier Jahre später wurde sie – vielfach in fachlich fragwürdiger Form – einem Millionenpublikum bekannt. Britische Astronomen um Arthur Eddington hatten damals erste empirische Belege dafür vorgelegt, dass sich Lichtstrahlen in starken Gravitationsfeldern krümmen; dies und vieles mehr hatte Einstein vorausgesagt. In der Folge grüßte er von manchem Titelblatt der Weimarer Republik und wurde auch international über Nacht zu einer Ikone, umjubelt wie angefeindet – Letzteres vor allem von nationalkonservativen und antisemitischen Kräften in Deutschland. So war es eine zwingende Konsequenz, dass der wohl prominenteste jüdische Intellektuelle seiner Zeit seiner Wirkungsstätte Berlin den Rücken kehrte und emigrierte, als Hitler 1933 Reichskanzler wurde.

Bei der Analyse hunderter Texte – Zeitungsartikel, Traktate, Romane und Gedichte bis hin zu philosophischen und theologischen Fachpublikationen der 1920er und 1930er Jahre – faszinierte und befremdete mich die enorme Wirkung, die eine physikalische Theorie entfalten konnte. Denn die inhaltliche Qualität der Darstellungen war extrem heterogen. Ich stieß auf sehr gute Erläuterungen bis in die Tagespresse hinein, genauso wie auf völlig verkürzte, ideologisch verbrämte Machwerke, welche nur Einsteins angebliche Kernaussage zerrissen, dass alles relativ sei und es nichts Absolutes in der Welt gebe. Wahlweise war dies dann der Kaiser, die Wahrheit, der Glaube oder auch Gott. Haarsträubend!

Nach der Zäsur durch den Zweiten Weltkrieg veränderte sich die öffentliche Diskussion um Einstein und die Physik. Während zuvor erkenntnistheoretische Fragen nach der wahren Beschaffenheit der Welt die Gemüter erhitzte, rückten nun, in der Morgendämmerung des Atomzeitalters, ethische Probleme wie die der Verantwortung von Physikern ins Zentrum der Aufmerksamkeit.

Um Einsteins einzigartiges Werk zu würdigen, starten wir mit dieser Ausgabe die große Serie »100 Jahre allgemeine Relativitätstheorie«, die uns sechs Hefte lang begleiten wird. Darin zeichnen namhafte Autoren ein Gesamtbild dessen, was Einstein leistete und wie seine Nachfolger sich bis heute an den von ihm geschaffenen Grundlagen abarbeiten. Den Anfang machen der Kosmologe und Stringtheoretiker Brian Greene von der Columbia University ab S. 42 und die Historiker Michel Janssen von der University of Minnesota und Jürgen Renn vom Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte ab S. 48.

Ich hoffe, Sie freuen sich ebenso auf diese Serie wie ich!
Herzlich Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Wir besitzen nicht nur eine innere Uhr – vielmehr verfügen verschiedene Organe unseres Körpers über eigene Zeitmesser. Geraten diese aus dem Gleichtakt, können wir schwer krank werden, wie die Chronobiologen **Keith C. Summa und Fred W. Turek** ab S. 36 erläutern.



Heute ist sie das Handwerkszeug jedes Kosmologen. Doch als Albert Einstein vor 100 Jahren zu seiner neuen Theorie der Gravitation gelangte, bereitete sie ihm einiges an Kopfzerbrechen, wie wir von **Michel Janssen und Jürgen Renn** ab S. 48 erfahren.



Wie soll sich ein selbstfahrendes Auto bei einem unausweichlichen Unfall verhalten? Die Philosophen **Alexander Hevelke und Julian Nida-Rümelin** befassen sich ab S. 82 mit den ethischen Aspekten autonomer Fahrzeuge.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Verwirrung um den Nullmeridian • Kehrtwende in der Alzheimertherapie? • Rätsel um Saturnring gelöst • Jungsteinzeitgrab belegt Massenmord und Verstümmelung • Winzige Antennen wandeln Strom in Licht • Verarbeitung von Pfeifsprachen im Gehirn

9 Bild des Monats

Trocknen im Zickzack

10 Forschung aktuell

Die lange Reise des Egtved-Mädchens
Menschen der Bronzezeit mobiler als gedacht

Es werde – wieder – Licht
Neurone ersetzen abgestorbene Fotorezeptoren

Exoplanet mit Schweif
Mutterstern bläst

Wasserstoffhülle von Planet Gliese 436b ins All

Ultraschall öffnet Blut-Hirn-Schranke
Hoffnung bei Hirntumoren und Demenz

SPRINGER'S EINWÜRFE
Wie man ein Netz zerstört
Bedrohte soziale Medien

28



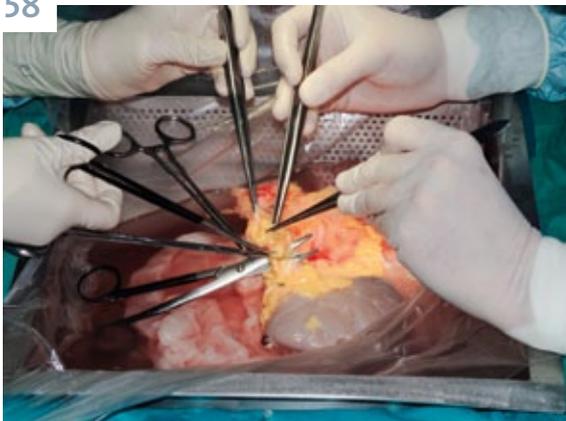
GIORDANO POLINI

56



H. JOACHIM SCHLICHTING

58



ISTOCK / LISA-BLUE

BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ **20 Neue Hoffnung bei chronischem Schmerz**
Grund für die ständige Pein können veränderte Moleküle an den Schmerzrezeptoren sein. Diese lassen sich gezielt mit maßgeschneiderten Medikamenten angreifen.
Stephani Sutherland

▶ **28 Verkannte Neandertaler**
Neuen archäologischen Befunden nach besaßen unsere Vorfahren unerwartet hohe geistige Fähigkeiten.
Kate Wong

36 Die Uhren in uns
Unser Wohlergehen hängt vom Zusammenspiel zahlreicher körpereigener Taktgeber ab.
Keith C. Summa und Fred W. Turek

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

56 Das Schicksal einer Pfütze
Ästhetische Rissmuster in trockenem Sediment resultieren aus dem Zusammenspiel verschiedener Vorgänge.
H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

SERIE »DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT« TEIL 6

58 Lebende Ersatzteillager für menschliche Organe
Demnächst lassen sich individuell passende Organe für Patienten in Tieren züchten. Doch ist das ethisch vertretbar?
Jens Clausen

64 Der Kampf um das unendlich Kleine
Die Jesuiten bekämpften mit aller Macht das Konzept der Indivisiblen, einen Vorläufer der Integralrechnung – und zwar vorrangig aus religiösen Gründen.
Amir R. Alexander

► TITELTHEMA

SERIE »100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE«

42 Der Glanz des Genies

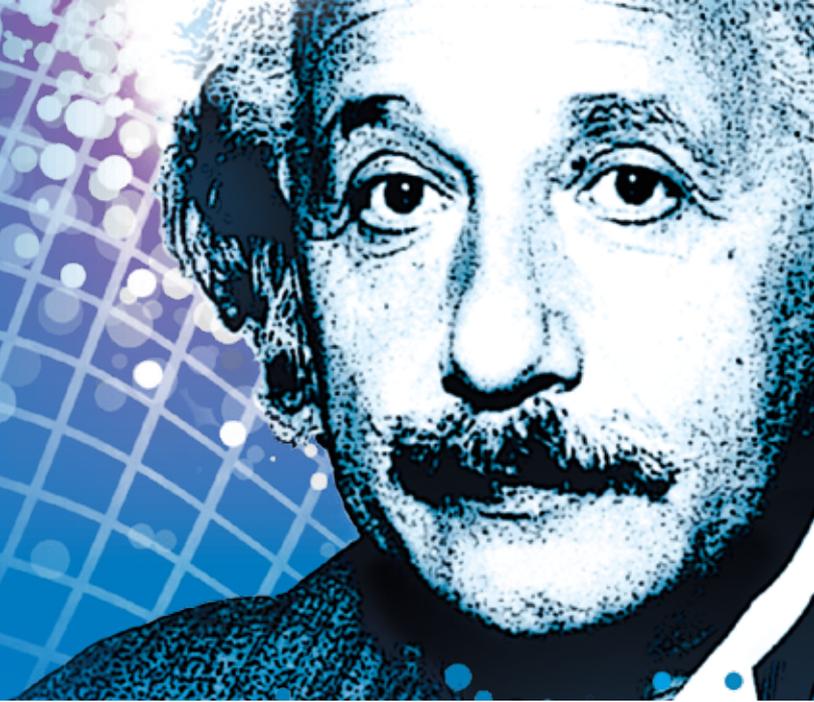
Brian Greene

Vor einem Jahrhundert veränderte Albert Einstein unsere Vorstellung vom Universum so fundamental, dass sein Erbe bis heute nachwirkt.

48 Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie

Michel Janssen und Jürgen Renn

Seine berühmten Formeln zur Beschreibung der Raumzeit waren das Ergebnis jahrelangen Ringens – mit einigen Sackgassen.



72



FOTOLIA / MARTIN SCHWAN

82



ISTOCK / RYERSON CLARK

ERDE & UMWELT

► 72 **Wellen als arktische Eisbrecher**

Das Meereis am Nordpol schwindet unerwartet schnell. Der Grund könnten Wellen in den offenen Wasserflächen sein.

Mark Harris

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

78 **Die skurrile Welt der Carbide**

Festkörper mit ausgefallenen Strukturen schlagen eine Brücke zwischen anorganischer und organischer Chemie.

Roald Hoffmann

TECHNIK & COMPUTER

► 82 **Intelligente Autos im Dilemma**

Wie sollen sich selbstfahrende Fahrzeuge bei drohenden Unfällen verhalten?

Alexander Hevelke und Julian Nida-Rümelin

Nach S. 86 finden Sie eine Sonderpublikation der Gesellschaft Deutscher Chemiker.



86 **Wissenschaft im Rückblick**

Chirurgiemagneten und Schallkugelschreiber

87 **Rezensionen**

Björn Schumacher: Das Geheimnis des menschlichen Alterns • Claude Martin: Endspiel • Chet van Duzer: Seeungeheuer und Monsterfische • Frans de Waal: Der Mensch, der Bonobo und die Zehn Gebote u. a.

94 **Leserbriefe/Impressum**

96 **Futur III**

Eric Garside: Am Tannhäuser Tor

98 **Vorschau**

Titelmotiv: Einstein: Getty Images / Lambert; Hintergrund: iStock / artishokcs; Composing: Spektrum der Wissenschaft / Claus Schäfer
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

GEODÄSIE

Verwirrung um den Nullmeridian

Wer das königliche Observatorium von Greenwich (England) aufsucht, findet im Innenhof einen Messingstreifen vor, der den Verlauf des »Greenwich-Meridians« markiert: jener Linie, die im Jahr 1884 als nullter Längengrad festgelegt wurde. Besucher, die über ein Smartphone mit Satellitennavigation verfügen, bemerken allerdings rasch, dass das Gerät dort nicht null Grad anzeigt. Erst 102 Meter weiter östlich stoßen sie auf den Nullmeridian, der aus geltenden Standardisierungen hervorgeht und von GPS-Geräten ermittelt wird.

Wie kommt es zu der Abweichung? Dem sind Forscher um Stephen Malys von der US-Behörde National Geospatial-Intelligence Agency (Nationale Agentur für geografische Aufklärung) nachgegangen. Ihre Erklärung: Der Versatz beruht auf einem Messfehler, dem die Astronomen und Vermesser des 19. Jahrhunderts hilflos ausgeliefert waren.

Mittels so genannter Zenitteleskope bestimmten die Astronomen damals den Meridiandurchgang bestimmter Referenzsterne, um die längengradabhängige Sternzeit zu messen. Für diese Aufgabe mussten die Teleskope exakt vertikal ausgerichtet sein. In Greenwich diente dazu – wie andernorts auch – ein quecksilbergefülltes Becken als »Wasserwaage«. Allerdings stimmt in diesem der Queck-

silberspiegel nicht gänzlich mit der Horizontalebene überein; vielmehr wird er durch örtliche Schwerkraftfelder geringfügig aus ihr ausgelenkt. Sowohl die bergige Landschaft rund um Greenwich als auch die Zusammensetzung des Bodengesteins unter dem Teleskop führten zu solchen Abweichungen – und somit zu Fehlern in der Bestimmung der lokalen Sternzeit. GPS-Satelliten unterliegen solchen Störungen nicht und projizieren daher ein etwas anderes Längengradnetz auf die Erde.

J. Geodesy 10.1007/s00190-015-0844-y, 2015



Der einst festgelegte Greenwich-Meridian (gestrichelt) unterscheidet sich von dem, den GPS-Geräte zeigen (durchgezogen).

GOOGLE MAPS / INFOTERRA LTD. & BLUESKY



Mehr Aktualität!

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

MEDIZIN

Kehrtwende in der Alzheimertherapie

Forscher um die Neurobiologin Michal Schwartz vom Weizmann Institute of Science (Israel) haben eine neue Alzheimertherapie im Tierversuch erfolgreich erprobt. Lange Zeit habe man beim Behandeln dieser Demenzerkrankung darauf gesetzt, das Immunsystem zu dämpfen; nun versuche sie es auf entgegengesetztem Weg, so Schwartz. Ihr Team ließ die Körperabwehr demenzkranker Mäuse »von der Leine«, indem es so genannte regulatorische T-Zellen der Nager blockierte. Diese Zellen gehören zu den T-Lymphozyten und haben die Funktion, Immunreaktionen des Körpers zu bremsen, damit diese sich nicht gegen körpereigene Strukturen richten – ein Mechanismus, um Autoimmunkrankheiten zu verhindern.

Im Gehirn der so behandelten Mäuse waren mehr Immunzellen

(darunter T-Lymphozyten) nachweisbar als bei nicht behandelten Kontrolltieren. Damit einhergehend schwand dort auch die Menge der Beta-Amyloid-Ablagerungen, der so genannten senilen Plaques, die als mögliche Auslöser der Erkrankung gelten. Auch die Entzündungsreaktionen im Gehirn ließen nach. Zudem erzielten die Mäuse in Gedächtnistests bessere Ergebnisse.

Ob eine Blockade der regulatorischen T-Zellen beim Menschen in Frage kommt, um neurodegenerative Erkrankungen zu behandeln, ist unklar. Die Forscher müssen erst einmal genauer untersuchen, was die zusätzlichen Abwehrzellen im Gehirn noch alles bewirken – insbesondere, ob sie auch gesundes Hirngewebe angreifen.

Nat. Commun. 6, 7967, 2015

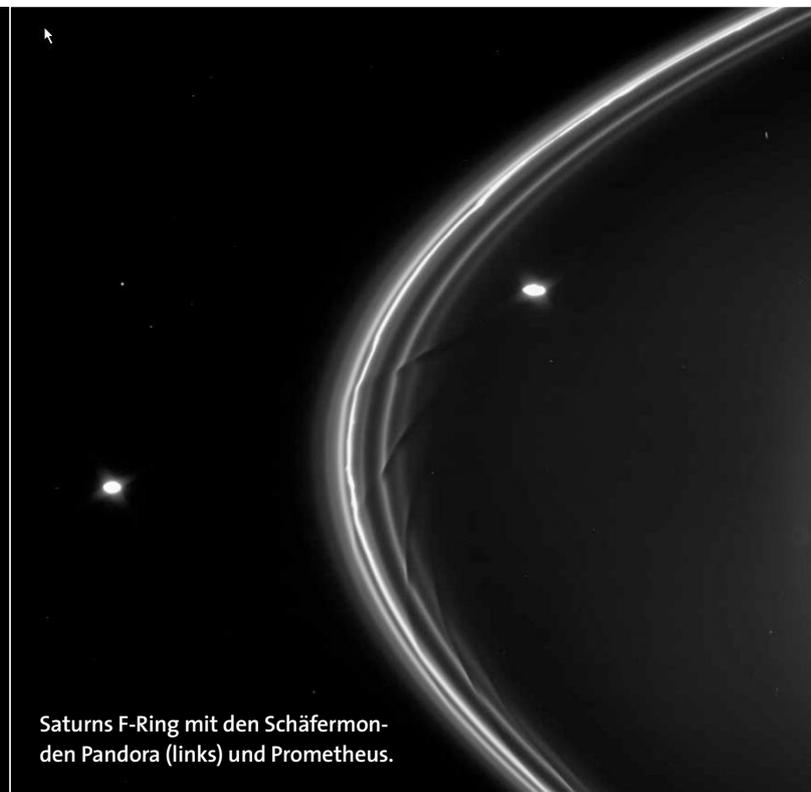
ASTRONOMIE

Rätsel um Saturnring gelöst

Wissenschaftler von der Universität Kobe (Japan) haben herausgefunden, wie der F-Ring des Saturns mutmaßlich entstanden ist – und damit ein altes Rätsel gelöst. Der F-Ring umgibt den Planeten etwas außerhalb der auffälligen Hauptringe, links und rechts von ihm (in der Ringebene) kreisen die »Schäfermonde« Prometheus und Pandora um den Saturn. Mit einer Breite von rund 100 Kilometern ist der Ring sehr zart, weshalb sich Astronomen fragen, warum er sich nicht längst aufgelöst hat.

Die japanischen Planetologen Ryuki Hyodo und Keiji Ohtsuki setzten numerische Simulationen ein, um die Entstehung des F-Rings im Computer nachzustellen. Laut den Ergebnissen sind Ring und Schäfermonde aus dem Zusammenstoß zweier Vorgängermonde hervorgegangen. Für den Verlauf der Simulationen war entscheidend, ob die frühen Begleiter einen dichten Kern besaßen, etwa aus Silikaten, oder nicht. Im ersten Fall brachte die Kollision einen schmalen Ring hervor, den zwei Saturntrabanten stabilisieren – so, wie es Astronomen heute beobachten. Im zweiten Fall entstand lediglich der Ring ohne Monde.

Bei den Simulationen zeigte sich zudem, dass die Vorgängermonde nicht frontal aufeinandergeprallt sein können, sonst wären sie verschmolzen. Vielmehr müssen sie in schrägem Winkel zusammengestoßen sein, wobei sie zum Teil intakt blieben und eine Unmenge kleinerer Bruchstücke entstand, die den sich bildenden Ring speisten. Die beiden Restmonde drifteten infolge des Aufpralls auf



Saturns F-Ring mit den Schäfermonden Pandora (links) und Prometheus.

NASA / JPL / SSI

neue, getrennte Bahnen, wo sie das zwischen ihnen befindliche Ringmaterial bis heute zusammenhalten. Viele Simulationsläufe lieferten für die Schäfermonde zusammen etwa so viel Masse wie für den Ring. Das stimmt mit tatsächlichen Beobachtungsdaten der Raumsonde Cassini überein.

Nat. Geosci. 10.1038/ngeo2508, 2015

ARCHÄOLOGIE

Jungsteinzeitgrab belegt Massenmord und Verstümmelung

Ein 7000 Jahre altes Massengrab im hessischen Schöneck-Kilianstädten enthält die Überreste von mindestens 26 Menschen, vor allem Männer und Kinder, die vermutlich gezielt getötet und verstümmelt wurden. Entdeckt haben es Forscher um den Anthropologen Christian Meyer von der Universität Mainz. Der Fund ist ein weiteres Indiz dafür, dass sich in der Jungsteinzeit kriegerische Konflikte ereigneten – vielleicht befördert durch die sesshafte Lebensweise, die ein Ausweichen bei Auseinandersetzungen erschwerte.

Vor 7000 Jahren hatte sich in Mitteleuropa die bandkeramische Kultur

verbreitet, die älteste bäuerliche Kultur der Jungsteinzeit mit dauerhaften Siedlungen. Bandkeramische Massengräber bei Talheim (Baden-Württemberg) und Asparn (Österreich) hatten schon früher vermuten lassen, dass es in dieser Zeit kriegerische Handlungen gab. Die neuen Funde von Schöneck-Kilianstädten untermauern dies nun.

Die Toten in dem Grab sind recht achtlos verscharrt worden. Ihre Überreste zeigen Spuren von Kopfverletzungen, die wahrscheinlich mit Dechseln zugefügt wurden, Vorläufern von Hacke, Beil und Axt, die als Universalwerkzeug in der Landwirtschaft

dienten. Besonders bemerkenswert ist, dass den Opfern offenbar systematisch die Beine gebrochen wurden – entweder kurz vor oder nach dem Tod, vielleicht als Foltermaßnahme, zur Fluchtvereitelung oder als Akt der psychologischen Kriegsführung.

Wie die bisherigen Indizien nahelegen, häuften sich Ausbrüche organisierter Massengewalt gegen Ende der bandkeramischen Ära vor zirka 6000 Jahren. Womöglich hängt das Verschwinden der Kultur damit zusammen.

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 10.1073/pnas.1504365112, 2015

PHYSIK

Winzige Antennen wandeln Strom in Licht

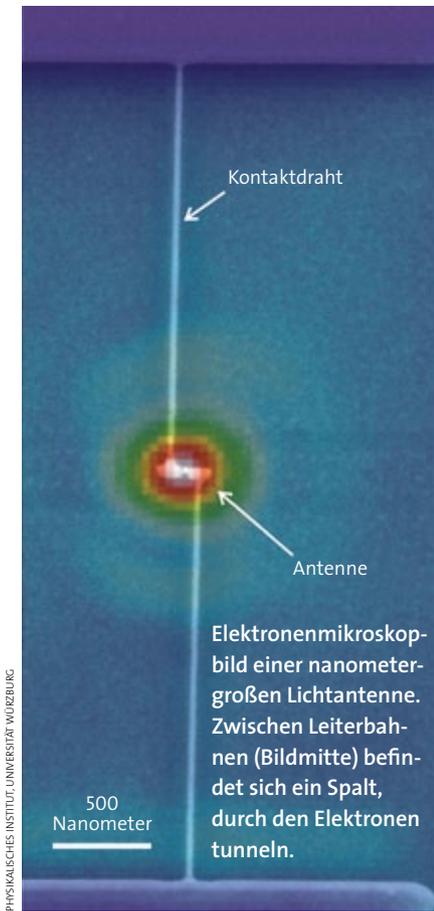
Physikern ist es gelungen, nanometergroße Antennen herzustellen, die bei Anlegen einer elektrischen Spannung Licht aussenden. Die Forscher um Bert Hecht von der Universität Würzburg erzeugen auf einem Glasträger winzige Leiterbahnen aus Gold, die nur wenige zehn Nanometer (milliardstel Meter) breit und lang sind. Deren Enden berühren sich fast, mit einer winzigen Lücke. In dieser platzieren die Forscher ein Nanoteilchen aus Gold, das die Lücke beinahe ausfüllt – aber nur beinahe: Es bleibt noch ein wenige Nanometer breiter Spalt.

Legen die Physiker nun über Kontaktdrähte eine elektrische Spannung an die Leiterbahnen an, überwinden Elektronen den Spalt auf Grund des quantenmechanischen Tunneleffekts. Dabei kommt es zu einem so genannten Schrotrauschen: Schwankungen des Stromflusses infolge der Tatsache,

dass zufallsbedingt mal mehr und mal weniger Ladungsträger pro Zeit die Barriere überwinden. Bei geeigneten Randbedingungen führt das zu Stromoszillationen im optischen Frequenzbereich – und damit einhergehend zur Aussendung sichtbaren Lichts.

Welche Farbe das Licht besitzt, hängt von der Länge der Leiterbahnen sowie von der Höhe der angelegten Spannung ab. Es sei die bislang kompakteste elektrisch betriebene Lichtquelle der Welt, betonen die Forscher. Sie könnte möglicherweise in Displays eingesetzt werden, aber auch zur Übertragung von Daten auf einem Chip. Bis zur Anwendungsreife müssen die Physiker allerdings weiter an der Effizienz feilen: Beim Betrieb geht noch zu viel Strom in Form von Wärme verloren, außerdem funktioniert die Nanostruktur bisher nur einige Stunden lang.

Nat. Photonics 10.1038/NPHOTON.2015.141



NEUROWISSENSCHAFT

Das Gehirn pfeift beidseitig

Menschen, die sich per Pfeifsprache verständigen, klingen nicht nur ungewöhnlich, sie denken auch anders. Das legt eine Studie an 31 Einwohnern des Dorfs Kuşköy im Nordosten der Türkei nahe. Diese sprechen nicht nur Türkisch, sie können das Mitzuteilende auch in eine eigene Pfeifsprache übertragen – in eine Abfolge von gepfiffenen Lauten also. Sie dient dazu, sich in der bergigen Region über weite Strecken (oft viele hundert Meter) zu verständigen. Der Bochumer Neurowissenschaftler Onur Güntürkün hat die Dorfbewohner untersucht und dabei festgestellt: Ihr Gehirn greift bei einer gepfiffenen Konversation stärker auf die rechte Hirnhälfte zurück als bei normalen Unterhaltungen.

Güntürkün schließt das aus Experimenten zum so genannten dichotischen Hören. Dabei bekamen die Pfeifer auf dem linken Ohr jeweils eine andere Silbe vorgespielt als zeitgleich auf dem rechten. Anschließend wurden die Teilnehmer gefragt, was sie vernommen hatten. Handelte es sich um gesprochenes Türkisch, setzte sich meist der auf dem rechten Ohr eingespielte Reiz durch; dieses ist mit der sprachlich dominierenden linken Hirnhälfte verbunden.



Pfeifdialog im Nordosten der Türkei: Der Abgebildete verständigt sich mit einem 700 Meter entfernten Mann.

Hörten die Teilnehmer hingegen Pfeifsprache, verschwand die Dominanz des rechten Ohrs, und die Reize von beiden Seiten drangen mit ungefähr gleich großer Wahrscheinlichkeit durch.

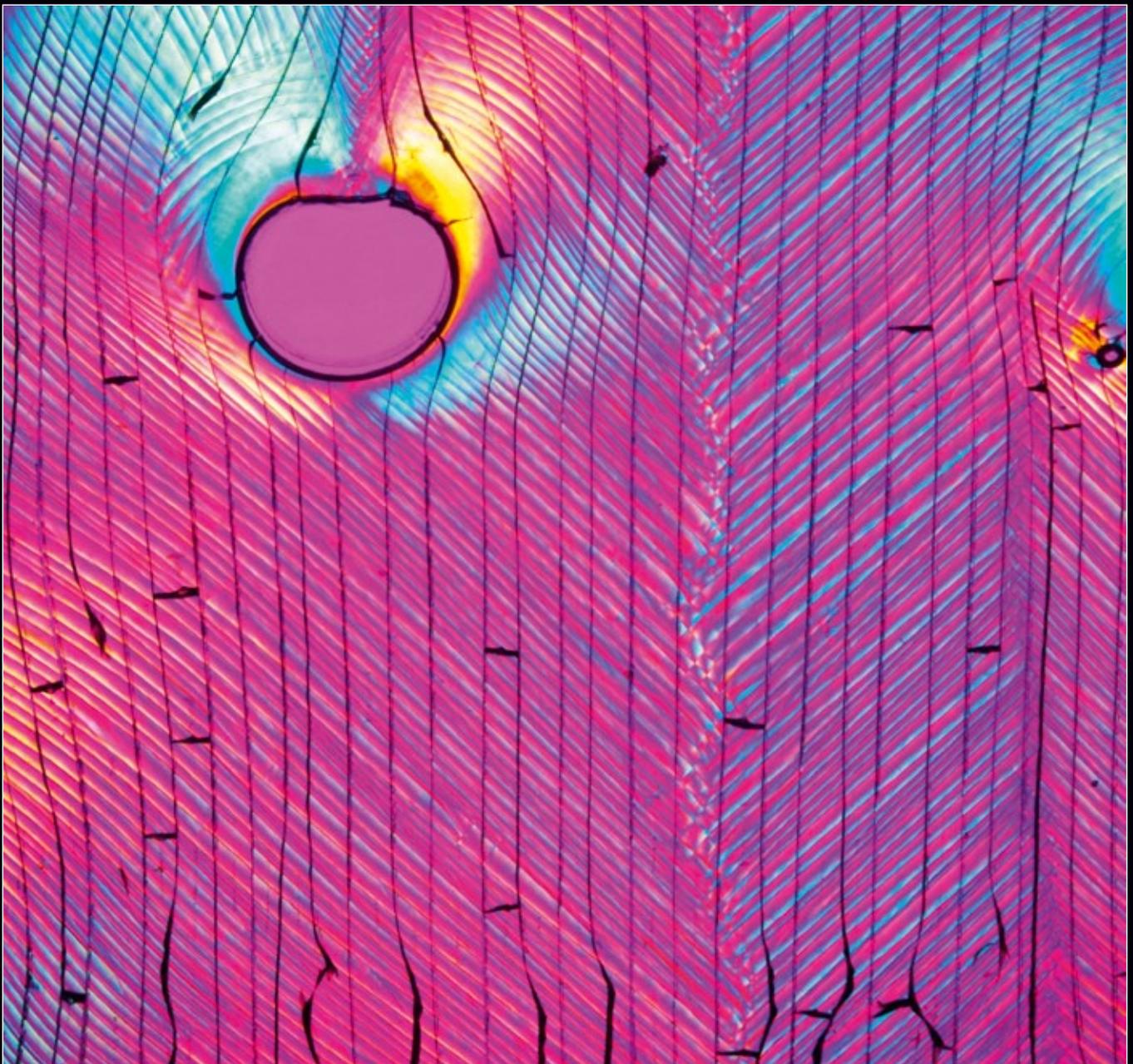
Sollte sich dieses Ergebnis in EEG- und MRT-Studien bestätigen, wäre Pfeifsprache die erste Form sprachlicher Kommunikation, bei der nicht die linke Hirnhälfte den Löwenanteil der Verarbeitung übernimmt. Die rechte Hälfte ist generell für die Verarbeitung von Melodien und Tonfolgen zuständig – auch bei Nichtpfeifern.

Curr. Biol. 25, R693–R710, 2015

TROCKNEN IM ZICKZACK

Viele Stoffgemische, etwa Farben oder Kosmetika, bestehen aus feinen Partikeln in einer Lösung. Forscher vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen untersuchten, was geschieht, wenn solche Kolloide langsam austrocknen: Der Flüssigkeitsverlust entzieht dem Inneren Wasser und erzeugt so Scherkräfte. Diese produzieren unter der festen Oberfläche charakteristische, diagonale Streifenmuster, wie unter dem Polarisationsmikroskop zu sehen ist.

Phys. Rev. Lett. 115, 088302, 18. August 2015



ARCHÄOMETRIE

Die lange Reise des Egtved-Mädchens

Die Überreste einer »Dänin« der Bronzezeit haben ein weiteres Geheimnis preisgegeben: Strontiumisotope verraten, dass sie vielleicht aus dem Schwarzwald stammte.

VON ANNINE FUCHS

Zahlreiche Schwertfunde in Dänemark belegen, dass man dort im 4. Jahrtausend v. Chr. die Kunst süd-deutscher Bronzeschmiede kannte und schätzte. Im Zuge des Fernhandels dürften insbesondere Angehörige der Oberschicht weit mobiler gewesen sein, als man es lange für die Bronzezeit annahm – da sind sich die Experten einig. Doch Artefakte allein verraten wenig über die Routen. Daher kommen zunehmend naturwissenschaftliche Methoden wie die Isotopenanalyse von Geweberesten ins Spiel.

Eine Spezialistin auf diesem Gebiet ist Karin Frei, leitende Wissenschaftlerin des Dänischen Nationalmuseums, die jüngst in Zusammenarbeit mit der Kopenhagener Universität das »Egtved-Mädchen« genauer untersuchte (»Tracing the dynamic life story of a Bronze Age Female«, *Scientific Reports*, Mai 2015, www.nature.com/srep/2015/150521/srep10431/full/srep10431.html). Diese 16- bis 18-Jährige ist vor etwa 3400 Jahren gestorben und in einem monumentalen Grabhügel nahe der heutigen Stadt Egtved auf der dänischen Halbinsel Jütland bestattet worden. Kleidung und andere Attribute verraten, dass sie der Elite angehört hat. Möglicherweise war sie eine Priesterin. Doch stammte sie überhaupt von Jütland?

Das in den Überresten von Lebewesen enthaltene Strontium (Sr) sollte darüber Aufschluss geben. Über Wasser und Nahrung gelangt das Erdalkalimetall in Pflanzen und Tiere, wo es an Stelle von Kalzium in Körpergewebe einge-

baut wird. Strontium kommt aber in mehreren Atomvarianten vor, die sich in ihrer Neutronenzahl im Atomkern, also in ihrem Atomgewicht, unterscheiden und deshalb mit Hilfe eines Massenspektrometers separiert und identifiziert werden können. Der besondere

Wert für Anthropologie und Archäologie rührt daher, dass die Anteile der Strontiumisotope in einer Region von deren Geologie abhängt. Insbesondere das Verhältnis von ^{86}Sr zu ^{87}Sr kann helfen, den Aufenthaltsort eines Lebewesens in einem bestimmten Zeitintervall



DÄNISCHE NATIONALMUSEUM, ROBERTO FORTUNA & KIRA LUSEM / CC-BY-SA-2.5 (CREATIVCOMMONS.ORG/licenses/by-sa/2.5/DE/CC0)

Die für diese Oberkleider geschorenen oder getöteten Tiere weideten der Isotopenanalyse zufolge in einer bergigen Region – vermutlich im Schwarzwald.



DÄNISCHE NATIONALMUSEUM, ROBERTO FORTUNA & KIRA URSEM / CC-BY-SA-2.5 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/2.5/LEGALCODE)

durch einen Vergleich mit entsprechenden Bodenproben zu bestimmen.

Da sich der Zahnschmelz der Backenzähne in den ersten drei bis vier Lebensjahren bildet und danach nicht mehr erneuert wird, lieferte dessen Analyse erste Hinweise auf den Geburtsort des »Egtved-Mädchens« – es stammte nicht von Jütland!

Die Haare verraten noch weit mehr: Weil sie im Mittel einen Zentimeter im Monat wachsen, speicherten sie bei einer Gesamtlänge von gut 23 Zentimetern die Strontiumwerte der letzten beiden Lebensjahre der Frau. Die Forscher unterteilten die Probenhaare der Länge nach in vier Abschnitte und entdeckten: Während Signaturen der ältesten und jüngsten mit denen der Proben aus dem Zahnschmelz übereinstimmten, zeigten die beiden mittleren die Werte Jütlands. Demzufolge hielt sich das Egtved-Mädchen höchstwahrscheinlich von 15 bis 5 Monate vor ihrem Tod dort auf. Davor und danach aber war sie in ihrer Heimat gewesen.

Ist sie auch dort gestorben und dann überführt worden? Warum sonst lassen sich die dänischen Isotopenverhältnisse nicht in den zuletzt gebildeten Haarspitzen nachweisen? Die Forscher weisen darauf, dass es mindestens vier Wochen dauert, bis das in einer Region aufgenommene Strontium eingelagert wird. Innerhalb dieser Zeit könnte die Frau also wieder nach Jütland gereist sein, wo sie kurz nach ihrer Ankunft

Nur wenig ist noch von der Toten erhalten, die in diesem Eichensarg nahe der Stadt Egtved auf Jütland ausgegraben wurde. Sie starb vor etwa 3400 Jahren und gehörte sicher der Oberschicht an. Strontiumisotope helfen, ihre Herkunft zu ermitteln.

starb. Kohlen- und Stickstoffisotope in Haarproben unterstützen diese Vermutung, da sie Informationen über die Ernährungsweise liefern: Die Kost des Mädchens war in ihren letzten Wochen arm an Protein gewesen – möglicherweise starb sie an Unterernährung.

Was die Kleider verraten

Wo nun lag ihre Heimat? Strontiumsignaturen vergleichbar mit denen des Zahnschmelzes, des Daumnagels und der entsprechenden Haarsegmente fanden sich in Norwegen, Schweden und auf der Insel Bornholm, aber auch in Süd- und Westeuropa. Tatsächlich können die Werte weit voneinander entfernt liegender Gebiete durchaus miteinander übereinstimmen.

Weitere Indizien lieferten die Strontiumsignaturen der Textilreste aus Wolle und Leder, die in dem Grab gefunden worden waren. Auch ihre Werte waren viel zu hoch für Dänemark, außerdem schwankten sie sehr stark. Das spricht dafür, dass die Tiere, deren Fell oder Haut verarbeitet worden war, in einer gebirgigen Region geweidet hatten. Die geologischen Verhältnisse in solchen Gegenden sind sehr abwechslungsreich, entsprechend mannigfaltig fallen die Isotopenverhältnisse aus. In

Frage kamen das Zentralmassiv in Frankreich und der Schwarzwald in Deutschland. Eingedenk der materiellen Hinterlassenschaften wie der erwähnten Schwerter kommen Karin Frei und ihre Kollegen zu dem Schluss: Das Egtved-Mädchen stammte mit hoher Wahrscheinlichkeit aus Süddeutschland.

Das passt zum Kontext der Fernbeziehungen bronzezeitlicher Kulturen. Die Dörfer des Schwarzwalds waren eine wichtige Zwischenstation des Bernsteinhandels von der Ostsee in den mediterranen Raum, umgekehrt waren Bronzeobjekte aus Süddeutschland im fast 1000 Kilometer entfernten Norden vermutlich als Statussymbole begehrt. Auf Grund der archäologischen Befunde wie auch durch Vergleiche mit späteren, teilweise rezenten Kulturen vermuten Prähistoriker, dass die miteinander Handel treibenden Gruppen ihre Verbindung durch eine Heiratspolitik festigten. Das Egtved-Mädchen mag also eine Braut gewesen sein, und alles spricht dafür, dass sie in ihrer Sippe einen hohen Rang bekleidete, der eine solche Mobilität erforderte.

Die Archäologin **Anine Fuchs** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Es werde – wieder – Licht

Sterben die Fotorezeptoren in der Netzhaut, wird man blind. Dank einem neuen gentechnischen Trick könnten jedoch andere, noch intakte Nervenzellen im Auge die Fähigkeit gewinnen, auf Licht zu reagieren.

VON CHRISTIAN WOLF

Millionen Menschen verlieren ihre Sehfähigkeit durch fortschreitende Degeneration der Netzhaut – teilweise oder vollständig. Um ihnen zu helfen, testen Forscher verschiedene Gentherapien, die das Augenlicht wiederherstellen könnten. Eine der vielversprechendsten bedient sich der Optogenetik, bei der es darum geht, Zellen mit Licht zu steuern. Denn während bei solchen Erkrankungen die auf optische Reize reagierenden Fotorezeptorzellen unwiederbringlich absterben, bleiben die Bipolar- und Ganglienzellen der Netzhaut meist funktionstüchtig. Diese könnten sich zu Ersatzrezeptoren umrüsten lassen.

Zu diesem Zweck schleusten Wissenschaftler bereits vor einigen Jahren einen lichtempfindlichen Ionenkanal aus der Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* in intakte Zellen der Retina: das Kanalrhodopsin-2. Wenn kurzweiliges, blaues Licht auf das Protein trifft, lässt es positiv geladene Ionen durch die Membran in die Zelle einströmen, was diese aktiviert. Tierstudien haben gezeigt, dass der Ansatz grundsätzlich funktioniert. Beispielsweise baute ein Team um Alan Horsager von der University of Southern California in Los Angeles Kanalrhodopsin-2 in die Bipolarzellen von blinden Mäusen ein (*Molecular Therapy* 19/7, S. 1220–1229, 2011). Auf diesem Weg gelang es ihnen, das Augenlicht der Tiere teilweise wiederherzustellen.

Doch die Methode hat ein paar Haken. Unter anderem benötigt das Kanalprotein sehr intensives Licht. Zwar kreierte Forscher inzwischen genetische Varianten davon, die lichtempfindlicher sind (*PLoS One* 9/6, e98924, 2014). Dennoch scheinen der Verbesse-

rung der Sensitivität enge Grenzen gesetzt zu sein – und damit auch diesem Ansatz.

Ein schweizerisch-deutsches Team um Sonja Kleinlogel von der Universität Bern hat daher einen etwas anderen Weg eingeschlagen (*PLoS Biology* 13/5, e1002143, 2015). Die Forscher setzten dafür an den so genannten ON-Bipolarzellen der Netzhaut an. Diese werden aktiv, sobald sich der Grad der Beleuchtung in der Umgebung erhöht, etwa wenn man eine Lampe einschaltet oder in die Sonne hinaustritt. Normalerweise erhalten die ON-Zellen die entsprechenden Informationen von den Fotorezeptoren und leiten ihrerseits Signale weiter zu den Ganglienzellen, der letzten Station der visuellen Verarbeitung in der Retina.

Andere Netzhautneurone als Ersatz

Nun sollten diese Zellen aber selbst auf Licht reagieren. Um das zu erreichen, griffen die Forscher auf das netzhaut-eigene Melanopsin aus einer kleinen Untergruppe von Ganglienzellen zurück. Das Protein reagiert vor allem auf blaues Licht und trägt dazu bei, dass diese lichtempfindlichen Ganglienzellen Informationen über die Umgebungshelligkeit und die Dauer von Tag und Nacht liefern und so den Tag-Nacht-Rhythmus des Organismus mitsteuern.

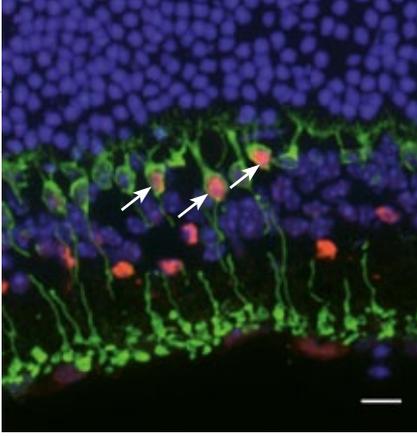
Das Melanopsin koppelten die Wissenschaftler an ein Rezeptormolekül namens mGluR6, das natürlicherweise auf ON-Bipolarzellen vorkommt. Im gesunden Auge erhält es über den Botenstoff Glutamat Signale von den Fotorezeptoren. Durch das Melanopsin reagiert es nun statt auf Glutamat direkt

auf Licht. Das neue lichtempfindliche Molekül taufte die Forscher Opto-mGluR6. Sein wesentlicher Vorzug: Die biochemische Signalweiterleitung in den Bipolarzellen ist bereits an mGluR6 angepasst.

Mit Hilfe eines Virus schleusten die Forscher den genetischen Bauplan des neu geschaffenen Fotorezeptormoleküls in die Netzhaut von Mäusen, die unter einer erblichen Form von Netzhautdegeneration litten. Die Bipolarzellen stellten dann von selbst das künstliche Rezeptorprotein her – und zwar über Monate hinweg.

Einige Wochen nach der Injektion der Genfahre testeten die Wissenschaftler die Empfindlichkeit der Netzhaut für blaues Licht. Tatsächlich rief die Strahlung elektrische Antworten in der Netzhaut von Mäusen mit dem eingebauten Rezeptor hervor. Teilweise fiel die Reaktion allerdings schwächer aus als bei normal sehenden Tieren. Darüber hinaus registrierten die Forscher auch im Gehirn – genauer: in der Sehrinde – eine stärkere Aktivität als bei blinden Kontrollmäusen.

Das neu gewonnene Augenlicht machte sich zudem im Verhalten bemerkbar, etwa bei Schwimmaufgaben. Dabei galt es, mittels eines LED-Lichts als Orientierungshilfe eine im Wasser versteckte Plattform zu finden, um das Schwimmbecken wieder verlassen zu können. Die Nagetiere mit Opto-mGluR6 schnitten hier nicht schlechter ab als normal sehende Mäuse. Der Rezeptor besitzt auch eine hohe zeitliche Auflösung: Bei Patch-Clamp-Messungen reagierte Opto-mGluR6 auf einen kurzen Lichtreiz vergleichbar schnell wie die normalen Fotorezeptoren von gesunden Mäusen.



In dem mit Fluoreszenzfarbstoffen markierten Querschnitt der Netzhaut leuchten die lichtempfindlich gemachten Bipolarzellen rot auf (Pfeile). Der weiße Balken ist 20 Mikrometer lang.

Sollte die Vorgehensweise eines Tages in eine klinische Therapie umgesetzt werden, könnte eine solche Behandlung jenen Menschen helfen, die durch Verlust ihrer Fotorezeptoren erblindet oder zumindest in ihrer Sehfähigkeit eingeschränkt sind. Dazu zählen etwa Menschen mit Retinitis pigmentosa, einer vergleichsweise seltenen erblichen oder durch spontane Mutation entstehenden Netzhautdegeneration. Der neue Ansatz könnte sich aber auch für die weitaus größere Patientengruppe auszahlen, die an altersbedingter Makuladegeneration leidet. Bei dieser Erkrankung der Netzhaut, die immerhin jeden Zehnten mit über 65 Jahren bis zu einem gewissen Grad trifft, verlieren die Zellen im Punkt des schärfsten Sehens allmählich ihre Funktion. Opto-mGluR6 könnte die Betroffenen in die Lage versetzen, wieder Gesichter zu erkennen, zu lesen oder Auto zu fahren, glauben die Forscher.

Hilfe bei Makulaschaden?

Gegenüber den früheren Ansätzen mit Kanalrhodopsin-2 weist die neue Methode einige Vorzüge auf. So reagiert in Bipolar- oder Ganglienzellen eingeschleustes Kanalrhodopsin-2 erst bei einer Lichtintensität, die einem sonnigen Tag auf einem Schneefeld entspricht. Das Kanalprotein ist also vergleichsweise wenig empfindlich. Bei dem neuen Rezeptor Opto-mGluR6 mit Melanopsin reicht hingegen normales Tageslicht aus, um ihn zu aktivieren. Sollte der Ansatz eines Tages erfolgreich therapeutisch genutzt werden, könnten Patienten daher unter üblichen Lichtbedingungen sehen, ohne dass sie verstärkende Spezialbrillen tragen müssten.

Anders als Kanalrhodopsin-2 behält Melanopsin zudem seine Helligkeitsempfindlichkeit, auch wenn es oft und von grellem Licht getroffen wird – es bleicht nicht aus, wie man sagt. Und zu guter Letzt besteht Opto-mGluR6 aus zwei netzhauteigenen Proteinen. Die Bipolarzelle sieht den daraus zusammengesetzten Rezeptor daher nicht als Fremdkörper an. Entsprechend ist es laut den Forschern um Kleinlogel sehr unwahrscheinlich, dass das Immunsystem gegen den Rezeptor vorgeht. In ihrer Studie konnten sie jedenfalls bei den behandelten Mäusen keine Abwehrreaktion innerhalb der Netzhaut feststellen. Allerdings muss der Ansatz diesbezüglich noch genau geprüft werden, bevor er in die klinische Anwendung gelangt.

Doch trotz aller Vorzüge hat die neue Methode ihre Grenzen. So kann Opto-mGluR6 das Farbsehen nicht wiederherstellen. Bei Mäusen und Menschen gibt es im Auge verschiedene Fotorezeptortypen: die Stäbchen, die einfach Licht, also Grautöne wahrnehmen, und die Zapfen, die nur auf bestimmte Wellenlängen reagieren und damit Farbwahrnehmung ermöglichen. Da Opto-mGluR6 nur ein Sehpigment trägt, sieht man mit diesem Rezeptor wie mit den Stäbchen alles in Grau. Auch deckt der neue Ansatz das Spektrum der von der Netzhaut erfassten Wellenlängen nur zum Teil ab. Dennoch liefert die optogenetische Gentherapie einen viel versprechenden Weg, um von Blindheit bedrohten Menschen zumindest eine gewisse Sehfähigkeit wiederzugeben.

Christian Wolf ist promovierter Philosoph und Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Internationale Fachmesse
Ideen · Erfindungen · Neuheiten

iENA

In Kombination mit:
START MESSE
Gründung
Finanzierung
Nachfolge
Franchising
31.10.+1.11.
MESSE NÜRNBERG

2015

29. Okt. - 1. Nov.



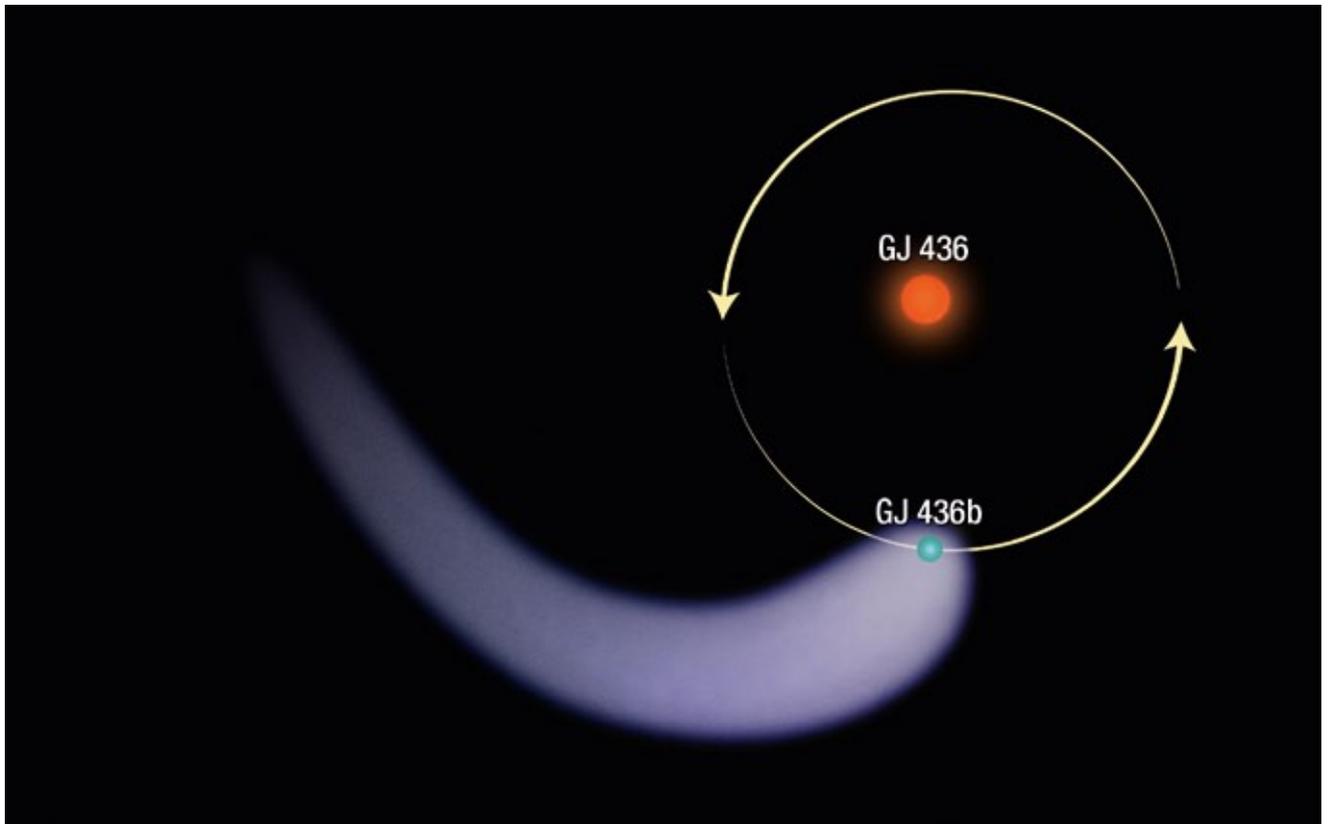
- **Neue Ideen für den Markt.**
Die iENA 2015 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.
- **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.
- **iENA-Symposium**
„Mit der Idee zum Erfolg“,
Samstag, 31.10., 10-12:30 Uhr
(Teilnahme im iENA-Eintritt enthalten)
- **Innovationseminar:**
„Strategien des Innovations-Managements“,
Freitag, 30.10., 10-16 Uhr
(Teilnahme im iENA-Eintritt enthalten)
- **Fachberatung und Information**
Messe Nürnberg · Halle 12

In Kooperation mit:



Veranstalter/Organisation
AFAG Messen und Ausstellungen GmbH
☎ 09 11-9 88 33-570

iena@afag.de · www.iena.de



ASTRONOMIE

Exoplanet mit Schweif

Der Planet Gliese 436b verliert mehr als 1000 Tonnen seiner Wasserstoffhülle pro Sekunde. Schuld ist die Einstrahlung durch seinen Mutterstern.

VON JAN HATTENBACH

Er ist nur wenig größer und schwerer als Neptun. Doch anders als der äußerste Planet unseres Sonnensystems umrundet der 2004 entdeckte Exoplanet Gliese 436b seinen Mutterstern in großer Nähe: Nur 4,5 Millionen Kilometer trennen ihn von dem Roten Zwerg Gliese 436. Für Astronomen ist das ein Katzensprung: Der innerste Planet unseres Sonnensystems, Merkur, umkreist die Sonne in mehr als zehnfacher Distanz. Auch wenn der im Sternbild Löwe gelegene Gliese 436 nicht einmal drei Prozent der Sonnenleuchtkraft erreicht, sollte er in dieser kurzen Distanz die Atmosphäre seines planetaren Begleiters enorm aufheizen und ins All blasen. Astronomen um David Ehrenreich vom Observatorium der Universi-

tät Genf fanden nun einen klaren Beleg für den Atmosphärenschwund: Eine gigantische Wolke aus Wasserstoff umgibt den Planeten – Gas, das einst in seiner Atmosphäre gefangen war. Auf die Atome dieser Wolke wirkt neben der Anziehungskraft des Sterns der nach außen gerichtete Strahlungsdruck des Sternlichts, erklärt Ehrenreich: »Dieser Druck gleicht die Gravitationskraft des Sterns teilweise aus und nimmt mit zunehmender Entfernung vom Stern ab. Dadurch entsteht ein Schweif, der offenbar dem Planeten folgt, ähnlich wie der Staubschweif einem Kometen.« Jedoch besteht der »Exoplanetenschweif« nicht aus Staub, sondern aus neutralen Wasserstoffatomen (*Nature* 522, S. 495–461, 2015).

Die Entdeckung gelang Ehrenreich und seinen Mitarbeitern mit dem Weltraumteleskop Hubble. Viermal hatten sie das Teleskop zwischen Januar 2010 und Juni 2014 auf den 33 Lichtjahre entfernten Stern gerichtet und dessen Licht mit dem bildgebenden Spektrografen STIS untersucht. Den Planeten allerdings kann selbst Hubble nicht direkt ablichten – er verblasst im Glanz seines vielfach helleren Zentralgestirns. Alle 2,6 Tage jedoch läuft Gliese 436b von der Erde aus gesehen vor diesem vorüber und blockt dabei einen geringen, aber messbaren Teil des Sternlichts ab. So konnten Astronomen bereits 2007 aus der periodischen Schwankung der Sternhelligkeit Masse und Größe des Planeten exakt bestimmen. Das

Wasserstoffgas des Planetenschweifs ist aber viel zu sehr ausgedünnt, um den Stern im optischen Spektralbereich zusätzlich messbar abzdunkeln. Bei ihren Untersuchungen kam den Forschern schließlich der Umstand zu Hilfe, dass das Hubbleteleskop ungestört von der Erdatmosphäre arbeitet: Es kann damit zum Beispiel das energiereichere Ultraviolettlicht von Gliese 436 beobachten, das von der irdischen

Diese Schemazeichnung zeigt das System mit dem roten Zwergstern Gliese 436 und dem neptunähnlichen Planeten Gliese 436b in der Draufsicht. Eingezeichnet ist die Umlaufbahn des Planeten um den Massenschwerpunkt des Systems. Während des Transits lässt sich der Schweif aus Wasserstoffgas anhand einer verstärkten Lyman-Alpha-Absorption des Sternlichts nachweisen.

Lufthülle weit gehend herausgefiltert wird und daher für erdgebundene Teleskope unsichtbar ist. Da Wasserstoffgas bestimmte, im Ultraviolettbereich liegende Spektrallinien absorbiert, sollte man nicht nur den Transit des Planeten, sondern auch den seines Gaschweifs in diesem Spektralbereich erkennen können.

Beobachtungen und Simulationen passen zusammen

Tatsächlich stellten die Astronomen fest, dass die markanteste Absorptionslinie des Wasserstoffs im Ultraviolettlicht, die Lyman-Alpha-Linie, um ein Vielfaches stärker geschwächt wird als das optische Licht des Sterns – und das nicht nur, während der Planet vor seinem Stern steht, sondern bereits zwei Stunden vorher und bis zu einer Stunde danach. In keinem anderen Planetensystem ließ sich bislang ein derart ausgeprägter Transit im Ultraviolettlicht beobachten, berichten Ehrenreich

und seine Kollegen. Um sicherzugehen, dass diese Abschwächung nicht etwa durch magnetische Aktivität des Sterns ausgelöst wird, überwachten die Astronomen Gliese 436 zusätzlich mit dem Röntgenteleskop Chandra, fanden aber keine stellaren Ausbrüche im Röntgenlicht. Für die Schwankungen des Sternlichts sei also einzig der Planet mit seiner Gaswolke verantwortlich, so die Forscher. Zudem stimmen die Beobachtungsergebnisse gut mit einem im Computer simulierten Modell der Wolke überein: Den Berechnungen zufolge verliert Gliese 436b pro Sekunde rund 1000 Tonnen neutrales Wasserstoffgas.

Das klingt viel, summiert sich im Lauf von einer Milliarde Jahren aber nur auf gerade einmal 0,1 Prozent der Gesamtatmosphäre des Planeten. Während des viele Milliarden Jahre langen Lebens seines Zentralsterns wird Gliese 436b also nur einen kleinen Teil seiner Gashülle verlieren. Anders dürfte das in fernen Sonnensystemen aussehen, in

 **STERNE UND
WELTRAUM**



DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2016

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2016 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

MOTIVE
JETZT SCHON
ONLINE
ANSCHAUEN!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.sterne-und-weltraum.de/kalender

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!



MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



In Folge 4 der Serie »Astroviews« über Exoplaneten von »Sterne und Weltraum« erfahren Sie, wie Forscher ferne Welten aufspüren.



www.spektrum.de/alias/videos-aus-der-wissenschaft/1170136

denen kleinere Planeten massereichere und damit heißere Sterne umkreisen: Dort könnte dieser Prozess sogar dazu führen, dass anfangs dichte Planetenatmosphären vollständig fortgeblasen werden. Erdgroße Planeten und selbst so genannte Super-Erden mit bis zu

zehnfacher Erdmasse halten ihre Atmosphäre weniger effektiv fest, da sie über eine geringere Gravitationskraft verfügen. So dürften viele von ihnen ihre Existenz als große »Gasplaneten« mit dichter Atmosphäre begonnen haben und sich erst durch den Einfluss ih-

rer nahen Sterne in nackte Felsplaneten verwandelt haben.

Auch unsere Erde verlor auf diese Weise in der Frühzeit des Sonnensystems einen Großteil ihrer Atmosphäre – und damit vermutlich ebenfalls einen gewissen Teils ihres bereits damals vorhandenen Wassers. Indem Wissenschaftler Exoplaneten wie Gliese 436b untersuchen, können sie also auch etwas über Prozesse lernen, die früher einmal in unserem Sonnensystem stattgefunden haben – und so die Entstehung unserer Heimatwelt besser verstehen.

Jan Hattenbach ist Physiker und passionierter Amateurastronom. Als Wissenschaftsjournalist schreibt er über alles, was am Himmel passiert.

MEDIZIN

Ultraschall öffnet Blut-Hirn-Schranke

Ein neuer Weg zur Behandlung von Hirntumoren oder der Alzheimerkrankheit.

VON EMILY UNDERWOOD

Ultraschall hat sich als vielseitiges Hilfsmittel in der Medizin erwiesen, sei es zur Abbildung des Ungeborenen im Mutterleib oder zum Zerkleinern von Nierensteinen. Nun soll er auch helfen, bösartige Erkrankungen im Gehirn zu behandeln. Dieses Organ ist durch eine Schicht aus dicht gepackten Zellen in den Wänden der hindurchführenden Blutgefäße gegen Krankheitserreger, Gifte und andere potenziell schädliche Stoffe abgeschottet (Bild). Das macht es schwer zugänglich für Medikamente oder Komponenten des Immunsystems. Durch eine Kombination aus Ultraschall und Gasbläschen lässt sich die Blut-Hirn-Schranke jedoch kurzzeitig durchbrechen, was ein Fenster für therapeutische Eingriffe öffnet. Im Labor und in Experimenten an Menschen wollen Forscher nun die Anwendungsmöglichkeiten genauer ergründen.

So hat Todd Mainprize, ein Neurochirurg an der University of Toronto

(Kanada), vor Kurzem mit ersten Tests begonnen, um mit Hilfe von Ultraschall bösartige Hirntumoren per Chemotherapie zu bekämpfen. Und im März lieferten Gerhard Leinenga und Jürgen Götz von der University of Queensland in Brisbane (Australien) einen der dramatischsten Belege für das Potenzial der Methode: Sie hatten es geschafft, pathologische Proteinablagerungen im Gehirn von Mäusen, die den Amyloidplaques bei Alzheimerpatienten entsprechen, per Ultraschall zu beseitigen (*Science Translational Medicine* 7, 278ra33, 2015). Das Erinnerungsvermögen und die kognitiven Fähigkeiten der Tiere verbesserten sich dadurch deutlich. »Wenn sich diese Befunde auf den Menschen übertragen lassen, wird das die Behandlung von Alzheimer revolutionieren«, meint der Biophysiker Kullervo Hynynen vom Sunnybrook Research Institute in Toronto, der als Erster die Öffnung der Blut-Hirn-Schranke mit Ultraschall erforscht hat.

Einige Wissenschaftler sind allerdings skeptisch, ob der Schritt von Nagetieren zum Menschen gelingt, und haben Bedenken wegen der Sicherheit – obwohl die in der Mäusestudie verwendeten Schallintensitäten relativ niedrig waren und den bei der Bildgebung üblichen Werten entsprachen. Der Neurologe Brian Bacskai vom Massachusetts General Hospital in Boston (Massachusetts), der über die Alzheimerkrankheit forscht und früher mit Hynynen zusammengearbeitet hat, sieht denn auch die entscheidende Krux des Verfahrens in der Kunst, die Blut-Hirn-Schranke gerade weit genug zu öffnen, um einen günstigen Effekt zu erzielen, ohne das Gewebe zu schädigen, eine überschießende Immunreaktion auszulösen oder Blutungen zu verursachen.

Die Abschottung des Gehirns gegenüber dem Blutkreislauf gefahrlos für kurze Zeit aufzuheben, ist ein Ziel, das die Mediziner schon länger verfolgen. Vor rund zehn Jahren begann Hynynen,

eine Kombination aus Ultraschall und Mikrobläschen dafür zu erproben. Die Idee war, dass die Bläschen unter dem Einfluss der hochfrequenten Schallwellen in raschem Wechsel expandieren und schrumpfen. Dabei erzeugen sie Lecks in der Blut-Hirn-Schranke, indem sie an den dicht gepackten Zellen zerren und sie teilweise auseinanderreißen.

Darin sehen Krebsforscher wie Mainprize die Chance, Chemotherapeutika ins Gehirn zu schleusen. Außerdem spekulierte schon Hynynen, dass durch die Öffnung womöglich Immunzellen in das Organ gelangen und dort in einer Entzündungsreaktion Beta-Amyloid abbauen: jenes Protein, das bei Alzheimerpatienten verklumpt und Nervenzellen absterben lässt. Es zu beseitigen, ist normalerweise die Aufgabe eines Mikroglia genannten Zelltyps im Gehirn. Diese Fresszellen sind mit dem Abbau jedoch anscheinend überfordert, wie Untersuchungen vor einiger Zeit ergaben. Der Kontakt mit eindringenden Immunzellen könnte sie dazu bringen, »aufzuwachen und ihre Aufgabe zu erledigen«, wie Bacskai sagt. Außerdem binden sich Antikörper

aus dem Blut möglicherweise direkt an das Beta-Amyloid und kennzeichnen es so als abzuräumenden Müll.

Hynynen und andere haben die Ultraschallmethode schon vor einiger Zeit an Mausmodellen der Alzheimerkrankheit erprobt. So berichteten er und seine Kollegen im Dezember 2014, dass das Verfahren in einem gentechnisch veränderten Mäusestamm, der die pathologischen Ablagerungen bildete, die Anzahl der Amyloidplaques verringerte – mit positiven Auswirkungen auf die kognitiven Fähigkeiten und das räumliche Lernen (*Radiology* 273, S. 736–745, 2014). Als Folge der Behandlung beseitigte die Mikroglia mehr Beta-Amyloid. Laut Isabelle Aubert, die mit Hynynen zusammenarbeitet, spricht das für die vermutete Aktivierung dieser Zellen durch eindringende Komponenten des Immunsystems.

Bei der jüngsten Untersuchung gingen Götz und sein Doktorand Leinenga ähnlich vor wie Hynynen und Aubert, verwendeten aber ein anderes Mausmodell der Alzheimerkrankheit. Sie injizierten den Tieren eine Flüssigkeit mit Mikrobläschen und führten dann

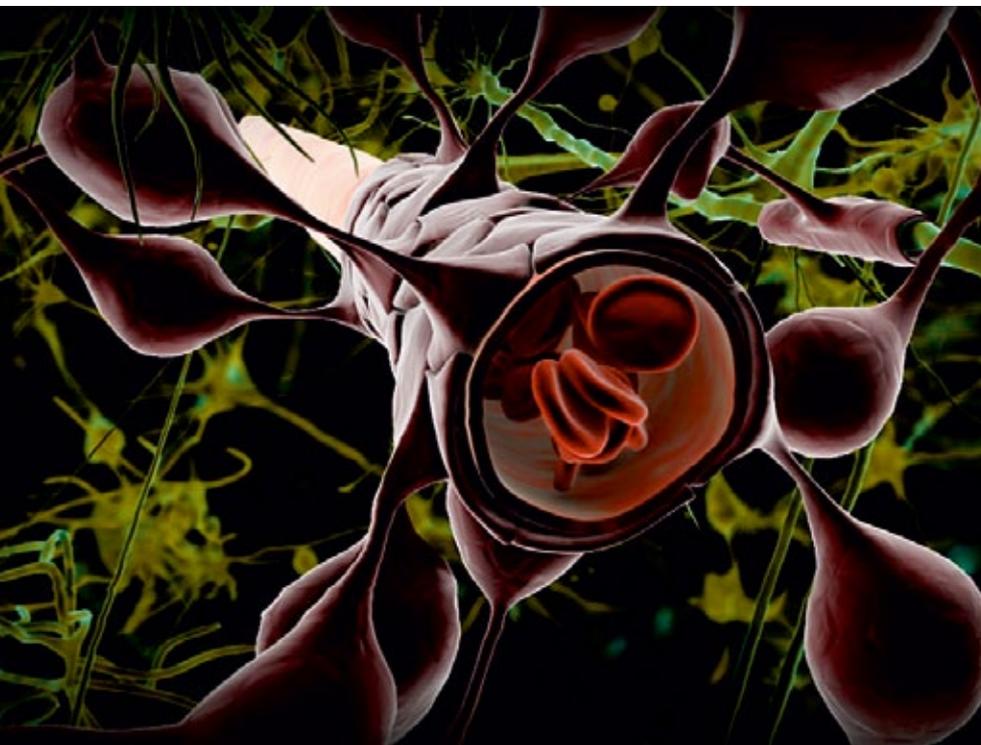
einen Ultraschallstrahl kreuz und quer über den gesamten Schädel der Nager, statt ihn nur auf einzelne Stellen zu richten, wie das andere Forscher zuvor getan hatten. Diese Behandlung nahmen sie fünfmal in sechs Wochen vor. Dann testeten sie die Mäuse mit drei verschiedenen Gedächtnisaufgaben. Bei den Tieren in der Kontrollgruppe, die nur die Flüssigkeit mit den Mikroblasen erhielten, war keine Veränderung zu beobachten. Die mit Ultraschall behandelten Nager schnitten dagegen in allen drei Tests erheblich besser ab als zuvor.

Entrümpelung des Gehirns

Bei diesen Mäusen verringerte sich die Menge der Amyloidplaques auf die Hälfte bis ein Fünftel. Offenbar regte das Verfahren auch den Appetit der Mikroglia an. In diesen Zellen fanden sich stark erhöhte Mengen des pathologischen Beta-Amyloids. Doch scheint das nicht der einzige Mechanismus zu sein, durch den sich die Merkfähigkeit der Tiere verbesserte. Aubert und Hynynen berichteten kürzlich, dass Ultraschall auch die Bildung und das Wachstum neuer Nervenzellen im Gehirn anregt (*Brain Stimulation* 7, S. 304–307, 2014).

Götz und Leinenga wollen das Verfahren als Nächstes an größeren Tieren mit Amyloidplaques erproben, beispielsweise an Schafen. Im Prinzip wäre es auch bei anderen Erkrankungen des Gehirns einsetzbar, die von anormalen Proteinklumpen herrühren. Der Neurochirurg Gerard Grant von der Stanford University School of Medicine in Palo Alto (Kalifornien) findet diese Aussicht »aufregend« und fährt fort: »Wir wollten die Blut-Hirn-Schranke öffnen, um Dinge ins Hirn hineinzubekommen, und nun holen wir Dinge damit heraus.«

Allerdings ist keineswegs klar, ob der Abbau von Beta-Amyloid, das sich zwischen den Nervenzellen im Gehirn abgelagert hat, Alzheimerkranke wirklich heilt oder auch nur das Fortschreiten des Leidens aufhält. Zudem bezweifelt Bacskai, dass die Ergebnisse bei Nagern viel über das Potenzial der Methode



BEN BRAHIM MOHAMMED / CC-BY 3.0 / CREATIVECOMMONS.ORG / LICENSES / BY / 3.0 / (LEGALCODE)

So genannte Astrozyten umschließen eine Kapillare im Gehirn. Sie sind Teil der Blut-Hirn-Schranke, die das Nervengewebe gegen Schadstoffe abschirmt.

Wie man ein Netz beeinflusst – oder zerstört

Trotz dezentraler Struktur lassen sich soziale Medien manipulieren.

Früher präsentierten Herrscher ihre geballte Macht pompös in Burgen und Schlössern, und der Sturm auf ein symbolisches Zentrum – ob Bastille oder Winterpalais – konnte das Ende einer Monarchie besiegeln. In modernen Gesellschaften wohnt die Macht anonymer. Darum laufen Proteststürme ins Leere und erschöpfen sich rasch – siehe die Occupy-Bewegung in westlichen Ländern oder der so genannte arabische Frühling.

Auf moderne digitale Netze trifft erst recht zu, dass sie, da dezentral strukturiert, gegen grobe An- und Eingriffe resistent sind. Diese Eigenschaft war ursprünglich das Motiv für das US-Militär, den Vorläufer des heutigen Internets zu entwickeln – und andererseits weckte sie bei Internet-»Piraten« die Hoffnung auf eine gegen Manipulationen gefeierte, basisdemokratisch nutzbare Kommunikationsform.

Doch längst untersucht eine eigene Forschungsdisziplin, wie sich Informationsgewebe aller Art manipulieren lassen. Diese Netzwissenschaft ist wegen der Komplexität ihres Gegenstands mathematisch höchst anspruchsvoll. Die Anwendungen reichen von empirischer Soziologie und Marketing bis zu Seuchenbekämpfung und psychologischer Kriegführung.

In jedem Fall geht es darum, herauszufinden, welche Punkte in einem Netz sich besonders zur Einflussnahme auf die darin kursierenden Informationen eignen. Zum Beispiel gibt es Netzknoten, so genannte Hubs (englisch für Naben oder Drehkreuze), die mit besonders zahlreichen anderen Netzpunkten verbunden sind. Die Werbung bedient sich gern solcher Knoten, um ein neues Produkt zu lancieren. In der Politik sind sie beliebte Adressaten für Lobbyisten und Meinungsführer – und in der Seuchenbekämpfung Orte, an denen eine lokale Impfung die Weiterverbreitung des Erregers zu unterbinden vermag.

Freilich reicht der gesamte Einfluss eines einzelnen Knotens je nach der Struktur des jeweiligen Netzes nur so und so weit, und es bleibt eine streng genommen unlösliche Aufgabe, für beliebige Topologien die »optimalen Beeinflusser« herauszufinden. Doch nun ist es den Netzforschern Flaviano Morone und Hernán A. Makse vom City College of New York gelungen, einen Algorithmus auszuhecken, der das Gewünschte wenigstens näherungsweise leistet (*Nature* 524, S. 65–68, 2015).

Zu diesem Zweck definierten sie einen »kollektiven Einfluss«, der nicht nur die Verbindungen eines Knotens zu den Nachbarn zählt, sondern auch bewertet, ob die Nachbarn vorwiegend schwach vernetzte Punkte sind oder ihrerseits einflussreiche Knoten. Je weiter der Algorithmus mit seiner Bewertung in die Nachbarschaft vordringt, desto exakter – aber auch aufwändiger – wird er. Auf diese Weise erzielt er eine immer bessere Näherung für den kollektiven Einfluss des Ausgangsknotens.

Methodisch geht der Algorithmus als simulierter Zerstörer vor: Um Einflussgrößen zu messen, löscht er Knoten aus dem Netz und stellt fest, was von der Struktur dann noch übrig bleibt: je einflussreicher der Hub, desto zerstörerischer seine Entnahme. Darum sehen István A. Kovács und Albert-László Barabási von der Northeastern University in Boston (Massachusetts) im Algorithmus ihrer Kollegen vor allem eine Methode, Netze möglichst effektiv aufzulösen (*Nature* 524, S. 38–39, 2015). Als positive Anwendung nennen sie Impfkampagnen, die, wenn sie an den einflussreichsten Knoten ansetzen, eine Seuche mit geringstmöglichem Aufwand stoppen können.

Doch trotz des segensreichen Beispiels drängt sich ein Verdacht auf: Hier werden Methoden perfektioniert, um soziale Netze nach Wunsch zu korrumpieren oder sukzessive außer Gefecht zu setzen.



Michael Springer

beim Menschen aussagen. Die Lernfähigkeit von Mäusen sei grundsätzlich »ziemlich gering«. Starke Verbesserungen in Verhaltenstests bei den Nagern müssten deshalb beim Menschen nicht unbedingt viel bedeuten. Ein weiteres Problem sieht der Forscher darin, dass die Ultraschallgeräte nicht standardisiert sind. Das mache es schwer, grundlegende Sicherheitsfragen zu beantworten wie: »Wie lange ist die Blut-Hirn-Schranke offen?«, »Wie groß sind die resultierenden Poren?« oder »Welcher bleibende Schaden entsteht?«.

Einschleusen von Medikamenten

Hynynen hat sich mit einer Firma für medizinische Bildgebung zusammengetan, um die Methode zu kommerzialisieren. Er verweist darauf, dass bei den bisherigen Versuchen – einschließlich solchen an Kaninchen und Affen – nie unerwünschte Nebenwirkungen aufgetreten sind. Und die klinischen Versuche von Mainprize dürften mehr Daten zur Sicherheit liefern. Dieser plant die Blut-Hirn-Schranke für die Zufuhr von Chemotherapeutika zu öffnen, kurz bevor er bei den Patienten den Tumor operativ entfernt. Dann will er das entnommene Gewebe auf Blutungen und den Einstrom des Antikrebsmittels prüfen. Für einen ähnlichen Test werden derzeit in Frankreich Teilnehmer rekrutiert.

Wenn diese klinischen Versuche der Phase I die Sicherheit des Verfahrens belegen, »ist der Weg frei für Phase-II-Tests, die den Nachweis für positive Effekte erbringen sollen«, sagt Mainprize. Trotz seiner Skepsis kann sich auch Bacskai der Faszination dieses jungen Gebiets nicht völlig entziehen und schwärmt: »Stellen Sie sich vor, Ihre Großmutter ginge einmal im Jahr zu einer Ultraschallbehandlung in die Klinik, um das Beta-Amyloid in ihrem Gehirn entfernen zu lassen, und mehr wäre nicht nötig – keine Operation, keine Medikamente. Wäre das nicht fantastisch?«

Emily Underwood arbeitet als Journalistin bei der Fachzeitschrift »Science«.

© Science

Science 347, S. 1186–1187, 13. März 2015

Jetzt als 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.



**JETZT
ABONNIEREN!**





Dauerschmerzen verursachen
oft höllische Qualen.

Neue Hoffnung bei chronischem Schmerz

Oft sind individuell veränderte Moleküle der Grund für ständige Pein. Das bedeutet aber auch: Man könnte sie gezielt mit maßgeschneiderten Medikamenten angreifen.

Von Stephani Sutherland

» Fahr aber zum Supermarkt, nicht zum Burger King, die von da schmelzen zu schnell«, schärfte Jama Bond ihrem Mann ein, als er spätabends wieder einmal aufbrechen musste, um ihr Eiswürfel zu besorgen. Damals war sie 38 Jahre alt und hochschwanger. Für ihre rot geschwellenen, brennenden Füße brauchte sie säckeweise Eis. Sie hatte ganz normal in einem Büro gearbeitet – bis im vierten Schwangerschaftsmonat dieser heftige Dauerschmerz einsetzte, der sie völlig außer Gefecht setzte. Sie hielt das Brennen nur aus, wenn sie die Füße, zum Schutz gegen Hauterfrierungen mit Mülltüten umwickelt, die ganze Zeit in Eiswasser hielt. Alle Berührungen waren qualvoll, Duschen wurde höllisch.

Jama Bond litt unter einer Erythromelalgie (nach griechisch: erythros = rot, melos = Glied und algos = Schmerz) – einer sehr seltenen Erkrankung, bei der Hände oder Füße extrem empfindlich schon für milde Wärme und sanften Druck sind. Das Leiden kann angeboren sein, doch häufig tritt es wie in ihrem Fall ohne erkennbaren Grund auf. Ein Zusammenhang mit Schwangerschaft ist nicht bekannt. Von einer Erythromelalgie werden unter einer Million Menschen

rund ein Dutzend heimgesucht. An diversen anderen Formen chronischer Schmerzen leiden jedoch erstaunlich viele: nach manchen Schätzungen mindestens jeder Zehnte, nach anderen noch deutlich mehr. Auch bei diesen Patienten lässt sich die Ursache oft nicht feststellen. Zu den häufigsten Beschwerden zählen Rücken- und Kopfschmerzen sowie Arthritis, also Gelenkentzündung (nicht zu verwechseln mit Arthrose, Gelenkabnutzung).

Mangelnde öffentliche Beachtung

In einigen Industrieländern sind davon mehr Menschen betroffen als von Diabetes, Krebs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen zusammen. Und chronischer Schmerz verursacht insgesamt höhere Kosten, wenn man nur die medizinische Versorgung und die Arbeitsausfälle berücksichtigt. Das persönliche Leid lässt sich fast nicht ermessen. Vielen Betroffenen droht Arbeitsunfähigkeit. Oft bekommen sie Depressionen, schwere Stimmungsschwankungen oder Schlafstörungen, werden alkohol- beziehungsweise drogenabhängig. So mancher von ihnen begeht Selbstmord. Die amerikanische Schmerzberaterin Linda Porter, Direktorin an den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland), nennt chronische Schmerzen ein Riesenproblem der öffentlichen Gesundheit, das keineswegs die ihm gebührende Beachtung findet und schon gar nicht adäquat angegangen wird.

Eigentlich sind Schmerzen sinnvoll, weil sie uns vor manchen Gefahren warnen und schweren Folgeschäden bei Verletzungen vorbeugen. Automatisch zieht man die Hand vom heißen Herd zurück, bevor sie verbrennt. Und ein gebrochenes Bein tut so weh, dass man es schont. Manchmal allerdings hält der Schmerz länger an als nötig – oder er entsteht überhaupt ohne erkennbaren Grund. Im Allgemeinen unterscheiden Mediziner bei chronischen Schmerzen die beiden Kategorien entzündlich und neuropathisch. Zu ersterer zählt etwa eine Osteoarthritis. Neuropathische Schmerzen rühren hingegen oft von Verletzungs- oder krankheitsbedingten Nervenschäden her.

AUF EINEN BLICK

INDIVIDUELLE ANSATZPUNKTE GEGEN SCHMERZ

1 Schätzungsweise **13 Millionen Menschen** leiden in Deutschland an chronischen oder wiederkehrenden Schmerzen. Manche Erhebungen kommen auf noch höhere Zahlen.

2 Die **gebräuchlichen Medikamente** helfen oft zu wenig oder gar nicht. Zudem können viele davon unerwünschte, manchmal sogar lebensgefährliche **Nebenwirkungen** haben.

3 Forscher suchen nach Wirkstoffen, die im Einzelfall zielgenau und ausschließlich an den jeweils **fehlerhaften Molekülen** und neuronalen Strukturen wirken, welche für den chronischen Schmerz verantwortlich sind. Auch manche **Tiergifte** eignen sich dazu.

Ist die Behandlung von chronischen Schmerzen generell schon schwierig genug, so erweisen sich die neuropathischen als besonders resistent. Gängige entzündungshemmende Medikamente wie Ibuprofen und Naproxen helfen hier kaum. Opiate wie Morphin (Morphium) sind zwar oft das Mittel der Wahl gegen vorübergehende schwere Schmerzen, haben aber massive Nebenwirkungen, von Darmträgheit und Benommenheit bis hin zu einer bedrohlich verlangsamten Atmung. Diese Gefahren nehmen zu, wenn bei längerer Anwendung eine Toleranz entsteht, die dann immer höhere Dosierungen erfordert. Außerdem besteht ein Risiko für Abhängigkeit und Missbrauch. In Amerika sterben mehr Menschen an einer Überdosis solcher Schmerzmittel als zusammengenommen an zu viel Kokain oder Heroin.

Zu den weiteren Medikamenten gegen chronische Schmerzen gehören einige, die an sich gegen Krampfanfälle und Depressionen gedacht sind und große Nachteile wie etwa Müdigkeit oder Gewichtszunahme haben. Diese sind jedoch meist das geringere Übel und werden daher in Kauf genommen. Auch Jama Bond erhielt trotz ihrer Schwangerschaft einen Cocktail aus Opiaten, Antikonvulsiva und Antidepressiva, damit sie überhaupt schlafen konnte und ihre gefährlich hohen Stresswerte zurückgingen. Denn bessere Präparate hat die Medizin bislang nicht zu bieten – allerdings beginnt sich die Situation nun zu ändern. Molekulare Erkenntnisse über die Signalwege bei der Schmerzentwicklung lassen hoffen, dass bald effektivere und zugleich sicherere Medikamente entwickelt werden. Laut Porter kommen diese Forschungen gut voran.

Die normale Funktion von Schmerzen

Wie entsteht Schmerz überhaupt? Als Erstes empfangen spezialisierte Nervenendigungen in der Haut und im Körper, die Schmerzrezeptoren oder Nozizeptoren, einen Reiz. Oft werden auch die Sinnesnervenzellen selbst, die solche freien Nervenendigungen tragen, als Nozizeptoren bezeichnet. Diese Rezeptoren reagieren auf vieles, was dem Körper schaden könnte, wie Hitze und Kälte, mechanische Gewalteinwirkung oder verschiedene chemische Stoffe – darunter etliche, die von beschädigten Zellen freigesetzt werden. Von den gereizten Zellendigungen gelangen dann über die zugehörigen Nervenfasern Signale zu den Spinalganglien nahe dem Rückenmark, wo die jeweiligen Zellkörper sitzen. Diese ersten

Neurone der Schmerzbahn benachrichtigen andere Zellen im Rückenmark, welche ihrerseits das ausgedehnte Schmerznetzwerk im Gehirn alarmieren, das auch Areale für Denken und Fühlen umfasst. Letzteres erklärt, wieso Ablenkung und Placebos Schmerzen manchmal tatsächlich lindern, ja mitunter völlig blocken.

Das Versenden der neuronalen Signale vom Ort des Reizes ist wie bei anderen Nervenimpulsen ein elektrischer Vorgang, Aktionspotenzial genannt. Der wird veranlasst, wenn positiv geladene Natrium- oder Kaliumionen durch die Zellmembran fließen und dadurch die Membranspannung verändern. Diese Teilchen passieren dabei so genannte Ionenkanäle. Das sind Proteine in der äußeren Zellmembran, die winzige Poren bilden, welche sich öffnen und schließen können. An den Nervenendigungen für Schmerzreize befinden sich unter anderem auch spezielle Ionenkanäle, die beispielsweise auf Hitze oder auf Substanzen von einer geschädigten Zelle in der Nähe reagieren. Andere registrieren die dadurch veranlasste Spannungsänderung und öffnen sich nun ihrerseits. Infolgedessen fluten so viele positiv geladene Ionen ein, dass sich ein Signal aufbaut, welches sich wie eine Welle über die Nervenfaser hinweg fortpflanzt (siehe »Fehlfunktionen im Visier«, rechts).

Mit diesen speziellen Ionenkanälen von Nozizeptoren beschäftigen sich Schmerzforscher schon lange. In den letzten 20 Jahren haben sie daran vieles entdeckt: etwa wie solche Kanäle Gefahrensignale wie Hitze oder Schäden erkennen; oder welche von ihnen Schmerzsignale weitergeben und welche dabei Hilfsfunktionen haben. Vor allem aber konnten die Wissenschaftler auch schon einiges darüber herausfinden, welche dieser Ionenkanäle man gefahrlos manipulieren könnte, damit unerwünschte Schmerzsignale verstummen.

Seit Längerem ist bekannt: Natriumionenkanäle an Nervenendigungen zu blockieren, lindert Schmerz. So wirken kurzzeitige örtliche Betäubungsmittel wie Lidocain und Novocain. Weil diese Anästhetika generell die Natriumkanäle im Umfeld verschließen, unterdrücken sie an der Stelle allerdings zugleich sämtliche anderen Empfindungen. Insgesamt kennt man beim Menschen – und bei Säugetieren – neun verschiedene spannungsabhängige Kanäle für Natriumionen, und jede Sorte öffnet sich bei einer etwas anderen elektrischen Spannung. Weil solche Ionenkanäle jedoch zu allen Nervenzellen des Körpers gehören sowie zu anderen Geweben, darunter Herz und Gehirn, wäre es lebensgefährlich, sie pauschal zu blockieren. Der ideale Ausweg: gezielt nur diejenigen Ionenkanäle angreifen, die allein bei schmerzsensitiven Zellen vorkommen.

Tatsächlich entdeckten Forscher Ende der 1990er Jahre drei spannungsgesteuerte Natriumionenkanäle, die nur im peripheren Nervensystem auftreten, nicht im Rückenmark oder Gehirn: Nav1.7, Nav1.8 und Nav1.9 (v für englisch: voltage = Spannung). Alle drei Sorten finden sich vorwiegend auf Nozizeptoren und ein paar anderen für Wahrnehmung zuständigen Neuronen. Sobald man ihre Gene identifiziert hatte, konnte man an Versuchstieren ihre Eigenschaften un-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Schmerz« finden Sie unter



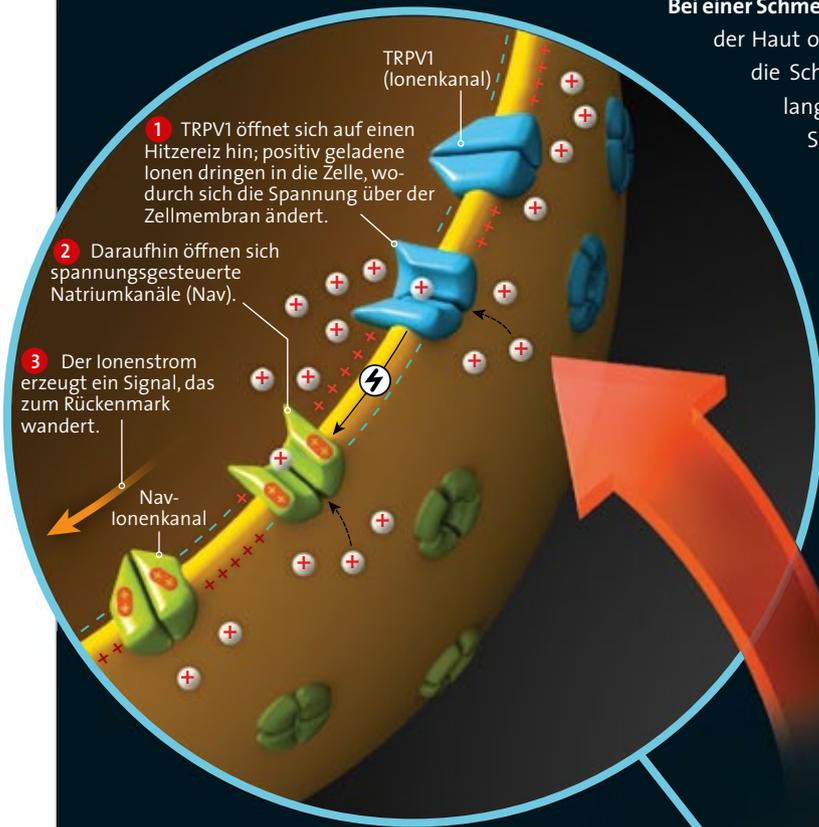
www.spektrum.de/t/schmerz



FOTOLIA / FRED GOLDSTEIN

Fehlfunktionen im Visier

Bei einer Schmerzempfindung registrieren freie Nervenendigungen in der Haut oder im Körper einen störenden Reiz, etwa Hitze. Über die Schmerzbahn, via Spinalganglien und Rückenmark, gelangt nun ein Signal ins Gehirn. Ursache für chronische Schmerzen kann ein geschädigter Nerv sein, aber auch etwa ein mutiertes Gen für einen Ionenkanal, der bei der Signalerzeugung mitwirkt (links). In anderen Fällen funktioniert die Abstimmung zwischen den Bahnen für den Schmerz- und den Tastsinn nicht normal (unten).

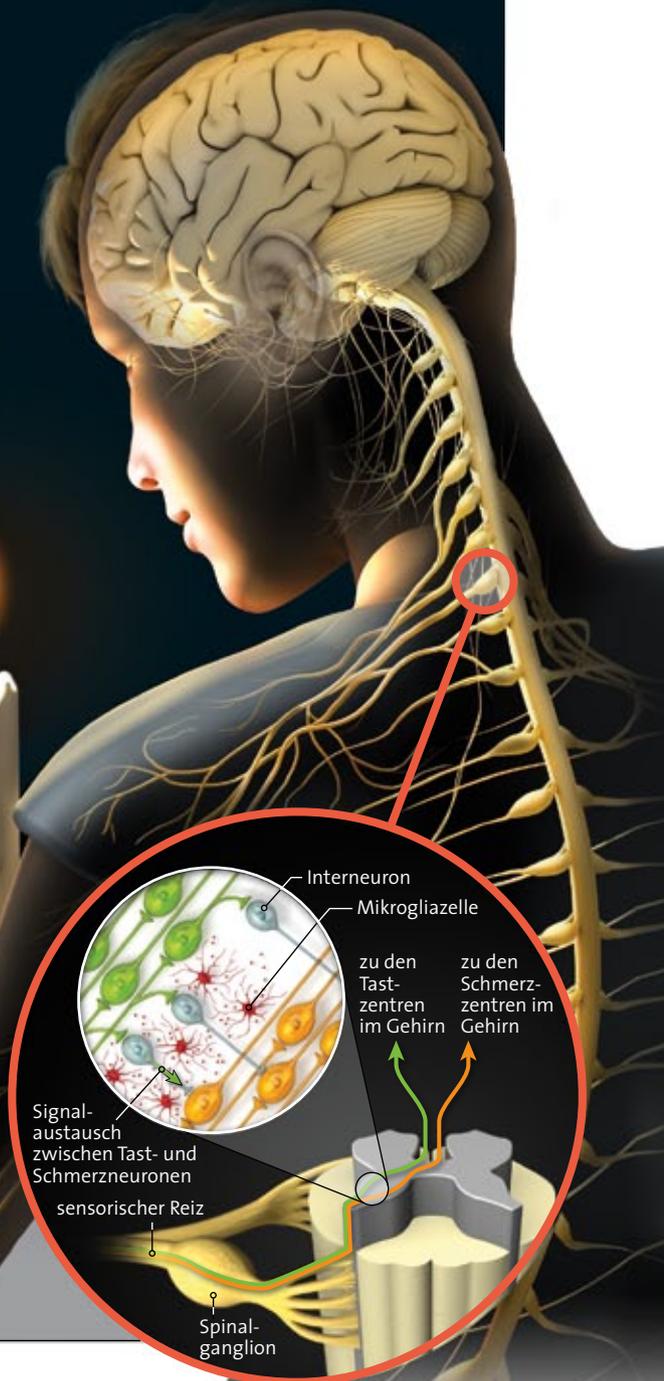


Überaktive Ionenkanäle

Damit ein Schmerzsensor ein elektrisches Signal erzeugt, das zum Rückenmark gelangt, müssen sich in der Nervenendigung spezielle Moleküle – Ionenkanäle – öffnen, so dass positiv geladene Ionen, hauptsächlich Natriumionen, in die Zelle einströmen. Hier erkennt der Kanal TRPV1 einen Hitzereiz und geht auf. Die einfließenden Ionen verändern die Membranspannung, was spannungsabhängige Natriumkanäle (Nav) öffnet. In der Folge entsteht ein elektrischer Impuls. Bei manchen Schmerzpatienten arbeiten diese Kanäle nicht korrekt. Sie wären darum Ansatzpunkte für neue Medikamente.

Falscher Austausch zwischen Nervenfasern

Manchmal stimmen bei verkehrten oder übersteigerten Schmerzempfindungen die Wechselbeziehungen im Rückenmark zwischen der Schmerz- (orange) und der Tastbahn (grün) nicht. Normalerweise regeln das Interneurone (blau), die zum Beispiel fälschliche Informationsübertragungen zwischen den Bahnen verhindern. Der Zustand kann nach einer Nervenläsion auftreten, wenn Mikrogliazellen ein bestimmtes neuronales Molekül unterdrücken.



tersuchen und sie experimentell manipulieren. Und wirklich bestätigten Studien in den nächsten zehn Jahren zumindest für Mäuse, dass eine Blockade dieser Kanäle neuropathische Schmerzen zu lindern vermag.

Bereits um das Jahr 2000 galten spannungsempfindliche Natriumionenkanäle als viel versprechende Zielstrukturen für neue Schmerzmittel. Trotzdem wollten Pharmaunternehmen allein auf Grund von Tierbefunden noch nicht in deren Entwicklung investieren. Vier Schlüsselarbeiten zum Nav1.7-Kanal halfen schließlich weiter. Wissenschaftler in Peking fanden 2004 bei zwei chinesischen Familien Mutationen im Gen des betreffenden Proteins; Mitglieder dieser Familien leiden an einer erblichen Form von Erythromelalgie. 2005 bestätigten Forscher in den USA, dass diese Mutationen den Nav1.7-Kanal hyperaktiv machen – woraus in dem Fall

die heftigen Schmerzen resultieren dürften. Kurz darauf berichteten Londoner Wissenschaftler, eine andere Erkrankung gehe ebenfalls auf einen mutationsbedingt überaktiven 1.7-Kanal zurück, die schwere Schmerzattacken (paroxysmale extreme Schmerzen, englisch PEPD) mit sich bringt, und zwar am After, den Augen und am Kiefer. Und schließlich wiesen Forscher aus Cambridge 2006 nach, dass Menschen jede Schmerzempfindung fehlt, wenn dieser Natriumkanal wegen einer Mutation nicht funktioniert. Das kommt selten vor und ist höchst gefährlich, weil Betroffene Verletzungen nicht spüren.

Verdächtige Ionenkanäle in Schmerzrezeptoren

An einer dieser Studien war Stephan Waxman von der Yale University in New Haven (Connecticut) beteiligt. Er befasst sich mit seltenen Erbkrankheiten auch deswegen, weil man dabei manchmal Hintergründe von häufigeren erblichen Störungen erkennt. Das war 2012 der Fall, als er zusammen mit niederländischen Kollegen unerklärte Fälle einer Polyneuropathie untersuchte, bei der feine, nicht ummantelte Nervenfasern in den äußeren Extremitäten, oftmals besonders den Füßen, Schaden nehmen und Schmerzen verursachen. Nur bei etwa der Hälfte der Patienten besteht ein erkennbarer Zusammenhang mit Diabetes oder einer anderen Krankheit. Wie nun bei genetischen Untersuchungen herauskam, ist bei fast 30 Prozent der übrigen Betroffenen das Gen für den Nav1.7-Ionenkanal mutiert; weitere neun Prozent weisen einen veränderten Nav1.8-Kanal auf und nochmals drei Prozent einen abweichenden Nav1.9-Kanal. Eine andere Untersuchung ergab, dass bei chronischen Schmerzen infolge Nervenschäden die Anzahl der Nav1.7-Kanäle in den geschädigten Nerven erhöht ist.

Jetzt genügte die zahlreichen Befunde den Pharmaunternehmen. Pfizer arbeitet seit mehreren Jahren an Wirkstoffen, die auf die Ionenkanäle Nav1.7 und Nav1.8 abzielen. Noch lässt sich nicht sagen, wann ein solches neues Schmerzmittel auf dem Markt sein wird. Immerhin werden aber derzeit mehrere potenzielle Substanzen an Patienten erprobt, ließ Neil Castle verlauten, der bei Neusentis in Durham (North Carolina) arbeitet, Pfizers Forschungszentrum für Schmerz und Wahrnehmungsstörungen. Das Besondere: Die neuen Präparate zielen nicht wie die älteren, darunter Lidocain, direkt auf die Pore im Ionenkanal – denn diese Tunnel sind bei allen Natriumkanälen fast identisch. Sie erkennen vielmehr eine Region des Moleküls, welche die elektrische Spannung erfasst und sich von Typ zu Typ unterscheidet. Dadurch wirken die Mittel spezifischer, und ihre Anwendung ist hoffentlich sicherer. 2013 gab Castles Arbeitsgruppe die Entdeckung einer chemischen Verbindung bekannt, die speziell den Spannungssensor von Nav1.7 erkennt. Dieses Molekül wirkt laut Castle so selektiv, dass es zumindest nach den bisherigen Tests Herz- und Muskelfunktionen wohl nicht beeinträchtigt.

Mit dem Spannungssensor von Nav1.7 befassen sich in Durham ebenfalls Forscher der Duke University. Sie setzen

Warum gerade ich?

Die gleichen Erkrankungen oder Verletzungen verursachen längst nicht bei jedem Betroffenen chronische Schmerzen. Nach einer vergleichbaren Rückenverletzung treten sie nur bei etwa drei von zehn Patienten auf. Jeder zweite Diabetiker entwickelt Nervenschäden, aber bei höchstens jedem dritten der Betroffenen sind sie schmerzhaft. Die Hintergründe für diese Diskrepanzen sind noch nicht völlig verstanden. Es dürfte aber drei Hauptursachen geben, die zudem wohl oft zusammenspielen.

► Genetische Veranlagung

Unsere Schmerzempfindlichkeit ist individuell verschieden. Hierüber bestimmt unter anderem auch die Genausstattung mit. Einzelne Menschen entwickeln schon genetisch bedingt besonders leicht chronische Schmerzen. Ein wichtiger Faktor ist das Geschlecht: Frauen sind deutlich häufiger betroffen als Männer.

► Äußere Einflüsse

Manche Erlebnisse, Erfahrungen oder Lebensumstände steigern das Risiko. Dazu können körperliche wie seelische Verletzungen und Belastungen gehören. Offenbar verändern sich dadurch manchmal langfristig Aktivitäten von Genen, die in der Schmerzbahn eine Rolle spielen. Das Risiko für chronischen Schmerz nimmt außerdem im Alter zu – wahrscheinlich auch deswegen, weil die Fähigkeit nachlässt, Verletzungen, auch Nervenschäden, zu beheben.

► Persönlichkeit

Bestimmte Wesensmerkmale können ungünstig sein. So ist die Wahrscheinlichkeit für chronischen Schmerz bei Menschen höher, die zu Pessimismus neigen oder die überall Katastrophen wittern. Anscheinend spielen auch Schaltkreise für Motivation und Belohnung im Gehirn eine Rolle.

einen Antikörper, also eine Immunwaffe, darauf an. Bei Mäusen zeigten sie 2014, dass dieser Antikörper entzündlichen wie auch neuropathischen Schmerz lindert und zudem Juckreiz dämpft, somit in drei Richtungen zu wirken scheint. Vielleicht ließe sich daraus also sogar eine Dreifachwaffe entwickeln. Um speziell diesen Rezeptortyp zu lähmen, eignen sich wohl ebenfalls manche Tiergifte. Auch daran arbeiten Wissenschaftler intensiv (siehe »Dem Schmerz den Stachel nehmen«, S. 26).

Aber die Forscher haben bei den Schmerzrezeptoren nicht nur die Natriumkanäle im Visier. Viele interessieren sich besonders für den Ionenkanal TRPV1 (Abkürzung für: transient receptor potential vanilloid), der unter anderem auf Hitze und scharfe Speisen anspricht, etwa das Capsaicin in Chili. Der Name deutet auf so genannte Vanillotoxine hin; das sind schmerzauslösende Spinnengifte. Auch dieser Ionenkanal beschränkt sich weitgehend auf schmerzempfindliche Zellen. Seit David Julius von der University of California in San Francisco und seine Kollegen 1997 das Gen dazu fanden, suchen die Forscher nach Molekülen, die ihn verschließen. Wie Linda Porter von den National Institutes of Health erzählt, lässt sich diese eigentlich so verheißungsvolle Struktur immer noch kaum fassen. Die ersten erprobten Hemmstoffe hatten untragbare Nebenwirkungen wie Überhitzung des Körpers und eine gefährliche Hitzeempfindlichkeit.

Dieser Ionenkanal spricht auch auf Säure und entzündungsfördernde Substanzen an. Überhaupt entpuppt er sich als ein komplexer Integrator sensorischer Signale. Das ideale Medikament, meint Julius, würde nur überaktive Kanäle dämpfen, aber die Hitzesensitivität nicht schmälern. Immerhin gelangen Forschern 2013 hoch aufgelöste Bilder von verschiedenen Zuständen von TRPV1. Nun möchten sie einen Wirkstoff finden, der das Molekül nur in dem Zustand angreift, in dem es Schmerz vermittelt.

Kontrollverlust im Rückenmark: Wenn Schmerzsignale in die falsche Nervenbahn gelangen

Gewöhnlich gehören zu neuropathischen Schmerzen drei Phänomene: Überempfindlichkeit gegenüber Schmerzreizen; plötzliche Schmerzattacken quasi aus dem Nichts; und eine so genannte Allodynie, bei der schon eine leichte Berührung heftige Schmerzen verursacht, wie es Jama Bond beim Duschen erlebte. Während abnormes Verhalten von Ionenkanälen die zu hohe Sensitivität gegen Schmerzreize zu verstehen hilft, setzt die Erklärung der Allodynie an anderer Stelle an. Normalerweise laufen die Signale von Schmerz- und Berührungseizen über getrennte Nervenbahnen, aber nicht in diesem Fall. Vielmehr kreuzen sich die Signale dann im Rückenmark, so dass Nervenfasern für den Tastsinn die Schmerzbahn aktivieren.

ANZEIGE



2°CAMPUS

www.2-Grad-Campus.de

KLIMARETTER GESUCHT!

Forschen ist deine Leidenschaft? Klimaschutz liegt dir am Herzen? Dann mach' mit bei der WWF-Schülerakademie 2°Campus!

Lerne Gleichgesinnte kennen, sei Teil toller Aktionen und aktueller Forschung. Bring dich und deine einzigartigen Ideen ein! Nur gemeinsam können wir eine klimafreundliche Zukunft gestalten. **Bewirb dich jetzt bis zum 01. Dezember 2015 für den 2°Campus 2016!** Alle Infos findest du hier: www.2-grad-campus.de

Der 2°Campus ist ein gemeinsames Projekt des WWF Deutschland und der Robert Bosch Stiftung. Weitere Partner: Hans Hermann Voss-Stiftung und Stiftung Nagelschneider

Dem Schmerz den Stachel nehmen

Tiergifte könnten eine Alternative zu Opiaten sein.

VON MARK PELOW

Einen Hundertfüßer zu melken, ist nicht so einfach. Der Biochemiker Glen King von der University of Queensland in Brisbane (Australien) fixiert das Tier mit elastischen Schnüren. Dann greift er dessen Zangen mit elektrischen Pinzetten und legt eine Spannung an. Prompt gibt das Exemplar Gift ab.

Solche Tröpfchen könnten zu einer neuen Gruppe schmerzstillender Medikamente führen, denn Tiergifte setzen sich oft aus vielen Substanzen zusammen und enthalten häufig Stoffe, die Nerven betäuben. King zählt zu den führenden Forschern, die Tausendfüßer, Spinnen, Schnecken und viele weitere giftige Kreaturen auf neue Analgetika hin untersuchen. 400 verschiedene Typen von Tiergiften hat er in seinem Labor.

Schon lange wünscht sich die Pharmazie Schmerzmittel, die suchtfördernde Substanzen wie Morphin ersetzen. Doch die Entwicklung von Molekülen, die nur am gewünschten Ort oder bei der angepeilten Struktur wirken, gestaltet sich schwierig. Genau solche speziellen Eigenschaften besitzen aber verschiedene Bestandteile von Tiergiften.

Viele Forscher dieses Gebiets zielen auf Natriumionenkanäle in Zellmembranen ab, die zur Signalerzeugung wichtig sind. Für Schmerzreize empfängliche Sinnesnervenzellen sind damit reich bestückt. Wenn man zum Beispiel den Kanaltyp Nav1.7 blockiert, entsteht kein Schmerzsignal.

Einzelne Komponenten von Tiergiften passen mit ihrer Gestalt und chemischen Aktivität genau an die Stelle des Ionenkanals, die als Spannungssensor fungiert. Sie bewirken, dass sich der Kanal schließt beziehungsweise erst gar nicht öffnet. Im Gift des Hundertfüßers *Scolopendra subspinipes mutilans* fand King eine Substanz – m-SLPTX-Ssm6a –, die nur den Nav1.7-Kanal offenbar so gezielt außer Gefecht setzt wie bisher kein anderes bekanntes Molekül. An sich tut der Biss dieses Skolopenders richtig weh, und das Gift kann sogar lebensgefährlich sein. Doch die besagte Komponente hat den gegenteiligen Effekt: Bei verletzten Mäusen betäubt sie Schmerzen besser als Morphin. Sie dämpft aber nicht Blutdruck, Herzschlag und motorische Funktionen, beeinträchtigt also nicht wie Opiate das Zentralnervensystem.

Als Kings Arbeitsgruppe das Molekül allerdings synthetisch nachbaute und erprobte, wirkte dieses lange nicht so gut. King vermutet, dass ihr ursprüngliches Präparat Spuren eines weiteren Wirkstoffs aufwies – den es nun zu finden gilt.

Auch Schlangengift enthält Verbindungen, die Ionenkanäle selektiv hemmen. Die Pharmakologin Anne Baron vom Institut de Pharmacologie Moléculaire et Cellulaire in Valbonne (Frankreich) hat mit ihren Kollegen zwei schmerzstillende Moleküle aus dem tödlichen Gift der Schwarzen Mamba isoliert. »Wir stehen kurz vor der klinischen Erprobung«, berichtet sie. »An



YAGUNORI KOIDE / CC-BY-SA-3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/LEGALCODE)

Der Biss dieses Skolopenders oder Riesenläufers *Scolopendra subspinipes* ist sehr schmerzhaft. Eine Komponente im Gift verhindert die Signalerzeugung bestimmter Nervenzellen, schadet sonst aber nicht. Der 20 Zentimeter lange Hundertfüßer lebt in Südostasien.

Nagern haben wir bereits eine Menge viel versprechende Toxizitätstests durchgeführt.«

Die Mambalgine genannten Moleküle blockieren bestimmte Ionenkanäle von Nervenzellen in der Haut, die auf Säure ansprechen und ebenfalls bei der Erzeugung von Schmerzsignalen mitwirken. Die meisten anderen Ionenkanäle werden von den Mambalginen nicht beeinträchtigt, was erklären dürfte, wieso bei Mäusen keine Nebeneffekte zu erkennen waren.

Wenn Tiergifte in Tablettenform verabreicht werden sollen, müssen sie dem Abbau im Verdauungstrakt trotzen, erläutert David Craik, der ebenfalls als Biochemiker an der University of Queensland forscht. Vor zehn Jahren kam Ziconotid (Prialt) auf den Markt. Das Medikament wird nach dem Vorbild einer Substanz im Gift der Kegelschnecke *Conus magus* hergestellt. Es muss allerdings vorsichtig und langsam direkt in die Rückenmarksflüssigkeit injiziert werden.

Darum verändert Craik nun schmerzstillende Gifte einer anderen Kegelschnecke, *Conus victoriae*. Er möchte die Aminosäureketten zu Ringen formen, die stabiler sind, weil Enzyme keine Enden abschneiden können. Solche Ringe gab er Ratten zu fressen, und das Präparat – cVc1.1 – erwies sich gegen neuropathischen Schmerz als 100-mal so wirksam wie das derzeit gängige Mittel Gabapentin. Vor Kurzem stellte Craik fünf weitere ringförmige Conotoxine vor, die nach ersten Studien ebenfalls viel versprechend sind.

Bei zehntausenden giftigen Tierarten halten die Forscher es nur für eine Frage der Zeit, bis sie ein ideales Schmerzmedikament entdeckt haben werden, das sich zudem gut in größerer Menge produzieren lässt. Die Experten würden gegenwärtig vielleicht erst ein Prozent der Stoffe in Tiergiften kennen, schätzt Anne Baron.

Mark Peelow ist Wissenschaftsjournalist in London.

Wie es dazu kommt, haben hauptsächlich Wissenschaftler in Japan und Kanada herausgefunden. Bei Nervenverletzungen, so zeigten Tierstudien, tritt im Rückenmark die Mikroglia in Aktion – eine Zellsorte, die dort wie auch im Gehirn Immunfunktionen wahrnimmt. Auf Signale von ihnen hin stellen die Neurone weniger von einem bestimmten Molekül für den Ionentransport her, genannt KCC2 (Kalium-Chlorid-Kotransporter 2). Dieses Transportmolekül sorgt für die richtige – sehr empfindliche – Balance von Chloridionen inner- und außerhalb der Zellen bei der Signalerzeugung. Im Rückenmark regeln normalerweise kleine Zwischen- oder Interneurone den Austausch zwischen den Nervenbahnen für Schmerz und denen für andere Empfindungen. So sorgen sie auch dafür, dass eine leichte Berührung die Schmerzbahn normalerweise nicht miterregt. Mangelt es an dem Transportmolekül, so verursacht die Berührung Pein. Ebenso sind die Interneurone beteiligt, wenn eine kräftige Berührung einen Schmerz kurzzeitig lindert.

2013 entdeckte ein Forscherteam um Yves De Koninck vom Quebec Mental Health Institute eine chemische Verbindung, die den Chloridtransport in den Nervenzellen mittels KCC2 zu deren Außenmembran verstärkt. Offenbar sorgt diese Verbindung dafür, dass nun mehr Chloridionen dorthin wandern. Es gelang damit, die Balance der Chloridionen und die elektrischen Funktionen geschädigter Rückenmarkneurone wiederherzustellen. Bei behandelten Ratten nahm dadurch der neuropathische Schmerz offenbar ab. Zumindest hier hatte der Wirkstoff sogar in hoher Dosierung keine Nebenwirkungen. Bisher gibt es dazu zwar nur Tierstudien, doch erfreulicherweise beeinflusst diese Substanz laut De Koninck nur Zellen mit Transportermangel. Das heißt, normal funktionierende Neurone bleiben unberührt; sie werden also nicht überaktiv. Bei der Suche nach einem neuen Schmerzmittel kommt es jetzt darauf an, den Transportprozess von KCC2 an die Zelloberfläche und die daran beteiligten Kontrollinstanzen noch besser zu verstehen.

Aussicht auf personalisierte Schmerztherapie

Die Medizin der Zukunft wird nach Ansicht der meisten Forscher personalisiert sein. Das bedeutet, die individuellen Gene und das jeweilige Ansprechen auf spezifische Arzneimittel und Therapien bestimmen über Behandlungen sowie vorbeugende Maßnahmen. Für chronische Schmerzen wird dergleichen allerdings erst vage sichtbar. »Wie gern würden wir jedem Patienten genau sagen können, was bei ihm speziell schiefgelaufen ist. Und ihm dann genau das Medikament geben, das ihm hilft«, sagt der Neurologe David Bennett von der University of Oxford. Bisher bleibt selbst in den besten Schmerzzentren oft nicht viel anderes übrig, als verschiedene Therapien auszuprobieren.

Dennoch – Menschen mit seltenen Mutationen der Gene von spannungsgesteuerten Natriumionenkanälen ebnet bereits den Weg zu einer individualisierten Schmerztherapie. Zum Beispiel hilft manchen Schmerzpatienten das Antiepileptikum Carbamazepin. Bei den meisten Erythromelal-

gikern mit erblich verändertem Nav1.7-Kanal wirkt es jedoch nicht. Aber das zugehörige Gen kann auf sehr verschiedene Weise mutiert sein, und den Angehörigen einer betroffenen Familie bringt das Medikament deutliche Linderung. Als Waxman und sein Kollege Sulayman Dib-Hajj, der ebenfalls in Yale forscht, die molekulare Struktur und Funktion dieses einen mutierten Kanals untersuchten, erkannten sie, wie der Wirkstoff die Überaktivität in dem Fall dämpft. Und daraus konnten sie erschließen, bei welcher anderen speziellen Mutation das Mittel auch wirken müsste. Völlig unrealistisch, so Waxman, sei eine individualisierte Schmerztherapie also nicht.

Bei Jama Bond verschwanden die Schmerzen plötzlich direkt vor der Geburt ihres Sohns. Das Kind kam ein paar Wochen zu früh zur Welt, war aber gesund. Für seine Lungenreife hatte man der Mutter Steroide verabreicht. »Mitten in der Nacht wurde ich wach, und die Füße taten mir nicht weh, zum ersten Mal seit vielen Monaten«, erzählt sie. Auch die Fachleute konnten das nicht erklären. Die Symptome kehrten später zwar wieder, aber längst nicht so stark wie früher. »Wenn ich länger auf den Beinen bin, tut es weh. Aber ich komme zurecht, ganz ohne Medikamente, das ist wirklich toll. Natürlich wünsche ich mir, völlig geheilt zu werden.« Das erhoffen sich auch die Schmerzforscher für diese Frau und ihre vielen Leidensgenossen. ~

DIE AUTORIN



Stephani Sutherland ist Neurowissenschaftlerin und Wissenschaftsjournalistin. Sie lebt in Südkalifornien.

QUELLEN

- Denk, F. et al.:** Pain Vulnerability: A Neurobiological Perspective. In: *Nature Neuroscience* 17, S. 192–200, 2014
- Diochot, S. et al.:** Black Mamba Venom Peptides Target Acid-Sensing Ion Channels to Abolish Pain. In: *Nature* 490, S. 552–555, 2012
- Waxman, S.G., Zamponi, G.W.:** Regulating Excitability of Peripheral Afferents: Emerging Ion Channel Targets. In: *Nature Neuroscience* 17, S. 153–163, 2014
- Yang, S.:** Discovery of a Selective Nav1.7 Inhibitor from Centipede Venom with Analgesic Efficacy Exceeding Morphine in Rodent Pain Models. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, S. 1534–1539, 2013

LITERATURTIPPS

- Basbaum, A.I., Julius, D.:** Neue Wege aus der Qual. In: *Spektrum der Wissenschaft* 7/2007, S. 44–51
Beschreibung der Schmerzbahn und möglicher Angriffspunkte für neue Medikamente
- Fields, R.D.:** Schmerz ohne Ende? In: *Spektrum der Wissenschaft* 11/2010, S. 52–59
Der Beitrag von Gliazellen zur Schmerzregulation

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362263

Verkannte Neandertaler

Neue archäologische, anatomische und genetische Befunde zeigen: Unsere nächsten Verwandten hatten unerwartet hohe geistige Fähigkeiten.

Von Kate Wong

An klaren Tagen erscheinen die zerklüfteten, hohen Felsen der Küste Marokkos von der Gorham-Höhle Gibraltars aus fast zum Greifen nah. Diese Gegend mit ihrem günstigen Klima und den starken, nährstoffreichen Meeresströmungen hat Menschen seit jeher angezogen. Eine Gruppe von ihnen lebte hier über Zehntausende von Jahren, wo sie auch widrige Phasen der Eiszeit überstand. Heute ist die engste Stelle der Straße von Gibraltar 14 Kilometer breit. In Kaltzeiten, wenn der Meeresspiegel tiefer lag, erstreckte sich vor der Gorham-Höhle, die östlich von der Spitze Gibraltars liegt, eine weite Küstenebene mit verschiedensten Tieren und Pflanzen. Damals erlegten die Menschen, die hier lebten, Großwild wie Steinböcke und Robben sowie kleinere Tiere wie Tauben und Kaninchen. Sie aßen Fische, Muscheln und Napfschnecken. In den umliegenden Wäldern beschafften sie sich Pinienkerne. Manchmal erbeuteten sie Raben oder Adler und schmückten sich mit den schillernden Federn. Auf eine flache Erhöhung in ihrer Höhle ritzen sie Zeichen von längst vergessener Bedeutung.

In solchen Dingen verhielten sich die Höhlenbewohner nicht viel anders als der *Homo sapiens* – unsere eigene Art, die in Afrika entstand. Nur waren dies keine anatomisch modernen Menschen, sondern Neandertaler, die viele Anthropologen für eine eigene Art halten. Ihre und unsere Evolutionslinie waren vor mindestens einer halben Million Jahren auseinandergeschieden. Die stämmigen Vettern mit den kräftigen, vorstehenden Brauen entwickelten sich aus Frühmenschen in Europa. Nach Ansicht mancher Forscher traten die

ersten Neandertaler vor rund 350 000 Jahren in Erscheinung. Andere Forscher setzen ihren Auftritt eher vor 230 000 Jahren an, den des klassischen Neandertalers erst vor 130 000 Jahren. Bis vor etwas über 39 000 Jahren lebten sie vermutlich noch vielerorts in Europa und im westlichen Asien. Wann die letzten Gruppen von ihnen verschwanden, ist noch strittig. Jedoch sprechen neuere Datierungen dafür, dass dies vor knapp 40 000 Jahren überall fast zeitgleich geschah.

Die Neandertaler hatten lange als tapsige, grobe Kraftpakete gegolten, als eher ungeschickte, minderbemittelte Affenmenschen. Insbesondere das 1908 im französischen La Chapelle-aux-Saints entdeckte erste vollständige Skelett trug zu diesem Bild wesentlich bei. Es handelte sich dabei aber um einen älteren Mann, der bereits an verschiedenen Knochenverformungen litt.

Doch auch seit die Paläoanthropologen erkannten, dass sie die Neandertaler zunächst weit unterschätzt hatten, flauen die Auseinandersetzungen um deren geistige Kompetenzen nicht ab. Während manche nicht glauben, dass sie intellektuell an den *Homo sapiens* heranreichten, würden andere sie mit uns auf die gleiche Stufe stellen. Eine Anzahl neuerer Entdeckungen facht diese Debatte gerade wieder an. Denn auf der einen Seite hatten Neandertaler wohl tatsächlich ein etwas anderes Gehirn, das womöglich in mancher Hinsicht weniger leisten konnte. Dafür sprechen einige Fossilanalysen wie auch DNA-Daten. Andererseits verblüffen archäologische Befunde, nach denen sich Neandertaler in vielem recht ähnlich wie moderne Menschen verhielten.

Umso rätselhafter ist, warum sie ausstarben, nachdem der *Homo sapiens* in Europa aufgetaucht war. Sie und ihre Vorfahren hatten sich hier einige hunderttausend Jahre lang behauptet. Was konnte der moderne Mensch, das ihnen fehlte?

Größe und Umriss eines Gehirns sowie die Ausprägung mancher Hirnregionen lassen sich anhand von Schädelausgüssen einigermaßen rekonstruieren. Hinweise auf eindeutige Unterschiede des Verhaltens der beiden Menschenarten ergaben sich daraus jedoch nicht. Zwar hatten Neandertaler etwas flachere Gehirne, diese waren allerdings ebenso voluminös – eher sogar etwas größer – als unsere, betont der Paläoneurologe Ralph Holloway von der Columbia University in New York. Gerade die Stirnlappen, die unter anderem das Problemlösen steuern, wirken nach den Vermessungen der Hirnoberfläche fast gleich – was laut Holloway nicht bedeu-

AUF EINEN BLICK

UNTERSCHÄTZTE KULTUR UNSERER VETTERN

1 Nach herkömmlicher Vorstellung waren die Neandertaler den modernen Menschen **geistig** weit **unterlegen**. Tatsächlich hatten sie ein anderes **Gehirn** und anderes **Erbgut**.

2 Neuere Befunde zu ihrer Kultur lassen die **mentale Kluft** zwischen den beiden Menschenformen schrumpfen. Die Neandertaler waren schon vor Ankunft des *Homo sapiens* technisch versiert und nutzten **Symbolik**.

3 Dass die Neandertaler ausstarben, lag anscheinend nicht an ihrer **Intelligenz**, sondern eher an ihrer **Vorgeschichte** und den äußeren Bedingungen.

ten muss, dass sie genauso geformt und organisiert waren. Rückschlüsse auf ihr Verhalten erlaubt das also nicht.

Aus reinen Hirnvolumenbestimmungen an fossilen Schädeln könne man nur begrenzt auf kognitive Eigenschaften schließen, betonen Eiluned Pearce von der University of Oxford und ihre Kollegen in einer 2013 erschienenen Studie. Wie sie feststellten, besaßen die Neandertaler größere Augenhöhlen als die modernen Menschen – einer Theorie zufolge eine Anpassung an das schwächere nördliche Licht. Entsprechend müsste die Sehrinde ebenfalls mächtiger gewesen sein, also mehr vom Gesamthirnvolumen beansprucht haben. Gleiches könnte für die größere Körpermasse gegolten haben. Pearce vermutet, dass den Neandertalern daher weniger Hirngewebe für andere Leistungen zur Verfügung stand, darunter das Vermögen, ausgedehnte soziale Netzwerke zu pflegen, die einem in harten Zeiten zugutekommen.

Holloway widerspricht dieser Argumentation. Nach seiner Erfahrung kann man die Größe der Sehrinde nicht von Schädelausgüssen herleiten. Im Übrigen hätten die Neandertaler größere Gesichter gehabt – daher vielleicht die größeren Augenhöhlen. Zudem sei bei heutigen Menschen der Anteil der Sehrinde am Gesamtgehirn sehr verschieden hoch, und er spiegle offenbar nicht Verhaltensunterschiede wider.

Umstritten ist ebenfalls, was es für die Gehirndifferenzierung bedeutet, dass die Neandertaler wohl überwiegend Rechtshänder waren. Dies schließen Anthropologen aus dem ungleichen Bau beider Arme und Schultern sowie aus Gebrauchsspuren an ihren Werkzeugen und Zähnen – die zum Beispiel Häute beim Bearbeiten festhalten mussten. Die rechte Hand ist in der linken Hirnhälfte repräsentiert, wo bei uns meistens auch das Sprachvermögen sitzt, also ein Schlüsselmerkmal modernen Verhaltens. Deswegen glauben manche Forscher, dass die Neandertaler ähnlich spezialisierte Hirnhälften besaßen wie wir, und schließen hieraus auf ihre Sprachkompetenz.

Jedoch ergaben Schädelvermessungen von Neandertalerkindern ein anderes Wachstumsmuster im jungen Alter. Am auffallendsten: Bei der Geburt waren die Proportionen noch ähnlich wie bei modernen Menschen, doch im ersten Lebensjahr wird der Kopf von *Homo-sapiens*-Kindern rund. Bei Neandertalerkindern blieb er länglich. Die Autoren dieser Studie argumentieren, dass das Hirnwachstum die Schädelform stark bestimmt. Das gilt gerade auch für Stirn- und

Scheitelpartien, die sich dann beim modernen Menschen mächtig entwickeln.

Anscheinend entstand das große Gehirn der Neandertaler erst lange nach der Trennung ihrer Vorfahren von der Evolutionslinie, die zum modernen Menschen führte. Vor etwa 430 000 Jahren lebte in Nordspanien eine Menschenform, die zu ihren europäischen Vorfahren oder mindestens in die nähere Verwandtschaft gehört. Fossilien von vielen Individuen sind im Atapuerca-Gebirge in der Sima de los Huesos (Knochenhöhle) aufgetaucht, darunter eine größere Anzahl Schädel – und die Gehirne dieser Menschen waren um einiges kleiner. Wenn folglich die Hirnvergrößerung bei uns und den Neandertalern unabhängig voneinander geschah, ist zu vermuten, dass sich ebenso manche Hirnstrukturen und Verknüpfungen auf jeweils eigene Weise ausbildeten.

Verräterische Gene richtig bewerten

Seit einigen Jahren ziehen Forscher bei diesen Fragen DNA-Befunde zu Rate. Besonders seit 2010 eine erste Version des Neandertalergenoms veröffentlicht wurde, stellen sie die verschiedensten Vergleichsanalysen mit dem Erbmateriale des modernen Menschen an. Interesse erregte etwa das verkürzt als »Sprachgen« bezeichnete Gen *FOXP2* für einen Transkriptionsfaktor, der auch bei Tieren vorkommt, viele andere Gene reguliert und beim Menschen unter anderem für Sprachfähigkeit wichtig ist, speziell deren motorische Feinkoordination. Denn die Neandertaler besaßen davon eine ganz ähnliche Version wie wir, woraus die Forscher schließen, dass beide Varianten gemeinsamer Herkunft sind. Andere Gene unterscheiden sich allerdings eindeutig, darunter einige ebenfalls für die Sprachfähigkeit wichtige wie *CNTNAP2*. Die Anthropogenetiker haben für den modernen Menschen 87 Gene ausgemacht, die nicht nur beim Neandertaler anders waren, sondern auch beim erst kürzlich in Südsibirien entdeckten Denisova-Menschen, von dem man bisher nur ein paar winzige Knochenfragmente kennt und der dem Neandertaler nahe stand (siehe SdW 12/2014, S. 68). Mehrere dieser Gene spielen bei der Entwicklung des Gehirns und seinen Funktionen eine Rolle.

Bei solchen Unterschieden kommt es nicht nur auf die Gensequenzen selbst an, sondern ebenso auf ihr An- oder Abschalten. Ihre Aktivierung kann beim Neandertaler anders ausgefallen sein. So scheint *FOXP2* nicht genauso benutzt worden zu sein. Derzeit fahnden die Genetiker in Erbsequenzen von frühen Menschenarten insbesondere nach Methylierungen: chemischen Markierungen, die DNA-Abschnitte stilllegen (siehe SdW 7/2015, S. 18). Die Frage ist jedoch, ob und wie sich abweichende Gene oder Aktivierungsmuster in andere kognitive Fähigkeiten umgemünzt haben. Faszinierende Anhaltspunkte dazu tauchen bei heutigen Menschen auf, die entsprechende DNA-Abschnitte von Neandertalern aufweisen. Denn abgesehen von Afrikanern tragen wir alle ein klein wenig von ihrem Erbgut in uns (siehe »Unser genetisches Erbe«, rechts).

Der Genetiker John Blangero vom Texas Biomedical Research Institute in San Antonio leitet eine seit 15 Jahren laufende umfangreiche Langzeitstudie zu genetischen Hinter-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Neandertaler« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/neandertaler



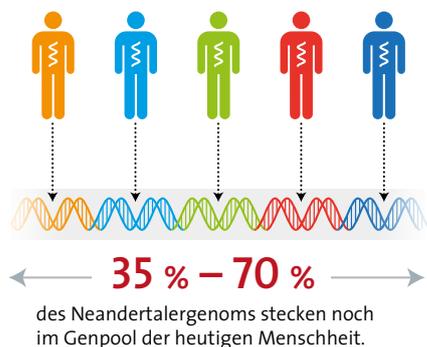
FOTOLIA / PROCY_AB

Unser genetisches Erbe

Vor über 50 000 Jahren kreuzten sich in Eurasien Neandertaler und moderne Menschen. Spuren davon stecken bis heute in unserem Erbgut. Nur bei Afrikanern fehlen sie.



Zwar trägt jeder heutige Nichtafrikaner etwas Erbgut von Neandertalern in sich, aber nicht jeder das gleiche. Setzt man die verschiedenen Bruchteile zusammen, ergibt das 35 bis 70 Prozent des Neandertalergenoms.



gründen bei komplexen Erkrankungen wie Diabetes, bei denen normalerweise eine Vielzahl von Genen zusammenspielt. Die Forscher haben dazu genetische Profile von jeweils zahlreichen Angehörigen einer Reihe von Familien erstellt. Vor ein paar Jahren haben sie die Analysen auf das Gehirn und seine Krankheiten ausgedehnt. Da Blangero auch biologische Anthropologie studiert hat, kam ihm die Idee, anhand des vorhandenen Datenmaterials indirekt kognitive Fähigkeiten von Neandertalern zu ergründen.

Neben den Genomsequenzen der Studienteilnehmer verfügte das Team auch über MRT-Hirnaufnahmen von ihnen. Es hatte zudem ein statistisches Verfahren entwickelt, mit dem sich die Auswirkungen bestimmter krankheitsgekoppelter Genvarianten auf erkennbare Körper- und Verhaltensmerkmale abschätzen lassen. Die vorliegenden Neandertalersequenzen nutzten die Wissenschaftler dazu, damit Muster aller genetischen Sequenzen – und auch deren Varianten – in ihren Daten abzugleichen, die nach ihren Analysen mit bestimmten Hirnmerkmalen und geistigen Funktionen zusammenhängen. Sie zielten also letztlich auf sämtliche potenziell hirrelevanten Erbfaktoren von Neandertalern ab, die sich in den Sequenzen des modernen Menschen abzeichnen, und versuchten sie in einen Zusammenhang zu bringen.

Folgt man den so gewonnenen Ergebnissen dieser Studie, waren mehrere entscheidende Hirnregionen von Neanderta-

lern kleiner als bei Jetztmenschen. Das gilt etwa für die Oberfläche der »grauen« Hirnsubstanz, also die Größe der Hirnrinde, die an der Informationsverarbeitung entscheidend mitwirkt. Kleiner scheinen ebenfalls das Broca-Zentrum und die Amygdala gewesen zu sein – wichtige Gebiete für die Sprachfähigkeit beziehungsweise die Steuerung von Motivationen und Gefühlen. Nach Blangeros Befunden hatten die Neandertaler auch weniger »weiße« Hirnsubstanz, also weniger Verbindungen zwischen Hirngebieten. Andere Merkmale deuten darauf hin, dass ihr Lernvermögen schlechter war und sie sich Wörter nicht so leicht merken konnten. Blangero fasst zusammen: »Ich wette, die Neandertaler waren geistig nicht besonders beschlagen.«

Überprüfen ließen sich diese Thesen wohl nur in Zellkulturen. Man müsste Neandertaler-DNA auf menschliche Zellen übertragen – was sich verbietet –, daraus Nervenzellen züchten und verfolgen, wie sich diese verhalten. Blangero selbst sieht ethische Bedenken, Neandertalerzellen zu basteln, meint allerdings, auf die Weise könne man auf Gene stoßen, die bei Hirnstörungen nicht richtig funktionieren. Das brächte neue Angriffspunkte für Medikamente.

Zu kurz gedacht

Einige Fachkollegen üben Kritik an solchen Schlussfolgerungen über die Neandertalerintelligenz. John Hawks von der University of Wisconsin in Madison merkt an, diese Menschen mögen durchaus kognitionsrelevante Genvarianten besessen haben, zu denen wir kein Pendant aufweisen und die deswegen bei Blangeros Ansatz durchs Raster fielen. Das verdeutlicht er am Beispiel der Hautfarbe: Würde man nur solche Gene von Neandertalern heranziehen, die auch beim modernen Menschen vorkommen, wären sie dunkel gewesen. Doch nachweislich trugen sie heute nicht vorhandene Erbfaktoren, die ihre Haut wohl eher hell machten. Für kritischer hält Hawks allerdings, wie wenig wir bisher über den Zusammenhang des Denkens mit genetischen Faktoren wissen. Er meint: »Genetische Befunde können über die geistige Kapazität der Neandertaler praktisch nichts aussagen, schlicht und einfach deshalb, weil hierzu auch über uns selbst fast gar nichts bekannt ist.«

Derzeit zeigen daher nach Ansicht vieler Forscher die kulturellen Hinterlassenschaften der Neandertaler am besten, wes Geistes Kind sie waren. Allerdings wirkte das Bild, das man sich danach früher von ihnen machte, wenig schmeichelhaft. Einen völlig anderen Eindruck vermittelten die modernen Menschen gleich von ihrer Anfangszeit in Europa durch viele archäologische Funde. Von ihren ausgeprägten mentalen Fähigkeiten zeugen beachtliche Kunstwerke und komplizierte Werkzeuge. Spuren ihrer Mahlzeiten berichten von ihrer Vielseitigkeit, Findigkeit und Anpassungsfähigkeit an neue Umwelten und Klimawechsel. Sie erlegten ein breites Spektrum von Tieren und nutzten verschiedenste Pflanzen. Die Neandertaler, so schien es, kannten keine Kunst und Symbolik. Sie benutzten vergleichsweise einfache Werkzeuge. Und offenbar ernährten sie sich vor allem von Großwild,

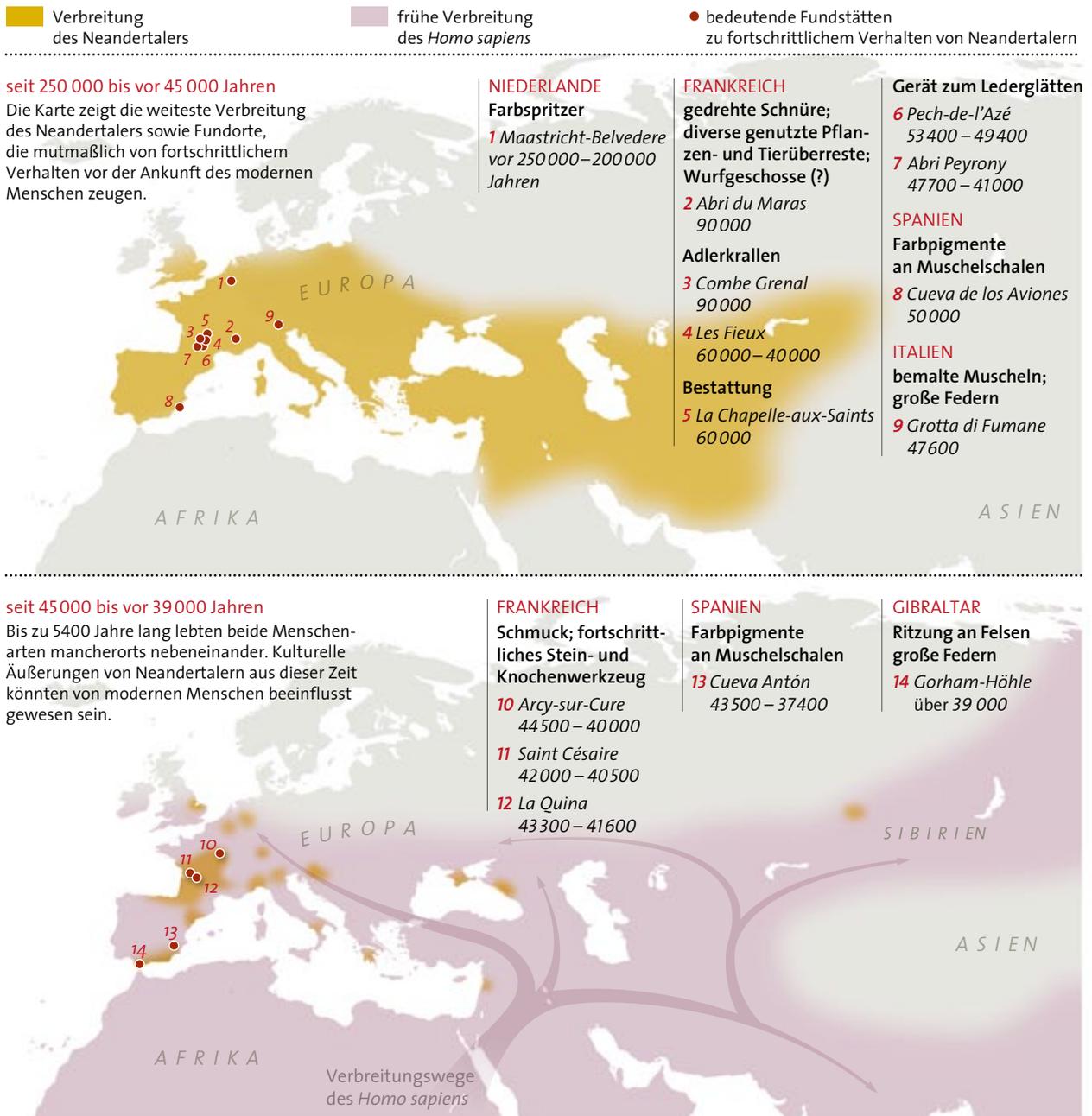
hatten also ein recht enges Nahrungsspektrum. Unter diesen Voraussetzungen gelang es ihnen nicht, sich auf Klimaveränderungen einzustellen und gegenüber den überlegenen Neuankömmlingen zu bestehen – so die herkömmliche Auffassung. Starke Zweifel an diesem Bild kamen in den 1990er Jah-

ren auf, als den Neandertalern ein paar Schmuckstücke und fortschrittliche Werkzeuge zugeschrieben wurden. Allerdings ist noch immer nicht sicher, ob jene Frühmenschen diese Dinge tatsächlich selbst erfunden oder zumindest angefertigt hatten. Denn sie stammen aus einer Zeit, als der *Homo sapiens*

Bedeutende Kulturfunde

Schon vor der Ankunft von modernen Menschen in Europa hinterließen Neandertaler Hinweise auf ihre geistige Welt und intellektuelle Anpassungsfähigkeit, einschließlich Symbolik und Kunst, fortschrittlichen Geräts und Ernährungsmethoden (obere Grafik). Immer mehr solcher bemerkenswerten Zeugnisse tau-

chen in letzter Zeit auf. Es bleibt zu klären, inwieweit spätere kulturelle Äußerungen auf Einflüsse des *H. sapiens* zurückgingen, mit dem die Neandertaler ihren Lebensraum nach neuen Datierungen mehrere Jahrtausende lang teilten (unten). Zumindest waren sie viel versierter und findiger als früher angenommen.



SW INFOGRAPHICS, NACH: HIGHAM, T. ET AL.: THE TIMING AND SPATIOTEMPORAL PATTERNING OF NEANDERTHAL DISAPPEARANCE. IN: NATURE 512, S. 306-309, 2014

schon in Europa lebte. Dieser kam hier vor mindestens 41 500 Jahren an und war in einigen südlichen Gegenden vielleicht sogar bereits vor 44 000 Jahren verbreitet. Die fraglichen Objekte könnten also durchaus von modernen Menschen stammen und in den Ablagerungen erst später zwischen Neandertalerüberreste geraten sein. Möglich wäre ebenso, dass die Neandertaler sie sich angeeignet hatten. Als dritte Variante wird diskutiert, ob sie solche Dinge womöglich nachahmten.

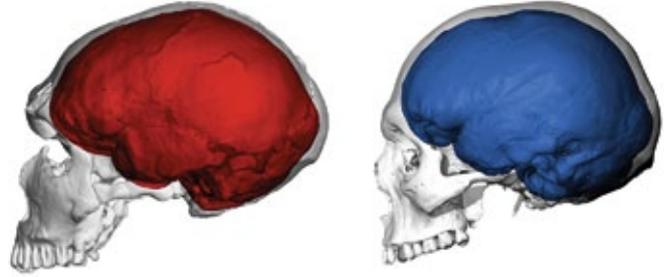
Angesichts einer Vielzahl neuerer Entdeckungen erscheint solche Skepsis jedoch immer weniger angebracht, denn manche dieser Objekte fallen in die Zeit vor der Ankunft des modernen Menschen (siehe »Bedeutende Kulturfunde«, links). »Wir erleben gerade einen Umbruch. Beinahe jeder Monat bringt etwas Neues, Erstaunliches zu Tage«, berichtet der Paläoanthropologe David Frayer von der University of Kansas in Lawrence. »Und immer in dem Sinn, dass die Neandertaler nicht blöd waren, sondern ganz schön pffiffig.«

Sinn für Schönheit

Überraschend ist vor allem, dass diese Menschen bereits vor dem Kontakt mit dem *Homo sapiens* ästhetisch empfanden und abstrakt dachten. In der Gorham-Höhle sprechen dafür das Ritzmuster und die Art der Verwendung von Vogelfedern. Solche Spuren tauchen inzwischen an verschiedenen Orten quer durch Europa auf. Auch in der Grotta di Fumane in Venetien fanden sich Hinweise, dass die Bewohner sich mit Federn schmückten. Dort kam zudem ein fossilisiertes Schneckengehäuse aus dem damals mindestens 100 Kilometer entfernten Meer zu Tage. Vor wenigstens 47 600 Jahren hatte es jemand rot eingefärbt, auf einen Faden gezogen und als Anhänger getragen. Schalen von Meeresmuscheln aus der Cueva de los Aviones und der Cueva Antón in Südostspanien weisen ebenfalls Reste von Farbpigmenten auf. Manche von ihnen dienten wohl als Gefäß zum Aufbewahren oder Mischen roter, gelber und glitzernder schwarzer Farben. Schminkten sich die Leute damit? Einige 50 000 Jahre alte Schalen hatten Löcher, sie könnten somit Schmuck gewesen sein.

Der Wunsch, sich zu verzieren, scheint bei den Neandertalern sogar noch früher vorhanden gewesen zu sein. Wie Fundstätten in Frankreich und Italien belegen, herrschte von vor 90 000 bis vor 40 000 Jahren eine Tradition, sich Adlerkrallen zu beschaffen. Denn nach den Schnittpuren an den Vogelknochen ging es den Menschen nicht um das Fleisch, sondern um die imposanten Klauen. Sie dürften diese Waffen des Königs der Lüfte als Symbole verwendet haben.

Nochmals deutlich älter, mindestens zwischen 250 000 und 200 000 Jahre alt, sind die Schichten, in denen Archäologen bei Ausgrabungen in den Niederlanden in Maastricht-Belvedere Farbspritzer von rotem Ocker entdeckten. Das eisenoxidhaltige Gestein war fein gemahlen und dann in einer Flüssigkeit verrührt worden. Etwas davon muss auf den Boden getropft sein. Niemand weiß, was die Neandertaler mit der Farbe machten. Aber wenn Forscher derartige Spuren an Aufenthaltsorten früher moderner Menschen vorfinden, nehmen sie an, dass diese damit etwas verschönert haben.



Das Gehirn der Neandertaler (links) hatte eine etwas andere Form als das der modernen Menschen (rechts). Was das für ihr Verhalten und ihr Denkvermögen bedeutete, ist aber unklar.

Was besagen solche Funde über das geistige Leben unserer Vorfahren? Kunstschaffen, einschließlich Schmücken des Körpers, werten Paläoarchäologen als ein entscheidendes Anzeichen dafür, dass deren Erschaffer moderne kognitive Fähigkeiten besaßen. Sie müssen sich etwas Abstraktes ausgedacht haben, das sie in etwas Symbolisches umsetzten. Nun ist Denken in Symbolen ein Wesenszug unserer sprachlichen Kommunikation. Diese Fähigkeit zählt darum zu den Merkmalen, die den modernen Menschen auszeichnen, und gilt als entscheidende Voraussetzung für den Erfolg unserer Art. Wenn die Neandertaler tatsächlich symbolisch denken konnten, ist zu vermuten, dass sie auch Sprache besaßen. Womöglich bildete sich abstraktes Denken sogar schon bei den gemeinsamen Vorfahren von *Homo sapiens* und Neandertalern heraus. Ende 2014 stießen Archäologen in Leiden in einer alten Sammlung zu Frühmenschen von Java auf eine rund 500 000 Jahre alte Muschelschale, die innen geometrische Einritzungen trägt. War *Homo erectus* der Urheber?

Auch die Werkzeuge des modernen Menschen in seiner Frühzeit waren vielleicht nicht so einzigartig wie lange angenommen. Früher hieß es, nur er habe unter anderem über Spezialgeräte für jeweils ganz bestimmte Zwecke verfügt. Doch 2013 gaben Marie Soressi von der Universität Leiden und ihre Kollegen bekannt, sie hätten an zwei Neandertaler-Fundstätten in der Dordogne so genannte Glätter aus Knochen entdeckt. Mit im Prinzip ähnlichen Instrumenten bearbeitet man noch heute Leder, damit es geschmeidiger, glänzender und dichter wird. Die auf ein Alter zwischen 53 000 und 41 000 Jahren datierten Funde weisen die passenden Gebrauchsspuren auf. Sie sind aus Hirschrippen gefertigt, und das Ende, das zum Brustbein wies, wurde abgerundet (siehe Bild S. 35). Dieses Gerät drückte man dann schräg in die trockene Tierhaut und führte es immer wieder darüber.

Von der Findigkeit der Neandertaler zeugen auch Objekte vom Abri du Maras in Südfrankreich, wo sie vor rund 90 000 Jahren Unterschlupf fanden. Unter dem Mikroskop erkannten Bruce Hardy vom Kenyon College in Gambier (Ohio) und seine Kollegen an von dort stammenden Steinwerkzeugen Spuren verschiedenster Tätigkeiten, die diesen Menschen bisher niemand zugetraut hatte. Besonders begeistern Reste verdrillter Pflanzenfasern, aus denen man Schnüre oder Seile

hätte anfertigen können. Vielleicht machte man damit Netze, Fallen oder Taschen. Außerdem fanden die Forscher Indizien für Holzbearbeitung, was für die Anfertigung von hölzernen Gerätschaften spricht.

Ein weiterer Aspekt, der neueren Analysen nicht standhält, ist das angeblich sehr begrenzte Nahrungsspektrum dieser Menschen. Sie verspeisten keineswegs hauptsächlich Großwild wie Mammuts und Wisente, welche sie unter Lebensgefahr erlegten – ja nicht einmal vorwiegend Fleisch. Die falsche Vorstellung hatten chemische Analysen ihrer Zähne und Untersuchungen der Tierknochen an ihren Lagerstätten nahegelegt. Doch die Neandertaler vom Abri du Maras aßen zudem eine Vielfalt kleinerer Tiere, darunter Kaninchen und sogar Fische. Dass sie solche flinken, kleinen Arten zu fangen oder zu erlegen wussten, also über dazu geeignete Gerätschaften verfügten, konnte man sich früher nicht vorstellen.

Pflanzkost ist für die Ernährung des menschlichen Organismus heikler als für andere Primaten, weil das große Gehirn nach besonders viel Energie und damit nach Essen mit hohem Energiegehalt verlangt. Zugleich eignen sich unsere für einen Primaten relativ kleinen Verdauungsorgane schlecht dazu, größere Mengen Rohkost zu verwerten. Um als Mensch von Pflanzennahrung zu profitieren, muss man schon einiges über die Inhalte wissen sowie Zubereitungsarten kennen, die sie aufschließen und verträglich machen. Nach Ansicht mancher Fachleute waren die modernen Menschen den Neandertalern hierin überlegen. Deswegen konnten sie Pflanzen mit Gewinn in ihren Speiseplan einbauen – was überdies bedeutete, dass sie die gleiche Fläche Land effektiver ausbeuteten, indem sie sowohl die Fauna als auch die Flora nutzten.

Wie sich allerdings herausstellte, sammelten die Neandertaler des Abri du Maras – und nicht nur sie – verschiedene essbare Pflanzen und Pilze, darunter in Südfrankreich etwa Pastinaken und Klee. Amanda Henry vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig fand im Zahnstein und an Werkzeugen von Neandertalern verschiedener

Stätten Eurasiens, so in Belgien und dem Irak, Indizien für eine ganze Palette von Pflanzen. Man erhitzte Getreide, die nah mit Weizen beziehungsweise Gerste verwandt waren. Auch aß man offenbar stärkehaltige Knollen und in einigen Gegenden Datteln. Henry kommentiert: »Wie wir diese Daten auch drehen und wenden, nie ergibt sich ein wirklicher Unterschied zum *Homo sapiens*. Im Augenblick sieht es nicht so aus, als ob sich die ersten modernen Menschen in Europa auf Pflanzennahrung besser verstanden hätten.«

Wenn die Neandertaler tatsächlich über einiges »moderne« Verhalten verfügten, ist es umso rätselhafter, wieso sie ausstarben. Eine Theorie dazu besagt: Die Vertreter von *Homo sapiens* besaßen schon vorher das größere und bessere Werkzeug- und Waffenarsenal, was es ihnen erlaubte, ihre Nahrungsbeschaffung effizienter zu gestalten. Wie Henry erläutert, war laut dieser Idee die Population des modernen Menschen in Afrika, wo die Art entstand, größer als die des Neandertalers in Eurasien. Als nun im Herkunftsgebiet immer mehr Münder zu stopfen waren, wurden die bevorzugten Nahrungsressourcen knapper, gerade auch das am leichtesten jagdbare Wild, und der Umweltdruck wuchs. Die Men-



MIT FRED. GEN. VON STEWART FINLAYSON, THE GIBRALTAR MUSEUM

In diesen Höhlen an der Mittelmeerküste Gibaltars hinterließen Neandertaler Zeugnisse symbolischen Denkens – insbesondere ein abstraktes Ritzmuster (rechts).



NATIONAL GEOGRAPHIC / DAVID LUTSCHWAGER

schen mussten also mehr Nahrungsquellen erschließen und dafür geeignete Gerätschaften konstruieren. Diese Technologien brachten sie nach Eurasien mit. Dank dessen konnten sie ihren neuen Lebensraum effizienter ausbeuten, als es die Neandertaler gewohnt waren. Ihre Überlebensfähigkeit hatten sie bereits in der früheren Umgebung unter Bedingungen geschult, wie die Neandertaler sie nie gekannt hatten.

Ein weiterer wichtiger Faktor für ihre Überlegenheit und baldige alleinige Herrschaft in Europa war vermutlich, dass sich neue Errungenschaften in größeren Populationen eher erhalten und tradieren. Wenn weit verstreute kleine Gruppen mehr oder weniger isoliert leben, wie für viele Neandertaler angenommen, werden Erfindungen seltener weitergegeben, und Spezialkenntnisse können mit dem letzten Mitglied verschwinden. Weil die Gruppen von *Homo sapiens* stärker untereinander vernetzt waren, erhielt sich das Wissen eher, vermutet Chris Stringer vom Natural History Museum in London. Es konnte sich sogar anreichern und in einer Art Sperrklinkeneffekt immer weiter steigern. Neue Erfindungen konnten somit zunehmend auf älteren aufbauen.

Dennoch gingen die Neandertaler nicht sofort nach Ankunft der modernen Menschen unter. Eine Forschergruppe um Thomas Higham von der University of Oxford hat mehrere Dutzend Fundstätten in Europa von Neandertalern und modernen Menschen bald nach deren Ankunft mit verbesserten, wesentlich präziseren Messmethoden neu datiert. Sie reichen von Spanien bis Russland, von England bis zum Kaukasus. Es stellte sich heraus, dass viele der früheren Radiokohlenstoffdatierungen durch Verunreinigungen ein deutlich zu geringes Alter geliefert hatten. Nach den neuen Ergebnissen teilten sich die beiden Menschenarten den Kontinent mindestens 2600, mancherorts vielleicht sogar an die 5400 Jahre lang. Aber vor spätestens 39 000 Jahren waren die Neandertaler ausgestorben.

Einige tausend Jahre Kontakt hätten durchaus Gelegenheiten für ein paar Techtelmechtel geboten. Und tatsächlich tragen heutige Asiaten und Europäer durchgehend Spuren von Neandertaler-DNA – die allerdings von noch früheren Begegnungen etwa im Nahen Osten zu stammen scheinen, als moderne Menschen Afrika gerade verlassen hatten. Doch kürzlich ergaben Erbgutanalysen eines etwa 40 000 Jahre alten Kieferknochens aus Rumänien, dass sich höchstens sechs Generationen zuvor ein Vorfahr dieses modernen Menschen mit einem Neandertaler gekreuzt hatte. Von diesen Sequenzen fand sich bisher in heutigem Erbgut nichts mehr. Einige Forscher stellen sich den Untergang der Neandertaler gar nicht einmal dramatisch vor. Sie postulieren, ihr Genpool könne in dem der modernen Menschen einfach versunken, ihre Population verschluckt worden sein. Fraser sinniert: »Zahlreich waren sie nie. Dann tauchten andere Menschen auf, die sich mit ihnen vermischten, und dadurch verschwanden sie allmählich. Alle Lebensformen sterben letztlich aus. Das Schicksal der Neandertaler muss nicht bedeuten, dass sie zu dumm, zu wenig kulturbegabt oder nicht anpassungsfähig waren.«



Diese Hirschrippe hatten Neandertaler so bearbeitet, dass sich damit vermutlich Häute oder Leder veredeln ließen.

SHANNON P. MCPHERSON, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

DIE AUTORIN



Kate Wong ist Redakteurin bei »Scientific American«.

QUELLEN

Gunz, P. et al.: Brain Development after Birth Differs between Neanderthals and Modern Humans. In: *Current Biology* 20, S. R921–R922, 2010

Hardy, B. L. et al.: Impossible Neanderthals? Making String, Throwing Projectiles and Catching Small Game during Marine Isotope Stage 4 (Abri du Maras, France). In: *Quaternary Science Reviews* 82, S. 23–40, 2013

Higham, T. et al.: The Timing and Spatiotemporal Patterning of Neanderthal Disappearance. In: *Nature* 512, S. 306–309, 2014

Rodríguez-Vidal, J. et al.: A Rock Engraving Made by Neanderthals in Gibraltar. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111, S. 13301–13306, 2014

LITERATURTIPPS

Henke, W.: Stoisch, risikotolerant und einfühlsam. In: *SdW* 10/2013, S. 96–97, *Rezension zu Wynn, T.: Denken wie ein Neandertaler. Zabern, Darmstadt 2013*

Mania, D.: Die Urmenschen von Thüringen. In: *SdW* 10/2004, S. 38–47; Interview zu den Speeren von Schöningen: S. 48–50 *Kulturzeugnisse vom Homo erectus in Europa vor 400 000 Jahren*

Wong, K.: Warum die Neandertaler ausstarben. In: *SdW* 11/2009, S. 68–73 *Diskussion einiger Hauptthesen*

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362265

Die Uhren in uns

Innere Taktgeber sorgen dafür, dass die Organe unseres Körpers zeitlich aufeinander abgestimmt funktionieren. Man findet sie im Gehirn, aber auch in der Leber, der Bauchspeicheldrüse oder dem Fettgewebe. Störungen in ihrer Synchronisation können zu schweren Krankheiten führen.

Von Keith C. Summa und Fred W. Turek

Jeder, der schon einmal einen Interkontinentalflug nach Osten oder Westen absolviert hat, kennt das Gefühl, wenn die innere Uhr nicht mit der Zeitzone übereinstimmt, in der man sich befindet. Es kann bis zu einer Woche dauern, diesen Jetlag zu überwinden – abhängig davon, ob die Zentraluhr (Master-Clock) im Gehirn ihren Takt beschleunigen oder verlangsamen muss, um sich mit äußeren Zeitgebern wie dem Sonnenstand zu synchronisieren. Diese Abstimmung ist unter anderem dafür wichtig, den Schlaf-wach-Rhythmus an den Tag-Nacht-Zyklus anzupassen.

In den zurückliegenden Jahren haben Wissenschaftler zur allgemeinen Überraschung festgestellt, dass unser Körper neben dem Haupttaktgeber im Gehirn auf zahlreiche weitere innere Zeitmesser zurückgreift. Diese finden sich in der Leber, der Bauchspeicheldrüse (Pankreas) und in weiteren Organen – sogar im Fettgewebe. Falls einer dieser peripheren Chronometer nicht mit der Zentraluhr synchron läuft, kann das Krankheiten wie Fettleibigkeit, Diabetes oder Depressionen hervorrufen.

Unsere Forschungsarbeiten drehen sich um sämtliche Aspekte dieser peripheren Körperuhren: wo es sie gibt, wie sie funktionieren und welche Erbanlagen ihre Aktivität steuern.

AUF EINEN BLICK

IM RICHTIGEN TAKT

1 Tief im **Gehirn** befindet sich der **Haupttaktgeber** unseres Körpers, die Zentraluhr oder »**Master-Clock**«, die zahlreiche physiologische Prozesse zeitlich aufeinander abstimmt.

2 Wissenschaftler haben in den zurückliegenden Jahren gezeigt, dass auch die **Leber**, die **Bauchspeicheldrüse** und **andere Organe und Gewebe** des Körpers über **eigene innere Uhren** verfügen.

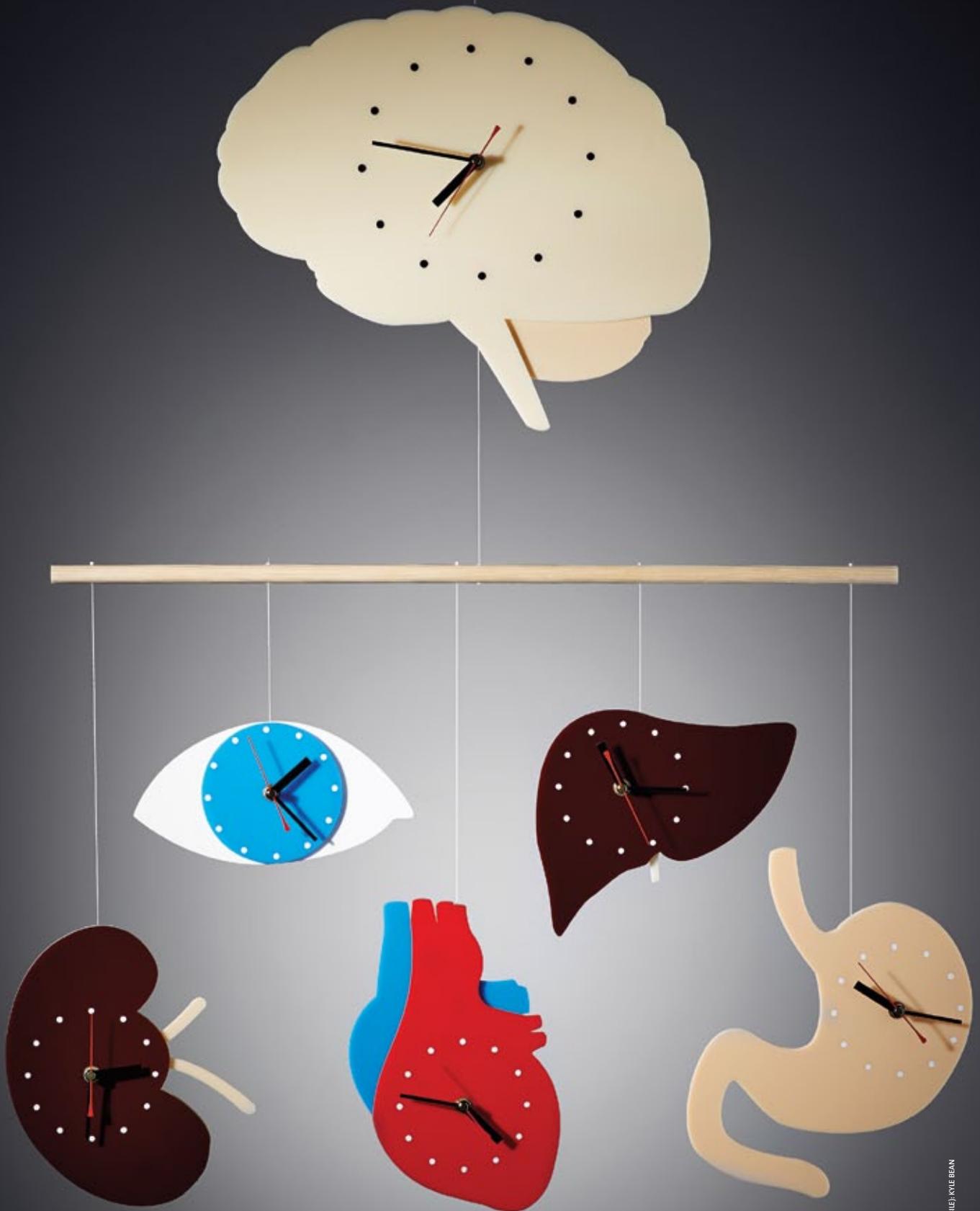
3 Regelmäßig zur »falschen« Zeit zu essen oder zu schlafen, kann den Gleichklang dieser peripheren Taktgeber mit der Master-Clock stören. Solche Irritationen sind wahrscheinlich mitverantwortlich für das Auftreten von **Fettleibigkeit**, **Diabetes**, **Depressionen** und anderen Leiden. Eine »zirkadiane Medizin« kann die **Synchronisation** möglicherweise wiederherstellen und Krankheiten effektiver behandeln helfen.

1984 entdeckten Wissenschaftler im Erbgut von Taufliegen das erste Gen, das am Mechanismus einer inneren Uhr beteiligt ist. Einer von uns (Turek) gehörte einer Arbeitsgruppe an, die 1997 ein weiteres »Uhren-Gen« beschrieb – das erste in Säugetieren entdeckte. Inzwischen sind dutzende weitere Erbanlagen bekannt, mit deren Hilfe der Körper seine internen Vorgänge zeitlich taktet. Sie tragen Namen wie Clock, Per (für period, Periode) und Tim (für timeless, zeitlos).

Erbanlagen, die an den Mechanismen innerer oder zirkadianer Uhren mitwirken, sind mittlerweile in sehr unterschiedlichen Lebewesen nachgewiesen worden, von Bakterien über Taufliegen bis hin zum Menschen. Manche dieser Genomabschnitte sind hoch konserviert, weisen also große Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Spezies auf. Das deutet darauf hin, dass sie in der Evolution von zentraler Bedeutung für das Überleben gewesen sind. Das Attribut zirkadian leitet sich ab von den lateinischen Wörtern »circa« (ringsum) und »dies« (Tag) und bezeichnet Vorgänge mit einer Periodenlänge von etwa einem Tag. Es gibt auch biologische Rhythmen mit deutlich geringerer oder größerer Periodenlänge, so genannte ultra- oder infradiane Prozesse.

Der bislang größte Fortschritt bestand darin, die Rolle der inneren Uhren bei Stoffwechselerkrankungen zu entschlüsseln. Ein überraschender Befund lautete etwa, dass das Körpergewicht nicht nur davon abhängt, was man isst, sondern auch davon, wann man es zu sich nimmt. Natürlich lassen sich nicht alle Störungen des Metabolismus mit zirkadianen Rhythmen erklären. Aber wenn wir das Wechselspiel unserer verschiedenen inneren Chronometer ignorieren, tun wir das zu unserem eigenen Nachteil. Das rasch zunehmende Wissen über diese Vorgänge könnte Krankheitsdiagnosen und -therapien radikal verändern und es den Menschen künftig erleichtern, ihre Gesundheit zu erhalten.

Alles Leben auf der Erde, von den einfachsten Organismen bis hin zu den komplexesten, wird von zirkadianen Rhythmen dirigiert, die an die Tageslänge angepasst sind. Solche Taktgeber finden sich bereits bei sehr frühen Lebensformen, etwa bei Zyanobakterien. Diese Einzeller betreiben Fotosynthese, das heißt sie nutzen die Energie des Sonnenlichts, um



Die Zentraluhr im Gehirn ist unser wichtigster Taktgeber, doch nicht der einzige. Oszillatoren in Niere, Leber, Herz, Bauchspeicheldrüse und Fettgewebe haben ebenfalls wichtige regulatorische Aufgaben. Sie müssen gut austariert sein, damit der Organismus nicht aus dem Gleichgewicht gerät.

Unser Online-Dossier zum Thema »innere Uhr« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/innere-uhr



aus Kohlendioxid und Wasser sowohl organische Moleküle als auch Sauerstoff zu erzeugen.

Eine innere Uhr sorgt dafür, dass jedes Zyanobakterium seine Fotosynthesemaschinerie vor Tagesanbruch in Bereitschaft versetzt, damit es bereits die ersten Sonnenstrahlen nutzen kann. Das bedeutet einen Vorteil gegenüber Organismen, die auf Lichteinfall lediglich reagieren. Zudem lässt der innere Taktgeber die Zyanobakterien den Fotosyntheseapparat abschalten, sobald es dämmt. Das hilft, Energie und andere Ressourcen einzusparen, die sich dann für andere Prozesse nutzen lassen, etwa DNA-Replikation und -Reparatur. Bei den letzten beiden Vorgängen ist es sogar vorteilhaft, wenn sie bevorzugt nachts stattfinden, da sie tagsüber durch ionisierende Sonnenstrahlung gestört werden können.

Im Gleichschritt mit Tag und Nacht

Sind Erbanlagen mutiert, die für innere Uhren relevant sind, zeigen die betroffenen Einzeller statt eines 24-stündigen Aktivitätsrhythmus mitunter einen 20-, 22- oder 30-stündigen. Carl Johnson von der Vanderbilt University (USA) und sein Team wiesen 1998 nach: Zyanobakterien, deren innerer Takt mit dem äußeren Hell-dunkel-Zyklus übereinstimmt, vermehren sich schneller als solche, die diesbezüglich nicht synchronisiert sind. Das gilt unabhängig von der Länge des Zyklus. Bei einer 24-stündigen Hell-dunkel-Periode beispielsweise reproduzierten sich »Wildtyp«-Zyanobakterien am besten, während es bei einem künstlichen 22-Stunden-Rhythmus die 22-Stunden-Mutanten waren. Diese Experimente zeigten erstmals deutlich: Die Fähigkeit, den inneren metabolischen Rhythmus auf die äußeren Gegebenheiten abzustimmen, ist von großer Bedeutung für die biologische Fitness.

Obwohl die innere Uhr beim Menschen auf anderen Erbanlagen beruht als bei Zyanobakterien, funktioniert sie ähnlich. Vermutlich haben sich beide Apparate evolutionär getrennt voneinander entwickelt, aber aus den gleichen Erfordernissen heraus und unter ähnlichem Selektionsdruck – und sich deshalb funktionell einander angenähert.

Lange Zeit gingen Wissenschaftler davon aus, es existiere nur ein einziger innerer Chronometer, der den Takt für Myriaden von biologischen Prozessen im Körper vorgebe. In den 1970er Jahren verorteten sie diesen im Nucleus suprachiasmaticus (SCN), einem Kerngebiet im Gehirn direkt oberhalb

der Kreuzung der Sehnerven. Aber um die Jahrtausendwende herum begann sich abzuzeichnen, dass es in anderen Organen, Geweben und sogar einzelnen Zellen untergeordnete Taktgeber gibt. Forscher fanden zunehmend Indizien, wonach die gleichen »Uhren-Gene«, die im Gehirn aktiv sind, auch in Zellen der Leber, Niere, Bauchspeicheldrüse, des Herzens und weiterer Gewebe regelmäßig an- und abgeschaltet werden. Inzwischen wissen wir: Diese zellulären Oszillatoren regulieren 3 bis 10 Prozent, manchmal sogar 50 Prozent, der jeweils aktiven Gene.

Schon bald begannen sich Experten zu fragen, ob zirkadiane Rhythmen eine Rolle im Alterungsprozess spielen. Kurz nach dem Jahrtausendwechsel führte Amy Easton, damals Doktorandin an der Northwestern University (USA), unter Anleitung Tureks verschiedene Experimente mit Mäusen durch. Die Tiere wiesen Mutationen im Clock-Gen auf. Während Easton das tägliche Laufverhalten älterer Mäuse untersuchte, stellte sie fest, dass die Nager zu Fettleibigkeit neigten und nur mit erkennbarer Mühe in ihre Laufräder hineinkletterten.

Diese Beobachtung lenkte unsere Aufmerksamkeit auf den Zusammenhang zwischen Stoffwechsel und zirkadianem Rhythmus. In einer Testserie, deren Ergebnisse wir 2005 in der Fachzeitschrift »Science« veröffentlichten, wiesen wir einen Zusammenhang nach zwischen Veränderungen im Clock-Gen und der Entwicklung von Fettleibigkeit sowie des metabolischen Syndroms. Mit dem letzten Begriff bezeichnet man ein gemeinsames Auftreten verschiedener physiologischer Auffälligkeiten, die das Risiko für Herzkrankheiten und Diabetes erhöhen. Um die Diagnose »metabolisches Syndrom« zu erhalten, muss ein Patient mindestens drei der folgenden Risikofaktoren aufweisen: hoher Blutdruck; hoher Glukosespiegel im Blut; übermäßige Fettansammlung im Bereich zwischen Brustkorb und Becken; hoher Gehalt von Triglyzeriden im Blut; niedriger Blutspiegel an Lipoprotein hoher Dichte (HDL).

Unsere Versuchsergebnisse lösten schlagartig großes Interesse daran aus, wie zirkadiane Rhythmen und Stoffwechsel miteinander zusammenhängen. Schon frühere Untersuchungen an Schichtarbeitern, deren innere Uhr ständig aus dem Takt gerät, hatten ergeben, dass sie ein größeres Risiko für Stoffwechsel-, Herzkreislauf- oder Magen-Darm-Erkrankungen tragen. Allerdings leben Schichtarbeiter generell oft ungesund, indem sie nicht ausreichend schlafen, sich schlecht ernähren und zu wenig bewegen. Das macht es schwer, ihre Erkrankungen auf eine konkrete Ursache zurückzuführen. Als wir an mutierten Mäusen nachwiesen, dass es einen genetischen Zusammenhang zwischen innerer Uhr und Stoffwechselstörungen gibt, trugen wir dazu bei, die Chronobiologie auf eine exakter beschreibbare molekulare Ebene zu befördern.

Kurz nachdem die Wissenschaftler erkannt hatten, dass der zirkadiane Rhythmus den Metabolismus reguliert, begannen sie die periphere Uhr in der Leber zu erforschen – einem Organ, das eine wichtige Rolle im Körperstoffwechsel spielt. Im Jahr 2008 führten Katja Lamia, Kai-Florian Storch

und Charles Weitz, damals alle an der Harvard Medical School (USA), Experimente mit genetisch veränderten Mäusen durch, bei denen ein wichtiges Uhren-Gen stumm geschaltet worden war, aber nur in den Leberzellen. Mäuse sind im Gegensatz zu Menschen vorwiegend nachtaktiv und schlafen tagsüber, doch sonst unterliegt ihr Schlaf-wach-Zyklus einer ähnlichen Regulierung wie bei uns. Die genetisch modifizierten Mäuse besaßen also keinen Taktgeber in der Leber, in den anderen Organen hingegen schon. Während ihrer Ruheperiode am Tag, in der sie nur wenig fraßen, sank ihr Blutzuckerspiegel wiederholt auf extrem niedrige Werte ab. Eine solche Hypoglykämie ist gefährlich, da sie binnen Minuten zu Funktionsstörungen im Gehirn führen kann.

Tag-Nacht-Zyklus und Stoffwechsel

Wie Lamia und ihre Kollegen herausfanden, resultierte die Hypoglykämie bei den Mäusen aus dem Fehlen innerer Rhythmen, die normalerweise kontrollieren, wann die Leber Glukosemoleküle ins Blut freisetzt. Demnach trägt die zirkadiane Uhr in der Leber dazu bei, einen normalen Blutzucker-

spiegel aufrechtzuerhalten, so dass das Gehirn und andere Organe kontinuierlich mit Energie versorgt werden.

Überschießende Blutzuckerwerte nach üppigen Mahlzeiten verhindert der Körper über ein entgegengerichtet wirkendes regulatorisches System. Das hierfür hauptsächlich verantwortliche Hormon ist Insulin, produziert in den so genannten Betazellen der Bauchspeicheldrüse. Nach dem Essen gelangt Glukose ins Blut, was die Ausschüttung dieses Hormons veranlasst. Insulin senkt dann den Blutzuckerspiegel, indem es Muskel-, Leber- und Fettgewebszellen dazu anregt, Glukose aus dem Blut aufzunehmen.

Der Mediziner Joseph T. Bass von der Northwestern University (USA) und sein Kollege Billie Marcheva haben die Mechanismen untersucht, die der peripheren Uhr in der Bauchspeicheldrüse zu Grunde liegen. Sie fanden heraus, dass der Taktgeber maßgeblich an der Regulation des Blutzuckerspiegels mitwirkt – und dass seine Unterbrechung die Funktion der Bauchspeicheldrüse ernsthaft beeinträchtigt, was zu Diabetes führen kann. Bei diesem Krankheitsbild stellt der Körper entweder zu wenig Insulin her oder reagiert zu schwach

Gehirn
Nervenzellen in einer bestimmten Hirnregion, dem Nucleus supra-chiasmaticus, geben einen zirkadianen Takt vor, wobei sie sich an äußeren Signalen wie Helligkeit und Dunkelheit orientieren.

Leber
Periphere innere Uhren können mehr als nur einen Prozess steuern. In der Leber etwa regulieren sie sowohl die Produktion von Glukose als auch die von Fetten sowie deren Freisetzung ins Blut.

Fettgewebe
Eine Funktionsstörung der zirkadianen Gen-Protein-Netzwerke im Fettgewebe des Körpers kann dazu führen, dass Lipidmoleküle zur »falschen« Zeit durch den Körper zirkulieren und sich das Essverhalten ändert.

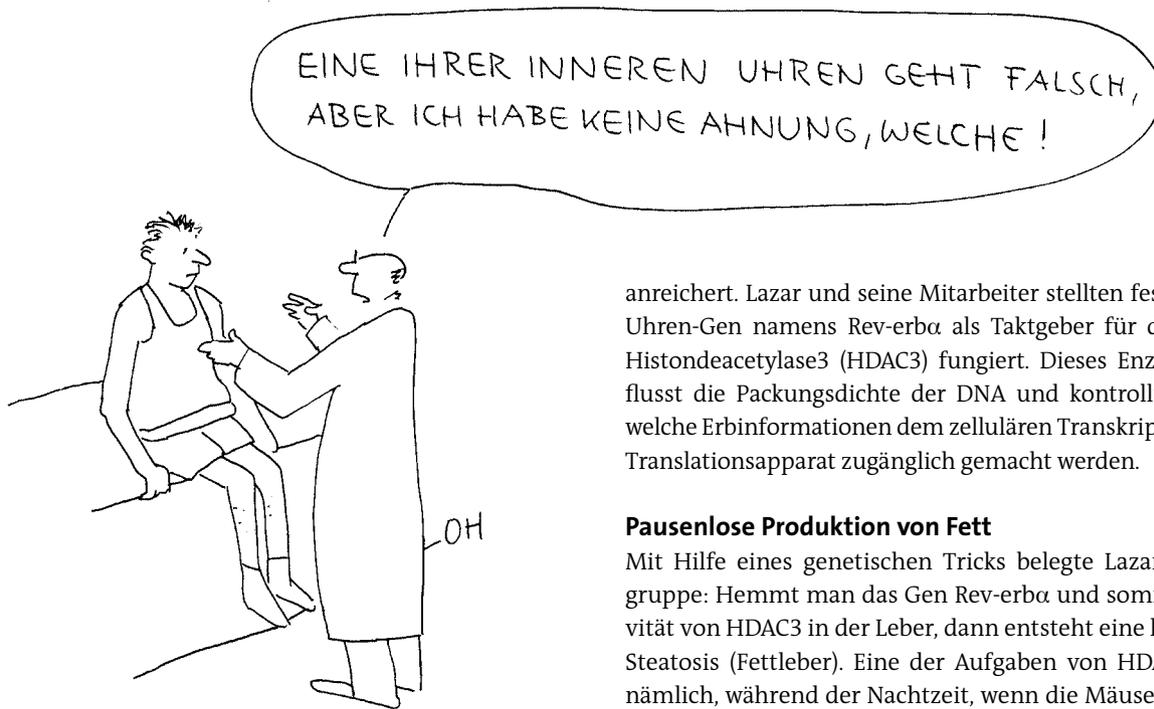
Herz
Zirkadiane Taktgeber bereiten das Herz in der Morgendämmerung auf das Aufwachen vor. Beeinträchtigungen dieses Mechanismus sind möglicherweise mitverantwortlich dafür, dass sich viele Herzinfarkte frühmorgens ereignen.

Bauchspeicheldrüse (Pankreas)
Zellen der Bauchspeicheldrüse schütten Insulin aus, was den Blutzuckerspiegel senkt – ein Prozess, der maßgeblich von inneren Taktgebern abhängt.

Niere
Oszillatoren in der Niere steuern, zu welchen Zeiten das Organ Ionen wie Natrium, Kalium und Chlorid zurückbehält oder ausscheidet. Diese spielen eine wichtige Rolle bei der Regulierung des Blutdrucks.

Die vielen inneren Uhren unseres Körpers

Das Leben auf der Erde wird heute durch den 24-stündigen Tagesrhythmus bestimmt. Beim Menschen synchronisiert ein Haupttaktgeber im Gehirn, die Zentraluhr oder »Master-Clock«, zahlreiche untergeordnete Uhren, die sich in verschiedenen Organen und Geweben unseres Körpers befinden. Dabei handelt es sich um stabile Netzwerke aus Genen und Proteinen, die sich wechselseitig regulieren und zahlreiche nachgeschaltete Prozesse fördern oder hemmen. Wenn die körpereigenen Taktgeber aus dem Rhythmus geraten oder nicht mehr richtig aufeinander abgestimmt sind, können gesundheitliche Probleme auftreten.



darauf, so dass die Glukose nicht mehr effektiv aus dem Blut entfernt wird.

Bass und Marcheva begannen ihre Studien damit, isoliertes Pankreasgewebe von Mäusen zu untersuchen, deren Uhren-Gene mutiert waren. Sie stellten fest, dass dieses auf eine Stimulation mit Glukose hin viel weniger Insulin ausschüttete als normales Gewebe. Im nächsten Schritt veränderten die Forscher Mäuse so, dass deren innere Taktgeber nur in der Bauchspeicheldrüse nicht funktionierten, in anderen Organen aber schon. Die Tiere zeigten daraufhin bereits in jungem Alter die Symptome eines Diabetes, und ihre Insulinsekretion war drastisch eingeschränkt.

Diese Beispiele verdeutlichen einen wesentlichen Punkt: Innere Uhren in verschiedenen Organen und Geweben können vollkommen unterschiedliche Funktionen ausüben. In der Leber und im Pankreas regulieren sie entgegengesetzt wirkende physiologische Prozesse. Doch wenn sie in einen gesunden Organismus integriert sind, synchronisieren sie ihre Rhythmen präzise und halten so den Körper im Gleichgewicht – Fachleute sprechen hier von Homöostase. Der zirkadiane Haupttaktgeber, die Master-Clock im Gehirn, lässt sich als Dirigent eines Orchesters veranschaulichen, der zahlreiche periphere Chronometer, die »Instrumentalisten«, untereinander und im Verhältnis zur Umgebung zeitlich genau abstimmt, was die Funktion des Gesamtorganismus optimiert.

Eine weitere bemerkenswerte Erkenntnis lautet, dass die innere Uhr eines bestimmten Gewebes dort mehrere Prozesse regulieren kann. Die in der Leber beispielsweise koordiniert ein ganzes Netzwerk von Genen und deren Produkten, die für den Glukosestoffwechsel erforderlich sind. Wie Mitch Lazar von der University of Pennsylvania (USA) und sein Team 2011 gezeigt haben, bestimmen zirkadiane Rhythmen in der Leber außerdem darüber, wie viel Fett sich in den Zellen des Organs

anreichert. Lazar und seine Mitarbeiter stellten fest, dass ein Uhren-Gen namens *Rev-erba* als Taktgeber für das Enzym Histondeacetylase3 (HDAC3) fungiert. Dieses Enzym beeinflusst die Packungsdichte der DNA und kontrolliert somit, welche Erbinformationen dem zellulären Transkriptions- und Translationsapparat zugänglich gemacht werden.

Pausenlose Produktion von Fett

Mit Hilfe eines genetischen Tricks belegte Lazars Arbeitsgruppe: Hemmt man das Gen *Rev-erba* und somit die Aktivität von HDAC3 in der Leber, dann entsteht eine hepatische Steatosis (Fettleber). Eine der Aufgaben von HDAC3 lautet nämlich, während der Nachtzeit, wenn die Mäuse aktiv sind und ihr Körperfett als Energiequelle nutzen, bestimmte Gene zu deaktivieren, welche die Produktion von Lipidmolekülen steuern. Der Funktionsausfall des Gens *Rev-erba* führt zu einem Rückgang der HDAC3-Aktivität – und das wiederum lässt Erbanlagen, die für die Fettsynthese in der Leber verantwortlich sind, dauerhaft aktiv bleiben. Im Endeffekt kommt es zu einer abnormen Anreicherung von Fett in den Leberzellen, zur Beeinträchtigung der Leberfunktion und zu einem erhöhten Risiko für Fettleibigkeit und Diabetes.

Uhren-Gene sind auch in Fettgewebe aktiv und beeinflussen von dort aus viele Stoffwechselprozesse. Fettgewebe ist nicht bloß ein Energiespeicher, sondern darüber hinaus ein endokrines Organ: Es schüttet Hormone ins Blut aus, die die Aktivität anderer Körpergewebe beeinflussen, darunter Leptin. Georgios Paschos und Garret FitzGerald, beide von der University of Pennsylvania (USA), veränderten Mäuse genetisch dahin gehend, dass den Nagern ein intaktes Uhren-Gen in den Fettzellen (Adipozyten) fehlte. Die Tiere wurden daraufhin übergewichtig und verlegten die Zeit ihrer Nahrungsaufnahme auf die hellen Tagesstunden. Fettmoleküle zirkulierten zur »falschen« Zeit durch ihren Körper, wodurch ihr Gehirn die Fähigkeit verlor, die Fressphasen korrekt auf die Tageszeit abzustimmen. Diese Art der Störung scheint nur aufzutreten, wenn der Taktgeber in den Adipozyten nicht funktioniert: Mäuse mit fehlerhafter innerer Uhr im Pankreas oder der Leber behalten den normalen Rhythmus der Nahrungsaufnahme bei.

Die Beobachtungen von Paschos und FitzGerald bestätigen frühere Untersuchungen, laut denen der Zeitpunkt des Fressens erhebliche Auswirkungen darauf haben kann, wie effektiv der Körper die Energie der Nahrung speichert und nutzt. Im Jahr 2009 berichtete Deanna Arble, damals Doktorandin in unserer Arbeitsgruppe an der Northwestern University: Mäuse, denen man fettreiche Nahrung während der hellen Tagesstunden anbietet, legen deutlich mehr Gewicht

zu als Artgenossen, die die gleiche Diät nachts erhalten. Und das sogar dann, wenn sowohl die Kalorienzufuhr als auch die Bewegungsaktivität in beiden Gruppen übereinstimmen.

Satchidananda Panda und seine Arbeitsgruppe am Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien, USA) haben diese Befunde weiter untermauert. Sie zeigten, dass Mäuse trotz fettreicher Diät und uneingeschränkter Kalorienangebots weder übergewichtig werden noch Stoffwechselstörungen entwickeln, wenn man die Nahrungszufuhr auf ein achtstündiges Zeitfenster während der Nachtstunden beschränkt, der Zeit der natürlichen Nahrungsaufnahme also. Die so behandelten Tiere hatten einen ähnlich gesunden Stoffwechsel wie Nager, die fettarm ernährt wurden. Offenbar sind bei Mäusen die metabolischen Zyklen in der Leber und anderen Geweben besser aufeinander abgestimmt, wenn die Tiere ausschließlich nachts fressen.

Diese Ergebnisse könnten für Menschen mit einem so genannten Night-Eating-Syndrom relevant sein. Davon Betroffene leiden an einer Essstörung mit nächtlichem Heißhunger, die häufig von Übergewicht, metabolischem Syndrom, Suchtverhalten, Stress, Angstzuständen und Depressionen begleitet wird. Vielleicht liegt die Ursache der Störung in einem Defekt der zirkadianen Regulierung des Hungergefühls.

Marta Garaulet von der Universidad de Murcia in Spanien und Frank Scheer von der Harvard University (USA) haben in einer Ernährungsstudie nachgewiesen, dass die Esszeiten beeinflussen, wie erfolgreich Diäten zum Gewichtsabnehmen sind. Personen, die ein frühes Mittagessen einnahmen, verloren mehr Pfunde als solche, die sich spät zu Tisch begaben. Es ist weitere klinische Forschung nötig, um die Zusammenhänge zwischen Esszeiten, Fettleibigkeit, Diabetes und verwandten Leiden aufzudecken. Doch schon heute deuten die Befunde auf die Möglichkeit zirkadianer Ernährungsstrategien hin, die sich als innovative, nicht pharmakologische Methoden zum Abnehmen bewähren könnten.

Zirkadiane Medizin

Detaillierte Untersuchungen menschlicher zirkadianer Rhythmen gewähren neue Einblicke darin, wie Stoffwechselerkrankungen entstehen. Der Chronobiologe Till Roenneberg und sein Team an der Ludwig-Maximilians-Universität München beispielsweise haben das Schlafverhalten tausender Menschen aus der ganzen Welt untersucht. Sie entdeckten eine verbreitete Form chronischer zirkadianer Störungen, die sie als sozialen Jetlag bezeichnen. Vergleicht man das Schlafmuster an den Wochentagen mit dem an den Wochenenden, stellt man häufig einen Zeitversatz von drei bis vier Stunden fest: Unter der Woche stehen viele gegen 6 Uhr auf, samstags und sonntags hingegen erst gegen 9 oder 10 Uhr. Das entspricht zwei Langstreckenflügen pro Woche durch je drei bis vier Zeitzonen. Die Wissenschaftler stellten eine positive Korrelation fest zwischen dem Ausmaß des sozialen Jetlags und dem Körpermasseindex (Body-Mass-Index). Demzufolge treiben andauernde Störungen der inneren Uhr(en) das Körpergewicht nach oben.

Weitere Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass aus dem Takt gebrachte zirkadiane Rhythmen mit Herz- und Magenerkrankungen in Verbindung stehen, aber auch mit verschiedenen Krebsarten sowie mit neurologischen, neurodegenerativen und psychischen Erkrankungen. Laut einiger kleinerer Studien kann schlechter Schlaf eine Ursache – und nicht etwa eine Folge – schwerer Depression sein, vor allem bei Menschen, die für diese Krankheit anfällig sind. Verschiedene Untersuchungen seit 2010 an Mäusen und Hamstern besagen zudem: Ein chronischer Jetlag beeinträchtigt sowohl das Lernvermögen als auch Gedächtnisleistungen und zieht neuronale Strukturen in bestimmten Hirnregionen in Mitleidenschaft.

Ein besseres Verständnis davon, welche Funktion und Bedeutung unsere inneren Uhren haben, kann die Medizin bereichern. Beispielsweise in Form einer zirkadianen Gesundheitsfürsorge, also der Abstimmung unserer Lebensweise auf zirkadiane Rhythmen etwa hinsichtlich des Glukosestoffwechsels. Ärzte, die das Wissen über innere Taktgeber und Schlaf-wach-Zyklen in ihre Diagnosen und Therapien einbringen, sollten besser dazu in der Lage sein, die Gesundheit ihrer Patienten zu erhalten, Krankheiten zu vermeiden oder diese effektiv zu behandeln. ~

DIE AUTOREN



Keith C. Summa (links) ist Doktorand der Northwestern University (USA) und erforscht, wie sich wissenschaftliche Erkenntnisse über zirkadiane Rhythmen in der Medizin anwenden lassen. **Fred W. Turek** ist Neurobiologe und arbeitet als Direktor am Center for Sleep and Circadian Biology (Zentrum für Schlaf und zirkadiane Biologie) an dieser Universität.

QUELLEN

Carlson, E. et al.: Tick Tock: New Clues about Biological Clocks and Health. In: Inside Life Science. Online-Publikation (<http://publications.nigms.nih.gov/insidelifescience/biological-clocks.html>), November 2012

Kc, R. et al.: Environmental Disruption of Circadian Rhythm Pre-disposes Mice to Osteoarthritis-Like Changes in Knee Joint. In: Journal of Cellular Physiology 230, S. 2174–2183, 2015

Summa, K. C., Turek, F. W.: Chronobiology and Obesity: Interactions between Circadian Rhythms and Energy Regulation. In: Advances in Nutrition 5, S. 312–319, 2014

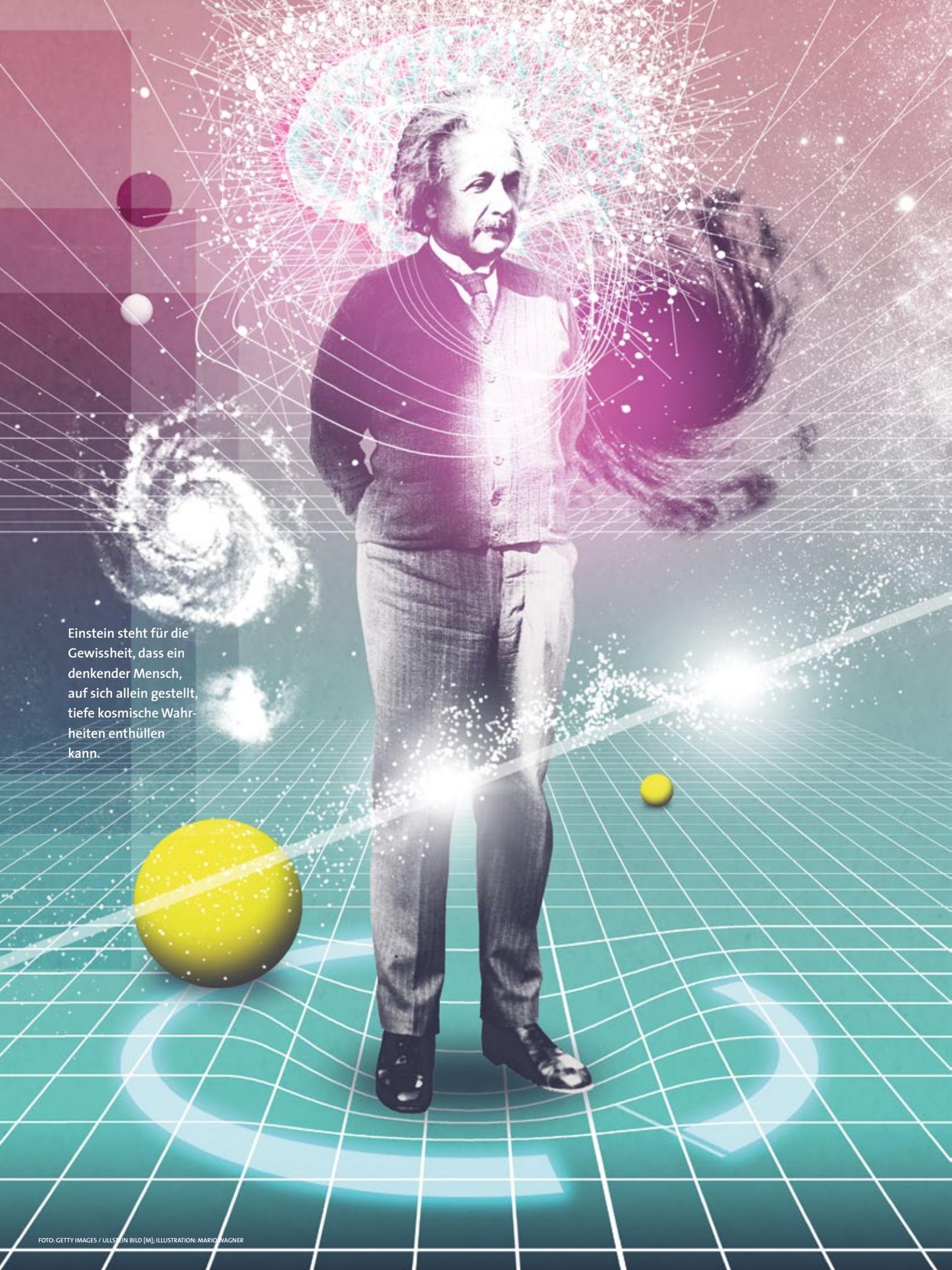
Voigt, R. M. et al.: Circadian Disorganization alters Intestinal Microbiota. In: PLoS One 9, e97500, 2014

WEBLINKS

www.ScientificAmerican.com/feb2015/clock-genes
Video über innere Uhren bei Säugetieren (englisch)

www.mpibpc.mpg.de/327366/research_report_318255
Chronobiologie: Das genetische Netzwerk der zirkadianen Uhr (Forschungsbericht des MPI für biophysikalische Chemie)

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362264



Einstein steht für die Gewissheit, dass ein denkender Mensch, auf sich allein gestellt, tiefe kosmische Wahrheiten enthüllen kann.

TITELTHEMA: 100 JAHRE EINSTEINS RAUMZEIT

Der Glanz des Genies

Vor einem Jahrhundert veränderte ein einzelner Mann mit seinen Gedanken unsere Vorstellung vom Universum so stark, dass sein Erbe bis heute nachwirkt.

Von Brian Greene

Albert Einstein soll einmal geäußert haben, zwei Dinge seien unendlich: das Universum und die menschliche Dummheit. Bei dem Universum sei er sich aber nicht ganz sicher.

Wir lachen, wenn wir das hören. Oder zumindest lächeln wir. Aber es beleidigt uns nicht. Denn mit dem Namen »Einstein« verbinden wir das Bild eines warmherzigen, onkelhaften Weisen aus vergangenen Zeiten. Wir sehen den gutmütigen Wissenschaftler mit den wilden Haaren vor uns, dessen berühmte Porträts – auf einem Fahrrad, mit herausgestreckter Zunge oder mit durchdringendem Blick – sich in unser Kulturgedächtnis eingebrannt haben. Einstein personifiziert die Macht des reinen Verstands.

In der Physikergemeinde wurde er schlagartig im Jahr 1905 berühmt, das heute als sein Annus mirabilis gilt. In der spärlichen Freizeit, die ihm neben einer Sechs-Tage-Woche in einem Berner Patentbüro blieb, veröffentlichte Einstein gleich vier bahnbrechende Theorien. Im März beschrieb er die Teil-

AUF EINEN BLICK

DER AUSNAHMEPHYSIKER

- 1 Albert Einstein veröffentlichte im Jahr 1905 mehrere revolutionäre Arbeiten, darunter seine **spezielle Relativitätstheorie**.
- 2 Zehn Jahre später gelang es ihm, die **Schwerkraft** in sein Gedankengebäude zu integrieren. Damit veränderte er auch unser Verständnis von **Raum und Zeit** grundlegend.
- 3 Als sich seine Theorie als richtig erwies, wurde er auch außerhalb von Wissenschaftlerkreisen zum Star. Seine Ideen **prägen die Welt bis heute**.

chennatur des Lichts, auf die später die Quantenmechanik gründen sollte. Zwei Monate später gelangen ihm Vorhersagen, deren Überprüfung den Aufbau der Materie aus Atomen belegte. Im Juni erschien seine spezielle Relativitätstheorie, die einen unerwarteten Charakter von Raum und Zeit offenbarte: Abstände, Geschwindigkeiten und Zeitspannen hängen stets vom Beobachter ab. Und dazu krönte Einstein in einem Nachtrag im September desselben Jahres sein Theoriegebäude mit seiner Formel, die weltberühmt wurde: $E = mc^2$.

Normalerweise entwickelt sich die Wissenschaft schrittweise. Spärlich sind die einzelnen Beiträge dazwischen, die einen Umbruch bewirken. Doch in diesem Fall erschütterte ein Mann mit einem enormen Kreativitätsausbruch in nur einem Jahr gleich viermal das Fundament der Physik. Der Forschungsgemeinde war die Bedeutung dessen sofort klar. Doch der breiten Öffentlichkeit war Einstein noch kein Begriff.

In seiner speziellen Relativitätstheorie legte Einstein fest, dass sich nichts schneller als das Licht bewegen kann. Das war ein Angriff auf Newtons Gravitationstheorie, laut der schwere Körper andere Massen augenblicklich beeinflussen. Diesen Widerspruch versuchte Einstein aufzulösen, indem er sich sogleich aufmachte, die jahrhundertealten newtonschen Regeln umzuformulieren. Selbst seine treuesten Unterstützer hielten dieses Unterfangen für weltfremd und zum Scheitern verurteilt. So mahnte Max Planck: »Als alter Freund muss ich Ihnen davon abraten, weil Sie einerseits nicht durchkommen werden; und wenn Sie durchkommen, wird Ihnen niemand glauben.« Einstein ignorierte die Warnungen und versuchte es. Fast ein Jahrzehnt lang.

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

- | | | |
|--------|---|---------------------|
| Teil 1 | ► Der Glanz des Genies
<i>Brian Greene</i> | Oktober 2015 |
| | Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie
<i>Michel Janssen, Jürgen Renn</i> | |
| Teil 2 | ► Der Zufall im Kosmos
<i>George Musser</i> | November 2015 |
| Teil 3 | ► Gravitationswellenjäger auf heißer Fährte
<i>Felicitas Mokler</i> | Dezember 2015 |
| Teil 4 | ► Auf der Suche nach der Theorie von Allem
<i>Corey S. Powell</i> | Januar 2016 |
| Teil 5 | ► Die Vermessung Schwarzer Löcher
<i>Dimitrios Psaltis, Shepard S. Doeleman</i> | Februar 2016 |
| Teil 6 | ► Sind Zeitreisen möglich?
<i>Tim Folger</i>
Wo Einstein irrte
<i>Lawrence M. Krauss</i> | März 2016 |

1915 stellte er schließlich seine allgemeine Relativitätstheorie vor und interpretierte die Gravitation vollkommen neu: als Krümmung von Raum und Zeit. Statt dass die Erdmasse eine entglittene Teetasse greift und ihrem klirrenden Schicksal entgegenzieht, sagt die allgemeine Relativitätstheorie voraus, dass unser Planet seine Umgebung verbiegt und die Tasse auf einer Art vierdimensionaler Rutschbahn zum Fußboden gleitet (Infografik rechts). Gravitation, so behauptete Einstein, sei in Form von »Raumzeit« ein Teil der Geometrie des Universums.

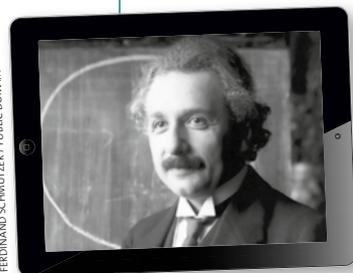
Über Nacht zum Weltstar – mit revolutionärer Physik

Am 6. November 1919, vier Jahre nachdem Einstein die allgemeine Relativitätstheorie formuliert hatte, verbreiteten Zeitungen weltweit neueste astronomische Messungen, nach denen einige Sterne am Himmel an Positionen standen, die nach Newtons Gesetzen nicht zu erwarten waren, aber genau mit den Vorhersagen des aufstrebenden Physikers übereinstimmten. Dieser Triumph seiner Theorie machte Einstein über Nacht zu einem Idol. Er hatte Newton vom Thron gestoßen und unsere Spezies einen gewaltigen Schritt näher an die ewigen Wahrheiten der Natur geführt.

Dazu kam Einsteins Persönlichkeit. Er selbst scheute zwar das Rampenlicht, zog mit seiner rätselhaften intellektuellen Übermacht aber umso mehr die Aufmerksamkeit der Welt auf sich. Gern nutzte er seine Wirkung für geistreiche Bemerkungen wie »Ich bin militanter Pazifist«. Bei der Uraufführung von Charlie Chaplins Film »Lichter der Großstadt« soll der Komiker auf dem roten Teppich zum anwesenden Einstein gesagt haben: »Mir applaudiert man, weil mich alle Leute verstehen, und Ihnen, weil niemand Sie versteht.«

Einige Historiker gehen sogar so weit und betrachten Einstein als Treiber der Avantgarde des 20. Jahrhunderts, dessen revolutionäre Wissenschaft auch eine kulturelle Erneuerung erzwang. Doch ich habe noch keine Belege für den schwärmerischen Gedanken gefunden, dass es die Strahlkraft von seinen Erkenntnissen war, welche die staubigen Überreste einer überalterten Gesellschaftsordnung wegfegte. Oft ist es eher eine weit verbreitete Fehlinterpretation der Relativität – dass es keine objektive Wahrheit mehr gebe –, wegen der Einsteins Einfluss derart beschworen wird. Er selbst hatte jedenfalls einen eher konservativen Geschmack, zog Bach und

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



Unser Online-Dossier zum Thema »Einstein« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/albert-einstein-und-die-relativitaetstheorie

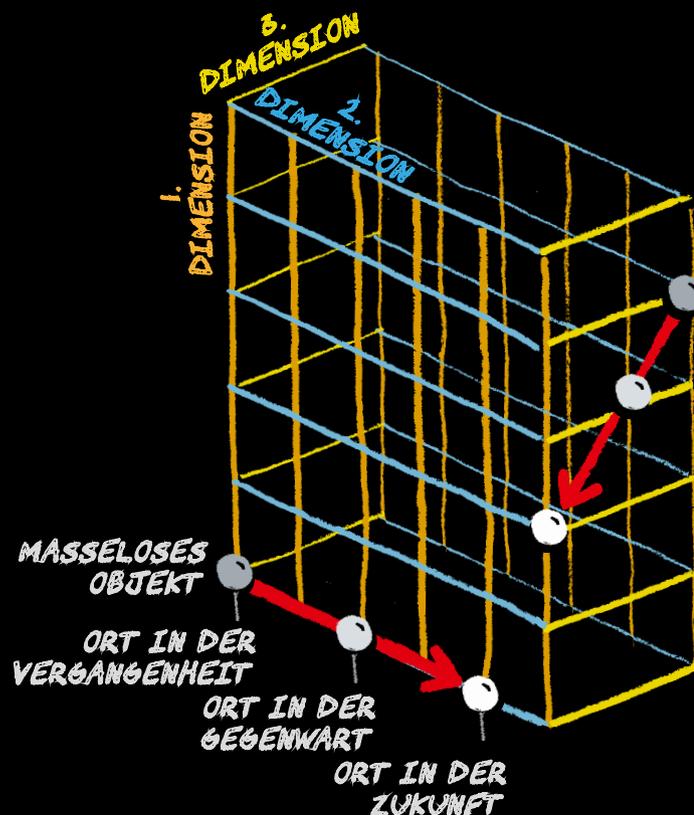
Seltsame Raumzeit

1915 definierte Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie die Gravitation vollkommen neu. Demnach ergibt sich die Schwerkraft direkt aus den geometrischen Eigenschaften eines vierdimensionalen Universums. Das folgerte Einstein aus seiner speziellen Relativitätstheorie, die er zehn Jahre zuvor formuliert hatte. Diese vereint Raum und Zeit zu einer gemeinsamen Raumzeit (unten). In der allgemeinen Relativitätstheorie beschrieb Einstein, wie ein massereiches Objekt die Raumzeit verändert (rechte Seite): Es verbiegt sie und zwingt so andere Körper auf eine gekrümmte Bahn.

Raumzeit ohne Masse

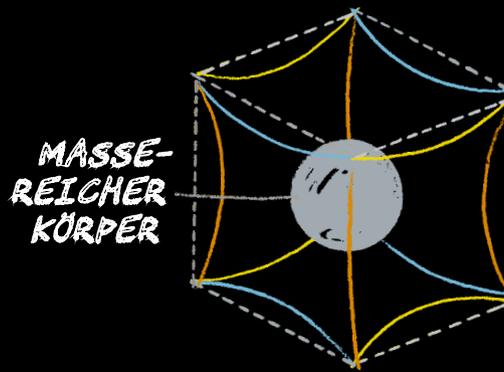
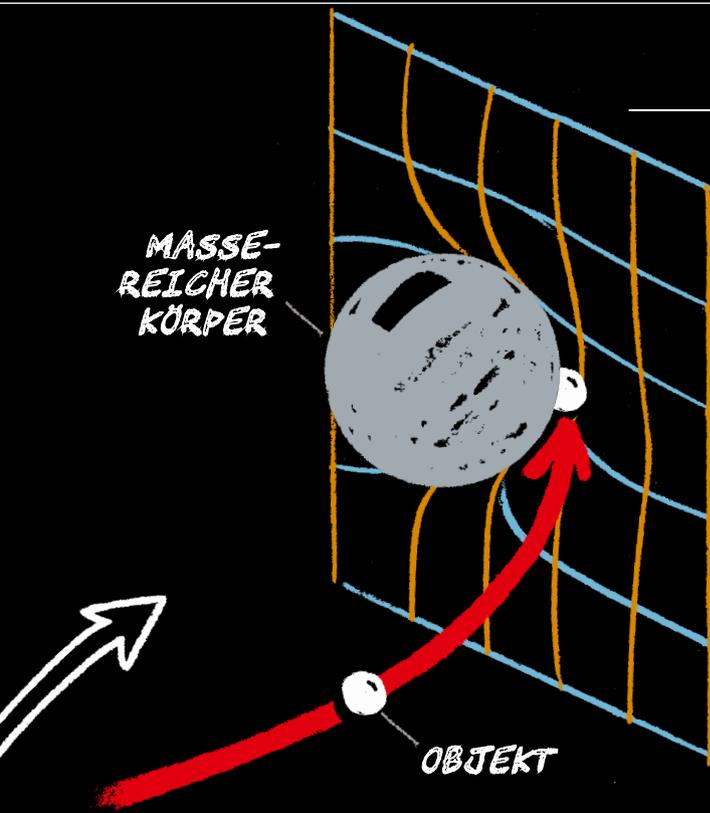
Unsere Welt besteht aus vier Dimensionen. Auf dieser zweidimensionalen Seite lassen sich die drei Raumrichtungen durch ein regelmäßiges Gitter darstellen und die vierte, zeitliche Dimension durch die Position eines Körpers zu verschiedenen Momenten. Ohne einen massereichen Gegenstand in dieser Umgebung ist der kürzeste Weg durch die Raumzeit einfach eine Gerade.

1, 2, 3 = WO 4 = WANN



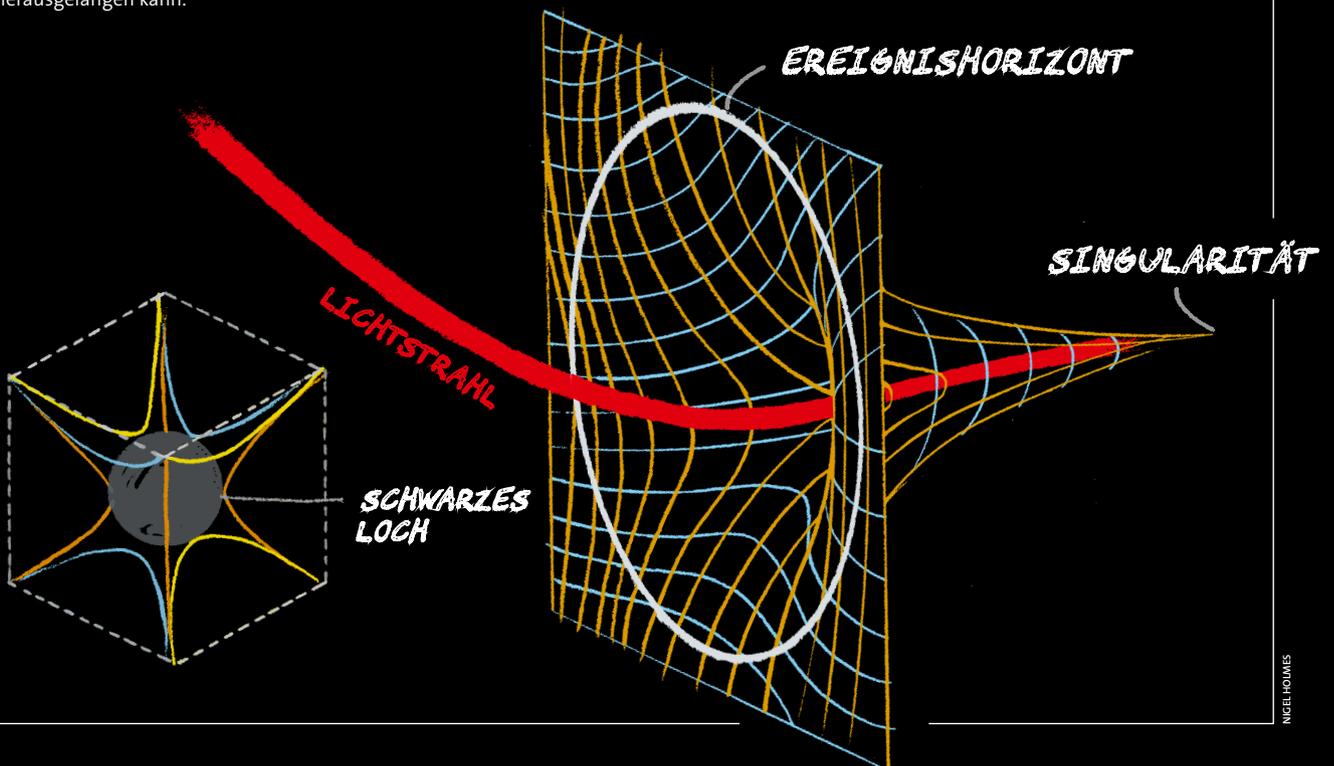
Raumzeit mit Masse

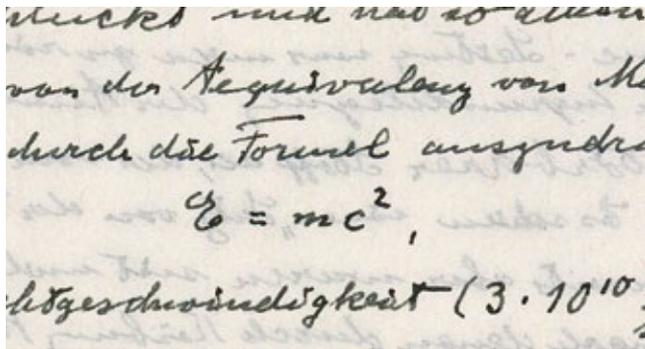
Jeder Körper verbiegt das Gitter der Raumzeit um sich herum – umso stärker, je mehr Masse er besitzt. Jede Bewegung führt ein Objekt dadurch auf einer gekrümmten Bahn näher an den Schwerpunkt heran. So ähnlich, wie es unmöglich ist, auf der Oberfläche einer dreidimensionalen Kugel eine gerade Linie zu beschreiten, zwingt eine verbogene Raumzeit alles in der Umgebung auf eine verzerrte vierdimensionale Bahn. Dieser Effekt führt zur Gravitationskraft, die wir als Anziehung zwischen zwei Massen wahrnehmen.



Raumzeit ins Extreme verzerrt

Eine der verblüffendsten Folgen der allgemeinen Relativitätstheorie sind Schwarze Löcher. Sie entstehen, wenn sich eine Masse auf kleinstem Raum konzentriert und eine so genannte Singularität bildet – einen Bereich, in dem die Raumzeit unendlich stark gekrümmt ist. Die Grenze zum übrigen Kosmos ist der »Ereignishorizont«, ein Bereich, in dem die Anziehung so groß ist, dass nichts, was sich von außen hineinbewegt, je wieder herausgelangen kann.





Einsteins weltberühmte Gleichung $E = mc^2$ in dessen Handschrift – hier aus einem Manuskript von 1946.

Mozart moderneren Komponisten vor und lehnte zu Gunsten seiner lieb gewonnenen traditionellen Einrichtung ab, als ihm jemand neue Möbel im Bauhausstil schenken wollte.

Der Siegeszug der Raumzeit

In der Wissenschaft erwies sich die allgemeine Relativitätstheorie hingegen ein Jahrhundert lang als fruchtbarer Boden. Während der 1920er Jahre wuchs daraus die moderne Kosmologie, die sich mit dem Ursprung und der Entwicklung des Universums beschäftigt. Der russische Mathematiker Alexander Friedmann und der belgische Physiker und Theologe Georges Lemaître zeigten mit Einsteins Gleichungen, dass sich der Weltraum ausdehnen muss. Einstein sträubte sich gegen diese Konsequenz und er führte zunächst sogar eine »kosmologische Konstante« in seine Formeln ein, um ein unveränderliches Universum sicherzustellen. Als Edwin Hubble später allerdings Galaxiebewegungen vermaß und zeigte, dass alle weit entfernten Objekte von uns wegrasen, sah Einstein seinen Irrtum ein.

Dass der Kosmos expandiert, legte nahe, dass er aus einem einzigen Punkt entstand – die Urknalltheorie keimte auf. In den folgenden Jahrzehnten wurde sie immer weiter entwickelt und hielt zahlreichen Überprüfungen stand. Eine von diesen Beobachtungen – 2011 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet – offenbarte, dass das All sich nicht nur ausdehnt, sondern dies sogar immer schneller tut. Die beste Erklärung dafür? Die Urknalltheorie, verfeinert mit der lange verworfenen kosmologischen Konstante. Die Lehre daraus? Wenn man nur genug wartet, erweisen sich selbst einige von Einsteins falschen Ideen als richtig.

Die erste Lösung von Einsteins Gleichungen gelang dem deutschen Astronomen Karl Schwarzschild im Schützengraben des Ersten Weltkriegs. An der russischen Front berechnete er Flugbahnen von Artilleriegeschossen – und in den Pausen dazwischen außerdem, wie sich die Raumzeit um einen kugelförmigen Körper wie unsere Sonne krümmen sollte. Ein Nebenprodukt seiner Überlegungen war allerdings eigenartig. Schrumpft man ein solches Objekt nur genügend, die Sonne etwa auf rund sechs Kilometer Durchmesser, dann verbiegt sich die Raumzeit darum so sehr, dass alles, was zu

nahekommt, unwiederbringlich gefangen wird – sogar das Licht selbst. Oder, um den heutigen Begriff für diese Körper zu verwenden: Schwarzschild entdeckte, dass Schwarze Löcher möglich sind.

Diese seltsamen mathematischen Konstrukte schienen ohne reale Bedeutung. Doch nicht die Erwartungen bestimmen, was richtig ist, sondern die Beobachtungen, und inzwischen gehen die Astronomen davon aus, dass massenweise Schwarze Löcher existieren. Seit den ersten einflussreichen Überlegungen von Stephen Hawking aus den 1970er Jahren werden Physiker immer zuversichtlicher, dass die extremen Bedingungen, die dort herrschen, Schwarze Löcher zu idealen Forschungsgegenständen machen, mit denen sich die allgemeine Relativitätstheorie weiterentwickeln und letztlich mit der Quantenmechanik vereinen lässt.

Das alles soll nur verdeutlichen, dass das 100-jährige Jubiläum der Theorie nicht bloß von historischem Interesse ist. Vielmehr ist dieses Weltbild heute untrennbar mit der aktuellen Forschung verflochten.

Wie gelang dem Genie ein so gewaltiger Beitrag von derart lang anhaltender Wirkung? Jenseits der Frage nach seinem übrigen kulturellen Einfluss steht Einstein zumindest für die Gewissheit, dass ein denkender Mensch, allein auf sich gestellt, kosmische Wahrheiten enthüllen kann. Gelangte er zu seinen Einsichten, weil sein Gehirn besonders aufgebaut war? Weil er ein Nonkonformist war? Wegen seiner Fähigkeit, sich hartnäckig und kompromisslos auf eine Sache zu konzentrieren? Vielleicht. Ja. Wahrscheinlich. Die Wahrheit ist aber, dass es niemand weiß. Man kann Geschichten darüber erzählen, warum jemand diese oder jene Idee hatte, doch im Grunde formen zu viele Einflüsse unsere Gedanken, als dass es je Klarheit darüber gäbe.

Mit Blick auf all seine Leistungen und sein lebendiges Erbe liegt eine weitere spekulative Frage nahe: Wird es einen nächsten Einstein geben? Sofern damit ein Ausnahmenschon gemeint ist, welcher der Wissenschaft einen kräftigen Stoß nach vorn versetzt, lautet die Antwort sicher: Ja. In dem halben Jahrhundert seit Einsteins Tod gab es solche Genies bereits tatsächlich. Doch meint man damit jemanden, den die Welt nicht wegen seiner Fähigkeiten als Sportler oder Entertainer verehrt, sondern als anregendes Beispiel für das, was der menschliche Geist erreichen kann, dann fällt diese Frage auf uns zurück – und darauf, was wir als Gesellschaft für wertvoll halten. ~

DER AUTOR



Brian Greene ist Professor für Theoretische Physik an der Columbia University in New York und arbeitet dort an der Theorie der Superstrings. Er ist zudem Autor mehrerer populärwissenschaftlicher Bestseller.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362266

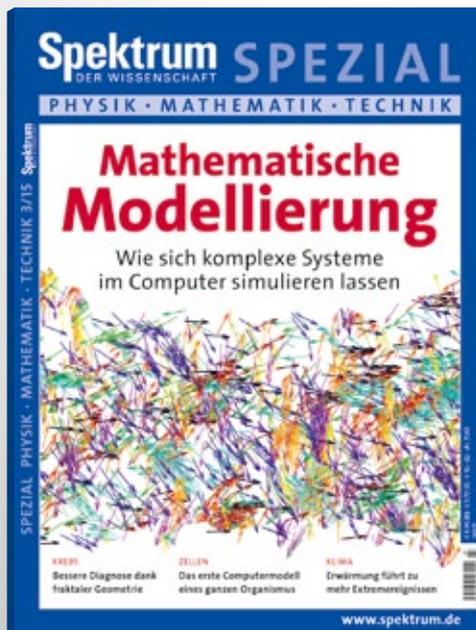
Unsere Neuerscheinungen



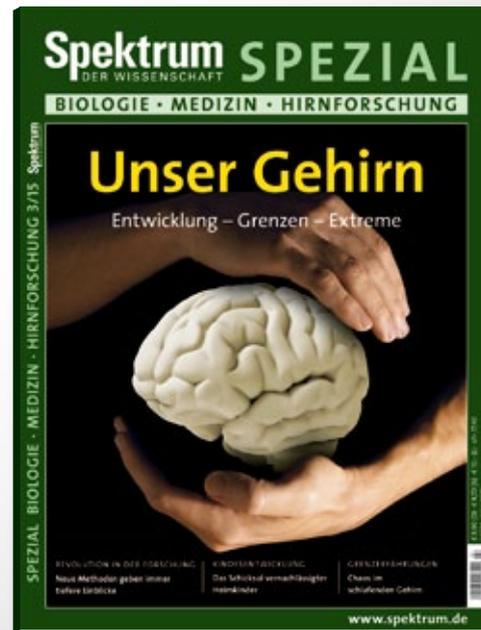
Neuroethik: Moral ist nicht angeboren • Hirndoping: Empathie auf Rezept? • Tierversuche: Leiden für die Wissenschaft • € 8,90



Jahrmärkte: Luxusgüter für die Reichen • Ketzer: Verbotene Wege zu Gott • Freiheit: Die Zünfte begehren auf • € 8,90



Strömungstechnik: Der Weg zum schwimmenden Nanoroboter • Molekulardynamik: Die Geheimnisse des Lebens simulieren • Krebs: Berechnung eines Tumors • € 8,90



Die Sprache des Gehirns • Im Kopf herrscht niemals Ruhe • Hirnstimulation: Unter Strom • Die genetische Kartierung des menschlichen Gehirns • € 8,90

Alle Hefte auch im Handel erhältlich!

So einfach erreichen Sie uns:

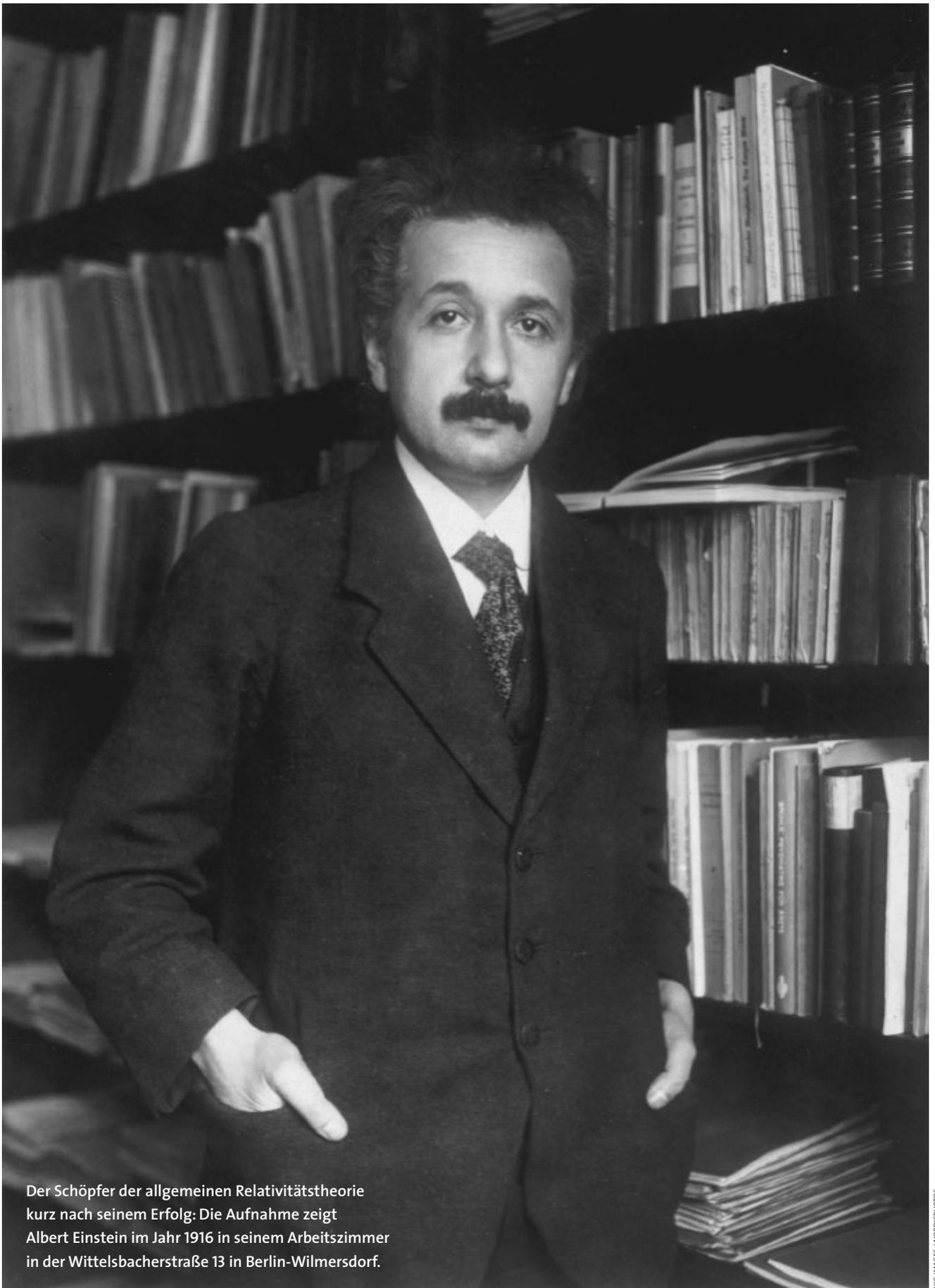
Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!





Der Schöpfer der allgemeinen Relativitätstheorie kurz nach seinem Erfolg: Die Aufnahme zeigt Albert Einstein im Jahr 1916 in seinem Arbeitszimmer in der Wittelsbacherstraße 13 in Berlin-Wilmersdorf.

AKG IMAGES / NORDICPHOTOS

Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie

Mit seiner neuen Theorie der Gravitation revolutionierte Albert Einstein vor 100 Jahren unser Denken. Doch auf dem Weg zu jenen Formeln, die heute jeder Physikstudent lernt und Handwerkszeug der theoretischen Astrophysik und Kosmologie sind, rang er jahrelang um eine Lösung.

Von Michel Janssen und Jürgen Renn

Vor 100 Jahren, am 25. November 1915, präsentierte Albert Einstein in einer Sitzung der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin eine kurze Abhandlung: »Die Feldgleichungen der Gravitation«. Es war der Schlussstein des Theoriegebäudes, das wir heute als allgemeine Relativitätstheorie (ART) kennen, der Höhepunkt in Einsteins wissenschaftlicher Karriere.

Ihre Entstehung ist eine der erstaunlichsten Episoden der Wissenschaftsgeschichte. Denn für eine neue Theorie der Schwerkraft gab es kaum eine ernst zu nehmende empirische Begründung. Newtons Modell konnte die astronomischen Tatsachen mit großer Präzision erklären, bis auf einen winzigen Effekt: eine minimale zusätzliche Komponente der Periheldrehung des Merkurs (siehe »Periheldrehung des Merkurs«, S. 52), die Einstein im November 1915 schließlich berechnen konnte. Doch dafür hätte es möglicherweise andere Erklärungen geben können als eine Modifikation des newtonschen Gravitationsgesetzes.

Mit seiner neuen Theorie revolutionierte Einstein unser Weltbild nachhaltig. Anders als in der newtonschen Mechanik sind Raum und Zeit in der allgemeinen Relativitätstheorie keine feste Bühne mehr, auf der sich das physikalische Geschehen zuträgt. Vielmehr werden sie durch ein dynamisches Feld bestimmt, das seinerseits an diesem Geschehen teilhat, indem es physikalischen Wirkungen unterliegt und ebensolche verursacht. Dieses Feld beschreibt die Geometrie von Raum und Zeit. Darüber hinaus ist es Ursache für zwei Erscheinungen, die in der klassischen Physik völlig unterschiedlichen Kräften zugeschrieben werden: der gegenseitigen Anziehung von Massen durch die Schwerkraft sowie den Effekten, die bei beschleunigten Bewegungen wie in einem Karussell auf die Trägheitskräfte zurückgeführt werden. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie sind jedoch Schwerkraft und Trägheit wesensverwandt, etwa so wie sich elektrische und magnetische Kräfte im Elektromagnetismus als zwei verschiedene Aspekte desselben Felds auffassen lassen.

Bereits im Jahr 1907, als Einstein noch am Schweizer Patentamt arbeitete, formulierte er eines der grundlegenden Prinzipien der allgemeinen Relativitätstheorie: das **Äquivalenzprinzip** (siehe Glossar S. 51), welches die Wesensgleichheit von Gravitations- und Trägheitskräften begründet. Es besagt, dass in zwei Laboren, von denen das eine gleichförmig und geradlinig beschleunigt wird, während das andere in einem homogenen Schwerfeld entsprechender Stärke ruht, dieselben physikalischen Gesetze gelten. Ein Beobachter kann also nicht zwischen der Trägheitskraft im beschleunigten Labor und der Schwerkraft im ruhenden Labor unterscheiden.

Damit treten beschleunigte Testlabore oder Bezugssysteme, wie theoretische Physiker sie nennen, ruhenden oder gleichförmig bewegten, kräftefreien **Inertialsystemen**, wie Einstein sie in seiner speziellen Relativitätstheorie (SRT) verwendete, gleichberechtigt an die Seite: Sie lassen sich als ruhend auffassen, wenn man nur annimmt, dass in ihnen ein Gravitationsfeld bestimmter Art wirksam ist. In dieser Zulassung beschleunigter Bezugssysteme sah Einstein die Verallgemeinerung des **Relativitätsprinzips** aus seiner speziellen Relativitätstheorie.

AUF EINEN BLICK

PER ASPERA AD ASTRA

1 Als Albert Einstein über eine **neue Theorie der Gravitation** nachdachte, stieß er rasch an die Grenzen seiner mathematischen Kenntnisse. Daher holte er sich Rat bei dem befreundeten Schweizer Mathematiker **Marcel Grossmann**.

2 Der Weg hin zu den endgültigen Feldgleichungen war steinig: Nachdem Einstein und Grossmann mit einer rein **mathematischen Vorgehensweise** zunächst nicht weiterkamen, gingen sie zu einer **physikalisch-heuristischen** über.

3 Die Bedeutung der allgemeinen Relativitätstheorie für **Astrophysik und Kosmologie** konnte Einstein damals kaum erahnen. Erst eine neue Generation von Physikern machte sie für diese Gebiete hoffähig.



Marcel Grossmann brachte Albert Einstein die für seine neue Theorie notwendige Mathematik bei. Die ersten Gleichungen der Entwurftheorie entwickelten beide gemeinsam.

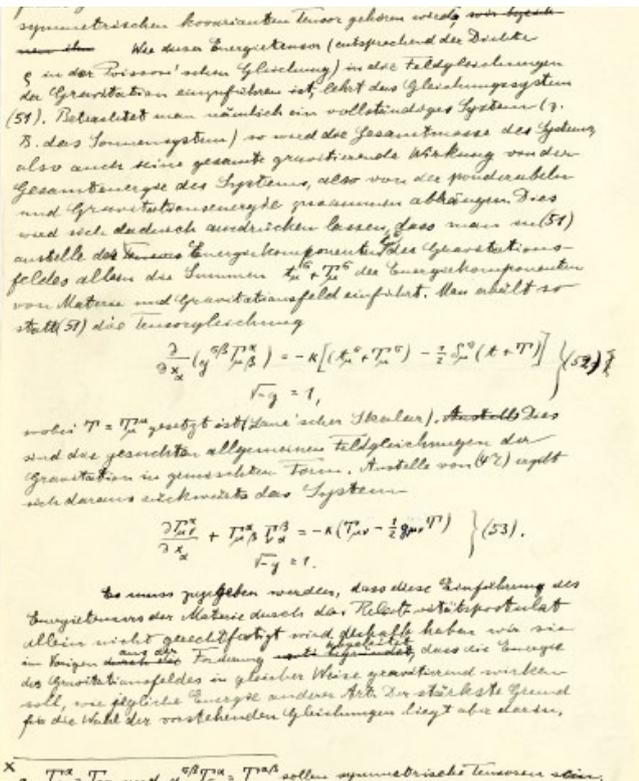
Um ihre Gedankenmodelle zu beschreiben, bedienen sich die Physiker der Sprache der Mathematik, und was dem Physiker das Bezugssystem, ist dem Mathematiker sein Koordinatensystem. So suchte Einstein für seine neue Theorie der Schwerkraft zunächst nach Gleichungen, die ihre Form möglichst unter beliebigen Koordinatentransformationen beibehalten. Die Mathematik bezeichnet solche Gleichungen als **allgemein kovariant**. Später stellte sich allerdings heraus, dass diese mathematische Forderung nicht zu einem Relativitätsprinzip im gleichen Sinn führt, wie es für die spezielle Relativitätstheorie gilt. Denn das klassische Relativitätsprinzip ist in der besonderen Symmetrie dieser Theorie begründet, die wiederum damit zusammenhängt, dass die spezielle Relativitätstheorie eine flache Raumzeit beschreibt, während die allgemeine Relativitätstheorie Raumzeiten mit beliebigen Krümmungen zulässt.

Eine neue Sprache – der absolute Differenzialkalkül

Inzwischen als Professor an der Karls-Universität in Prag tätig, publizierte Einstein 1911 einen Vorschlag zur Beobachtung der Lichtablenkung im Gravitationsfeld während einer Sonnenfinsternis, der noch allein auf dem Äquivalenzprinzip beruhte. Zu einer vollständigen Feldtheorie der Gravitation gehörte aber die Aufstellung zweier fundamentaler Gleichungen, wie Einstein aus der Theorie des elektromagnetischen Felds wusste: eine Bewegungsgleichung, welche die Bewegung im Feld beschreibt, und eine Feldgleichung, die bestimmt, wie das Feld durch seine Quellen erzeugt wird.

Bei der Konstruktion einer solchen Feldtheorie ging Einstein systematisch vor. In der Folgezeit beschäftigte er sich zunächst mit dem Spezialfall des statischen Gravitationsfelds. Dabei hatte er bereits das umfassendere Theoriegebäude im Blick, das dynamische Gravitationsfelder einschloss. Mitte 1912 wurde ihm klar, dass seine Gravitationstheorie nach einer neuen mathematischen Ausdrucksweise verlangte. Der Durchbruch war die Erkenntnis, dass sich die Bewegungsgleichung in solchen dynamischen Gravitationsfeldern als Gleichung einer im weitesten Sinn geraden Linie in einer gekrümmten Raumzeit schreiben lässt. Das bedeutete zugleich, dass sich das Gravitationsfeld als Ausdruck der Geometrie der Raumzeit verstehen ließ.

Dafür war der so genannte absolute Differenzialkalkül die geeignete Sprache, die wir in heutiger Terminologie Differentialgeometrie in **Tensor**darstellung nennen würden. Die Mathematiker Elwin Bruno Christoffel, Gregorio Ricci-Curbastro und Tullio Levi-Civita hatten sie basierend auf den Arbeiten von Carl Friedrich Gauß und Bernhard Riemann seit dem 19. Jahrhundert entwickelt; den damaligen Physikern war sie allerdings fast unbekannt. Als Einstein im Sommer 1912 von Prag nach Zürich zurückkehrte, um eine Professur an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) anzutreten, bat er daher verzweifelt seinen Freund, den Mathematiker Marcel Grossmann, um Hilfe. Die beiden waren Klassenkameraden am Eidgenössischen Polytechnikum in Zü-



Die Formel (53) in Albert Einsteins Handschrift aus dem Manuskript »Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie« von 1916 enthält die endgültigen Feldgleichungen.

rich gewesen – 1911 umbenannt in Eidgenössische Technische Hochschule – und sie waren nun wieder an ihrer Alma Mater vereint.

Auf der Suche nach einer mathematisch konsistenten Darstellung seiner Theorie machte sich Einstein gemeinsam mit Grossmann als nächsten Schritt daran, nun auch **Feldgleichungen** zu finden, die ihre Form unter möglichst unterschiedlichen Koordinatentransformationen beibehielten. Die physikalischen Gesetze sollten also in allen denkbaren Bezugssystemen – egal ob relativ zueinander ruhend, sich gleichförmig bewegend, beschleunigt oder gar rotierend – ihre Gültigkeit in derselben Form beibehalten. Ausgehend vom **Riemann-Tensor**, dem zentralen mathematischen Ob-

jekt des absoluten Differenzialkalküls, suchte Einstein nach einer Feldgleichung, die beschreiben sollte, wie die Geometrie der Raumzeit und damit das Gravitationsfeld durch die Wirkung von Massen und Energien erzeugt wird.

Zugleich aber musste diese Feldgleichung plausiblen physikalischen Forderungen genügen. Insbesondere sollte sie selbstverständlich das bekannte Wissen über Gravitation, wie es im klassischen newtonschen Gravitationsgesetz verkörpert ist, einschließen. Und sie sollte natürlich auch mit den altbewährten Prinzipien der Erhaltung von Energie und Impuls verträglich sein. Einstein und Grossmann sahen sich also genötigt, die neue Mathematik der Raumzeit mit dem bekannten physikalischen Wissen ins Gleichgewicht zu brin-

Glossar

Äquivalenzprinzip: Nach dem Äquivalenzprinzip, das Einstein zum Ausgangspunkt der ART machte, sind Gravitations- und Trägheitskräfte wesensgleich. Es beruht auf der Gleichheit von schwerer und träger Masse. Diese Annahme wurde durch ein Experiment des Physikers Loránd Eötvös im Jahr 1890 untermauert.

Christoffelsche Symbole: Die christoffelschen Symbole erhält man aus partiellen Ableitungen der Metrik. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Parallelverschiebung eines Vektors im gekrümmten Raum beschreiben. Sie tauchen in der Bewegungsgleichung eines Teilchens in der ART auf, da sie das Gravitationsfeld darstellen.

Feldgleichungen: Sie beschreiben in einer Feldtheorie, wie eine Quelle ein Feld erzeugt. Typischerweise bestehen sie aus einer linken Seite, in der ein Differenzialoperator auf das Feld wirkt, und einer rechten Seite, die die Quelle wiedergibt. In den einsteinschen Feldgleichungen wird die Quelle durch den Energie-Impuls-Tensor der Materie dargestellt und das Feld durch Ableitungen des metrischen Tensors.

Geodäte: Eine Geodäte ist die am wenigsten gekrümmte Verbindung zwischen zwei Punkten in der Raumzeit. In der euklidischen Geometrie ist dies eine Gerade; auf einer Kugel verläuft sie entlang eines Großkreises. In einer gekrümmten Raumzeit schmiegt sie sich an die lokale Geometrie.

Inertialsystem: Inertialsysteme sind in der klassischen Physik gleichförmig bewegte Bezugssysteme. In ihnen haben die physikalischen Gesetze dieselbe Form wie in einem kräftefreien, ruhenden System.

Kovarianz, kovariant: Gleichungen heißen kovariant, wenn sie unter einer Koordinatentransformation ihre Form beibehalten. **Allgemein kovariant** nennt man Gleichungen, wenn diese Eigenschaft für sämtliche Koordinatentransformationen gilt.

Lagrange-Funktion: Die Lagrange-Funktion ist eine einzige Größe, mit der sich die Dynamik eines physikalischen Systems konzipieren lässt. In der klassischen Mechanik ist dies etwa die Differenz von potenzieller und kinetischer

Energie. Aus ihr lassen sich die Bewegungsgleichungen des Systems ableiten.

Metrik: Die Metrik ist eine Vorschrift für die Berechnung von Abständen in gekrümmten Räumen, in denen die Koordinaten selbst keine unmittelbar messbare Bedeutung mehr haben. In Einsteins ART wird sie durch einen **metrischen Tensor** dargestellt. Mit seiner Hilfe lässt sich die Gravitation als Eigenschaft einer gekrümmten Raumzeit beschreiben.

Noether-Theorem: Die Mathematikerin Emmy Noether verknüpfte physikalische Erhaltungsgrößen mit Symmetrien bei Koordinatentransformationen. Jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems ist eine Erhaltungsgröße zugeordnet. So gehört zur Translations-symmetrie bezüglich der Zeit die Erhaltung der Energie. Entsprechend folgt aus der Unabhängigkeit des Systems gegenüber Translationen und Rotationen des Koordinatensystems die Erhaltung von Impuls beziehungsweise Drehimpuls.

Newtonscher Grenzfall: Im Grenzfall schwacher und statischer Gravitationsfelder führt die ART näherungsweise auf das bekannte newtonsche Gravitationsgesetz.

Tensor: Tensoren sind eine Verallgemeinerung des Vektorbegriffs auf Größen, die durch beliebig viele Komponenten charakterisiert sind und sich etwa als Matrizen darstellen lassen.

Relativitätsprinzip: Das Relativitätsprinzip aus der SRT besagt, dass in allen Inertialsystemen physikalische Gesetze die gleiche Form haben und identische Messanordnungen gleiche Ergebnisse. In der ART versuchte Einstein diese Gleichberechtigung von Bezugssystemen auch auf beschleunigte Testlabore auszuweiten.

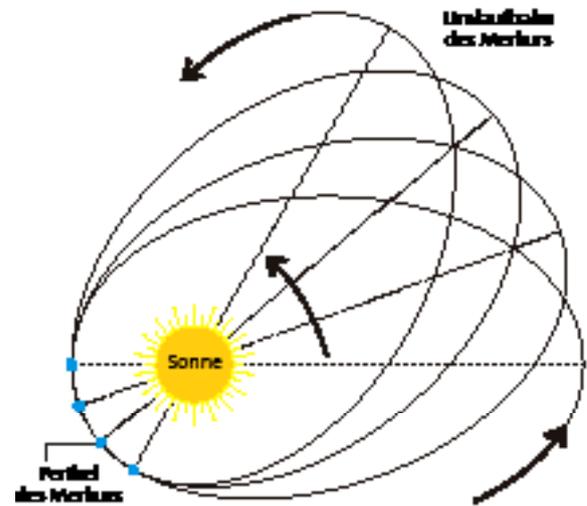
Riemann-Tensor: Der Riemann-Tensor, auch als Krümmungstensor bezeichnet, besteht aus zehn unabhängigen Komponenten, die man aus partiellen Ableitungen der christoffelschen Symbole erhält. Er ist ein Maß für die Krümmung der Raumzeit.

Periheldrehung des Merkurs

Alle Planeten des Sonnensystems bewegen sich auf einer Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Der sonnennächste Punkt auf dieser Umlaufbahn heißt Perihel. Wegen des Einflusses der Schwerkraft der übrigen Planeten rotieren diese elliptischen Bahnen ihrerseits um die Sonne, und damit auch das Perihel des jeweiligen Planeten.

Bei Merkur, dem sonnennächsten und zugleich masseärmsten Planeten tritt dieser Effekt besonders »stark« zu Tage. Beobachtungen hatten gezeigt, dass die Periheldrehung des Merkur $5,74''$ (Bogensekunden) pro Jahr betrug. Die newtonsche Mechanik sagte aber nur $5,32''$ vorher. Die Differenz zwischen Beobachtung und Theorie machten also pro Jahrhundert $43''$ aus.

Einsteins Entwurfgleichungen sagten aber eine zusätzliche Drehung des Merkurperihel von nur $18''$ pro Jahrhundert voraus. Nach den neuen Feldgleichungen betrug der noch fehlende Wert $43,02''$ pro Jahrhundert, was sehr gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. Damit war der erste und zum damali-



gen Zeitpunkt einzig mögliche Nachweis einer Vorhersage der fertigen allgemeinen Relativitätstheorie geglückt.

MPFZ / PUBLIC DOMAIN [M]; BESCHRIFTUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

gen – ein Balanceakt, der ihnen zunächst nicht gelang. Denn sie mussten erst noch mühevoll lernen, wie sich dieses bewährte Wissen in den neuen Formalismus einbetten ließ.

Einsteins und Grossmanns Ringen mit diesem Spannungsverhältnis von Physik und Mathematik ist im Einzelnen in den Notizen nachzulesen, die Einstein in seinem Züricher Notizbuch festgehalten und die eine Forschergruppe am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte umfassend ausgewertet hat. Wie sich diesen Aufzeichnungen entnehmen lässt, waren sie damals den richtigen Feldgleichungen bereits sehr nahegekommen, ohne sich dessen bewusst zu sein. Doch erst in den Sitzungsberichten für die Berliner Akademie kehrte Einstein im November 1915 zu Gleichungen zurück, wie sie die elegante Mathematik von Gauß, Riemann und deren Kollegen bereits in jenem Winter 1912/1913 nahegelegt hatte.

Statt des bisherigen mathematischen Ansatzes schlugen sie damals einen physikalisch motivierten, heuristischen Weg ein. Sie konstruierten ihre Feldgleichungen gerade so, dass diese den richtigen **newtonschen Grenzfall** ergaben und a priori mit der Energie-Impuls-Erhaltung kompatibel waren. Zudem stützten sie sich dabei ganz wesentlich auf die Analogie zwischen Gravitationsfeldern und elektromagnetischen Feldern. Im Juni 1913 veröffentlichten sie ihre Arbeiten dazu unter dem Titel »Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und Theorie der Gravitation«.

Wie die endgültige Theorie beschreibt schon die Entwurftheorie das Gravitationspotenzial durch einen **metrischen Tensor**, der die metrischen Eigenschaften einer im Allgemeinen gekrümmten vierdimensionalen Raumzeit bestimmt. Die Bewegung eines Testteilchen in einer solchen Raumzeit wird durch die Bewegungsgleichung bestimmt, für die es

eine einfache Interpretation gibt: Wenn keine anderen Kräfte wirken, beschreibt sie die Bewegung in der gekrümmten Raumzeit entlang einer so genannten **Geodäte**. Die Krümmung selbst ist durch eine Feldgleichung gegeben, die vorschreibt, wie Masse und Energie das Verhalten des metrischen Tensors festlegen.

Die Feldgleichung, die Einstein in der Entwurftheorie aus dem Gravitationspotenzial abgeleitet hatte, bevorzugte bestimmte Koordinatensysteme und genügte daher nicht dem allgemeinen Relativitätsprinzip, wie er es verstand. Um diesen Bruch mit seiner ursprünglichen Heuristik zu rechtfertigen, ersann Einstein nun eine Reihe von Argumenten, mit denen er belegen wollte, dass es allgemein kovariante Feldgleichungen gar nicht geben konnte, dass also die Entwurfgleichungen unter diesen Umständen in der Tat die bestmögliche Lösung darstellten. Allerdings waren ihre Kovarianteigenschaften unklar und Einstein änderte während der nächsten zwei Jahre immer wieder seine Ansicht darüber, ob sie beispielsweise unter Transformationen zu rotierenden Koordinatensystemen kovariant sind oder nicht.

Das war eine wichtige Frage, da seine Heuristik von Anfang an darauf gegründet war, die in einem rotierenden Bezugssystem auftretenden Beschleunigungen als Wirkungen verallgemeinerter Gravitationskräfte auffassen zu können. Die Transformation zu einem rotierenden Koordinatensystem sollte deshalb zu den erlaubten Transformationen innerhalb der Entwurftheorie gehören. Denn so konnte er, im Geist des Äquivalenzprinzips, die Corioliskraft und die zentrifugalen Kräfte in einem rotierenden Bezugssystem als Gravitationskräfte interpretieren.

Zudem hatte die Entwurftheorie noch ein offensichtliches Manko: Für die einzige Anwendung, anhand der sie sich

zur damaligen Zeit überhaupt überprüfen ließ, nämlich der Periheldrehung des Merkurs, lieferte sie den falschen Wert. Dennoch war Einstein mehr als zwei Jahre lang davon überzeugt, diese Theorie stelle die Lösung seines Problems dar. Denn er sah keine andere Möglichkeit, seine im Äquivalenzprinzip begründete Idee einer relativistischen Gravitationstheorie mit dem bewährten Wissen der klassischen Physik über Gravitationskräfte und Erhaltungssätze zu vereinbaren.

Fortschritte durch das Variationsprinzip

Vor dem Hintergrund dieser Überzeugung, dass die Entwurftheorie die endgültige Lösung des Gravitationsproblems sei, bemühten Einstein und Grossmann sich um ihren systematischen Ausbau. Im Frühjahr 1914 gelang es ihnen, die Entwurfgleichungen aus einem Variationsprinzip für die Feldgrößen abzuleiten. Damit griffen sie auf eine Technik zurück, die im 18. Jahrhundert im Rahmen der analytischen Mechanik entwickelt worden war. Ausgangspunkt ist dabei die **Lagrange-Funktion** für das Gravitationsfeld, mit deren Hilfe man ein so genanntes Wirkungsintegral bildet, das über alle möglichen Werte des Gravitationsfelds variiert wird und für das man einen Extremalwert sucht. Einstein betrachtete diese Technik nur als ein nützliches Hilfsmittel, schrieb ihr jedoch keine tiefere Bedeutung zu. Doch es ermöglichte Einstein und Grossmann nicht nur einen besseren Zugriff auf die Kovarianzeigenschaften dieser Feldgleichungen, sondern auch andere Einsichten in die Struktur ihrer Theorie, vor allem in den Zusammenhang zwischen Energie- und Impulserhaltung einerseits und zulässigen Koordinatentransformationen andererseits. Ihre Ergebnisse darüber veröffentlichten die beiden Freunde im Mai 1914 in einem zweiten

und letzten gemeinsamen Artikel. Damals war Einstein bereits von Zürich nach Berlin umgezogen.

Anhand dieses Variationsansatzes fand Einstein insbesondere heraus, dass dieselben Bedingungen, die die Kovarianz der Lagrange-Funktion und damit ebenso die der aus ihr folgenden Feldgleichungen bestimmen, ebenfalls sicherstellen, dass die Feldgleichungen mit der Energie-Impuls-Erhaltung verträglich sind. Einstein war damit auf einen Spezialfall eines der Theoreme gestoßen, die Emmy Noether 1918 veröffentlichten würde; darin verknüpfte sie Symmetrien und Erhaltungssätze. Einsteins Blick auf dieses Resultat 1914 war jedoch ein anderer: Aus seiner Sicht erfordert die Energie-Impuls-Erhaltung eine Beschränkung der Kovarianz der Feldgleichungen.

Aber der Triumph dieser neuen mathematischen Behandlung der Entwurftheorie schien noch weiterzugehen: Einstein überzeugte sich sogar davon, dass sein Ansatz auf eindeutige Weise genau zur Lagrange-Funktion der Entwurffeldgleichungen führte. »Wir sind nun«, erklärte er, »auf rein formalem Wege, das heißt ohne direkte Heranziehung unserer physikalischen Kenntnisse von der Gravitation, zu ganz bestimmten Feldgleichungen gelangt.« Auch wenn Einstein die mathematische Reinheit dieser neuen Ableitung der Entwurfgleichungen übertrieb, kann man seinen Enthusiasmus doch leicht verstehen. Hier schienen endlich die mathematischen und physikalischen Denkwege zusammenzulaufen, die im Züricher Notizbuch noch divergierten.

In dieser Form präsentierte Einstein seine Theorie in einer Vorlesungsreihe an der Universität Göttingen im Sommer 1915. Doch bald darauf begann sein Vertrauen in diese Feldgleichungen zu zerbröckeln. Im September 1915 prüfte Ein-

In der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin (Gebäude rechts, um 1900) stellte Albert Einstein seine allgemeine Relativitätstheorie im November 1915 vor.



stein erneut, ob die Entwurfgleichungen unter Transformationen zu einem rotierenden Koordinatensystem kovariant sind. Zu seiner großen Überraschung stellte er fest, dass sie es nicht sind und dass seine frühere Überprüfung dieser Tatsache auf einem Rechenfehler beruhte. Darüber hinaus fand er, dass sein »rein formaler Weg« keineswegs zu einer eindeutigen Ableitung der Entwurfgleichungen führte, wie er geglaubt hatte, sondern auch Alternativen zuließ.

Das war zweifellos ein Rückschlag, aber die Ausarbeitung der Entwurftheorie und insbesondere ihre Formulierung mit Hilfe des Lagrange-Formalismus eröffnete auch neue Möglichkeiten. Der für die Entwurftheorie entwickelte Formalismus wirkte jetzt wie ein Baugerüst, mit dessen Hilfe sich das eigentliche Gebäude, die allgemeine Relativitätstheorie, errichten ließ. Einstein konnte nun außerdem andere Lagrange-Funktionen heranziehen und dabei den allgemeinen Formalismus der Entwurftheorie nicht nur intakt lassen, sondern für eine erneute Suche nach Feldgleichungen produktiv nutzen.

Dem Vorbild der Elektrodynamik folgend, war es für Einstein nahe liegend, die Lagrange-Funktion des elektromagnetischen Felds nachzubilden, wie er es schon für die Entwurftheorie getan hatte, aber jetzt die Definition des Gravitationsfelds zu verändern. Die zeitgenössischen Dokumente sprechen dafür, dass Einstein genau dieses tat.

In einem Brief an seinen Münchener Kollegen Arnold Sommerfeld über die endgültigen Feldgleichungen schrieb Einstein zum Beispiel: »Den Schlüssel zu dieser Lösung lieferte mir die Erkenntnis, dass nicht (ein Term mit einem Gradienten der Metrik), sondern die damit verwandten **christoffelschen Symbole** als natürlicher Ausdruck für die »Komponente« des Gravitationsfeldes anzusehen ist.« In der klassischen Feldtheorie hängt die Feldstärke mit der räumlichen Variation des Potentials zusammen, die sich durch den so genannten

Gradienten ausdrücken lässt. Dass dieser Zusammenhang in der neuen Gravitationstheorie durch die viel komplizierteren christoffelschen Symbole auszudrücken ist, erkannte Einstein erst, nachdem die Verwendung des einfachen Gradienten im Rahmen der Entwurftheorie gescheitert war.

Mit dieser neuen Definition des Gravitationsfelds erhält man Feldgleichungen, die im Wesentlichen jenen entsprechen, auf die Einstein und Grossmann bereits 1912/1913 gestoßen waren, sie damals aber fallen gelassen hatten, unter anderem weil sie nicht sahen, wie sie mit der Energieerhaltung verbunden waren. Jetzt lieferte paradoxerweise ausgerechnet der Formalismus der Entwurftheorie genau diesen Zusammenhang frei Haus.

Bis November 1915 hatte sich schließlich Einsteins Verständnis der Beziehung zwischen Kovarianz und Energie-Impuls-Erhaltung geändert, auch wenn er diese neue Beziehung in voller Allgemeinheit erst im November 1916 beweisen würde. Das verblüffende Resultat war: Die Energie-Impuls-Erhaltung beschränkt nicht die Kovarianz der Feldgleichungen, wie er zunächst angenommen hatte; sondern deren Kovarianz garantiert die Energie-Impuls-Erhaltung – ganz im Sinn der späteren **Noether-Theoreme**.

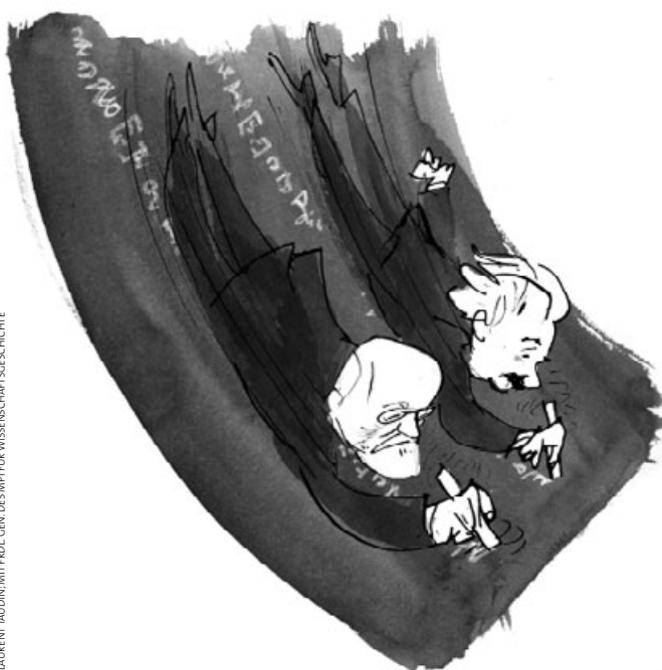
Kopf an Kopf mit Hilbert?

Im Wissen darüber, dass David Hilbert von der Theorie gefesselt war, und in Sorge, der überragende Göttinger Mathematiker könne bald auf dieselben Probleme stoßen, die er selbst gefunden hatte, also etwa die Schwierigkeiten mit der Rotationsmetrik, beeilte sich Einstein, die neuen Feldgleichungen in Druck zu geben. So legte er im November 1915 die neue Form seiner Theorie in vier aufeinander folgenden Sitzungen in der Preussischen Akademie der Wissenschaften in Berlin vor, wobei er zwischen den einzelnen Veröffentlichungen immer wieder Korrekturen zu bestimmten Punkten vornahm.

Am 20. November, fünf Tage bevor Einstein sein endgültiges Resultat bekannt gab, präsentierte Hilbert seine Theorie in Göttingen. Jedoch zeigen Druckfahnen von Hilberts Artikel mit einem Datumsstempel vom 6. Dezember, dass die von Hilbert vorgeschlagene Theorie konzeptionell zu diesem Zeitpunkt der Entwurftheorie noch näherstand als Einsteins neuer Theorie. Als der Artikel schließlich im März 1916 mit Veränderungen, die genau diese Verbindung zur Entwurftheorie betrafen und sie überwand, publiziert wurde, hatte der Mathematiker Einsteins Theorie vollständig akzeptiert und sprach ihrem Schöpfer vorbehaltlos das Verdienst daran zu.

Im Nachhinein gesehen hätte sich Einstein im November 1915 also Zeit lassen können und sich nicht darüber beunruhigen müssen, dass Hilbert ihm zuvorkommen könnte. Die beiden Männer tauschten während dieses hektischen Monats einige Briefe aus, aber keiner von beiden hatte eine klare

Im Herbst 1915 lieferten sich Albert Einstein und David Hilbert einen Wettlauf um neue Feldgleichungen.



LAURENT TAUDIN: MITT FÖRL GEN DES HAPI FÜR WISSENSCHAFTSGESCHICHTE



Die einsteinischen Feldgleichungen haben selbst auf einer Lok auf dem Eisenbahnfriedhof in den bolivianischen Anden bei Uyuni ihren Platz gefunden. Ob sie wohl ein Physikstudent nach seinen Diplomprüfungen dort verewigt hat?

Vorstellung davon, worauf der andere aus war. Dennoch beklagte Einstein sich bei zwei seiner engsten Freunde in der Schweiz, dass Hilbert in seinem Revier wildere. Am 26. November schrieb er an Heinrich Zangger, ein bestimmter Kollege habe seine Theorie nostrifiziert, und vier Tage später an Michele Besso, das Verhalten gewisser Kollegen (die er nicht beim Namen nennt) sei scheußlich gewesen. Zwischen diesen beiden Briefen, am 28. November, schickte Einstein – wahrscheinlich auch, um seine Priorität zu sichern – an seinen Freund Arnold Sommerfeld einen detaillierten Bericht, warum er die alten Feldgleichungen aufgeben und die neuen angenommen hatte. Doch welch böses Blut es auch immer zwischen Einstein und Hilbert in diesem Monat gegeben haben mag, das Kriegsbeil wurde schnell begraben. Am 20. Dezember schickte Einstein einige versöhnliche Zeilen an Hilbert.

Die Feldgleichungen vom 25. November 1915 bildeten den Schlusspunkt der mühevollen Suche nach einer relativistischen Theorie der Schwerkraft, die Einstein acht Jahre zuvor begonnen hatte. Einstein konnte auf ihrer Grundlage die kleine Abweichung der Drehung der Merkurbahn von den klassischen Vorhersagen erklären, konnte aber zunächst keine anderen empirischen Belege für seine Theorie anführen. Es sollte noch einige Jahre dauern, bis die von der Theorie vorhergesagte Lichtablenkung im Gravitationsfeld wirklich bestätigt werden konnte, und noch viel länger, bis sich andere ihrer Vorhersagen nachprüfen ließen. Für die Theorie sprach zunächst einmal vor allem, dass sie als plausible Verallgemeinerung der klassischen Physik und der speziellen Relativitätstheorie gelten konnte, wenn man das Äquivalenzprinzip postulierte.

Ihre überragende Bedeutung für die Kosmologie und die Astrophysik waren noch kaum zu erahnen. Einstein hat die Theorie in der Folge noch selbst vervollständigt und wesentlich zu ihrer Interpretation beigetragen. So formulierte er etwa grundlegende Konzepte für das Verständnis von Gravitationswellen. Doch die eigentlichen revolutionären Ent-

wicklungen, die der allgemeinen Relativitätstheorie ihre heutige fundamentale Bedeutung verliehen, waren das Werk einer späteren Generation und vor allem der Physiker, die Begriffe wie Urknall und Schwarze Löcher ausarbeiteten und auf neue kosmische Phänomene bezogen. In ihrer unvermuteten Anwendbarkeit auf diese Phänomene liegt ein besonderer Zauber der Theorie und auch eine Herausforderung für die Wissenschaftsgeschichte. ~

DIE AUTOREN



Michel Janssen (links) ist Professor im Program for History of Science, Technology, and Medicine an der University of Minnesota in Minneapolis. Sein wichtigstes Forschungsgebiet ist die Entwicklung der Relativitäts- und Quantentheorie in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts. **Jürgen Renn** ist Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. Er beschäftigt sich mit dem Strukturwandel von Wissenssystemen und hat unter anderem über den Umbruch geforscht, durch den die moderne aus der klassischen Physik hervorgegangen ist. Sein besonderes Interesse gilt den langfristigen Prozessen der Wissensentwicklung und ihrer Dynamik.

QUELLE

Stachel, J. et al. (Hg.): The Collected Papers of Albert Einstein. Princeton University Press, 1987

LITERATURTIPPS

Gutfreund, H., Renn, J.: The Road to Relativity. Princeton University Press 2015

Erläutert ausführlich die Entstehung der allgemeinen Relativitätstheorie

Janssen, M., Lehner, C. (Hg.): The Cambridge Companion to Einstein. Cambridge University Press, 2014

Über Einsteins wissenschaftliches Denken und Wirken

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362267

Das Schicksal einer Pfütze

Die ästhetischen Rissmuster in ausgetrocknetem Sediment entstehen beim Zusammenspiel ganz unterschiedlicher physikalischer Vorgänge.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Während eines kräftigen Regenschauers landen an tiefer gelegenen Stellen mit dem fließenden Wasser auch Erde und andere Stoffe, die den Boden bedecken. Eine schlammige Pfütze entsteht. Das strömende Nass schiebt das Baumaterial dafür jedoch nicht nur mechanisch vor sich her. Durch Oberflächenkräfte verleibt sich das Wasser einen Teil der benetzten Körnchen gewissermaßen ein. Die Partikel überziehen sich mit einer Flüssigkeitsschicht, weil sie hydrophil sind – für eine solche Substanz ist es energetisch günstiger, eine Grenzschicht mit Wasser zu bilden als mit Luft. Dahinter steckt ein bedeu-

tendes Prinzip der Natur, wonach Vorgänge von selbst so ablaufen, dass möglichst viel Energie frei wird.

Spielende Kinder nutzen diese Zusammenhänge unwissentlich beim Bau von Sandburgen. Gibt man Wasser zum Zuckersand, so benetzt es so viel Oberfläche wie möglich (siehe »Das Geheimnis der Sandburgen«, SdW 9/2014, S. 44). Das klebt die Körner zusammen – es entsteht eine zusammenhängende Substanz.

Sobald die mit Erde angereicherten Wasserströme eine Mulde in eine Pfütze verwandelt haben und darin halbwegs zur Ruhe gekommen sind, sondern sich die mitgeschleppten Teilchen bereits wieder ab: Wegen der Schwerkraft sinken sie auf den Grund. Die Grenzflächenenergie spielt hier keine Rolle mehr, denn die Sedimentation verläuft komplett unter der Oberfläche. Stattdessen treibt nun die Höhenenergie den Prozess an – die Körner fallen also einfach herab.

Doch während sich Wasser und Erde derart entmischen, ohne die Benetzung aufzugeben, sortieren sich die Partikel obendrein noch: Zuerst sinken die größeren Teilchen nach unten, zuletzt die kleinsten. Bei den winzigsten unter ihnen kann das sehr lange dauern. Woran liegt das? Größere Körner haben eine größere Masse und sind daher schwerer. Zwar wachsen auch die Oberfläche

»Und Risse schlitzten jählings sich und narben am grauen Leib«

August Stramm (1874–1915)

der Teilchen und damit die bremsende Reibungskraft mit dem Durchmesser, aber die Masse und damit die Gewichtskraft nehmen stärker zu als der Wasserwiderstand. Geht man näherungsweise davon aus, dass alle sedimentierenden Teilchen eine ähnliche Dichte haben, so wächst deren Masse proportional zum Volumen (Radius hoch drei), die Reibung aber nur proportional zur Fläche (Radius hoch zwei). Weil die Reibungskraft aber auch noch mit der Geschwindigkeit zunimmt, holt diese die Gewichtskraft schließlich doch noch ein. Ein Gleichgewicht zwischen beiden stellt sich daher bei größeren Teilchen erst bei einem höheren Sinktempo ein.

Groß und Klein finden glanzvoll zusammen

Die Konsequenz dieser Sortierung kann man sehr schön erkennen, wenn die Pfütze schließlich fast ausgetrocknet ist. Die ersten Schichten sind noch ziemlich grobkörnig und die aus feinsten Teilchen bestehende oberste Deckschicht präsentiert sich als eine dunkle glatte Fläche, die wie lackiert schimmert.

Diese letzte Schicht besteht oft aus feinstem Lehm oder Ton. Sie wird dann nahezu wasserdicht, so dass kaum noch Flüssigkeit versickert. Das kann bei nicht allzu starkem Sonnenschein dazu führen, dass die Pfützen längere Zeit gefüllt bleiben und vorübergehend belebte Biotope im Kleinformat bilden.

Trocknet die Lache irgendwann vollkommen aus, verschwinden zuletzt auch noch die Wasseranteile, die in dem kompakten Sediment enthalten sind. Und für dieses hat das dramatische Folgen. Denn mit dem Wasser geht ein Teil seiner Substanz verloren. Nun könnte man sich vorstellen, dass das



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

Austrocknender Boden (oben) zerbricht in einzelne, vieleckige Teile. Geht noch mehr Wasser verloren, spalten sich die Bruchstücke wiederum in noch kleinere Polygone (Mitte). Bei sehr inhomogener Schichtung kann sich die obere Lage ganz von der darunter lösen und einrollen (unten).



Pfützen auf einem Waldweg kurz nach einem Regenschauer.



Der spiegelnde Boden einer weitgehend getrockneten Pfütze.

Wasser zwischen den festen Teilchen nach und nach verdunstet und die Körner einfach dort bleiben, wo sie gerade sind. Doch die Liebe zum Wasser ist stärker – oder physikalisch gesprochen: Um die nassen Teilchen zu trennen, wäre reichlich Energie nötig, nämlich genauso viel, wie bei ihrer Vereinigung frei wurde.

Und weil die benetzten Teilchen nicht loslassen, entsteht mit dem Verlust des Wassers eine zunehmende Zugspannung innerhalb der zuerst trocknenden oberen Schicht. Diese kann aber nicht einfach gleichmäßig vom Rand her schrumpfen, weil sie dort mit dem Untergrund verbunden ist. Die Kräfte in der Kruste werden schließlich so groß, dass diese an einer ihrer schwächsten Stellen nachgibt und zerreißt.

Der Riss läuft zunächst in der zufällig eingeschlagenen Richtung gerad-

linig weiter, bis er an die Schichtgrenze kommt und das System sich entspannt. Aber das ist nur der Anfang, denn die Verdunstung geht unvermindert weiter und damit die Tendenz der trocknenden Substanz, sich weiter zusammenzuziehen. Auch die übrigen Teile reißen, bis sich die Klüfte zu einem netzartigen Geflecht vereinigen. Je einheitlicher die Schichtstruktur des Sediments ist, desto weniger unterscheiden sich die einzelnen Bruchstücke.

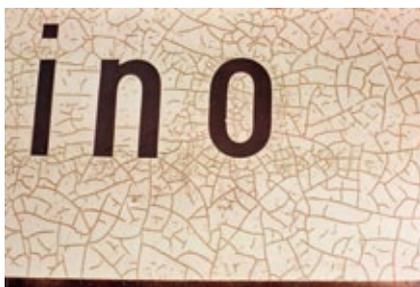
Vielfältige Furchen

Im Idealfall würden sie alle eine sechseckige Form annehmen, weil ein solches Netzwerk eine gegebene Fläche unter minimaler Länge der Grenzen aufteilt. Das heißt, es lässt sich mit kleinstmöglichem Aufwand herstellen und kann so maximal viel Energie an die Umgebung abgeben. Bei realen

Pfützen erzeugen allerdings zufällig verteilte Schwachstellen Rillennuster mit mehr oder weniger starken Abweichungen von dieser Optimalform.

Wegen der winzigen Partikel sind die benetzten Grenzflächen in der obersten Schicht am größten. Sie einmalig durch Spalten zu entspannen, reicht oft nicht aus, um den weiter zunehmenden Zugkräften Rechnung zu tragen. Daher zerfällt diese dünne Decke zuweilen in ein eigenes, feineres Netzwerk, das den bereits vorhandenen polygonalen Inseln aufgeprägt wird. Es kann sogar vorkommen, dass diese Substruktur sich ganz vom übrigen Untergrund ablöst, hochwölbt und einrollt.

Risse treten nicht nur in einstigen Pfützen auf; ausgedörrte Seen oder von Gezeiten überflutetes und dann der Verdunstung preisgegebenes Land haben ein noch reichhaltigeres Repertoire an Mustern. Schließlich zeigen sich vergleichbare Brüche auch in Holz, in alter Farbe oder Resten von Lebensmitteln wie beispielsweise ausgetrocknetem Quark und Kaffeesatz. Solche Rissstrukturen sind oft schön anzusehen. Darin kommt zum Ausdruck, dass sie nicht irgendwie, sondern organisiert entstehen. ∞



Spannungsrisse kommen auch an anderen Stellen vor: alte Farbe auf einem Hinweisschild (links oben), getrockneter Quark (links unten), ein verdorrter Holzbalken (rechts).

DER AUTOR



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.

Dieser Artikel und Links im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362269

Lebende Ersatzteillager für menschliche Organe

Die Transplantationsmedizin erzielt beachtliche Fortschritte. Demnächst lässt sich das für einen Patienten individuell passende Organ sogar im Körper eines Tiers züchten. Doch ist das ethisch vertretbar?

Von Jens Clausen

Eine Organtransplantation kann einen lebensbedrohlich erkrankten Menschen vor dem Tod bewahren und seine Lebensqualität deutlich steigern. Seit sich die vom Fremdorgan ausgelöste Abstoßungsreaktion des Immunsystems besser beherrschen lässt, steigen die Erfolgsaussichten des Eingriffs zunehmend. Die Anzahl der Patienten, denen so geholfen werden kann, wird seit einiger Zeit weniger durch das medizinisch Mögliche begrenzt als vielmehr durch die Knappheit verfügbarer Organe.

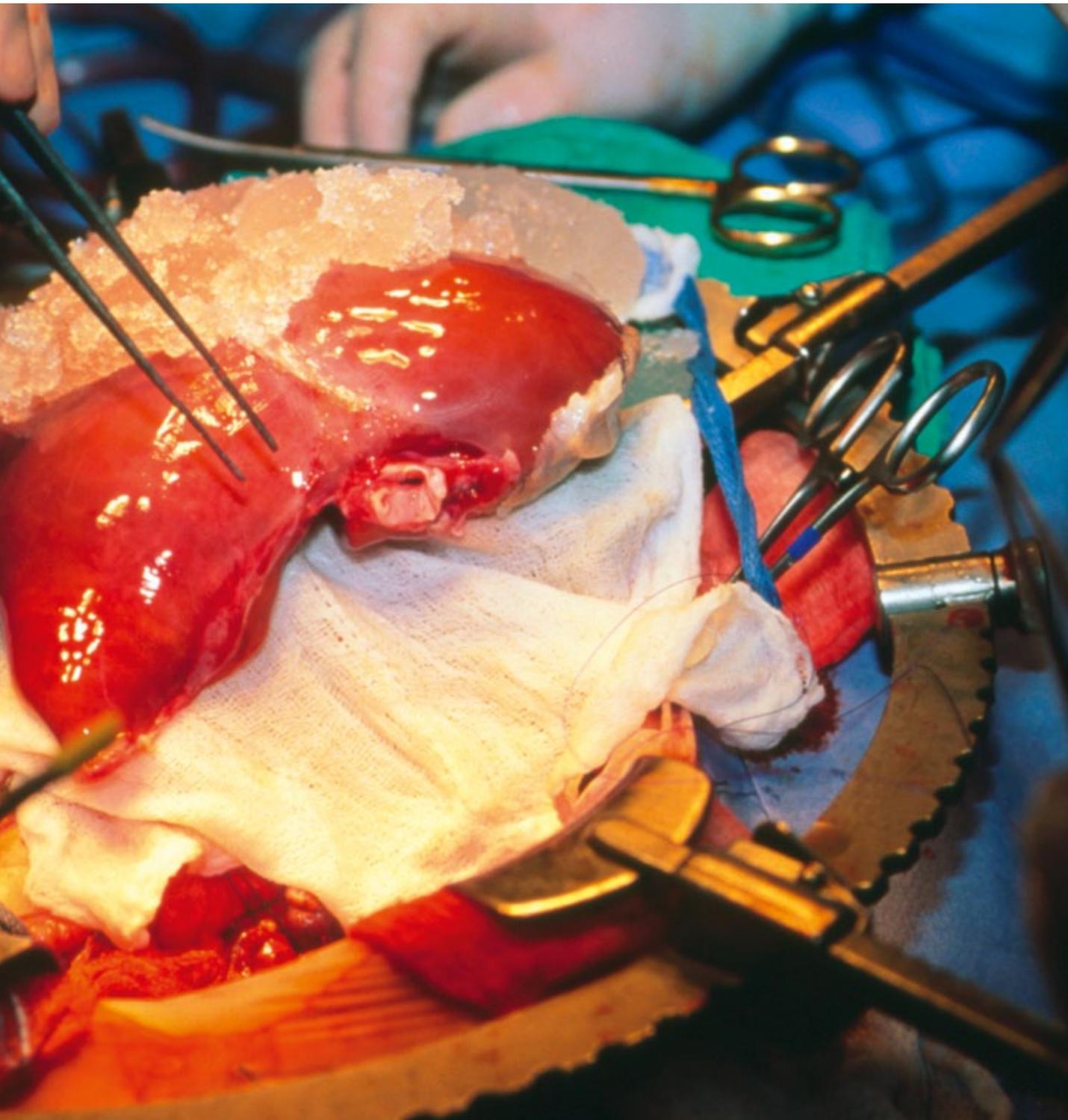
DIE SERIE IM ÜBERBLICK

DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT

- | | | |
|---------------|--|---------------------|
| Teil 1 | ▶ Die RNA-Revolution
<i>Christine Gorman und Dina Fine Maron</i>
Nanofahren gegen Krebs
<i>Dina Fine Maron, Mark Peplow und Larry Greenemeier</i> | Mai 2015 |
| Teil 2 | ▶ Designermoleküle für intelligente Medikamente
<i>Darlene K. Taylor und Uddhav Balami</i> | Juni 2015 |
| Teil 3 | ▶ Schwachstelle der Bakterienfestung
<i>Carl Zimmer</i> | Juli 2015 |
| Teil 4 | ▶ Impfen mit Zucker
<i>Peter Seeberger</i> | August 2015 |
| Teil 5 | ▶ Gezielter Eingriff ins Erbgut
<i>Margaret Knox</i> | September 2015 |
| Teil 6 | ▶ Lebende Ersatzteillager für menschliche Organe
<i>Jens Clausen</i> | Oktober 2015 |



Jede chirurgische Operation – hier eine Lebertransplantation – ist mit Risiken verbunden. Die Züchtung des menschlichen Organs in einem Tier vermeidet das Operationsrisiko für den Spender.



AG FOCUS / SCIENCE PHOTO LIBRARY / J.L. MARTA, PUBLIPHOTO DIFFUSION

Als Ausweg propagieren Experten neben den wiederholten Versuchen, die generell schwankende Bereitschaft der Bevölkerung zur Organspende zu erhöhen, auch biomedizinische Innovationen. Dazu gehören technische Lösungen – ein Pumpsystem an Stelle des Herzens oder Zelltherapien mit embryonalen Stammzellen – sowie die gezielte Fabrikation von Organen im Labor (tissue engineering) und der Einsatz tierischer Organe (Xenotransplantation). Ein weiterer Vorschlag zielt hingegen darauf ab, in genetisch veränderten Tieren menschliche Organe heranwachsen zu lassen, um diese dann für die Transplantation zu verwenden.

Wie kommt die menschliche Niere in das Schwein?

Der japanische Genetiker Hiromitsu Nakauchi von der Universität Tokio, seit Kurzem auch an der Stanford University in Kalifornien tätig, hat mit seinem Team die Züchtung eines fremden Organs in genetisch veränderten Mäusen, Ratten und Schweinen demonstriert. Zwar durften die Forscher in Japan bisher nicht mit menschlichen Zellen experimentieren, doch künftig erlauben dort per Regierungsbeschluss geänderte Regularien auch das Züchten menschlicher Organe in Tieren.

Für dieses anspruchsvolle Ziel müssen drei unterschiedliche biomedizinische Forschungsrichtungen miteinander kombiniert werden:

- die gentechnische Veränderung von Säugetierzellen,
- das Klonen mittels Zellkerntransfer und
- Versuche mit humanen embryonalen Stammzellen.

Wenn beispielsweise eine menschliche Niere in einem Schwein wachsen soll, müssen nach Nakauchis Ansatz in einer komplizierten Prozedur sechs perfekt miteinander abgestimmte Schritte aufeinanderfolgen.

1. Herstellung humaner Stammzellen: Zunächst entnimmt man dem Menschen, der später das Organ erhalten soll, Zellen und verwandelt diese in Stammzellen, aus denen sich jede Körperzellart entwickeln kann. Diese »induzierten pluripotenten Stammzellen« (iPS-Zellen) sollen auf ein Schwein übertragen werden, das keine Nieren zu bilden vermag. Da ein solches Tier nicht einfach im Stall herumläuft – schon weil es ohne Nieren kaum lebensfähig wäre –, sind erst einmal weitere aufwändige biomedizinische Verfahren nötig.

2. In-vitro-Befruchtung mit genetischer Modifikation: Man lässt im Labor Eizellen von Schweinen reifen, befruchtet sie mittels intrazytoplasmatischer Spermien-Injektion (ICSI) und verändert sie gleichzeitig genetisch. Dazu spritzt man in das Zytoplasma der Eizelle gemeinsam mit dem Spermium ein transgenes, das heißt genetisch verändertes Stück DNA. In diesem Fall wird eine genetische Variante gewählt, die das Schweineembryo daran hindert, Nieren zu entwickeln.

3. Zellentnahme von ausgewählten Föten: Die transgenen Embryonen werden auf Leihmuttertiere übertragen. In einigen der sich entwickelnden Schweineföten führt die genetische Veränderung tatsächlich zu dem angestrebten Ergebnis – sie bilden keine Nieren. Diesen Föten werden etwa am 80. Tag Zellen entnommen.

AUF EINEN BLICK

ETHISCHE BEDENKEN RECHTZEITIG KLÄREN

1 Viele Schwerkranken müssen unnötig **leiden** oder vorzeitig **sterben**, weil das für eine **Transplantation** dringend benötigte **Organ** nicht zur Verfügung steht.

2 Einen Ausweg bietet das so genannte **Organ-Farming**: Das menschliche Ersatzorgan wird dabei in einem **genetisch manipulierten Tier** gezüchtet.

3 Das bisher nur experimentell erprobte Verfahren wirft **neuartige ethische Fragen** auf, die vor seiner Einführung geklärt werden sollten.

4. Klonen: Aus diesen Zellen entstehen mittels Zellkerntransfer genetisch identische Embryonen, also Klone, die ebenfalls keine Nieren ausbilden können.

5. Ergänzung geklonter Embryonen um humane iPS: Etwa am 5. Tag ihrer Entwicklung – im so genannten Blastozystenstadium – spritzt man in die zur Nierenbildung unfähigen Klonembryonen jene menschlichen Stammzellen, die zuvor im ersten Schritt aus den Patientenzellen gewonnen wurden. Auf diese Weise entstehen Hybridembryonen aus Zellen von Schwein und Mensch.

6. Austragen des Hybridembryos: Da der Schweineembryo nicht fähig ist, Nieren zu bilden, die menschlichen Stammzellen dagegen schon, wächst aus dieser Kombination von Schweineblastozyste und menschlichen Stammzellen ein Schwein mit einer menschlichen Niere heran – so jedenfalls die Idee der Wissenschaftler um Hiromitsu Nakauchi.

Bisher ist es allerdings noch nicht so weit. Im Tierexperiment ist es der japanischen Arbeitsgruppe zwar gelungen, Bauchspeicheldrüsen und Nieren aus Mäusestammzellen in transgenen Mäusen wachsen zu lassen, die das entsprechende Organ nicht selbst bilden konnten; auch bei Schweinen ist dieses Experiment bereits geglückt. Doch vor dem klinischen Einsatz für Transplantationen bei Menschen müssen noch viele Fragen geklärt werden. Dazu gehört nicht zuletzt das grundsätzliche Problem, ob sich die tierexperimentellen Ergebnisse auch mit zwei verschiedenen Spezies realisieren lassen, beispielsweise eben mit Mensch und Schwein. Das ist keineswegs selbstverständlich, denn bisher beschränken sich alle Tierexperimente – bis auf wenige Zellübertragungen zwischen Ratte und Maus – auf eine einzige Tierart.

Dennoch sollte die ethische Dimension dieser Forschung rechtzeitig beleuchtet werden und nicht erst, nachdem sich das Verfahren möglicherweise bereits etabliert hat. Denn die naturwissenschaftlich-technischen Fragen nach Realisierbarkeit und Zuverlässigkeit jeder neuen medizinischen Technologie hängen eng mit einem wichtigen ethischen Aspekt zusammen: der Sicherheit für die Patienten.

Neben dem nicht gering zu schätzenden Erkenntnisgewinn sprechen zunächst einmal gewichtige ethische Argumente dafür, neue Möglichkeiten für eine Therapie zu entwickeln, die das Leben sonst unheilbar Erkrankter rettet

oder die Lebensqualität teils schwer leidender Patienten verbessert. Es wäre gewiss wünschenswert, auch dann einen Transplantationserfolg zu erzielen, wenn kein Organ von hirntoten Spendern zur Verfügung steht. Zudem würde die Notwendigkeit, gesunde Menschen dem Operationsrisiko einer Lebendorganspende auszusetzen, deutlich verringert. Doch andererseits darf ein so hochinnovatives Verfahren die Patienten nicht unverhältnismäßigen Gefahren aussetzen – im hier besprochenen Fall insbesondere Infektions- und Abstoßungsrisiken.

Abwägung von Nutzen und Risiken

Wie jeder operative Eingriff ist eine Transplantation immer mit einem gewissen Infektionsrisiko verbunden. Bei der Übertragung von Zellen, Geweben oder Organen über Artgrenzen hinweg diskutieren die Experten zudem seit den Debatten um die Xenotransplantation über die spezifische Gefahr von Xenozoonosen (vom Tiertransplantat übertragene Krankheiten). Zwar besteht das Organ im vorliegenden Fall aus menschlichen Zellen, aber es ist im Tier gewachsen. Es könnte dort somit Erreger aufgenommen haben, die möglicherweise erst bei Übertragung auf den Menschen gänzlich unbekannte Krankheiten auslösen.

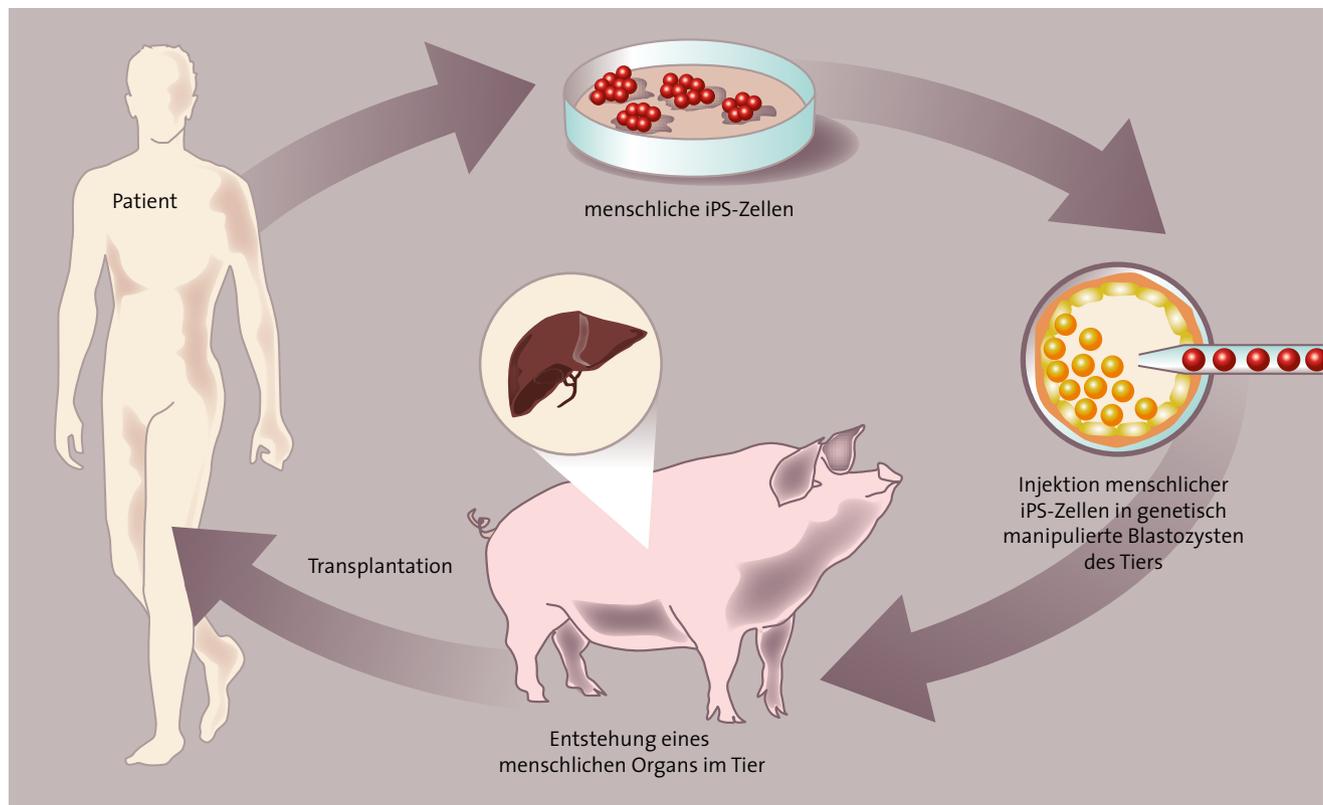
Das sind zwar weit gehend hypothetische Bedenken, die aber auf Grund der begrenzten Erfahrung mit Organübertragungen von einer Spezies zur anderen ernst zu nehmen sind.

Man sollte zunächst also mit wenigen, streng kontrollierten Einzelstudien beginnen. Erst wenn Xenozoonosen ausbleiben oder sich zumindest als beherrschbares Risiko herausstellen, könnte man das Verfahren Schritt für Schritt einem breiteren Kreis von Patienten zugänglich machen.

Das Risiko, dass das Immunsystem des Patienten das Spenderorgan abstößt, wird immer besser beherrscht – sowohl durch die immunologisch passende Zuordnung von Spender und Empfänger als auch durch Fortschritte bei der medikamentösen Immunsuppression. Gleichwohl lässt sich eine Organabstoßung schon bei der allogenen Transplantation von einem Menschen zu einem anderen nicht ganz ausschließen. Wird Gewebe einer anderen Spezies verwendet, ist die Kontrolle der Immunreaktion ungleich schwieriger.

Die genetische Veränderung im Lauf des geschilderten Verfahrens soll sicherstellen, dass das Organ aus Zellen besteht, die denen des Patienten immunologisch gleichen: Da das Schwein das spezifische Gewebe des Organs nicht bilden kann, treten die menschlichen Zellen an seine Stelle. Ob dies allerdings auch für die versorgenden Blutgefäße und Nervenzellen gilt, ist gegenwärtig noch fraglich, wenn nicht gar unwahrscheinlich. Falls aber beispielsweise die spezifischen Zellen der Bauchspeicheldrüse zwar vom Menschen stammen, Blutgefäße und Nervenzellen hingegen teilweise vom Schwein, kann dies verheerende Abstoßungsreaktionen auslösen. Vor den ersten Versuchen mit menschlichen

Damit in einem Tier ein menschliches Organ heranwächst, werden induzierte pluripotente Stammzellen (iPS-Zellen) hergestellt und einem genetisch manipulierten Tierembryo (Blastozyste) injiziert.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK



Unser Online-Dossier zum Thema »Künstliche Organe und Prothesen« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/kuenstliche-organe-und-prothesen

Patienten muss daher garantiert sein, dass sich tatsächlich alle Zellen des zu transplantierenden Organs von den Stammzellen des Patienten ableiten.

Tierethische Einwände

Während sich die Sicherheitsbedenken mit der Weiterentwicklung des Verfahrens möglicherweise auf ein akzeptables Maß reduzieren lassen, tauchen unter tierethischen Gesichtspunkten grundsätzlichere Bedenken gegen dieses »Organ-Farming« auf.

Das Tier wird dabei als bloßes Objekt behandelt – quasi als Brutkasten zur Herstellung des gewünschten Ersatzteils. Es soll nur für einen bestimmten Menschen aufwachsen und schließlich zum Zweck der Organgewinnung getötet werden. Das entspricht einer ethischen Abwägung, die Tieren ein geringeres Gewicht zubilligt als Menschen. Die Möglichkeit, einem Menschen das Leben zu retten, wiegt demnach schwerer als das Leben des Tiers. Diese Einstellung spiegelt sich in unserer gegenwärtigen Praxis in der Massentierhaltung, bei Tierexperimenten und in zoologischen Gärten wider. Selbst überzeugte Vegetarier können dem Organ-Farming zustimmen, wenn sie das Ziel, einem Menschen das Leben zu retten, höher gewichten als das Töten von Tieren zu Ernährungszwecken. Wer Tieren allerdings weiter gehende Rechte zugesteht und das Leben eines Tiers dem eines Menschen gleichstellt, wird das Verfahren ablehnen.

Zudem überschreitet das Organ-Farming die Grenzen zwischen zwei Spezies; es erzeugt so genannte Chimären, in unserem Fall Mischwesen zwischen Tier und Mensch. Eine die Artgrenzen überschreitende Forschung wirft die ethische Frage auf, wie mit den dabei entstehenden Chimären umzugehen ist. Müssen wir jeden Organismus, der menschliche Zellen enthält, wie einen Menschen behandeln – oder bleibt das Schwein beim Organ-Farming einfach ein Tier, das bloß menschliche Zellen in sich trägt? Brauchen wir eine spezifische Chimärenethik?

Besonders problematisch wird die Prozedur, wenn die in einem Tier wachsenden menschlichen Zellen die Keimbahn besiedeln oder sich an der Hirnentwicklung beteiligen. Die Keimbahn sollte prinzipiell vom Chimärismus ausgeschlossen werden, um eine Weitervererbung des Mischstatus in die nächste Generation auszuschließen. Eine chimärische Hirnentwicklung wiederum tangiert ganz unmittelbar unser

moralisches Selbstverständnis. Denn das Gehirn gilt als menschliches Zentralorgan, als biologische Grundlage für zentrale Aspekte des Menschseins wie Bewusstsein, Selbstbewusstsein und Moralfähigkeit. Selbst wenn es entwicklungsbiologisch fraglich sein mag, ob in einem Schwein unter Beteiligung menschlicher Zellen ein Gehirn mit menschlichen Funktionen heranwachsen kann, so verschärft schon allein die Möglichkeit einer solchen Entwicklung die Frage: Was ist der moralische Status dieser Mischwesen?

Im Extremfall könnten die eingepflanzten menschlichen Zellen nicht nur das gewünschte Organ bilden, sondern alle Tierzellen ersetzen – und im Schwein wüchse ein kompletter menschlicher Embryo heran. Das wäre etwa möglich, wenn die genetisch modifizierten Tierzellen im Lauf des Verfahrens weiter mutieren und infolgedessen früh absterben.

Alles in allem bleiben beim Organ-Farming noch technische Fragen offen, von deren Beantwortung die ethische Einschätzung abhängt: Wie groß ist das Risiko von Xenozoonosen und verstärkten Abstoßungsreaktionen? Wie gut lassen sich die Keimbahnbesiedlung sowie die Teilnahme menschlicher Zellen an der Hirnentwicklung vermeiden? Das sind freilich keine Gründe für eine grundsätzliche Ablehnung. Die ethischen Bedenken sollten nicht den Blick für das große Glück verstellen, das jede erfolgreiche Organtransplantation für den Patienten bedeutet. Aber es ist wichtig, sie im Hinterkopf zu behalten und immer wieder entsprechende Fragen zu stellen. ∞

DER AUTOR



Jens Clausen ist Biologe und Philosoph. Als außerplanmäßiger Professor am Institut für Ethik und Geschichte der Medizin der Eberhard Karls Universität Tübingen leitet er dort die Arbeitsgruppe Neuroethik und führt die Geschäfte des Klinischen Ethik-Komitees.

QUELLEN

Clausen, J.: Stem Cells, Nuclear Transfer and Respect for Embryos. In: Human Reproduction and Genetic Ethics 16, S. 48–59, 2010
Matsunari, H. et al.: Blastocyst Complementation Generates Exogenic Pancreas in Vivo in Apancreatic Cloned Pigs. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 110, S. 4557–4562, 2013

LITERATURTIPPS

Clausen, J.: Ethische Innovationen verantworten: Das Beispiel Klonen. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2006
Bewertung unterschiedlicher Techniken des Klonens beim Menschen
Clausen, J.: Artifizielles Werden: Eine Einschätzung aktueller In-vitro-Verfahren an Hand von »Natürlichkeit« und »Künstlichkeit«. In: Maio, G. et al. (Hg.): Mensch ohne Maß? Reichweite und Grenzen anthropologischer Argumente in der biomedizinischen Ethik. Karl Alber, Freiburg 2008, S. 303–327
Bewertung künstlicher Eingriffe in die Entstehung von Lebewesen

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362270



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.de

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Der Kampf um das unendlich Kleine

Ein Vorläufer der heutigen Integralrechnung war im 17. Jahrhundert Gegenstand heftiger Auseinandersetzungen – und zwar vorrangig nicht aus wissenschaftlichen, sondern aus religiösen Gründen.

Von Amir R. Alexander



Wie berechnet man den Flächeninhalt eines Kreises, einer Ellipse oder allgemein einer krummlinig begrenzten Figur? Oder in drei Dimensionen: Wie bestimmt man das Volumen einer Kugel, eines Kegels oder eines Zylinders? Die klassische Geometrie der griechischen Antike, niedergelegt in den berühmten »Elementen« des Euklid, stellt nicht unmittelbar Antworten auf diese Fragen bereit. In einem Geniestreich gelang es Archimedes von Syrakus (um 287–212 v. Chr.), mit den eigentlich unzulänglichen Mitteln der euklidischen Geometrie gewisse spezielle Flächeninhalte und Volumina zu bestimmen. Insbesondere fand er die Fläche des Kreises und damit eine bis dahin unerreichte Näherung an die Zahl π .

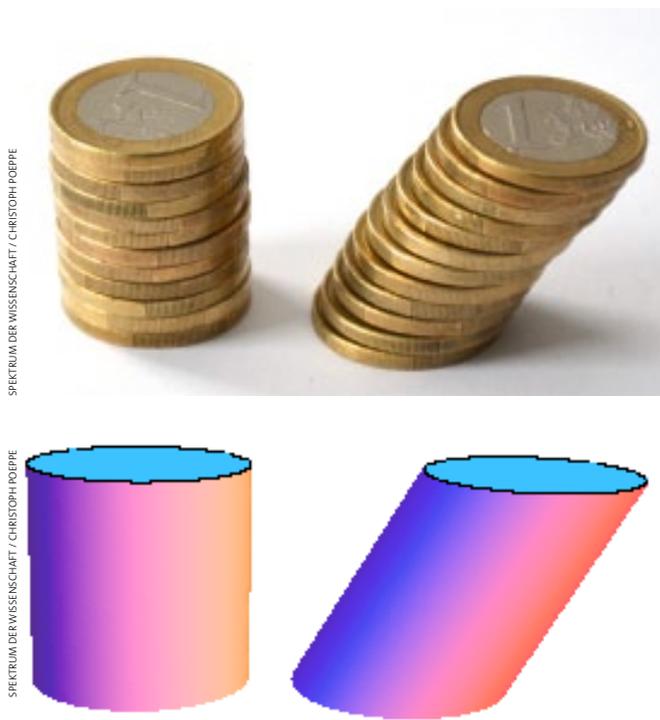
Mehr als anderthalb Jahrtausende später unternahm der italienische Mönch, Mathematiker und Astronom Bonaventura Francesco Cavalieri (1598–1647) Schritte über Archimedes hinaus. Seine »Methode der Indivisiblen« zeigt starke Ähnlichkeiten mit heute üblichen Näherungsverfahren. Um zum Beispiel das Volumen eines krummflächig begrenzten Körpers zu finden, kann man ihn in dünne Scheiben schneiden. Das Volumen jeder Scheibe wäre nach Archimedes gleich deren Dicke mal dem Flächeninhalt ihrer Oberfläche – wenn die niedrigen Seitenwände der Scheibe exakt senkrecht stünden, so dass man die Scheibe als verallgemeinerten Zylinder auffassen könnte. Aber dieser Fehler ist klein und geht vor allem gegen null, wenn man die Scheibchen unendlich dünn macht.

Ein solches unendlich dünne Scheibchen nennt Cavalieri eine »Indivisible« (»Unenteilbare«), weil man etwas unendlich

Kleines nicht weiter zerkleinern kann. Entsprechend zerlegt er eine krumme Fläche in indivisible Geradenstücke und eine Strecke in indivisible Punkte, »so wie ein Buch aus einzelnen Blättern und ein Tuch aus einzelnen Fäden besteht«.

Das Volumen des krummen Körpers wäre demnach zu berechnen als eine Summe aus unendlich vielen Volumina unendlich dünner Scheibchen. Solche Summen sind jedoch nicht einmal widerspruchsfrei definierbar, geschweige denn berechenbar. Das wusste auch Cavalieri. Aber er fand einen Ausweg, um sein Konzept doch noch nutzbar zu machen: Wenn zwei Körper aus denselben Scheibchen zusammengesetzt sind – Beispiel: ein gerader und ein schräger Zylinder – (Bilder unten) –, dann müssen ihre Volumina gleich sein. Insbesondere kann man von dem bekannten Volumen des einen Körpers auf das unbekannte des anderen schließen.

Cavalieri fand für diese Ideen etliche Anhänger, darunter vor allem seinen Lehrer und väterlichen Freund Galileo Galilei (1564–1642), der bei mathematischen Studien selbst zu dem Schluss gekommen war, eine gerade Linie enthalte nicht nur unendlich viele Punkte, sondern bestehe auch aus nichts anderem. Auf der anderen Seite sah er sich heftigen Angriffen von Seiten der etablierten Mathematik ausgesetzt. Deren prominente Vertreter waren bemerkenswerterweise sämtlich Jesuiten: Paul Guldin (1577–1643), Mario Bettini (1584–1657) und André Tacquet (1612–1660). Sie argumentierten – zu Recht –, dass Cavalieri den Widersprüchen in seiner Theorie nicht entgehen konnte. Die Redaktion



Für das Volumen kommt es nicht darauf an, ob man die einzelnen Scheiben eines Stapels gegeneinander verschiebt. Wenn aber die Scheiben unendlich dünn und unendlich zahlreich werden ...?

Guldin, der älteste der drei, warf als Erster den Fehdehandschuh. Geboren als Habakuk Guldin in St. Gallen (Schweiz) als Sohn protestantischer Eltern jüdischer Abstammung, war er vermutlich der erste in einer langen und illustren Reihe von jüdischen (oder konvertierten jüdischen) Mathematikern, die bis in die Gegenwart reicht. Guldin sollte ursprünglich nicht Wissenschaftler werden, sondern erlernte das Goldschmiedehandwerk. Noch als Jugendlicher begann er, am protestantischen Glauben seiner Eltern zu zweifeln. Im Alter von 20 Jahren trat er zum Katholizismus über und schloss sich den Jesuiten an. Dabei änderte er seinen Vornamen von Habakuk, einem Propheten des Alten Testaments, zu Paul, dem bekanntesten jüdischen Konvertiten, der den Heiden das Christentum predigte.

Nach Abstammung, Ausbildung und Religion war Guldin ein buntes Gemisch aus den widersprüchlichen Strömungen der frühen Neuzeit und damit untypisch für einen Jesuiten. Gleichwohl hieß der Orden ihn ohne Einschränkung willkommen. In der Tat war die Societas Jesu in ihrer Frühzeit bemerkenswert offen für Konvertiten aller Art, was ihr hoch anzurechnen ist, vor allem weil sie dem Druck von Seiten des spanischen Königshauses ausgesetzt war, das höchsten Wert auf die »limpieza de sangre« (Reinheit des Blutes) legte.

Obendrein war die Gesellschaft Jesu eine Meritokratie, die auch Männern einfacher Herkunft wie Guldin einen Weg

nach oben bot. Dank seiner mathematischen Begabung stieg er in den Rängen des Ordens auf und wurde schließlich nach Rom gesandt, wo er am Collegio Romano bei Christophorus Clavius (1538–1612) studierte: dem Mann, der im Auftrag des Papstes die gregorianische Kalenderreform durchführte.

Guldin hatte noch keine drei Jahre bei Clavius gelernt, als der Meister 1612 verstarb. Fünf Jahre später wurde er ins habsburgische Österreich geschickt, um dort Mathematik zu unterrichten; den Rest seines Lebens verbrachte er am Jesuitenkolleg in Graz und an der Universität Wien.

Die Jahre bei Clavius haben Guldins mathematische Ansichten für den Rest seines Lebens geprägt: Er hing der alten jesuitischen Überzeugung an, dass die Mathematik auf halbem Weg zwischen der Physik und der Metaphysik angesiedelt sei; er glaubte an die Überlegenheit der Geometrie gegenüber allen anderen Disziplinen der Mathematik; und er beharrte auf den klassischen euklidischen Standards deduktiver Beweise. Alle diese Positionen machten ihn zu einem idealen Opponenten der Indivisiblenmethode.

Attacke der Jesuiten

Guldins Kritik findet sich im vierten Buch seines Werks »De centro gravitatis« (»Über den Schwerpunkt«, auch »Centrobaryca« genannt) von 1641. Zunächst behauptet Guldin, Cavalieris Methode stamme gar nicht von ihm, sondern von zwei anderen Mathematikern, und zwar einerseits Johannes Kepler (1571–1630), mit dem Guldin einen intensiven Briefwechsel pflegte, andererseits von dem deutschen Mathematiker Bartholomäus Sover (1576–1629). Dieser Plagiatsvorwurf war so gut wie sicher unberechtigt; und wenn Guldin mit seiner Zuschreibung Kepler und Sover ein Kompliment machen wollte, wäre es vergiftet, denn alsbald folgt eine scharfe und radikale Kritik der Indivisiblenmethode.

Cavalieris Beweise, so argumentiert Guldin, seien nicht konstruktiv in dem Sinne, den klassisch ausgebildete Mathematiker akzeptierten. Dies trifft zweifellos zu: Nach der euklidischen Methode konstruiert man geometrische Figuren Schritt für Schritt aus Geraden und Kreisen (»nur mit Zirkel und Lineal«), wobei man vom Einfachen zum Komplexen fortschreitet. Jeder Schritt eines Beweises erfordert eine der-



FOTOLIA / GIUSEPPE FORZANI

Erst zwei Jahrhunderte nach seinem Tod wurde Bonaventura Cavalieri durch eine Statue gewürdigt. Dieses Werk von Giovanni Antonio Labus steht im Palazzo Brera in Mailand.

artige Konstruktion, gefolgt von einer logischen Herleitung der Eigenschaften der entstandenen Figur. Cavalieris Verfahren dagegen ist eher Dekonstruktion als Konstruktion zu nennen: Er beginnt mit einer fertigen geometrischen Figur wie einer Parabel oder einer Spirale und zerlegt sie dann in unendlich viele Teile. Es geht ihm nicht darum, eine geometrische Figur zu erzeugen, sondern die innere Struktur einer solchen zu entschlüsseln. Ein solches Verfahren ist nicht konform mit den strengen Standards der euklidischen Beweisführung, wie sich der klassisch geschulte Guldin zu betonen beliebt. Schon aus diesem Grund sei es zu verwerfen.

Als Nächstes geht Guldin auf die Grundidee von Cavalieris Methode ein: Eine ebene Fläche bestehe aus unendlich vielen geraden Linien oder ein Körper aus unendlich vielen ebenen Flächen. Die ganze Vorstellung sei Unsinn, so Guldin: »Meiner Ansicht nach wird ihm kein Geometer zugestehen, dass eine Fläche gleich ›allen geraden Linien dieser Figur« [gemeint: allen geraden Linien ein und derselben Richtung, also einer Schar von Parallelen] sei und dass man dies in geometrischer Sprache so sagen könne. Niemals kann man mehrere oder auch alle Geraden eine Fläche nennen, denn eine Vielheit von Geraden, so groß sie sein mag, kann noch nicht einmal die kleinste Fläche bilden.« Anders gesagt: Da Geraden keine Breite haben, können auch beliebig viele von ihnen nebeneinandergelegt nicht die kleinste Fläche bedecken. Also sei Cavalieris Unterfangen, den Inhalt einer Fläche aus den Längen aller ihrer Geraden zu berechnen, absurd.

Damit kommt Guldin zu seinem letzten Punkt: Cavalieris Methode beruht darauf, zwischen »allen geraden Linien« ei-

AUF EINEN BLICK

RELIGIONSSTREIT ÜBER MATHEMATIK

1 Im 17. Jahrhundert arbeitete **Bonaventura Cavalieri** mit der Vorstellung, ein dreidimensionales Gebilde sei aus unendlich vielen unendlich dünnen Scheiben (»**Indivisiblen**«) zusammengesetzt.

2 Daraus konnte er in manchen Fällen das Volumen des Körpers bestimmen. Damit ist die Indivisiblenmethode ein Vorläufer der **Integralrechnung**.

3 Cavalieris Indivisible sind nicht **widerspruchsfrei definierbar**. Aus diesem Grund lehnten die **Jesuiten** sie nicht nur ab, sondern bekämpften ihre Vertreter so intensiv, dass die Forschungsrichtung in Italien erlosch.



Nicht zufällig ist Paul Guldin mit einem Globus im Hintergrund abgebildet. In seiner »Centrobaryca« leitet er auch eine Formel für das Volumen eines Rotationskörpers her.

ner Figur und »allen geraden Linien« einer anderen ein Verhältnis herzustellen. Aber beide Mengen sind unendlich, wie Guldin betont, und das Verhältnis zweier Unendlichkeiten zueinander habe keinen Sinn. Wie oft man auch eine unendliche Anzahl von Indivisiblen vervielfältigt, das Ergebnis werde niemals eine andere unendliche Menge von Indivisiblen übertreffen. Damit seien diese Größen nicht vergleichbar in dem Sinn, wie zwei gewöhnliche Zahlen vergleichbar sind: Zu zwei (positiven reellen) Zahlen a und b mit $a < b$ gibt es stets ein Vielfaches von a , das größer als b ist. Diese Eigenschaft wurde von Archimedes formuliert und heißt heute »archimedisches Axiom«.

In ihrer Gesamtheit verkörpert Guldins Kritik die zentralen Prinzipien der Mathematik, so wie die Jesuiten sie in der Nachfolge von Clavius verstanden. Insbesondere die Geometrie müsse systematisch und deduktiv vom Einfachen zu immer komplexeren Sätzen fortschreiten. Ihr Ziel ist die Beschreibung universell gültiger Beziehungen unter Figuren. Diese Idealvorstellung wird realisiert durch konstruktive Beweise, die in logischen Schritten aus Geraden und Kreisen komplexe Konstruktionen aufbauen. Langsam, aber sicher errichten sie eine strenge und hierarchische mathematische Ordnung, wodurch die euklidische Geometrie den jesuitischen Idealen Gewissheit, Hierarchie und Ordnung näher kommt als jede andere Wissenschaft. Mit seinem Beharren auf konstruktiven Beweisen lebte Guldin also nicht etwa seine persönliche Pedanterie oder Engstirnigkeit aus, wie Cavalieri und seine Freunde dachten, sondern verfocht die Grundüberzeugungen seines Ordens.

Insbesondere muss nach dieser Überzeugung die Mathematik nicht nur hierarchisch und konstruktiv sein, sondern auch vollkommen rational und frei von Widersprüchen. Wie Guldin zeigte, sind Cavalieris Indivisible in ihrem Kern widersprüchlich, da die Vorstellung, das Kontinuum sei aus Indivisiblen zusammengesetzt, der Überprüfung durch die Vernunft nicht standhält. »Dinge, die nicht existieren und auch nicht existieren können, können nicht verglichen werden«, lautete Guldins unanfechtbare Schlussfolgerung. Wer es dennoch tue, gerate in Paradoxien und Widersprüche und letztlich zu falschen Aussagen. Eine solche Mathematik wäre für die Jesuiten schlimmer als gar keine Mathematik. Würde dieses fehlerhafte System akzeptiert, so könnte sie nicht länger Basis einer ewigen vernunftgemäßen Ordnung sein. Der Traum der Jesuiten von einer universellen hierarchischen Ordnung, die so unanfechtbar sei wie die Geometrie, wäre geplatzt.

Guldin erklärt in seiner Schrift nicht die tieferen philosophischen Gründe für seine Ablehnung der Indivisiblen; das tun auch Bettini und Tacquet nicht. An einer Stelle allerdings lässt Guldin in einer sehr kryptischen Formulierung durchblicken, dass hier wichtigere Ideen als die rein mathematischen im Spiel sind: »Ich glaube nicht, dass diese Methode [der Indivisiblen] aus Gründen verworfen werden sollte, die durch niemals unangebrachtes Schweigen unterdrückt werden müssen.« Er erklärt allerdings nicht, was diese »Gründe, die unterdrückt werden müssen«, sein sollen. Es leuchtet jedoch ein, warum die drei Jesuiten darauf bedacht waren, nichtmathematische Gründe für ihre Haltung zu verschweigen. Ihre Autorität und Glaubwürdigkeit wäre in Gefahr geraten, hätten sie zugegeben, dass ihre Haltung nicht nur durch mathematische Argumente, sondern vor allem durch theologische und philosophische Überlegungen motiviert war.

Cavalieri schlägt zurück

Natürlich wussten beide Parteien im Streit über die Indivisiblen, was wirklich auf dem Spiel stand. Wenn Stefano degli Angeli (1623–1697), Mathematikprofessor in Padua und einer der letzten aufrechten Mitstreiter Cavalieris, scherzhaft schrieb, er wisse nicht, »welcher Geist« die jesuitischen Mathematiker bewege, und wenn Guldin von den »Gründen, die unterdrückt werden müssen«, raunte, bezogen sich beide auf die ideologische Feindschaft der Jesuiten gegenüber den Indivisiblen. Dennoch gingen diese grundsätzlichen Überlegungen mit wenigen Ausnahmen niemals in die öffentliche mathematische Debatte ein. Offiziell handelte es sich um eine Auseinandersetzung unter Fachleuten darüber, welche Verfahren in der Mathematik zulässig seien und welche nicht.

Als Cavalieri 1642 erstmals von Guldins Kritik erfuhr, begann er umgehend, eine detaillierte Widerlegung auszuarbeiten. Ursprünglich wollte er nach dem Vorbild seines Lehrers Galilei in Form eines Dialogs unter Freunden antworten. Als er aber einen kurzen Entwurf seinem Freund und Fachkollegen Giannantonio Rocca (1607–1656) zeigte, riet dieser

ab. Um Galileis Schicksal zu entgehen, sei es sicherer, von der provozierenden Dialogform die Finger zu lassen, da Ironie und auftrumpfendes Verhalten mächtige Gegner auf den Plan rufen könnten. Cavalieri möge lieber eine sachliche Antwort auf Guldins Einwürfe verfassen, sich dabei auf rein mathematische Themen beschränken und auf den ätzenden Spott Galileis verzichten.

Dabei verschwieg Rocca taktvollerweise den eigentlichen Grund: Cavalieri verfügte nicht im Entferntesten über die literarischen Fähigkeiten Galileis; er war nicht einmal in der Lage, komplexe Sachverhalte in witziger und unterhaltsamer Weise darzustellen. Wahrscheinlich tat Cavalieri gut daran, den Rat seines Freundes zu befolgen; so ist der Nachwelt ein schwerfälliger »Dialog« in fast unverständlicher Prosa erspart geblieben. Cavalieris Antwort an Guldin ist in der dritten seiner sechs »Excercitationes« (Übungen) enthalten; sie trägt den schlichten Titel »In Guldinum« (gegen Guldin).

Cavalieri erscheint in seiner Antwort wenig beeindruckt von Guldins Kritik; über den Vorwurf des Plagiats geht er rasch hinweg, um zum mathematischen Kern zu kommen. Er habe nie behauptet, das Kontinuum sei aus einer unendlichen Anzahl von indivisiblen Teilen zusammengesetzt; überdies hänge seine Methode nicht von dieser Annahme ab. Wenn man davon ausgehe, dass ein Kontinuum aus Indivisi-

blen zusammengesetzt sei, dann würden in der Tat »alle geradlinigen Schnitte« zusammen sich zu der Fläche addieren und »alle ebenen Schnitte« zu dem Volumen. Wenn man aber diese Voraussetzung nicht akzeptiere, dann müsse zweifellos etwas zu den Linien hinzukommen, was zusammen mit ihnen die Fläche ausmache, entsprechend für die ebenen Schnitte und das Volumen. Nichts hiervon aber habe Auswirkungen auf die Methode der Indivisiblen, denn diese vergleiche »alle geradlinigen Schnitte« oder »alle ebenen Schnitte« einer Figur mit denjenigen einer anderen unabhängig davon, ob die Schnitte zusammen die ganze Figur ausmachen oder nicht.

Dürftige Ausreden

Cavalieris Argument könnte sachlich sogar akzeptabel sein, ist aber unaufrichtig. Alle seine Werke basieren auf der Idee, dass das Kontinuum tatsächlich aus Indivisiblen aufgebaut ist; das konnte auch keiner seiner Leser ernsthaft bezweifeln. Seinem Rückzieher zum Trotz macht das Unterfangen, »alle geradlinigen Schnitte« beziehungsweise »alle ebenen Schnitte« von Figuren miteinander zu vergleichen, nur dann Sinn, wenn diese Schnitte irgendwie die Fläche beziehungsweise das Volumen der Figur bilden. Dass Cavalieri das im Sinn hatte, geht schon aus dem Namen »Indivisible« hervor, und seine eingangs erwähnte Metapher vom Tuch und vom Buch macht das kristallklar. Guldin hatte also vollkommen Recht, als er Cavalieri aufforderte, über seine Ansichten zum Kontinuum Rechenschaft abzulegen, und dessen Verteidigung erscheint als reichlich schwache Ausrede.

Seine Antwort auf Guldins Feststellung »Eine Unendlichkeit hat kein bestimmtes Verhältnis zu einer anderen Unendlichkeit« ist kaum überzeugender. Cavalieri unterscheidet zwischen zwei Arten von Unendlichkeit und behauptet, ein »absolutes Unendliches« habe in der Tat kein bestimmtes Verhältnis zu einem anderen »absoluten Unendlichen«. Allerdings seien »alle geradlinigen Schnitte« und »alle ebenen Schnitte« eben keine absoluten, sondern nur »relative Unendlichkeiten«, und diese hätten allerdings ein bestimmtes Verhältnis zueinander. Wie oben scheint Cavalieri seine Methode mit abstrusen Argumenten zu verteidigen, die man mit fantasievollen Definitionen noch retten könnte – oder auch nicht. In jedem Fall haben sie nichts mit den echten Gründen oder vielmehr Motiven hinter der Methode der Indivisiblen zu tun.

Erst in der Antwort auf Guldins Vorwurf, er »konstruiere« seine Figuren nicht ordentlich, verliert Cavalieri die Geduld und zeigt sein wahres Gesicht. Guldin behauptete, jede Figur, jeder Winkel und jede Gerade, die in einem geometrischen Beweis auftreten, müssten sorgfältig aus elementaren Prinzipien (»Axiomen«) konstruiert werden. Cavalieri bestreitet das: »Damit ein Beweis wahr ist, ist es nicht notwendig, alle diese Figuren zu beschreiben [gemeint: konstruieren]; es genügt anzunehmen, dass sie im Geiste beschrieben wurden [...] und folglich kann sich kein Widerspruch ergeben, wenn wir annehmen, dass diese Figuren bereits konstruiert wurden.«



Allem Anschein nach verband den Jesuiten Mario Bettini eine innige Feindschaft mit dem Jesuiten Bonaventura Cavalieri, der auch noch in Bettinis Geburtsstadt Bologna eine Professur hatte.



CEMALDE VON LORENZO LIPPI, UM 1647 / PUBLIC DOMAIN

Evangelista Torricelli, ab 1642 Hofmathematiker in Florenz als Nachfolger von Galileo Galilei, fand unter anderem auch eine Methode zur Berechnung der Tangente an eine Kurve, die Isaac Newton (1643–1727) später zur Differenzialrechnung weiterentwickelte.

Diese Bemerkung bringt den Grundwiderspruch auf den Punkt. Für die Jesuiten diente die Mathematik dem Ziel, die Welt als einen unveränderlichen, ewigen Ort zu konstruieren, dessen hierarchische Ordnung unter keinen Umständen anfechtbar sein sollte. Deshalb musste jeder Teil der Welt sorgfältig und vernunftgemäß konstruiert sein, und keine Andeutung eines Widerspruchs oder Paradoxons durfte bestehen bleiben. Es galt, die augenscheinlich so chaotische Welt aufzuräumen, sprich sie mit Ordnung und Rationalität zu versehen.

Für Cavalieri und die anderen Anhänger der Indivisiblen stellte sich die Sache genau umgekehrt dar. Die Welt war nicht das Zielobjekt ihrer Bemühungen, sondern deren Ausgangspunkt. Ihre Mathematik war von Vorstellungen über die materielle Welt inspiriert – ebene Figuren bestehen aus Linien ebenso wie ein Stoff aus Fäden und ein Buch aus Blättern. Man muss solche Figuren nicht mit Mitteln der Vernunft konstruieren, denn sie existieren schon in der Welt, wie wir alle wissen. Es genügt, sie sich vorzustellen, um dann ihre innere Struktur zu erforschen. Letztlich, so Cavalieri, »ist kein Widerspruch ableitbar«, weil die Tatsache, dass die Figuren existieren, deren innere Konsistenz garantiert. Irgendwelche Paradoxien oder Widersprüche können höchstens Indizien dafür sein, dass unser Verständnis noch mangelhaft ist, und weiterer Forschung den Weg weisen, bis sie sich schließlich auflösen. Niemals jedoch sollten sie uns daran hindern, die innere Struktur geometrischer Figuren und deren verborgene Beziehungen untereinander zu ergründen.

Für einen klassischen Mathematiker wie Guldin war die Vorstellung, man könne die Mathematik auf einer vagen und paradoxen Intuition von Materie aufbauen, schlicht absurd. Seinem Opponenten warf er die folgende rhetorische Frage vor die Füße: »Wer wäre der Richter« über die Wahrheit einer geometrischen Konstruktion, »die Hand, das Auge oder der Verstand?« Aber der Vorwurf, eine irrationale Geometrie der Hand oder des Auges zu betreiben, konnte Cavalieri nicht beeindrucken, denn seine Methode beruhte tatsächlich auf einer solchen praktischen Intuition. Für ihn war Guldins Forderung, die Methode sei zu verwerfen, weil sie auf Widersprüche führe, sinnlose Pedanterie. Jeder wusste, dass diese Figuren existieren; da sei es Unfug zu argumentieren, dass das logisch nicht zulässig sei. Cavalieri hätte seine Haltung durch die fast 300 Jahre später formulierten Worte des Dichters Christian Morgenstern »weil, so schließt er messerscharf, nicht sein kann, was nicht sein darf« zweifellos treffend ausgedrückt gefunden.

Zu allem Überfluss, so Cavalieri, seien Guldins Spitzfindigkeiten dem Fortschritt der Wissenschaft abträglich: Würde er sich durchsetzen, so ginge eine machtvolle Methode verloren, und die Mathematik wäre die Leidtragende.

Die letzte Bastion des unendlich Kleinen

Cavalieris Befürchtungen waren nur zu berechtigt. Ihm selbst konnten die Jesuiten seine Professur in Bologna nicht nehmen; aber keiner seiner Anhänger gelangte in Italien je zu akademischen Ehren, und viele zogen es in späteren Jahren vor, nichts mehr zu dem heiklen Thema zu veröffentlichen.

Allgemeine Mutlosigkeit hatte sich breitgemacht. Cavalieri selbst hatte versucht, seine Kritiker zu beschwichtigen, indem er so wenig wie möglich von klassischen Gedankenpfaden abwich; er hatte ja sogar darauf verzichtet, Guldin in der provokanten Form eines Dialogs anzugreifen. Sein Gesinnungsgenosse Evangelista Torricelli (1608–1647), besser bekannt als der Erfinder des Quecksilberbarometers, weigerte sich schlicht, auf die Kritiker seiner Methode einzugehen. Sein Freund Antonio Nardi (gestorben um 1656) füllte Tausende von Seiten zum Thema, die bis heute unveröffentlicht in den Archiven der Bibliotheca Nazionale Centrale in Florenz ruhen. Torricellis Schüler Michelangelo Ricci (1619–1682) brachte es sogar zum Kardinal und Ratgeber der Glaubenskongregation, in welcher Rolle es ihm gelang, mäßigend auf die »Verteidiger des wahren Glaubens« gegen die Wissenschaft einzuwirken; aber darüber, dass er selbst die verfemte Methode praktizierte, ließ er nie ein öffentliches Wort verlauten.

Nur einer brachte den Mut und das Durchhaltevermögen auf, den unkonventionellen Zugang zur Mathematik öffentlich zu verteidigen: Bruder Stefano degli Angeli, der den Jesuiten von St. Hieronymus angehörte.

Nur ein Buchstabe trennte die Namen der beiden Orden: Während die Jesuiten bis heute eine bedeutende Rolle spielen, wurde der 1361 gegründete Orden der Jesuiten, der sich vorrangig mildtätigen Werken für die Armen und Kranken widmete – und sowohl Cavalieri als auch Angeli zu seinen

Mitgliedern zählte – am 6. Dezember 1668 durch einen päpstlichen Federstrich aufgelöst. Dokumente, die Licht in die Hintergründe dieses drastischen Schritts bringen könnten, schlummern bis heute in den Archiven des Vatikans.

Angeli stürzte sich mit einem Schwung in die Schlacht um die Indivisiblen, wie man es seit Jahrzehnten nicht mehr gesehen hatte. Er war entschlossen, zurückzuschlagen und die von ihm hoch geschätzte Methode dem Würgegriff der Jesuiten zu entwinden. Seine erste Breitseite war in seinem »Appendix pro indivisibilibus« enthalten, welchen er 1658 seinem Buch »Problemata geometrica sexaginta« (»Sechzig geometrische Probleme«) beigab, und richtete sich direkt gegen den Jesuiten Mario Bettini. Darüber hinaus beschimpfte er die Jesuiten so drastisch, wie es seit Galileis Zeiten niemand mehr gewagt hatte, machte sich über ihre exorzistischen Praktiken lustig und gab vor, niemals von einem berühmten Mathematiker in ihren Reihen gehört zu haben.

Auf den ersten Blick wirkt die Geschichte Cavalieris wie eine Neuauflage des nur wenige Jahrzehnte älteren Falls Galilei: Die mächtige Kirche stellt die überkommenen Lehren höher als jede wissenschaftliche Erkenntnis, unterdrückt nicht nur abweichende Meinungen, sondern bedroht auch deren Vertreter und erstickt damit den wissenschaftlichen Fortschritt. Es gibt allerdings einen entscheidenden Unterschied: Diesmal hatten die Jesuiten in der Sache Recht.

Die Mathematik kann Widersprüche, wie sie Cavalieris Theorie verunstalteten, nicht hinnehmen, will sie nicht ihren Anspruch auf universelle Gültigkeit aufgeben. Als ein Jahrhundert später Isaac Newton (1643–1727) und Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) die Differenzial- und Integralrechnung erfanden, waren die Widersprüche keineswegs verschwunden. Newton und Leibniz hatten nur geschicktere Methoden gefunden, um ihnen aus dem Weg zu gehen.

Der neue Zweig der Mathematik, der heute »Analysis« oder auch »Infinitesimalrechnung« (»Rechnen mit dem unendlich Kleinen«) heißt, wuchs zu zentraler Bedeutung heran. Ohne die Infinitesimalrechnung wäre insbesondere die moderne Physik nicht denkbar. In ihrer Frühzeit war jedoch wegen der überall lauern den Widersprüche unklar, welche Schlussweisen zulässig waren und welche nicht. Erst intensive Aufräumarbeiten im 19. Jahrhundert stellten die Sicherheit wieder her. Neben vielen anderen schufen namentlich Augustin Cauchy (1789–1857) und Karl Weierstraß (1815–1897) einen Aufbau der Analysis aus Axiomen, gegen den auch die Jesuiten nichts einzuwenden gehabt hätten.

In gewisser Form lebt allerdings der Gegensatz zwischen den »Fundamentalisten« und den »Pragmatikern« bis heute fort. Nach wie vor fallen in der Analysis die Findung eines Satzes und seine Bestätigung durch einen Beweis in der Regel auseinander. Letzterer beginnt typischerweise mit den berühmtesten Worten »Sei $\varepsilon > 0$ « und nimmt keinen Bezug auf die Intuition, die zu dem Satz geführt hat. Die Mathematiker –

In der Sache brachte er den Gegensatz zwischen Jesuiten und Jesuiten in unübertroffener Deutlichkeit auf den Punkt. In den Augen der Jesuiten führte die Idee, das Kontinuum sei aus Indivisiblen aufgebaut, zu Widersprüchen und musste deshalb aus der Mathematik verbannt werden. Eine auf ihr beruhende Methode – und sei sie auch effizient und fruchtbar – war inakzeptabel, da unvereinbar mit dem einzigen Grund, überhaupt Mathematik zu betreiben: deren makelloser logischer Struktur. Angelis Sicht der Dinge war exakt entgegengesetzt: Weil die Methode der Indivisiblen effizient war, mussten ihre Grundlagen wahr sein. Sollte sie zu Paradoxien führen, so musste man mit ihnen leben. Der eine Zugang betont die Reinheit der Mathematik, der andere ihren praktischen Nutzen; der eine beharrt auf absolut perfekter Ordnung, der andere ist bereit, Zweideutigkeiten und Ungewissheiten in Kauf zu nehmen. Und die beiden schienen unversöhnlich. ~

und vor allem die Physiker – hören nicht auf, in unendlich kleinen Größen zu denken, weil das so intuitiv einleuchtend ist und auch meistens auf den richtigen Weg führt, und müssen sich nachträglich vergewissern, dass sie nicht einem der allgegenwärtigen Paradoxa zum Opfer gefallen sind.

Das zeigt sich sogar in der Schreibweise. Die auf Leibniz zurückgehende Bezeichnung dx/dt für die Ableitung von x nach t sieht aus wie ein Bruch, und die Rechenregeln für die Ableitung sind denen für gewöhnliche Brüche manchmal zum Verwechseln ähnlich. Aber dx/dt ist eben nicht die unendlich kleine Größe dx geteilt durch die unendlich kleine Größe dt , denn die gibt es beide nicht, das heißt, sie sind nicht widerspruchsfrei definierbar.

Trotzdem ist es häufig hilfreich, nach dem Vorbild Cavalieris so zu tun, als gäbe es sie. Man muss nur das so gefundene Ergebnis nach dem Vorbild der Jesuiten durch einen Beweis absichern.

Die Redaktion

DER AUTOR



Amir R. Alexander lehrt Wissenschaftsgeschichte an der University of California in Los Angeles. Dieser Text ist ein Auszug aus seinem Buch »Infinitesimal. How a Dangerous Mathematical Theory Shaped the Modern World«. © Scientific American / Farrar, Straus and Giroux, New York 2014

QUELLEN

Alexander, A. R.: Exploration Mathematics: The Rhetoric of Discovery and the Rise of Infinitesimal Methods. In: Configurations 9, S. 1–36, 2001

Alexander, A. R.: The Skeleton in the Closet: Should Historians of Science Care about the History of Mathematics? In: Isis 102, S. 475–480, 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362273

DAS GANZE SPEKTRUM.
AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
DIGITAL-
ABO



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet 1m Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/digitalabo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



KLIMAWANDEL

Wellen als arktische Eisbrecher

Die globale Erwärmung lässt die Eiskappe am Nordpol schwinden – so weit, so bekannt. Doch nun haben Forscher eine zusätzliche Bedrohung entdeckt: In der zunehmend offenen See türmen Winde immer höhere Wellen auf, die an der verbliebenen Eisdecke nagen und sie noch schneller zerstören.

Von Mark Harris



Nur ein einsamer Eisberg dümpelt in den rauen Gewässern nahe der Inselgruppe Franz-Josef-Land, dem nördlichsten Punkt Eurasiens, wo das Meer früher das ganze Jahr über zugefroren war.

Der Sommer 2014 war in der Tschuktschensee höchst ungewöhnlich. Normalerweise bleiben die arktischen Gewässer nördlich der Beringstraße fast das ganze Jahr über zugefroren. Doch diesmal gab es dort so gut wie kein Eis. Den 35 000 Walrossen in der Region blieb deshalb nichts übrig, als sich am Strand im Nordwesten Alaskas niederzulassen; denn Eisschollen, von denen aus sie sonst auf Nahrungssuche gehen, waren weit und breit keine zu finden.

Und noch etwas Seltsames fiel dem Ozeanografen Jim Thomson von der University of Washington in Seattle bei einer Fahrt mit dem Forschungsschiff Norseman II eines Morgens im September auf: Ein großer Teil der Besatzung war seekrank. Mitten im Ozean mag das nicht ungewöhnlich erscheinen, doch in dieser Region, wo die Tschuktschen- an die Beaufortsee grenzt, war es schon merkwürdig. Da das Meer hier gewöhnlich eisbedeckt ist, können sich nämlich normalerweise keine Wellen bilden. Nun aber gab es weite offene Wasserflächen – und riesige Wogen: Fünf Meter hohe Brecher schubsten das Schiff hin und her und krachten auf das Deck. Die See war so rau, dass der Kapitän, um ein Kentern zu vermeiden, nicht gegen die Wellen ansteuern konnte, sondern vor ihnen herfahren musste. Während Thomson, ein erfahrener Seemann, seine Forscherkollegen kreidebleich über das Schiff wanken sah, genoss er selbst das stürmische Wetter. Er war hergekommen, um nach Wellen zu suchen – und hatte sie gefunden.

»Sie übertrafen alles, was je gemessen, berichtet oder auch nur für möglich gehalten worden war«, erinnert er

sich. Einige Monate vorher hatte er eine kleine Flotte von Tauchbojen ausgesetzt, und jetzt wollte er eine davon wieder einholen. »Rund sechs Stunden vor ihrer Bergung gab es die höchsten jemals von uns registrierten Wellen«, erzählt er.

Diese Wellen lösen vielleicht ein ebenso bedeutendes wie verwirrendes Rätsel. Warum schwindet das arktische Meereis in so atemberaubendem Tempo? Klimamodellen zufolge sollte es wegen der Erderwärmung durch den von Menschen verursachten Treibhauseffekt zwar schrumpfen, aber wesentlich langsamer, als das derzeit geschieht. Entweder sind die Modelle also falsch, oder es gibt einen bislang übersehenen Effekt. Thomson und andere Wissenschaftler glauben inzwischen, dass es sich dabei um Wellen handelt. Diese erhalten durch das klimabedingte Abschmelzen von Meereis mehr Raum, sich aufzuschaukeln, und prallen dann ihrerseits mit Macht dagegen und zermalmen es. Eine Roboterboje, die Thomson 2012 ausgesetzt hatte, wurde von einer sich auftürmenden Woge fast acht Meter hochgeschleudert.

Solche neuerdings auftretenden Riesenwellen können weit reichende Folgen für das gesamte Weltklima haben. Die arktischen Gewässer umgeben den Nordpol von der Beaufort- und Tschuktschensee nördlich von Kanada und Alaska über die Ostsibirische, Laptew-, Kara- und Barentsee oberhalb von Russland bis zum Europäischen Nordmeer und der Grönlandsee im Atlantik. Die Eisbedeckung dieses gewaltigen Areals dürfte außer dem Lebensraum der Walrosse auch Meeresströmungen sowie vielleicht so-



gar den Strahlstrom in der Atmosphäre beeinflussen, was sich auf das Klima bis in mehrere tausend Kilometer Entfernung auswirken würde. Und wenn das Eis die Küsten in der Region nicht mehr vor Erosion schützt, sind vermutlich auch die fragilen Permafrostregionen, die einen großen Teil davon ausmachen, in erhöhter Gefahr.

Diese Überlegungen führten Thomson und gut 100 andere Forscher 2014 zurück ins Nordpolarmeer, wo sie das modernste Fernerkundungsnetzwerk installierten, das je in solch eisigen Gewässern ausgebracht wurde. Das mehrere Millionen Dollar teure Unternehmen sollte endlich Klarheit darüber bringen, was das Auftauchen von Riesenwellen für die Zukunft zu bedeuten hat.

Ein fehlender Faktor

Schon seit Jahren sind sich Forscher bewusst, dass ihnen eine entscheidende Größe in der Arktis durch die Maschen schlüpft. Die Meereisfläche geht alljährlich im Sommer weit aus schneller und weiter zurück, als sämtliche Klimamodelle vorhersagen. Erstmals machte Julienne C. Stroeve vom National Snow and Ice Data Center in Boulder (Colorado) 2007 auf diese Tatsache aufmerksam. »Die Simulationen erfassen nicht wirklich, was vorgeht«, meint sie.

Akkurate Klimamodelle für die Arktis sind jedoch von entscheidender Bedeutung. Eis hat eine höhere Albedo als Wasser, wirft also mehr Sonnenstrahlung ins All zurück. Wenn es schwindet, heizt sich das Nordpolarmeer deshalb stärker auf – und damit auch die Atmosphäre über ihm. Nach Ansicht von Wissenschaftlern beim Pacific Northwest National Laboratory in Richland (US-Staat Washington) kann das den Strahlstrom stören – jenes Luftband, das sich in großer Höhe sehr schnell von West nach Ost bewegt und dadurch beispielsweise dafür sorgt, dass ein Flug von Europa nach Amerika länger dauert als umgekehrt. Diese Strömung wirkt laut einigen Forschern als Barriere, die eisige Luft von den Polen daran hindert, nach Süden vorzustoßen. Wird sie geschwächt, kann es in Europa oder Nordamerika im Winter zu starken Kälteeinbrüchen kommen, wie das in den letzten Jahren mehrfach der Fall war.

AUF EINEN BLICK

FATALES FEEDBACK

1 Das arktische Meereis zieht sich rascher zurück, als die **Modelle der globalen Erwärmung** vorhersagen.

2 Der Grund dafür könnten **gewaltige Wellen sein**, die früher nie in der Region gesichtet wurden. Sie entwickeln sich in den offenen Meeresgebieten, die durch die **Eisschmelze** entstehen.

3 Die Wogen können weiteres Eis zerschmettern und so mehr **freie Wasserflächen** erzeugen, in denen sich noch größere Wellen bilden – ein **verhängnisvoller Rückkopplungseffekt**.

4 Die aufgewühlte See verstärkt zugleich die **Küstenerosion** und könnte auch Wettermuster außerhalb der Arktis negativ beeinflussen.

Laut Messungen durch Wissenschaftler von der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts nimmt der Salzgehalt der Beaufortsee stark ab. Weil das Eis immer dünner wird und sich weiter zurückzieht, liegt der Eintrag von Süßwasser dort heute um 25 Prozent über dem Wert von vor 40 Jahren. Würde dieses Süßwasser in den Nordatlantik gelangen, könnte es das großräumige Strömungsmuster in den Ozeanen beeinträchtigen. Etwas Ähnliches ist aus noch unbekanntem Gründen in den 1970er Jahren geschehen. Damals stieß salzarmes Wasser aus der Arktis nach Süden vor und brachte Strömungen durcheinander, welche für ein relativ mildes Klima in Nordwesteuropa sorgen. Nach Ansicht einiger Wissenschaftler lösten analoge Störungen schon in früheren Zeiten rasante Klimaumschwünge aus, beispielsweise das Alleröd-Interstadial vor ungefähr 12 000 Jahren, bei dem die Temperaturen in Grönland innerhalb weniger Jahrzehnte um rund acht Grad stiegen.

Zurückweichendes Eis beschleunigt derzeit auch die Küstenerosion in der Arktis. Bei rund einem Drittel aller Kontinentalränder weltweit grenzt Permafrost, also dauerhaft gefrorener Boden, direkt ans Meer. »Das einzige, was diese Böden an Ort und Stelle hält, ist das Meereis, und sie dürften sehr schnell erodieren, wenn dieser Schutz wegfällt«, meint Hugues Lantuit, Geomorphologe am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Einige Küsten entlang der Beaufortsee weichen bereits um bis zu 30 Meter pro Jahr zurück.

Diese Erosion bedroht Siedlungen, kann Ökosysteme zerstören und Land absinken lassen. Außerdem trägt sie zur Versauerung der Meere und zur globalen Erwärmung bei. Beim Tauen setzt Permafrostboden nämlich darin eingeschlossenes Kohlenstoff von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen frei, der sich schließlich zersetzt. Dabei entstehen die Treibhausgase Methan und Kohlendioxid. Letzteres löst sich im Meerwasser, säuert es an und macht es so lebensfeindlicher.

Auch Unternehmen wüssten gern genauer, was mit dem arktischen Eis geschieht. Öl- und Gasfirmen spekulieren darauf, in bisher zugefrorenen Meeresregionen Bohrungen vorzunehmen. Und wenn sich die sommerliche Schmelze zuverlässig vorhersagen ließe, könnten Schifffahrtsunternehmen die legendäre Nordwestpassage nutzen, was die Fahrzeiten zwischen Pazifik und Atlantik um eine Woche verkürzen würde. Der Eisschwund hat auch die US-Marine alarmiert, nicht zuletzt wegen der Sicherheitsfragen, die ein plötzlich schiffbarer Ozean an der Nordgrenze Alaskas aufwirft.

Alles in allem gibt es also triftige Gründe, herauszufinden, warum das arktische Eis letzthin so überraschend schnell zurückgeht. Thomson vermutet, dass große Wellen mit ihrer zerstörerischen Gewalt entscheidend dazu beitragen. Sie könnten, wie er meint, die Diskrepanz zwischen Vorhersage und Realität erklären. »Bisher gibt es kein umfassendes Modell von Ozean, Atmosphäre, Wetter und Meereis, das die Wellen einschließt,« erklärt er. »Der mechanische Aspekt wurde einfach unterschlagen.« Lantuit hält es gleichfalls für denkbar, dass die bewegte See für das Zurückweichen der Küsten mitverantwortlich sein könnte. »Noch gibt es kein gutes Modell der Wir-



GETTY IMAGES / DANIELU.COX

Wenn dichtes Packeis die Beaufortsee nördlich von Alaska bedeckt, können sich keine Wellen bilden.

kung auf Permafrostboden«, meint er, »allerdings scheint es logisch, dass höhere Wellen auch mehr Erosion hervorrufen.«

Tatsächlich gibt es Beobachtungen, die diese Annahme stützen. Elizabeth Hunke vom Los Alamos National Laboratory in Kalifornien modelliert schon seit Langem Ozeane und Meereis. Bei einer Forschungsfahrt in die Antarktis auf der anderen Seite der Erde stieß sie 1998 am Filchner-Ronne-Eisschelf in der Weddellsee auf einen seltenen Bereich mit offenem Wasser. »Ich sah Wellen mit enormer Wucht auf das Meereis krachen, das seit Jahren, Jahrzehnten oder vielleicht Jahrhunderten fest mit der Küste verwachsen war«, schildert sie. »Obwohl das Eis wirklich dick und widerstandsfähig war, hielt es der Gewalt des Wassers nicht stand.«

Auf der Jagd nach Riesenwellen

Da in der Arktis niemand Riesenwellen erwartete, suchte bis vor Kurzem auch keiner danach oder dachte gar daran, sie in Klimamodelle aufzunehmen. Das änderte sich erst mit den erstaunlichen Messungen, die Thomsons einsame Boje 2012 vornahm. Sie ließen nicht nur die Ozeanografen weltweit aufhorchen, sondern erregten auch die Aufmerksamkeit des US Office of Naval Research, eines Forschungsinstituts der US-Marine in Arlington County (Virginia). Dort gab es bereits ein mit zwölf Millionen Dollar dotiertes Projekt namens Marginal Ice Zone Program (MIZ) mit dem Ziel, das Schicksal des arktischen Eises zu klären. Im Sommer 2014 avancierte die Suche nach Wellen dank der Erkenntnisse von Thomson zum offiziellen Teil dieses Vorhabens.

Das Projekt spannte mehr als 100 Wissenschaftler aus allen Teilen der Welt zum ehrgeizigsten Unternehmen zusammen, das je gestartet wurde, um Licht in das sommerliche Abschmelzen des arktischen Meereises zu bringen. In früheren Jahren hätten dazu Eisbrecher das Polarmeer durchpflügt, bemannte U-Boote die Tiefen ergründet und Satelliten am Himmel ihre Spähaugen auf die Arktis gerichtet. 2014 jedoch erfüllten kleine Schiffe, kurze Expeditionen und Un-

mengen an Drohnen im Wasser denselben Zweck. Autonome Unterwasserroboter können heute Plätze aufsuchen, die für Menschen unerreichbar sind, und 24 Stunden am Tag unermüdlich Daten sammeln.

Im Frühjahr 2014 flogen Wissenschaftler auf die dick zugefrorene Beaufortsee und installierten Dutzende von Instrumenten entlang einer 400 Kilometer langen Linie, die vom 73. Breitengrad Richtung Pol verlief. Die Geräte registrierten die Dicke der Eisschicht, die Temperatur und Zusammensetzung des Wassers darunter und das Wetter darüber. Sie waren als Schwimmkörper konstruiert, so dass sie, als im Sommer das Eis allmählich aufbrach und sie eine nach der anderen in das kalte Wasser plumpsten, weiterhin die gewünschten Daten aufzeichneten.

Spät im Juli letzten Jahres begannen Thomson und fünf andere Forscher dann von der Ukpik aus, einem kleinen, zum Forschungsschiff umgebauten Fischerboot, raffiniertere Versionen der Instrumente in der Beaufortsee auszusetzen. Um diese Jahreszeit geht die Sonne dort niemals unter; rund um die Uhr taucht sie die bewegte See und glitzernde Eisschollen in ihre schrägen, matten Strahlen. Kein anderer Seefahrer befand sich in jenen Tagen wohl so weit nördlich, mehr als 150 Seemeilen von der nächstgelegenen Siedlung entfernt. Abge-

Vor einem Jahren setzten Wissenschaftler in der Beaufortsee ein Netzwerk von Sensoren aus, um zu ergründen, warum das arktische Meereis in der jüngsten Vergangenheit noch viel schneller zurückgegangen ist, als Modelle für den Klimawandel vorhergesagt haben.



sehen vom gelegentlichen fernen Blasen eines Grönlandwals ist dieser Teil der Beaufortsee ein trostloser Ort.

Für den Mangel an belebter Natur entschädigte in gewissem Maß die Gesellschaft der Roboter. Die Forscher bereiteten mehrere unterschiedliche Typen von Drohnen für den Einsatz vor. Bei einigen handelte es sich um Thomsons Standardbojen zum Registrieren von Wellen, ähnlich der 2012 in derselben Gegend installierten Version. Die anderen waren wesentlich komplexer: knapp zwei Meter lange, torpedoförmige Unterwassergleiter, die sich mit Hilfe von Schwerkraft, einstellbarem Auftrieb und einem beweglichen Flügelpaar selbstständig durch das Wasser bewegen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 11/2014, S. 76). Jeder verfügt über eine Schwimmblase, die sich aufpusten oder entleeren lässt, wodurch das Gerät leichter oder schwerer als Wasser wird. Auf diese Weise legt ein solcher Gleiter bis zu 20 Kilometer am Tag zurück, indem er sich in eleganten Bögen auf- und abbewegt. Bei entsprechender Einstellung des Flügelpaars kann er auch um die Kurve fahren.

Am höchsten Punkt seiner geschwungenen Bahn reckt das Gerät wie eine neugierige Robbe kurz seine Nase aus dem Wasser, um eine GPS-Ortung vorzunehmen sowie Daten an Satelliten zu übermitteln und von dort neue Instruktionen zu erhalten. Eine leistungsstarke Batterie liefert genug Strom für eine Betriebszeit von zehn Monaten.

Thomson und seine Kollegen setzten insgesamt vier solche Gleiter aus. Diese pendelten zwei Monate zwischen offenem Wasser und Eisdecke hin und her. Dabei ermittelten sie die Turbulenz, die Temperatur und den Salzgehalt des Meeres und maßen die Konzentration an organischem Material. Da bei längerem Aufenthalt unter der Eisdecke kein regelmäßiger Kontakt zu Satelliten möglich war, setzten die Forscher einen eigens entwickelten dritten Drohnentyp als Relaisstation ein. Von Solarzellen und Wellenkraft angetrieben, bewegen sich diese so genannten Wellengleiter zum Eisrand und kommunizieren von dort über akustische Signale mit den Unterwasserfahrzeugen. Insbesondere übermitteln sie Informationen über Längen- und Breitengrade sowie die Anweisungen der Forscher.

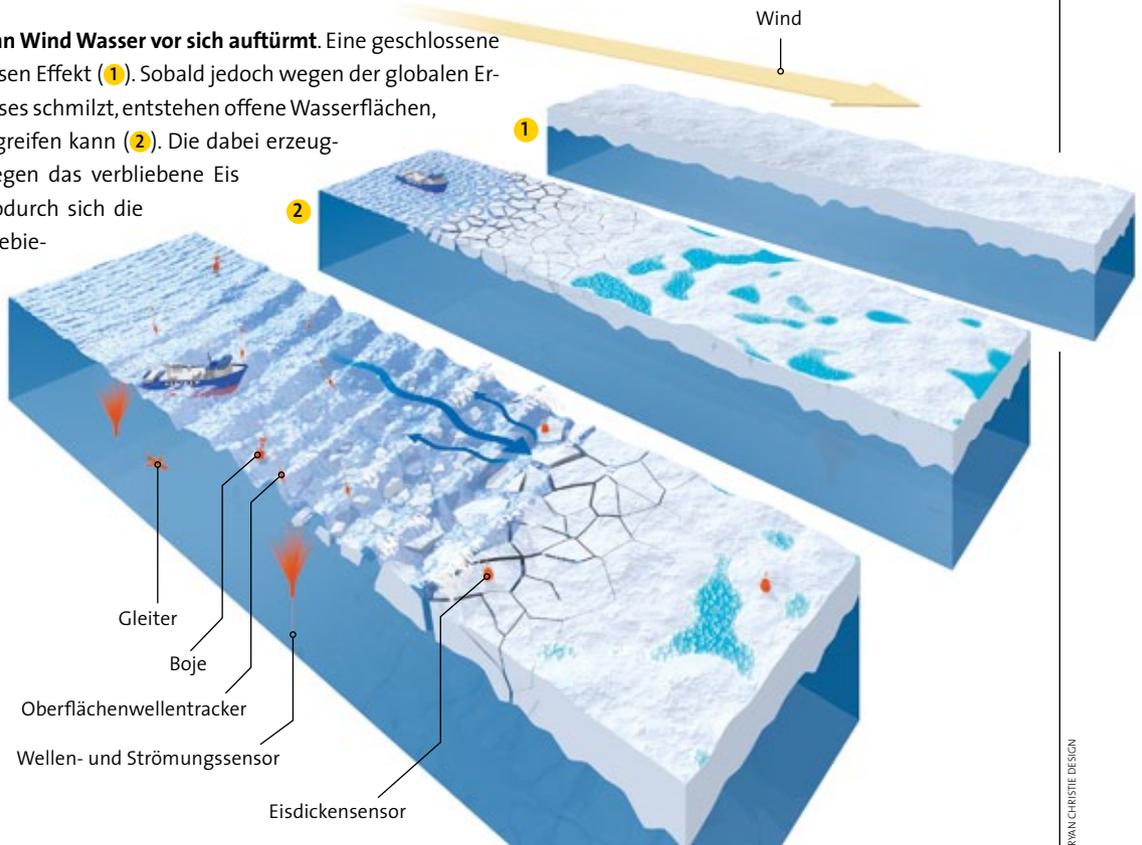
Für diesen Zweck hatte Lee Freitag, ein Ingenieur bei Woods Hole, ein System entworfen, um niederfrequente Schallwellen über weite Strecken im Meer zu übertragen: durch Reflexion an den Grenzen von Wasserschichten unterschiedlicher Dichte. Auf dieselbe Weise lassen Wale ihre Gesänge über ganze Ozeane hinweg erschallen. Um die Kommunikation der Tiere nicht zu stören, verwendeten die Forscher allerdings andere Wasserschichten und Frequenzen.

Roboter können ein viel größeres Gebiet abdecken als Eisbrecher. Da Letztere relativ schwerfällig sind, verfolgen sie meist eine feste Route – auch dann, wenn sich das interes-

Wechselspiel von Wind, Wellen und Eis

Wellen bilden sich, wenn Wind Wasser vor sich aufwürmt. Eine geschlossene Eisdecke verhindert diesen Effekt (1). Sobald jedoch wegen der globalen Erwärmung ein Teil des Eises schmilzt, entstehen offene Wasserflächen, an denen der Wind angreifen kann (2). Die dabei erzeugten Wellen krachen gegen das verbliebene Eis und zersplittern es, wodurch sich die unbedeckten Meeresgebiete ausdehnen und noch größere, zerstörerische Wellen entstehen (3).

Um die Interaktion zwischen Wellen und Eis zu erforschen, brachten Wissenschaftler 2014 die hier gezeigten Instrumente aus. Dazu gehörten Bojen und Detektoren zur Messung der Wellenhöhe, Unterwassergleiter, die unter die Eisdecke vordringen können, und Sensoren zur Messung der Eisdicke.





Unser
Online-Dossier
zum Thema
»Klimawandel«
finden Sie unter



[www.spektrum.de/
t/klima](http://www.spektrum.de/t/klima)

sante Geschehen vielleicht gerade ganz woanders abspielt. Die sehr viel wendigeren Wellen- und Unterwassergleiter können auf Anweisung der Forscher dagegen scharf abbiegen, um alle Bewegungen des Eises nachzuverfolgen, während es sich auflöst.

Es gibt einen weiteren Vorteil: Die Roboter benötigen nur ein kleines Mutterschiff. »Die Ukpik eignet sich bestens für Manöver auf engstem Raum«, sagt Thomson. »Eisbrecher sind oft einfach zu groß. Wie ein Elefant im Porzellanladen zerstören sie genau die Wellen, die wir messen wollen.«

Die zerstörerische Kraft der Wogen

Nachdem er der Mannschaft geholfen hatte, zwei Wellengleiter zu Wasser zu lassen, erläuterte er mir, an die Reling gelehnt, wie Wellen entstehen. »Grundvoraussetzung ist natürlich Wind. Wenn er weht, sind zwei weitere Dinge nötig: Zeit und Entfernung. Je mehr Raum zur Verfügung steht, desto größer werden die Wellen. Dasselbe gilt für die Zeit. Richtig große Wellen brauchen beides: Raum und Zeit.«

Selbst in den wärmsten Jahren steckt die Arktis im Frühjahr noch unter einem Eispanzer. Doch gegen Ende des Sommers gibt es dort eine freie Wasserfläche von der doppelten Größe des Mittelmeers. Je ausgedehnter diese Fläche, desto größer ist die Streichlänge des Winds, und desto höhere Wogen türmen sich auf: Der Wind treibt das Wasser vor sich her – je weiter und länger, desto gewaltiger der Wasserberg.

Wenn das Meer eisfrei ist, absorbiert es auch mehr Sonnenlicht. Dadurch erwärmt sich das Wasser, heizt die Luft auf und verstärkt so den Wind. Die von ihm erzeugten Wellen können dann binnen Tagen Eisflächen von der Größe Deutschlands zerbrechen. Dabei entsteht mehr offenes Wasser, was die Bildung noch größerer Wellen begünstigt.

Unklar ist nur der genaue Beitrag der einzelnen Glieder dieser Rückkopplungsschleife zur Zerstörung des Eises. Auch fragt sich, inwieweit die Wellen das erneute Zufrieren des Meers im Herbst verzögern. Für ein besseres Verständnis solcher Zusammenhänge bedarf es genauerer Kenntnisse über die Interaktion zwischen Wellen und Meereis.

Nach dem Aussetzen der Drohnen im Juli 2014 geriet die Ukpik in ein ausgedehntes Feld mit Eisbergen, die von kleinen Brocken bis zu Kolossen ähnlich jenem reichten, der 1912 die Titanic versenkte – ein ideales Umfeld für Thomsons Untersuchungen. Der Forscher beeilte sich, eine Boje

fertig zu machen, die er noch außerhalb des Felds über Bord warf. Dann steuerte er behutsam zwischen das Eis und deponierte eine weitere.

Der Unterschied zwischen der offenen See und dem Eisfeld war eklatant. Hatte das Schiff eben noch heftig geschaukelt, bewegte es sich schon erheblich sanfter, als es nur ein kleines Stück hineingefahren war. Einige hundert Meter weiter kam es völlig zur Ruhe, während auf der spiegelglatten Wasserfläche zwischen den Eisbrocken nur noch ein schwaches Kräuseln zu sehen war. »Das Eis wirkt wie ein Filter für die Wellen und lässt lediglich die längsten ein Stück weit hinein«, erläuterte Thomson. Unter anderem wollte er herausfinden, welchen Anteil die physikalischen Prozesse Streuung und Dämpfung an dem Filtereffekt haben.

Bei der Streuung wird die Wellenenergie lediglich umverteilt, bei der Dämpfung geht sie dagegen auf das Eis über, indem sie es zerbricht und aneinanderreißt. Dabei entfaltet sie die größte zerstörerische Kraft. So dramatisch haushohe Wellen in der offenen See wirken mögen – die Messungen im Zentimeterbereich innerhalb von Eisfeldern dürften mehr dazu beitragen, die Klimamodelle für die Arktis in den kommenden Jahren zu verbessern.

Was Thomson bisher herausgefunden hat, stützt jedenfalls seine Annahme, dass mehr Wellen zu weniger Eis und damit zu noch mehr Wellen führen. Das bestätigt auch W. Erick Rogers vom US Naval Research Laboratory. »Diese Rückkopplungsschleife scheint ein wichtiger Mechanismus zu sein, mit dem sich der Schwund des arktischen Meereises im künftigen wärmeren Erdklima verstehen lässt«, versichert er.

Als die Ukpik das Eisfeld wieder verlassen hatte und zurück in den Hafen tuckerte, traf sie auf ein kleines Boot mit einem alten Inuit und seinem Enkel aus der nahen Siedlung. Während die Welt noch kaum Notiz von den dramatischen Entwicklungen in der Arktis nimmt, bekommen diese Gemeinschaften – und die einheimische Tierwelt wie Eisbären, Robben, Wale und im Permafrost eingeschlossene Mikroben – die Auswirkungen schon empfindlich zu spüren. ~

DER AUTOR



Mark Harris ist Wissenschafts- und Technikjournalist in Seattle.

QUELLEN

Cohen, J. et al.: Recent Arctic Amplification and Extreme Mid-Latitude Weather. In: *Nature Geoscience* 7, S. 627–637, 2014

Stroeve, J. C.: Trends in Arctic Sea Ice Extent from CMIP5, CMIP3 and Observations. In: *Geophysical Research Letters* 39, L16502, 2012

Thomson, J., Rogers, W. E.: Swell and Sea in the Emerging Arctic Ocean. In: *Geophysical Research Letters* 41, S. 3136–3140, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362276

FESTKÖRPERFORSCHUNG

Die skurrile Welt der Carbide

Die Verbindungen aus Metall und Kohlenstoff faszinieren nicht nur durch ausgefallene Strukturen, sondern schlagen auch eine Brücke zwischen anorganischer und organischer Chemie.

VON ROALD HOFFMANN

Wenn Sie einen Chemiestudenten im höheren Semester danach fragen, was er über Carbide weiß, bekommen Sie höchstwahrscheinlich eine Antwort der folgenden Art: »Ich kenne natürlich Calciumcarbid, CaC_2 , und dann habe ich von den langen Kohlenstoffketten in den organometallischen

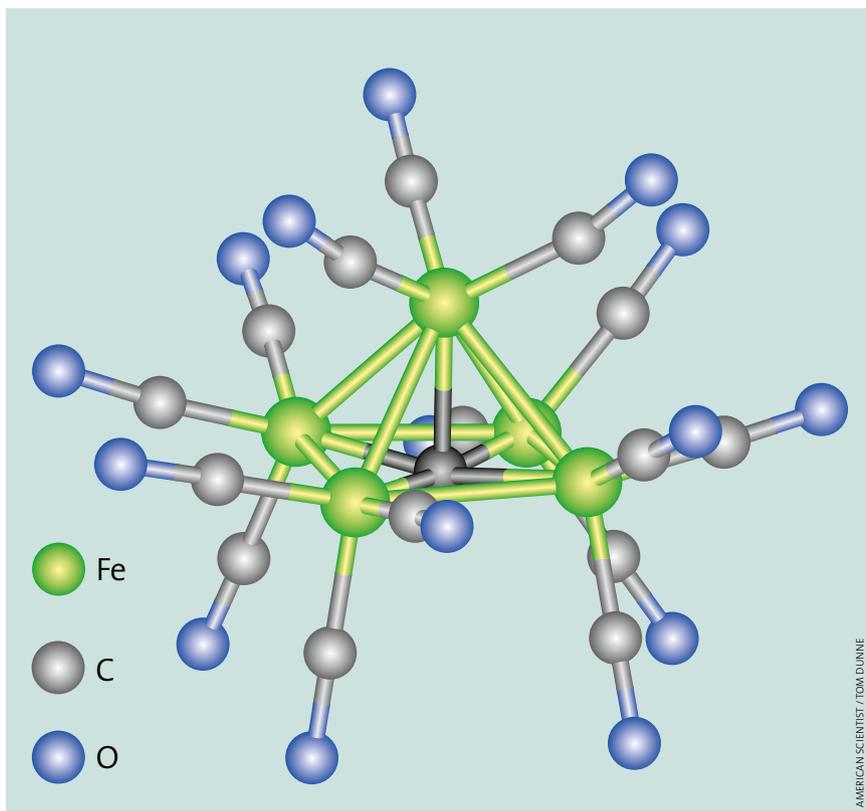
Molekülen von John Gladysz gehört und, ach ja, da gibt es doch auch noch diese Übergangsmetallcarbidgecluster wie $\text{Fe}_5\text{C}(\text{CO})_{15}$.«

Technisch spielt Calciumcarbid inzwischen allerdings kaum noch eine Rolle, auch wenn es seinerzeit dem Chemie Giganten Union Carbide, heute eine

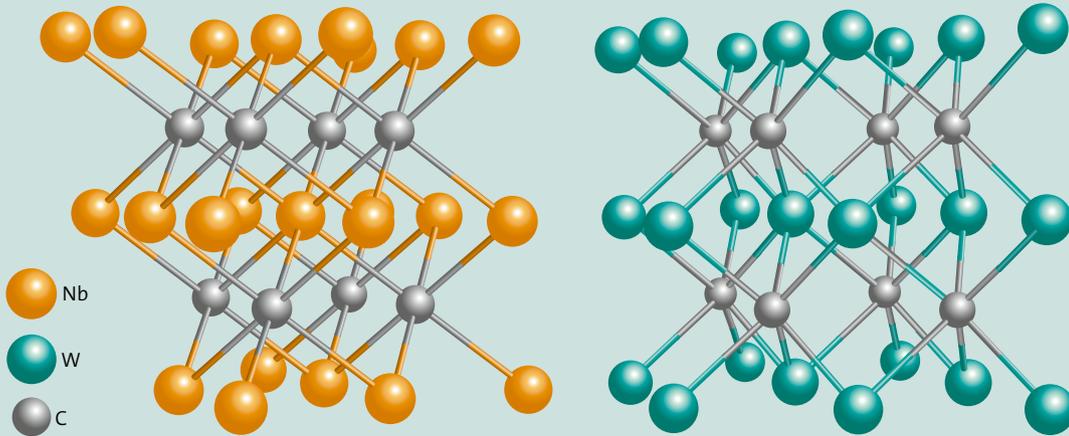
Tochtergesellschaft von Dow, seinen Namen gab. Weitaus größere Bedeutung haben stattdessen Materialien wie WC – nein, nicht das Klo, sondern Wolframcarbid – und andere gesinterte Hartmetallcarbide für Bohrspitzen.

Noch wichtiger ist Stahl. Obwohl es sich um einen der meistverwendeten Werkstoffe überhaupt handelt, gehe ich jede Wette ein, dass im Lehrplan für Chemiestudenten kaum ein Wort darüber verloren wird. Stahl ist eine feste Lösung von Kohlenstoff in Eisen, die außerdem Verbindungen wie Zementit (Fe_3C) und das Hägg-Carbid (Fe_5C_2) enthält. Eher aus wissenschaftlicher Neugier als für den Profit haben Chemiker zudem eine Vielzahl anderer Carbide hergestellt.

Die einseitige, lückenhafte Antwort der Studenten – und Professoren wären da auch nicht viel besser – verrät eine Menge über die Realitätsferne und modische Ausrichtung des heutigen Chemiestudiums. Ich sehe darin zum einen den Triumph der molekularen Chemie im letzten Jahrhundert, weshalb zum Beispiel der exotische $\text{Fe}_5\text{C}(\text{CO})_{15}$ -Cluster bekannter ist als der Zementit mit seiner ausgedehnten Atomstruktur, und zum anderen die große Vorliebe der Menschen – Unterspezies Chemiker – für Einfachheit; aus diesem Grund interessieren sich Lehrer wie Studenten mehr für kleine, diskrete Moleküle als etwa für das schwer zu erklärende Lanthanickelcarbid ($\text{La}_2\text{Ni}_3\text{C}_3$) oder gar das Kuddelmuddel im Stahl.



Die hier dargestellte Verbindung aus Eisen, Kohlenstoff und Sauerstoff, $\text{Fe}_5\text{C}(\text{CO})_{15}$, ist ein molekularer Cluster und bildet damit eine große Ausnahme unter den Carbiden. Die meisten Vertreter dieser Stoffklasse haben ausgedehnte Strukturen und lassen sich nicht in Einzelmoleküle aufteilen.



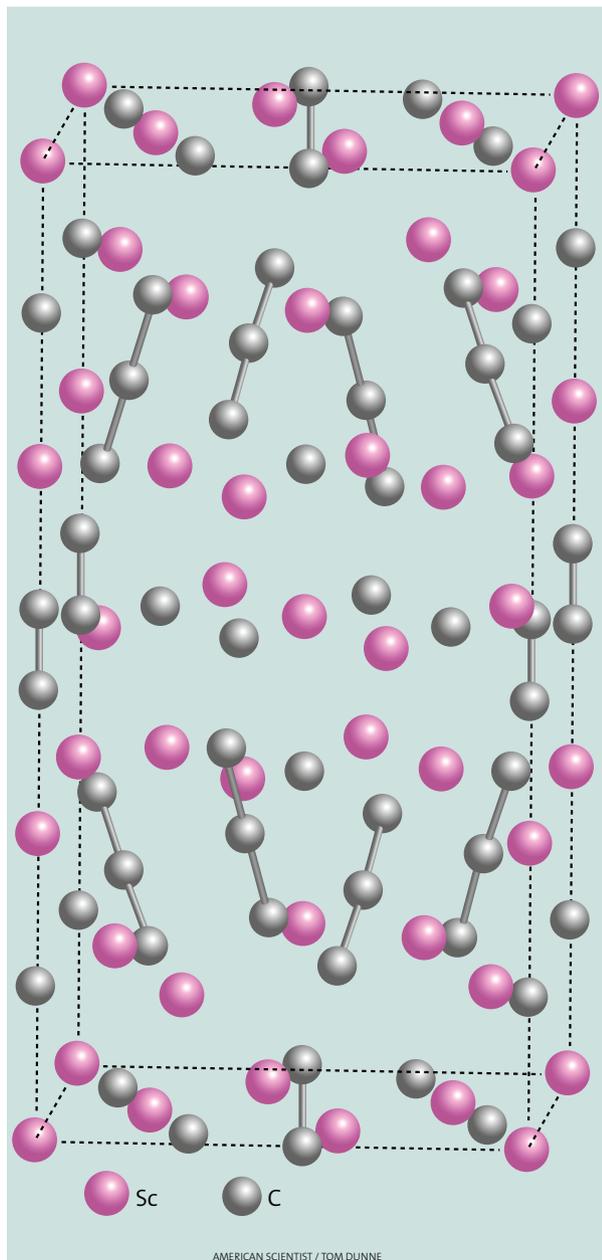
Niobcarbid (NbC, links) und Wolframcarbid (WC, rechts) haben trotz gleicher Stöchiometrie unterschiedliche Strukturen. Bei Ersterem ist der eine Bindungspartner jeweils oktaedrisch vom anderen umgeben. Wolframcarbid enthält trigonale Prismen an Stelle der Oktaeder.

Doch gerade die ausgedehnten, nicht aus kleinen diskreten Molekülen bestehenden Vertreter der Carbide, von denen einige hundert bekannt sind, bilden eine höchst bemerkenswerte und, wie ich meine, inspirierende Substanzgruppe. Makroskopisch betrachtet, handelt es sich immer um Festkörper keramischer oder manchmal auch metallischer Natur.

Oft zeichnen sich diese Stoffe durch große Härte und einen hohen Schmelzpunkt aus. Sie können feuchtigkeitsempfindlich sein: Wer je den widerlichen Geruch von nassem technischem Karbid in die Nase bekommen hat, wird ihn wohl nie vergessen! Aber meist sind sie sehr beständig gegen Wasser und Luft – man denke etwa an WC-Bohrerspitzen, die selbst bei Rotglut nicht mit Sauerstoff reagieren. Ihre chemische Zusammensetzung reicht von sehr einfach – etwa beim WC oder NbC (Niobcarbid) – bis zu höchst komplex wie bei Sc_3C_4 (Scandiumcarbid) oder $\text{Er}_{10}\text{Ru}_{10}\text{C}_{19}$ (Erbiumrutheniumcarbid).

Oktaeder und trigonale Prismen

Was die mikroskopische Struktur betrifft, kommt Kohlenstoff in den bekannten Carbiden bisher nur in drei Formen vor. Am häufigsten sind isolierte Kohlenstoffatome, bei denen es sich wahrscheinlich um negativ geladene Ionen handelt. NbC zum Beispiel besteht aus Schichten von Niob und Kohlenstoff, in denen die Atome des einen Elements jeweils oktaedrisch von de-



Wie dieses Strukturbild von Scandiumcarbid (Sc_3C_4) zeigt, kommt der Kohlenstoff in dieser Verbindung in drei Formen vor: als C_3 - und C_2 -Einheit sowie als Einzelatom.

nen des anderen umgeben sind (links im Bild oben auf S. 79).

Kommt Ihnen das bekannt vor? Dieselbe geometrische Struktur hat Kochsalz (Natriumchlorid, NaCl), nur dass sie in diesem Fall gewöhnlich aus einem anderen Blickwinkel gezeigt wird. Die Niobatome sind etwas weiter voneinander entfernt als in metallischem Niob, während die NbC-Abstände denen in diskreten organometallischen NbC-Verbindungen ähneln. C–C-Bindungen gibt es keine.

Interessanterweise hat WC trotz gleicher Stöchiometrie eine ganz andere Struktur. Hier ist jedes Kohlenstoffatom von einem trigonalen Prisma von Wolframatomen und jedes Wolframatom von einem trigonalen Prisma von Kohlenstoffatomen umgeben. Ich habe mit Sunil Wijeyesera einen Artikel geschrieben, in dem wir dem Grund für diesen Unterschied nachgehen. Zementit besitzt übrigens eine Variante der WC-Struktur. Um sie zu erhalten, muss man zwei Drittel der Kohlenstoffatome entfernen und dann das Metallgerüst auf komplizierte Art stauchen.

Falls Sie einen anorganischen Chemiker fragen, wann die ersten Moleküle mit einem Metallatom in trigonal-prismatischer Umgebung synthetisiert wurden, wird er wahrscheinlich »um 1965« sagen. Aber die Struktur von WC ist seit 1928 bekannt. Auch MoS₂ – Molybdänsulfid – weist eine trigonal-prismatische Koordination der Metallatome auf, wie Linus Pauling schon 1923 herausfand. Dass der auf Moleküle fixierte Anorganiker auf keine der beiden Verbindungen kommt, beleuchtet die fast das ganze 20. Jahrhundert hindurch bestehende Kluft zwischen molekularer und Festkörperchemie. Wie war das mit den zwei Kulturen? Hier haben wir sie sogar in ein und derselben Disziplin!

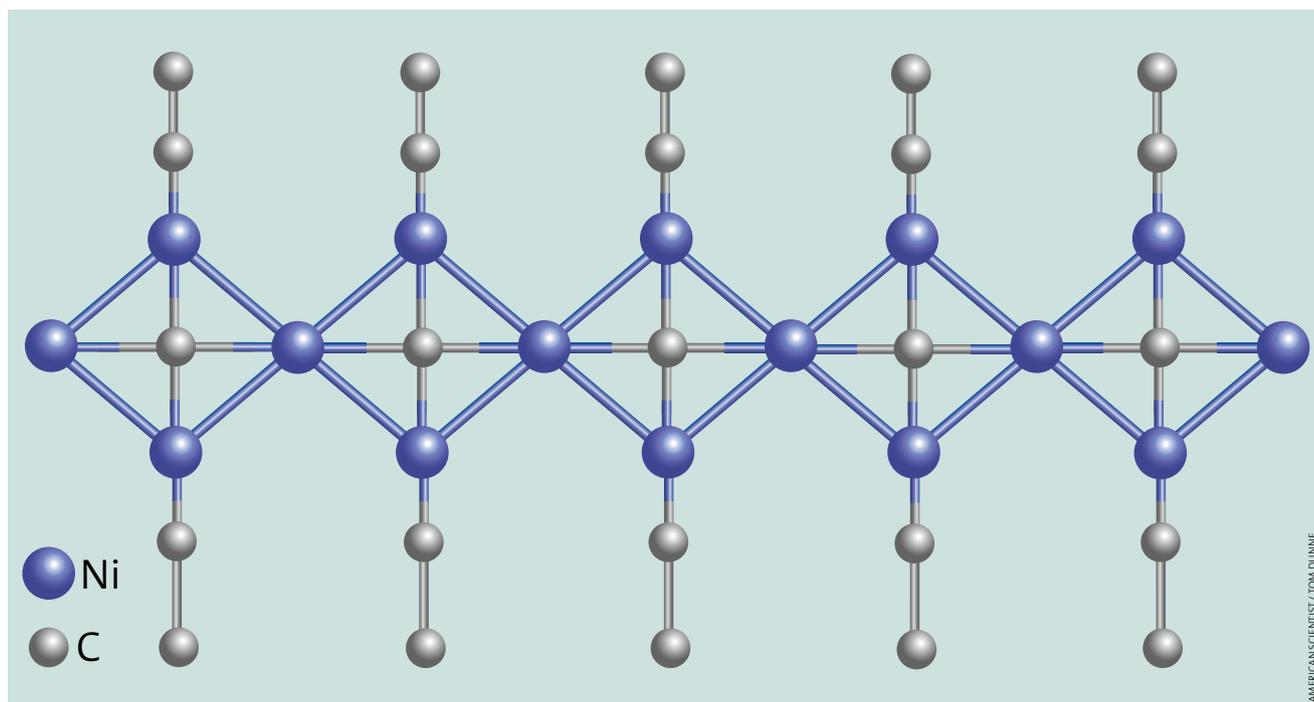
Enge und lose Kohlenstoffpaare

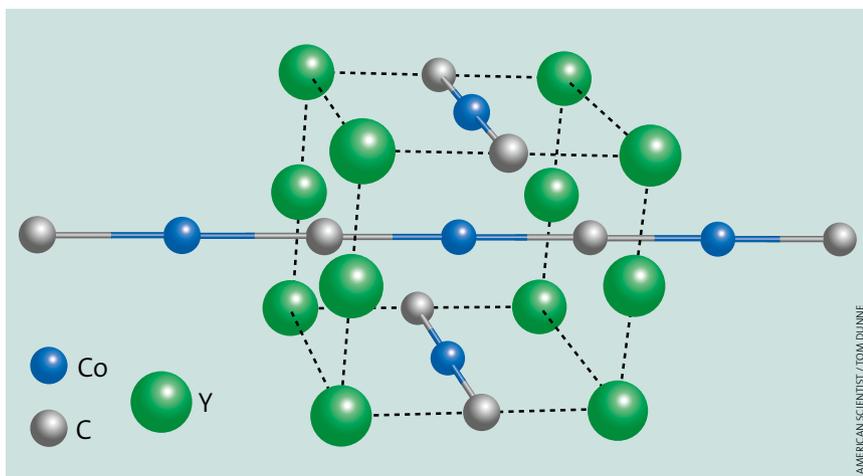
Carbide der zweiten Art enthalten zwei miteinander verknüpfte Kohlenstoffeinheiten. Das CaC₂ gehört dazu. Die C₂-Einheiten kommen darin einem C₂²⁻-Ion nahe – wie in einem Acetylen (HCCH), bei dem die beiden Wasserstoffatome als Protonen entfernt wur-

den. Das äußert sich auch in der C–C-Bindungslänge von 1,19 Ångström (10⁻¹⁰ Meter), die der im Acetylen entspricht. Die C–C-Abstände in den C₂-Gruppen anderer Carbide variieren beträchtlich. Sie reichen von 1,19 bis 1,48 Ångström und decken damit fast den gesamten Bereich der C–C-Bindungslängen in organischen Kohlenwasserstoffen ab, von einer Dreifachbindung wie im Acetylen bis hin zu der gewöhnlichen Einfachbindung in Alkanen. Das ist gewiss kein Zufall.

Bei der dritten bekannten Konstellation der Kohlenstoffatome in Carbiden handelt es sich um eine C₃-Einheit. Sie kommt allerdings nur selten vor, etwa in Ca₃Cl₂C₃. Statt diese Verbindung genauer zu beschreiben, möchte ich Ihnen lieber die bizarre Struktur von Sc₃C₄ vorführen, das Rainer Pöttgen und Wolfgang Jeitschko vor 25 Jahren an der Universität Münster hergestellt haben (Bild unten auf S. 79). Die Substanz enthält einen kuriosen Mischmasch aus allen drei in Carbiden auftretenden Kohlenstoffarten: In der Elementarzelle kommen zwölf C-, zwei C₂- und acht C₃-Einheiten vor. Es ist, als hätten die Metallatome ein Graphitgitter auseinandergerissen, bis nur noch winzige, wie Inseln im Scandium verteilte Fetzen übrig waren.

Calciumnickelcarbid (Ca₃Ni₃C₅) enthält Nickelcarbideketten (Ni₃C₅), von denen hier eine leicht idealisiert dargestellt ist. In der Mitte der über die Ecken verknüpften und mit C₂-Einheiten behängten Nickelquadrate sitzt jeweils ein Kohlenstoffatom.





In dieser Darstellung der Elementarzelle von Yttriumcobaltcarbide ist eine Co–C-Kette verlängert eingezeichnet, um die polymere, stabförmige Struktur zu verdeutlichen. Die beiden anderen sehen genauso aus.

Von diesem Schwindel erregenden Gipfel der Komplexität komme ich zu einer etwas einfacheren, aber nicht weniger interessanten Verbindung: $\text{Ca}_4\text{Ni}_3\text{C}_5$. Sie wurde ebenfalls in der Gruppe von Jeitschko synthetisiert, dem wir viele der bekannten Carbide verdanken. Aneinandergereihte Nickelquadrate, die sich jeweils ein Metallatom teilen und an den übrigen Ecken mit C_2 -Einheiten dekoriert sind, bilden darin ein eindimensionales $\text{Ni}_3\text{C}_5^{8-}$ -Band. Und genau in der Mitte jedes Quadrats sitzt ein Kohlenstoffatom und macht das Molekül teilweise organisch (Bild links).

Metallorganisches Polymer im Käfig

Beachtung verdient auch eine weitere Struktur von Jeitschko, die aus Yttrium, Cobalt und Kohlenstoff besteht: YCoC (Bild oben). Das Besondere daran sind unendlich lange $[\text{CoC}]^{3-}$ -Nadeln, die sich in zwei Richtungen hindurchziehen. Der Co–C-Abstand ist mit nur 1,85 Ångström rekordverdächtig kurz, viel kürzer jedenfalls als im natürlich vorkommenden Vitamin B_{12} .

Man kann die $[\text{CoC}]^{3-}$ -Ketten als organometallische Polymere auffassen, wobei wegen des kurzen Abstands eine Mehrfachbindung vorliegen muss. Das Polymer ist gleichsam im Festkörper eingeschlossen. Als theoretischer Chemiker, der seine Kollegen aus der Ex-

perimentalzunft gerne mal provoziert, rufe ich ihnen zu: »Holt das Polymer doch einfach da heraus, bringt es in Lösung, indem ihr ihm einen besseren Lewis-Säure-Partner als Y^{3+} anbietet.« Natürlich werden sie es nicht schaffen. Aber vielleicht bringt sie diese Struktur auf eine Idee, wie sich stabförmige metallorganische Polymere herstellen lassen; sie sind bestimmt machbar, auch außerhalb eines Festkörpers.

Meiner Meinung nach wird die Synthese von weiteren kohlenstoffreichen Carbiden außer C -, C_2 - und C_3 -Einheiten noch andere Konstellationen von C-Atomen zum Vorschein bringen. Ich glaube fest daran, dass in Festkörpern kleine Kohlenstoffklumpen mit bislang unbekannter Struktur entstehen können. Warum?

Nun, jede Umgebung – ob Gasphase, Lösung, Grenzfläche, Metalloberfläche oder das Innere eines Metalls – schafft ureigene Stabilitätsbedingungen für Aggregate eines Elements (hier Kohlenstoff). So haben die speziellen Reaktionsbedingungen eines Kohlelichtbogens in einer Heliumatmosphäre dem Buckminsterfulleren (C_{60}) makroskopische Stabilität verliehen. Bei den meisten Formen von Kohlenstoff garantieren die hohen Barrieren für den Bruch der starken C–C-Bindungen, dass sie überleben, nachdem sie einmal gebildet wurden – selbst in einer merkwür-

digen, spannungsreichen geometrischen Anordnung. Nach allem, was wir über die ungewöhnlichen Geometrien von festen Boriden wissen (Bor steht im Periodensystem links neben Kohlenstoff), ist es nur eine Frage der Zeit, bis sonderbare C–C-Bindungen auch in Carbiden entdeckt werden.

Wenn Sie mich fragen, liegt die Bedeutung dieser Substanzklasse nicht in ihrem wirtschaftlichen Wert, ja nicht einmal in der teils bizarren Schönheit ihrer Strukturen, dem Loblied auf die Komplexität, das sie lautlos singen. Nein, es ist ihre geistige Botschaft. Sie sind anorganisch und zugleich ganz klar organisch – wie sonst wären die C–C-Bindungen in vielen davon zu verstehen? Metallcarbide bilden eine Brücke zwischen den beiden Hauptzweigen der Chemie, einen Wink der Natur, um uns zu zeigen, dass unser Schubladendenken die mannigfaltigen Manifestationen der einen, ganzheitlichen Welt nur sehr unvollkommen zu erfassen vermag. ∞

DER AUTOR



Roald Hoffmann ist emeritierter Frank H.T. Rhodes Professor of Humane Letters an der Cornell University in Ithaca (New York) und Träger des Chemie-nobelpreises 1981. Er

dankt Hans-Jürgen Meyer für wertvolle Kommentare und Musiri M. Balakrishnarajan für seine Unterstützung beim Erstellen der Abbildungen.

QUELLEN

Hoffmann, R., Meyer, H.-J.: The Electronic Structure of two Novel Carbides, $\text{Ca}_3\text{Cl}_2\text{C}_3$ and Sc_3C_4 , Containing C_3 Units. In: Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 607, S. 57–71, 1992

Jeitschko, W. et al.: Carbon Pairs as Structural Elements of Ternary Carbides of the f Elements with the late Transition Metals. In: Journal of the Less Common Metals 156, S. 397–412, 1989

Oyama, S. (Hg.): Chemistry of Transition Metal Carbides and Nitrides. Kluwer, New York 1996

© American Scientist

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1362274

Intelligente Autos im Dilemma

Autonome Fahrzeuge könnten bald unsere Straßen erobern – und stellen uns schon heute vor ethische Fragen: Wie sollen sie sich bei drohenden Unfällen verhalten?

Von Alexander Hevelke und Julian Nida-Rümelin

Plötzlich läuft jemand vor das Auto. Man kann nicht mehr rechtzeitig bremsen, und jedes Ausweichmanöver würde ebenfalls einen Zusammenstoß verursachen. Solche Situationen, in denen es sich nicht vermeiden lässt, dass Menschen verletzt oder getötet werden, entstehen im Straßenverkehr immer wieder.

Da die Autohersteller derzeit die Automatisierung ihrer Fahrzeuge immer weiter vorantreiben, scheint es nur eine Frage der Zeit, bis die ersten völlig autonomen Wagen marktreif sind. Damit stellt sich die Frage, wie diese für solche kritischen Situationen programmiert werden sollen – und welche Faktoren dabei eine Rolle spielen. Wird die Anzahl der jeweils gefährdeten Personen entscheiden? Ihr Alter? Ist es relevant, wer den Unfall verschuldet hat? Darf ein Fahrzeug der Sicherheit seiner Insassen Priorität gegenüber den anderen Verkehrsteilnehmern einräumen?

Sicher hängt die tatsächliche Umsetzung auch davon ab, was zu diesem Zeitpunkt technisch realisierbar sein wird. Doch vorher muss man einen Blick darauf werfen, welcher Weg ethisch am ehesten zu rechtfertigen wäre. Dies zu beantworten, ist auch für denkbare computergesteuerte Unfallassistenten von Bedeutung, die lediglich in Notfällen die Kontrolle übernehmen, um Kollisionen oder zumindest Verletzungen besser vermeiden zu können.

Anhand eines Beispiels lassen sich zwei mögliche Richtlinien für eine solche Programmierung gegenüberstellen.

Stellen wir uns also eine Situation vor, in der ein Unfall nicht zu verhindern ist: Zwei Personen laufen so plötzlich vor ein autonomes Fahrzeug, dass es nur noch ausweichen, aber nicht mehr rechtzeitig bremsen könnte. Weicht es nach links aus, rammt es aber einen entgegenkommenden Lastwagen. Auf der rechten Seite würde es mit einem Passanten auf dem Gehweg kollidieren (Illustration auf S. 84).

Der erste hier diskutierte Ansatz, einer solchen Lage zu begegnen, konzentriert sich darauf, die zu erwartenden Verletzungen so gering wie möglich zu halten. Ist ein Zusammenstoß unausweichlich, soll das Fahrzeug die wahrscheinlichen gesundheitlichen Schäden sowie die Opferzahl minimieren. In unserem Beispiel würde es dann entweder nach links oder in Richtung Fußgänger ausweichen. Falls mehrere Personen in dem selbstfahrenden Auto sitzen und der Lastwagen sie vermutlich alle schwer verletzen würde, ginge die Schadensberechnung wohl zu Ungunsten des Passanten aus.

Dieses Prinzip hat den Vorteil, dass es ein grundsätzliches Problem des Straßenverkehrs verringern könnte: die große Zahl an Toten und Verwundeten jedes Jahr. Die Überlegungen dahinter beruhen auf dem so genannten Konsequentialismus. Der Begriff steht für eine Tradition ethischer Theorien, die Handlungen ausschließlich auf Grundlage ihrer Folgen bewerten. Dabei wird der Nutzen und Schaden aller Beteiligten gegeneinander aufgerechnet. Als beste Entscheidung gilt diejenige, die den meisten Menschen den größtmöglichen Vorteil bringt – Ethiker sprechen von einer Maximierung der Nutzensumme. In unserem Fall bedeutet dies, die zu erwartenden Verletzungen zu minimieren.

Ein erstes Problem dieses Ansatzes: Es ist nicht einfach, verschiedene Konsequenzen miteinander zu verrechnen. Dazu kommt die Komplikation, dass ein Zusammenstoß bei jedem der möglichen Unfallopfer mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zu diversen Verwundungen führen kann. Wie bezieht man diese Unsicherheiten in die Gewichtung ein? Wie viele Schwerverletzte wiegen einen Toten auf? Lassen sich leichte Blessuren überhaupt mit lebensgefährlichen Folgen verrechnen? Zählen viele Menschen, die jeweils ein gewisses Risiko haben, ums Leben zu kommen, mehr oder

AUF EINEN BLICK

DAS UNAUSWEICHLICHE BERECHNEN

1 Autonome Fahrzeuge reifen technisch immer weiter. Doch unter realen Bedingungen werden auch sie in **unvermeidbare Unfälle** verwickelt.

2 Die grundsätzlichen Richtlinien, nach denen ein Wagen dabei reagieren soll, bestimmt nicht der **Bordcomputer**, sondern – lange zuvor – dessen **Programmierer**.

3 Das zwingt die Entwickler, über die **ethischen Probleme** nachzudenken, die in solchen Situationen auftreten.



Selbst wenn Computer das Steuer übernehmen, wird es im Straßenverkehr weiterhin Verletzte und Tote geben.

weniger als eine Person, die mit Sicherheit sterben würde? Solche Fragen lassen sich nur durch relativ willkürliche Grenzziehungen beantworten.

Ein zweiter Einwand ist sehr viel grundsätzlicher. Aus Sicht des Konsequentialismus mag es zwar kein Problem sein, die jeweiligen Interessen der verschiedenen Personen gegeneinander aufzurechnen. Ein demokratischer Rechtsstaat sollte aber, zumindest wenn Grundrechte betroffen sind, gerade nicht so verfasst sein. Ein Verstoß gegen zentrale Rechte lässt sich durch Vorteile für andere, wie groß sie auch sein mögen, nicht rechtfertigen.

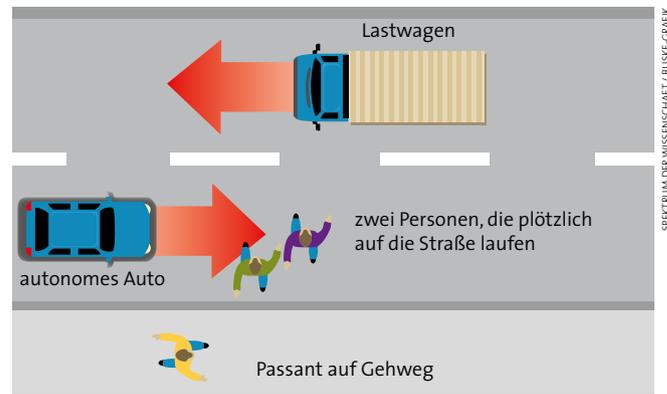
Nun hat der Passant in unserem Beispiel zweifellos einen Anspruch auf körperliche Unversehrtheit. Ihn zu opfern und das mit dem größeren Nutzen für Dritte zu rechtfertigen, würde damit rechtsstaatlichen Grundsätzen widersprechen. Vor diesem Hintergrund erscheint es auf den ersten Blick inakzeptabel, bei unausweichlichen Unfällen die Strategie zu verfolgen, Verletzungen zu minimieren, wenn dabei die Verwundungen verschiedener Menschen gegeneinander abgewogen werden.

Regeln festlegen – lange vorher

Allerdings trifft das Auto selbst gar keine Entscheidungen im eigentlichen Sinn. Es folgt seiner Programmierung, die es nicht hinterfragen kann. Damit fällt der eigentliche Entschluss nicht unmittelbar vor dem Unfall, sondern zu einem Zeitpunkt, an dem Menschen über die Verhaltensrichtlinien des autonomen Fahrzeugs bestimmen. Zu diesem sehr viel früheren Moment ist zwar bereits absehbar, dass es zu Situationen wie in unserem Beispiel kommen wird; es ist aber noch völlig offen, wer die Beteiligten sein werden.

Und das macht einen erheblichen Unterschied: Bei der ethischen Beurteilung einer Handlung muss man nämlich von dem Wissensstand zum Zeitpunkt der Entscheidung ausgehen. Es ist unsinnig, die moralische Bewertung von Informationen abhängig zu machen, die dem Akteur erst im Nachhinein zugänglich sein können. Wenn der Bordcomputer in unserem Beispiel den Passanten auf dem Gehweg ins Visier nehmen würde, lässt sich allein daraus nicht ohne Weiteres schließen, dass dessen Interessen denjenigen der Mehrheit geopfert werden. Der ursprüngliche Entschluss für besagte Programmierung könnte ja auch sein statistisches Risiko minimiert haben, im Straßenverkehr verletzt zu werden. Sofern das zutrifft, war es in seinem Interesse – selbst wenn er letztlich der Unglückliche ist, der überfahren wird.

Das Problem dieser Rechtfertigung liegt darin, dass wir praktisch nicht alle ein gleich großes Risiko hätten, uns in einer der jeweiligen Rollen wiederzufinden. Eine Programmierung mit dem Ziel der Schadensbegrenzung reduziert die Gefahr für bestimmte Gruppen auf Kosten anderer. So sind beispielsweise alte Menschen in Unfallsituationen verletzungsanfälliger als junge Erwachsene. Der Computer müsste demnach ihrem Schutz Priorität einräumen. Ein solches Vorgehen ließe sich aber nicht mehr damit legitimieren, auch im Interesse derer zu sein, die schlussendlich zu Schaden kämen.



Auch selbstfahrende Autos werden in Unfälle verwickelt. Hier laufen zwei Menschen vor ein autonomes Fahrzeug. Durch ein Ausweichmanöver würde es auf einen entgegenkommenden Lastwagen oder einen Passanten auf dem Bürgersteig zusteuern. Die Frage, welche Reaktionen für solche Fälle einprogrammiert werden sollen, stellt die Entwickler vor große Probleme.

Vielmehr würden hier die Interessen bestimmter Menschen systematisch geopfert, um eine andere, verwundbare Gruppe zu schützen. Auch individuelle Angewohnheiten hätten Einfluss. So würden unvorsichtige Menschen von einem solchen Ansatz profitieren – auf Kosten ihrer umsichtigeren Mitbürger. Wenn jemand ohnehin niemals unaufmerksam auf die Straße läuft, hat er wenig davon, wenn Autos in manchen Situationen auf den Bürgersteig ausweichen, weil sie darauf programmiert sind, die Summe an Verletzungen und Verletzten zu minimieren. Gleiches gilt für Fahrzeuge mit unterschiedlichen Sicherheitsstandards. Das Unfallrisiko derer, die robustere Wagen nutzen, könnte sich letztlich erhöhen, weil die autonomen Autos vermeiden würden, beispielsweise mit Motorrädern und Oldtimern zusammenzustößen.

Das würde aller Wahrscheinlichkeit nach auch Fehlanreize setzen. Die Gefahr etwa, sich durch besonders sichere Gefährte zur Zielscheibe zu machen, wäre schließlich durchaus absehbar. Möglicherweise wäre es unter solchen Umständen vorteilhafter, ein Auto mit eher unterdurchschnittlichem Schutz zu wählen. Ein Käufer könnte des Weiteren ein Interesse daran haben, dass sein Fahrzeug für mögliche Unfallgegner besonders gefährlich ist. Schließlich würde ihn auch das zu einem unattraktiveren Ziel machen. Je nachdem, wie sehr solche Faktoren das Risiko beeinflussen, in einen Unfall verwickelt zu werden, widerspräche es vielleicht auf einmal den eigenen Interessen, ein für alle Parteien möglichst sicheres Fahrzeug zu verwenden. Im Voraus kann natürlich nur darüber spekuliert werden, wie stark diese Beweggründe das tatsächliche Verhalten der Verkehrsteilnehmer beeinflussen würden. Aber es besteht das Potenzial, dass sie das Ziel der Verletzungsminimierung ad absurdum führen.

Ein weiterer Einwand gegen den Ansatz: Er erscheint unfair. Wenn zwei Personen auf die Straße laufen, ohne auf den Verkehr zu achten, und ein autonomes Auto nicht mehr bremsen kann, wirkt es ungerecht, den Passant auf dem Geh-

weg zu opfern, um diejenigen zu schützen, welche den Unfall mit ihrem Fehlverhalten hervorgerufen haben.

Nun lassen sich solche unfairen Resultate bei der Programmierung autonomer Fahrzeuge wohl kaum vermeiden. Schließlich könnte selbst ein menschlicher Fahrer in dieser Situation nicht beurteilen, wer die Verantwortung für sie trägt. Das muss nicht derjenige sein, der unerwartet auf der Fahrbahn auftaucht. Vielleicht sind die beiden Menschen auf der Straße drei Jahre alt, und der Fußgänger hätte auf sie aufpassen sollen. Möglicherweise hat der Passant sie angepöbeln, und sie sind erst dadurch auf die Straße gestolpert. Dass ein Fahrzeug in solchen Situationen selbst einen Schuldigen sucht und sein Verhalten daran anpasst, ist nicht nur technisch etwas viel verlangt. Es ist auch aus ethischer Sicht kaum wünschenswert, dass autonome Autos Schuldurteile fällen und den als verantwortlich Erkannten ins Ziel nehmen.

Nichtsdestoweniger hätte auch eine rein auf die Minimierung von Verletzungen ausgerichtete Programmierung Konsequenzen, die unnötig ungerecht erscheinen. Das gilt insbesondere für Fälle, in denen jemand gerade durch sein Fehlverhalten verwundbarer ist als die anderen potenziellen Unfallbeteiligten. Ein Motorradfahrer etwa, der keinen Helm trägt, ist bei einem Zusammenstoß deutlich gefährdeter als einer mit Kopfschutz. Gleichzeitig scheint es extrem ungerecht, wenn letzterer deshalb zum Ziel wird, weil er sich im Gegensatz zu dem anderen an die Regeln gehalten hat. Denn das vorschriftswidrige Handeln des Fahrers ohne Helm wäre ja der Grund, weshalb seiner Sicherheit Priorität eingeräumt würde.

Der Wert der Vorhersehbarkeit

Ein alternativer Ansatz geht von der Prämisse aus, nach der gerade motorisierte Verkehrsteilnehmer dazu verpflichtet sind, sich absehbar zu verhalten. Autofahrer sollten möglichst versuchen, uns nicht zu gefährden; wir können darüber hinaus aber auch noch verlangen, dass sie das Leben anderer nicht durch unberechenbare Manöver riskieren.

Das enorme Zerstörungspotenzial der Kraftfahrzeuge wird anderen Verkehrsteilnehmern erst dadurch zumutbar, dass ihr Verhalten so vorhersehbar ist. Ihre Nutzung ist stark reglementiert: Sie müssen auf klar ausgewiesenen Wegen bleiben; dazu kommt die Pflicht, Richtungsänderungen und Spurwechsel anzukündigen sowie Schilder, Ampeln und zahlreiche Regeln zu beachten. Es geht dabei nicht nur darum, das Verletzungsrisiko insgesamt zu reduzieren. Vielmehr ermöglicht es dem Einzelnen, sich ohne übermäßige Anstrengung so zu bewegen, dass er sich selbst nicht in Gefahr bringt. Offensichtliches Beispiel ist die Trennung von Fahrbahn und Bürgersteig. Erst wenn wir über eine Straße laufen wollen, müssen wir darauf achten, ob ein Auto kommt. Solange wir aber auf den Fußgängerwegen bleiben, dürfen wir die vorbeifahrenden Wagen getrost ignorieren.

Regelkonformität erhält im Straßenverkehr damit ein eigenes und erhebliches moralisches Gewicht. Das hat Konsequenzen für die Frage, welches Verhalten von autonomen

Autos in solchen Situationen am ehesten moralisch vertretbar ist, in denen ein Unfall nicht mehr vermieden werden kann. Potenzielle Opfer haben demnach nämlich nicht nur einen Anspruch darauf, vor Verletzungen geschützt zu werden, sondern darüber hinaus auch darauf, dass andere sie nicht durch regelwidriges und deshalb unvorhersehbares Tun verwunden. In unserem Beispiel bedeutet dies: Das Fahrzeug darf zwar bremsen, aber nicht ausweichen, wenn dadurch andere Menschen zu Schaden kommen würden. Die Autoinsassen, der Lastwagenfahrer sowie der Passant auf dem Gehweg haben einen stärkeren Anspruch auf Schutz als die beiden Personen auf der Straße. Ein Recht darauf, nach Möglichkeit nicht verwundet zu werden, haben sie alle. Ausschlaggebend wäre damit das zusätzliche Anrecht, im Straßenverkehr nicht durch regelwidriges Verhalten anderer gefährdet zu werden.

Zumindest in Situationen, in denen jedes mögliche Verhalten ähnlich schwer wiegende Risiken birgt, bietet dieser zweite Ansatz die überzeugendere Lösung. Problematischer wird es, wenn ein erwartungskonformes Verhalten deutlich bedrohlicher ist als eine regelwidrige Alternative. So sind auch Vollbremsungen überraschend und damit gefährlich. Es scheint aber absurd zu verlangen, dass ein selbstfahrendes Auto im Stadtverkehr nicht einmal scharf bremsen darf, wenn plötzlich ein Kind auf die Fahrbahn rennt.

Der besondere Anspruch darauf, nicht durch unvorhersehbare Fahrmanöver gefährdet zu werden, hat ein eigenes moralisches Gewicht. Er ist aber kein übergeordnetes Prinzip, das jeder Abwägung entzogen wäre. Damit kommen wir also wieder nicht umhin, Schäden gegeneinander aufzurechnen – zumindest in Fällen, in denen das Verletzungsrisiko bei erwartungsgerechten Aktionen deutlich höher eingestuft werden kann als bei den regelwidrigen Alternativen.

Es wird also kaum eine bequeme Antwort auf die Frage geben, wie sich autonome Fahrzeuge in Situationen verhalten sollten, in denen sich ein Unfall nicht mehr vermeiden lässt. Das liegt aber nicht an der Technologie an sich. Unausweichliches Leid und der Verlust von Menschenleben sind keine Besonderheit autonomer Fahrzeuge. Der Fortschritt zwingt uns lediglich, diese dunkle Seite unseres Straßenverkehrs auf neue Weise zu betrachten. ~

DIE AUTOREN



Alexander Hevelke (links) ist Mitarbeiter an der Ludwig-Maximilians-Universität München am Lehrstuhl für Philosophie und politische Theorie von Professor **Julian Nida-Rümelin**. Die Autoren befassen sich dort unter anderem mit den ethischen Aspekten des Fortschritts in der Robotik und legen Grundlagen für politische Empfehlungen, etwa im Rahmen des EU-Projekts RoboLaw.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1362277

1915

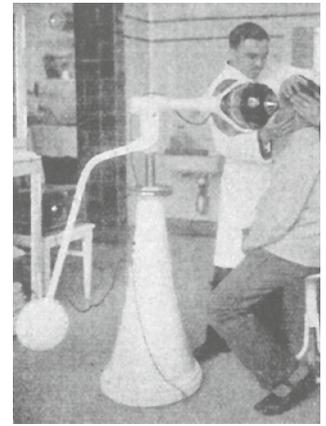
Dr. Magneto

»Die Anwendung großer Elektromagnete zu Entfernung von Eisen- und Stahlsplintern aus dem Auge hat

sonders für industriereiche Gegenden. Dieser Verwendungsart hat sich eine neue hinzugesellt, da sich die Kriegschirurgie des Magneten zur Entfernung von Geschosssplintern aus dem Körper bedient. Hier hat sich das Verfahren besonders bewährt, wo, wie bei Gehirnverletzungen, die Entfernung mit dem Messer nicht ratsam erscheint, während der

Magnet den Eingriff verhältnismäßig gefahrlos ermöglicht. Von den vielen Magnetkonstruktionen hat sich besonders eine Anordnung eingebürgert, bei der der Elektromagnet leicht um seine wagerechte Achse gedreht werden kann.« Technische Monatshefte 10, 1915, S. 308–310

Der Elektromagnet im klinischen Einsatz.



Schliemanns Erbe

»An der Erschütterung der alten, uns bereits von den Griechen überkommenen Lehre von der Erfindung unseres Alphabets durch die Phöniker sind die wiedergegebenen Gegenstände beteiligt. Es handelt sich um Spinnwirtel aus den untersten, zum Teil noch dem 3. vorchristlichen Jahrtausend



Dekoration oder Schrift?

angehörigen ältesten Schichten von Troja, die Heinrich Schliemann vor 40 Jahren ausgrub und deren eigenartige Muster im Hinblick auf die neuerdings auf Zypern und Kreta, in Griechenland, Ägypten und Palästina gefundenen ganz ähnlichen Zeichen die Frage aufwerfen, ob diese M-, T-, E-, N- und H-ähnlichen Figuren nicht bereits wenigstens Silbenzeichen darstellen.« Kosmos 10, 1915, S. 352

(Anm. d. Red.: Tatsächlich gibt es zu diesen Zeichen kein abschließendes Urteil, doch halten sie die meisten Experten heutzutage für reines Ornament.)

Ein neues Zwergvolk

»Ein neues Zwergvolk ist im Zentrum von Französisch-Kongo entdeckt worden. Die Zwerge sollen eine Größe

von 1,50 m nicht überschreiten. Ihre halbkugelförmigen Hütten bauen sie mitten im Wald. Der Häuptling herrscht

absolut. Die Frauen leben von Wurzeln, die Männer von der Jagdbeute. Ihre geistige Entwicklung hat Legenden erzeugt, so stammen die

Männer von einer Kröte, die Weiber von einem Igel. Auch unsichere Vorstellungen von Gut und Böse sind vorhanden.« Prometheus 1355, 1915, S. 48

Afrikas Wild in Gefahr

»Im Verlaufe der Kosmos-Foto-Safari 1964/65 hörten wir in Südwestafrika eine alarmierende Nachricht: In einem Gebiet, das halb so groß wie Deutschland ist, soll alles Wild abgeschossen werden! Und sinnlos sollen Millionen Wildtiere in den Steppen verfaulen! Dürfen wir es dahin kommen lassen?

Die gespannte Lage Südafrikas erfordert einschneidende bevölkerungspolitische Maßnahmen. Nach einem Plan soll das Land in Farmgebiete für Weiße und in Bantustans, Heimatländer für Eingeborene, aufgeteilt werden; denn die Apartheid verpönt das Zusammenleben von Weißen und Farbigen, und die Aufteilung des Landes erscheint ihren Ver-

fechtern als die beste Lösung. Auch das ehemalige Deutsch-Südwestafrika fällt unter die Apartheidspolitik.

Dort arbeitete die Odendaal-Kommission Pläne für die Zukunft des Landes aus. Mehr als drei Viertel des Wildbestandes werden in Südwest ausgetilgt werden, wenn der Odendaalplan realisiert wird!« Kosmos 10, 1965, S. 334–337

1965

Kurioser Kugelschreiber

»Ein Kugelschreiber ohne Tinte, der mit Ultraschallwellen arbeitet, wurde kürzlich in den USA entwickelt. Er enthält einen Generator, der Hochfrequenzschwingungen erzeugt. Diese verändern die Struktur der Papierfasern, so

dass eine lesbare Spur entsteht. Am besten soll sie auf farbigem Papier zur Wirkung kommen, weil die Farbe durch den Ultraschall an den beschriebenen Stellen konzentriert wird.« Neuheiten und Erfindungen 353, 1965, S. 181



Burchell-Zebra und Gemsböcke in der Etoschpanne.



Björn Schumacher

Das Geheimnis des menschlichen Alterns

Die überraschenden Erkenntnisse der noch jungen Altersforschung

Blessing, München 2015

288 S., € 19,99

MEDIZIN

Medikamente gegen das Älterwerden?

Forscher verstehen immer besser, warum wir altern und wie sich dieser Prozess beeinflussen lässt.

Im Sommer 2015 hat die amerikanische Arzneimittel-Zulassungsbehörde FDA eine wegweisende Entscheidung getroffen: Zum ersten Mal hat sie eine Studie über einen Arzneistoff genehmigt, der nicht direkt dazu dienen soll, eine Erkrankung zu verhindern, unter Kontrolle zu halten oder zu heilen. Stattdessen soll er das Altern aufhalten. »Metformin«, ein gängiges Mittel gegen Diabetes, senkt zugleich das allgemeine Sterberisiko der Behandelten. In der geplanten Studie möchten Mediziner nun herausfinden, ob dieser Effekt auch bei Nichtdiabetikern auftritt. Allein die Tatsache, dass eine solche Untersuchung heute möglich ist, belegt: Wissenschaftler verstehen immer besser, welche Mechanismen in den Zellen unseres Körpers dafür sorgen, dass wir altern.

Björn Schumacher, Professor für Genomstabilität während Alterungs- und Erkrankungsprozessen an der Universität zu Köln, hat die jüngsten Erkenntnisse der Altersforschung im vorliegenden Sachbuch allgemein verständlich zusammengefasst. Zunächst unternimmt er einen Streifzug durch die Geschichte der Molekularbiologie, um Lesern mit geringen Vorkenntnissen wichtige Grundlagen zu vermitteln. Damit gerüstet kann man die später beschriebenen wissenschaftlichen Experimente gut nachvollziehen. Die Erkenntnisse, die sich aus solchen Versuchen ergeben,

betreffen altersrelevante Erbanlagen und deren Wirkungen auf Zellen und Gewebe bis hin zum Gesamtorganismus. Diese Reihenfolge entspricht auch dem groben Aufbau des Buchs.

Bei verschiedenen Organismen haben Wissenschaftler bereits einzelne Genvarianten identifiziert, die den Alterungsprozess beschleunigen. Es ist sogar gelungen, Mäuse zu züchten, bei denen einzelne dieser Erbanlagen ausgeschaltet sind und die deutlich länger leben als gewöhnliche Mäuse. Der Autor, der in seinem Labor sowohl Fadenwürmer als auch Nager auf altersbezogene Mechanismen untersucht, diskutiert, inwieweit die Ergebnisse solcher Tierversuche auf den Menschen übertragbar sind. Dies scheint nicht immer ganz eindeutig. So leben Fadenwürmer und Mäuse bei systematischer Unterernährung deutlich länger; zwei Studien mit Rhesusaffen lieferten diesbezüglich jedoch widersprüchliche Resultate.

Kompliziert erscheinen auch die Zusammenhänge zwischen den molekularen Mechanismen des Alterns und denen der Krebsentstehung. Manche Faktoren, etwa eine fehlerhafte Reparatur von DNA-Schäden seitens der Zelle, begünstigen sowohl den Alterungsprozess als auch die Entstehung von Krebs. Bei vielen anderen ist die Wirkung hingegen zweischneidig. Wenn das Immunsystem beispielsweise beschädigte Zellen nicht

hinreichend gründlich entfernt, steigt das Krebsrisiko. Fällt die Immunreaktion dagegen zu stark aus, richtet sie sich auch gegen gesundes Gewebe, was mit Alterungserscheinungen einhergeht. In mancher Hinsicht schützt Altern sogar vor Krebs: Alte Zellen teilen sich langsamer, wodurch Schäden am Erbmateriale weniger schnell verbreitet werden.

Obwohl die Mechanismen, die dem Altern zu Grunde liegen, keineswegs vollkommen verstanden sind, hängen Lebensstil und Lebenserwartung eindeutig miteinander zusammen, wie Schumacher schreibt. Deshalb ruft er mit deutlichen Worten zu einer gesunden Lebensweise auf. Er plädiert für ein ausreichendes Bewegungspensum und maßvolle Ernährung, um das Risiko zu minimieren, früh an den Folgen von Zivilisationskrankheiten zu sterben.

Weiterhin geht der Autor auf Probleme ein, vor der unsere alternde Gesellschaft steht – etwa jenes, die materielle und pflegerische Versorgung im gehobenen Lebensalter sicherzustellen. Um Lösungsansätze hierfür zu finden, sollten Forscher seiner Meinung nach möglichst große Freiräume haben. Daher plädiert er am Ende für eine umfassende Freiheit der Forschung. Auch appelliert er an die Leser, Verantwortung für ihr Leben zu übernehmen.

Schumacher hat sich redlich bemüht, sein Thema allen zugänglich zu machen, die sich dafür interessieren. Jedes Kapitel leitet er mit einem amüsanten Vorspann ein; molekularbiologische Prozesse veranschaulicht er mit eingängigen Bildern. Die Arbeit von DNA-Reparaturenzymen beispielsweise vergleicht er mit der Instandsetzung eines Autos in voller Fahrt. Allerdings verwendet er viele Fachbegriffe wie »Nucleotidexzisionsreparatur«, was Leser ohne entsprechenden Hintergrund überfordern dürfte. Daher profitieren Biologen und Mediziner am ehesten von der Lektüre. Diese aber lernen beim Lesen über die großen Fortschritte der Altersforschung zu staunen.

Maren Emmerich

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Stuttgart.



Claude Martin

Endspiel

Wie wir das Schicksal der tropischen Regenwälder noch wenden können

Aus dem Englischen von Eva Leipprand

Oekom, München 2015

351 S., € 22,95

ÖKOLOGIE

Emotionale Analyse

In den kommenden Jahrzehnten wird sich das Los der tropischen Regenwälder entscheiden, prognostiziert ein früherer WWF-Generaldirektor.

Der tropische Regenwald ist in vielerlei Hinsicht etwas Besonderes. Er ist der vielleicht größte Biodiversitätspool der Erde, zentrale Station planetarer Kreisläufe und ein Raum pulsierenden Lebens voller Wunder und Geheimnisse. Claude Martin, Biologe und Umweltaktivist, will mit seinem Buch bewusst machen, dass dieser Lebensraum nicht einfach ökonomischen Zwängen geopfert werden darf – genau das aber bevorsteht. Noch ist das Schicksal der Tropenwälder nicht besiegelt, doch die kommenden Jahrzehnte werden laut dem Autor über ihr Sein oder Nichtsein entscheiden.

Der langjährige Generaldirektor des WWF International widmet den ersten Teil seines Buchs dem derzeitigen Wissensstand über die tropischen Regenwälder. Er beschreibt, wie sie ins Visier der Industrie gerieten und wie Wissenschaftler den Raubbau an ihnen ab den 1970er Jahren ins öffentliche Bewusstsein rückten. Lange Zeit, schreibt Martin, habe man die Flächenausdehnung des Regenwalds nur grob schätzen können, bis endlich Fernerkundungstechnologien genauere Analysen ermöglichten. Immer schon problematisch sei das Wirrwarr an einschlägigen Begriffen gewesen. So gebe es mehr als 1500 Definitionen für Wald und Waldland, von denen fast 100 international gebräuchlich seien.

Nach einem Überblick über diverse Waldschutzprogramme, die mal mehr und mal weniger erfolgreich waren, geht

Martin auf die Gründe für Entwaldung und Degradierung der tropischen Regenwälder ein. Dabei behandelt er unter anderem den Brandrodungsfeldbau, den Holzeinschlag, die Ölpalmenmonokulturen und die Biodieselproduktion. Hinzu kommen die ineffiziente Rinderhaltung auf Regenwaldböden sowie der Anbau von Futtersoja, um den wachsenden Fleischhunger zu decken. Diese Entwicklungen seien bislang vor allem von exportorientierten Industrien vorangetrieben worden, bilanziert Martin. Mit der fortschreitenden Verstädterung der Tropenländer und des vor Ort steigenden Konsums nähmen sie noch einmal an Fahrt auf.

Am Beispiel von Brasilien, dem Hauptanbaugebiet für Soja, zeigt der Autor, was die Gesellschaft erreichen kann, wenn sie nur will. Öffentliche Proteste erzwangen dort eine Abkehr von der zuvor auf Profit fixierten, destruktiven Wirtschaftsweise. Vielleicht sei das auch in anderen bedrohten Regenwaldregionen vorstellbar, hofft Martin. In dem Zusammenhang geht er auf vielversprechende Aufforstungsprogramme und Forstmanagementsysteme ein und hinterfragt, ob sie ausreichen, die Regenwälder zu retten. Von Bedeutung sei das nicht zuletzt wegen deren zentraler Rolle im Klimageschehen. Schon jetzt führe der Klimawandel weltweit zu immer mehr Wetterextremen.

Martin prognostiziert, dass bis 2050 weitere 11 bis 14 Prozent des tropischen

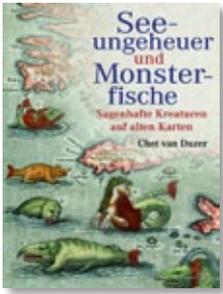
Regenwalds verschwunden sein werden. Er ist davon überzeugt: Die größten Gefahren für diesen Lebensraum erwachsen aus einer verhängnisvollen Kombination von Waldfragmentierung und -degradierung einerseits und der Klimaerwärmung mit Dürren und Bränden andererseits. Um wenigstens noch die verbleibenden Regenwaldbestände zu bewahren, spricht der Autor am Ende seines Buchs konkrete Empfehlungen aus – von Naturschutzmaßnahmen über eine vereinheitlichte Fernerkundungsüberwachung bis hin zur Zusammenarbeit zwischen Regierungen und Nichtregierungsorganisationen.

So wie man sich bei Regenwaldexpeditionen durch den Dschungel kämpfen muss, so auch bei der Lektüre durch viele Passagen dieses Werks. Leser mit entsprechenden Vorkenntnissen haben es dabei deutlich leichter, etwa angesichts der immer länger werdenden Listen der vorgestellten Studien und Organisationen. Deren komplette Namen und Abkürzungen (etwa ITTO für International Tropical Timber Organisation, oder REDD für Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) führt der Autor zwar im Glossar auf. Ihre Fülle bremst trotzdem zwangsläufig den Lesefluss. Ähnlich ist es bei manchen Grafiken und technischen Details, die sich dem Laien erst nach einigem Grübeln erschließen.

»Endspiel« ist eindeutig ein Fachbuch. Aber es macht auch Martins persönliche Begeisterung für den Regenwald spürbar – und seine Betroffenheit angesichts dessen Verlustes. Das Werk überzeugt inhaltlich und ebenso optisch, indem zahlreiche eindrucksvolle Farbfotos sowie historische Holzschnitte den Text bebildern. Eine Einschätzung, die andere teilen: Die internationale gemeinnützige Expertenorganisation The Club of Rome, die sich für eine nachhaltige Zukunft der Menschheit einsetzt, nahm Martins Buch als Bericht über den Zustand der Tropenwälder an.

Bettina Pabel

Die Rezensentin ist promovierte Lebensmittelchemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Aschaffenburg.



Chet van Duzer
Seeungeheuer und Monsterfische
 Sagenhafte Kreaturen auf alten Karten
 Aus dem Englischen von Hanne Henninger
 und Jan Beaufort
 Philipp von Zabern, Darmstadt 2015
 144 S., € 39,95

KARTOGRAFIE

Parade der Untiere

Auf alten Karten tummeln sich allerhand Seeungeheuer.
 Die Zeichner platzierten sie dort aus unterschiedlichen Gründen.

Seekarten aus dem Mittelalter und der frühen Neuzeit zeigen oft riesige Ungeheuer, monströse Seeschlangen und andere Kreaturen mit bizarrem Aussehen. Was wollten die Kartenzeichner damit signalisieren? Das beantwortet der Historiker Chet van Duzer im vorliegenden Band. Er arbeitet als Direktor eines universitären Forschungsprojekts über multispektrale Bildgebung beim Analysieren historischer Dokumente.

Laut dem Autor tauchten Seeungeheuer ab dem 10. Jahrhundert auf mittelalterlichen Weltkarten auf. Rund 600 Jahre lang zierten sie Karten und Globen, bis sie im 17. Jahrhundert wieder aus der Mode kamen. In dem üppig bebilderten Band präsentiert van Duzer viele Beispiele. Der umfangreiche Anhang mit zahlreichen Literaturverweisen belegt seine gründliche Recherche.

In nüchtern-wissenschaftlichem Stil stellt van Duzer dutzende Kartografen vor und analysiert ihre Werke daraufhin, in welchem historischen Kontext sie stehen, welche Kreaturen sie zeigen, wer diese zeichnete, auf welche Quellen er sich dabei stützte, von wem er wahrscheinlich abgeschaut hatte und so weiter. Das ist nicht uninteressant, aber ziemlich speziell. Als Leser sollte man sich für Kartografie, Seefahrt und historische Weltbilder interessieren.

Recht prägnant arbeitet der Autor heraus, was es mit den Darstellungen auf sich hat:



Wale greifen ein Schiff an, aus »Carta marina« von Olaus Magnus, 1572 (oben). Ein Fantasiemonster bläst aus fünf Rüsseln, aus »Europae descriptio emendata« von Gerhard Mercator, 1572 (unten).

➤ Seeungeheuer dienten der Dekoration, sollten Kunden beeindrucken und den Verkauf der Karten fördern. Besonders im 16. Jahrhundert interessierte man sich für Wunder und Kuriositäten. Die Zeichner platzierten die Fabelwesen oft in großen Meeren, um Leerflächen auf den Karten zu vermeiden.

➤ Sie stehen bildhaft für »fremd« und »bedrohlich« und erscheinen daher oft in Gewässern, die fernab damals bekannter Gegenden lagen: Im Indischen Ozean etwa oder um Amerika herum.

➤ Mitunter verweisen sie auf berühmte Mythen, etwa vom Propheten Jona, der von einem Seetier verschluckt wird. Ein häufiges Motiv sind Sirenen: menschenähnliche Wesen, die bereits in der griechischen Mythologie vorkommen.

➤ Sie entspringen der mittelalterlichen Auffassung, jedes Landtier müsse ein Gegenstück im Meer haben: Seeschweine, Seebären oder Ziegenfische.

➤ Manchmal sind es schlecht getroffene Darstellungen echter Tiere. Walrosse etwa erscheinen als elefanten- oder krokodilähnliche Bestien und Wale mit trompetenartigen Auswüchsen am Kopf. Viele Zeichner, die damals Meerestiere zu Papier brachten, haben diese offenbar nie selbst gesehen.

➤ Es gab wirtschaftliche Gründe, sie darzustellen. So zeigt eine Nordeuropakarte des 16. Jahrhunderts eine fliegende Schildkröte: wohl eine Art Logo des Kartenzeichners, das spätere Kartografen als »echtes« Untier in ihre Werke übernahmen, nicht ahnend, dass sie damit Werbung für die Konkurrenz machten. Eine andere Karte zeigt Furcht einflößende Meeresungeheuer bei Norwegen – vermutlich auch, um Fremdscherei in skandinavischen Gewässern zu unterbinden.

Je mehr Untiere eine Karte präsentierte, schreibt van Duzer, umso teurer war sie, denn die Monster wurden wahrscheinlich von Spezialisten gezeichnet. Besonders fantasievoll (und absurd) fielen die Kreaturen aus, wenn wohlhabende Käufer viele davon bestellten – und der Zeichner deshalb stärker als sonst gezwungen war, kreativ zu werden. Das erklärt laut Autor auch, warum die meisten mittelalterlichen Karten keine Untiere zeigen. »Wenn der Kunde, der die Karte in Auftrag gegeben hatte, nicht für Seeungeheuer bezahlte, dann erhielt er auch keine.«

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Hans-Jürgen von Wensierski, Andreas Langfeld, Lea Puchert

Bildungsziel Ingenieurin

Biographien und Studienfachorientierungen von Ingenieurstudentinnen – eine qualitative Studie

Budrich, Opladen 2015. 370 S., € 49,90

Unter den Studierenden der »harten« Technikfächer beträgt der Frauenanteil nur 15 Prozent. Warum ist das so? Um eine Antwort darauf zu finden, haben die Autoren 42 Maschinenbau- und Elektrotechnikstudentinnen befragt und präsentieren die Ergebnisse im vorliegenden Band. Die Auskünfte der Studentinnen haben einen gemeinsamen Nenner: Lehrerinnen und Lehrer sind es nicht, die junge Frauen für Technik begeistern. Es sind die Eltern oder Geschwister – egal ob in Ingenieurs- oder Handwerkerfamilien. Die Autoren fordern daher, Lehrpläne und Unterrichtskonzepte auf den Prüfstand zu stellen. Etwa die Hälfte des Buchs ist 14 ausgewählten, eingängig geschilderten Lebensläufen gewidmet, in denen sich die große Bandbreite möglicher Wege in einen technischen Beruf hinein widerspiegelt.

KATJA MARIA ENGEL



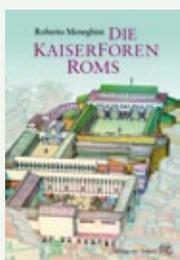
Marcel Hänggi

Fortschrittsgeschichten – Für einen guten Umgang mit Technik

S. Fischer, Frankfurt am Main 2015. 304 S., € 12,99

Ist technische Entwicklung eine Abfolge sich zwangsläufig ergebender, zielgerichteter Erfindungen? Werden technische Innovationen unsere aktuellen Probleme lösen, etwa den anthropogenen Klimawandel? Der Wissenschaftsjournalist Marcel Hänggi schaut zurück in die Technikgeschichte und beschäftigt sich mit »Fortschritts-Dingen« (etwa dem Buchdruck) sowie »Fortschritts-Treibern« (etwa der Ansicht, Tempo sei mit Progression gleichzusetzen). Zudem hinterfragt er Fortschrittsgeschichten wie die vom angeblich unaufhaltsamen Siegeszug des Autos. Das Buch ist akribisch recherchiert, sachlich geschrieben und bezieht Position: Eine demokratische Gesellschaft müsse geeignete Mittel finden, um Techniken zu bewerten – immer wieder neu. Entscheidungen, wie diese Techniken angewendet werden, dürften nicht an den Markt delegiert werden. Und nichtwissenschaftliche Erkenntnisformen sollten mehr Gewicht bekommen, etwa das Spielerische, das Erfahrungs- und das Kunstwissen.

JÜRGEN SCHARBERTH



Roberto Meneghini

Die Kaiserforen Roms

Philipp von Zabern, Darmstadt 2015. Aus dem Italienischen von Dagmar Penna Miesel. 112 S., € 29,95

Seit die Ausgrabungen römischer Foren in den 1980er Jahren wiederaufgenommen wurden, hat sich eine Fülle neuer Erkenntnisse darüber angesammelt. Der Archäologe Roberto Meneghini fasst die einschlägigen Forschungsergebnisse aus mehr als zwei Jahrzehnten wissenschaftlicher Arbeit zusammen. Das Buch enthält detaillierte Beschreibungen, Grafiken und Grundrisse der Foren. Pro Kapitel widmet sich der Autor einem Bauwerk und unternimmt dabei ausführliche und mit viel Zahlenmaterial versehene Exkurse – nicht nur in die Architektur, sondern auch in die Geschichte. Meneghini setzt bei seinen Lesern historische Kenntnisse voraus und verwendet sehr häufig Fachbegriffe aus der Architektur, von denen immerhin einige im Glossar am Ende des Buchs wiederzufinden sind. Sachkundige können mit dem Werk ihr Wissen vertiefen; Laien hingegen ist von der Lektüre abzuraten.

MAIKE KOMOREK



Anette Michels (Hg.)

Wissenschaftlerleben mit Kunst – Druckgraphik der Sammlung Heide und Wolfgang Voelter

Museum der Universität Tübingen, Tübingen 2014. 165 S., € 19,90

Heide Voelter, Tierärztin und Redakteurin, und ihr Mann Wolfgang, Biochemiker, haben fast 150 Grafiken gegenständlicher Kunst zusammengetragen – mit Werken von Max Beckmann bis Horst Janssen, vom Expressionismus bis zur zeitgenössischen Kunst. Die Sammlung vermachten sie nun der Universität Tübingen, welche diese in einer Ausstellung zeigte. Das vorliegende Buch ist der Begleitband dazu. Es ordnet die Grafiken kunsthistorisch ein und stellt ausgewählte Künstler vor. Hervorzuheben ist Friedrich Meckseper, der 1982 im Auftrag des Nobelkomitees die Mappe »The Nobel Prizes« erstellte, in der alle ausgezeichneten Disziplinen symbolisch dargestellt sind. Studierende haben das Bildmaterial erschlossen und die meisten Katalogtexte verfasst. Die Gestaltung ist ansprechend, die Grafiken erscheinen oft seitenfüllend in hoher Druckqualität. Ein bebildertes Werksverzeichnis nebst Autorenliste, Künstlerbiografien und Literaturhinweisen runden den guten Eindruck ab.

SIGRID SPIES



Frans de Waal

Der Mensch, der Bonobo und die Zehn Gebote

Moral ist älter als Religion

Aus dem Englischen von Catherine Hornung

Klett-Cotta, Stuttgart 2015

365 S., € 24,95

PHILOSOPHIE

Alles Gute kommt von unten

Der niederländische Verhaltensforscher Frans de Waal versucht sich an einer naturalistischen Erklärung der Moral.

Schon in Platons frühem Dialog »Euthyphron« stellt Sokrates (5./4. Jh. v. Chr.) die Frage, ob es eine von den Göttern unabhängige Moral geben könne. Und so wie der griechische Philosoph das seinerzeit bejahte, so ist auch der niederländische Verhaltensforscher Frans de Waal davon überzeugt, dass Gott nicht als Urheber nötig ist. Dabei geht es ihm allerdings nicht so sehr darum, das Wesen der Moral zu verstehen, wie es bei Platon der Fall war, als vielmehr ihre Herkunft zu beleuchten.

De Waal hält den Menschen von Natur aus für gut und glaubt nicht an die von ihm »Fassadentheorie« genannte Vorstellung, wonach Moralität von außen, oder religiös gedacht, »von oben« auf den Menschen aufgesetzt sei und sozusagen nur eine dünne Schicht bilde, unter der sich die brutale und gefühllose Natur verberge. Wie der deutsche Biologe und Philosoph Ernst Haeckel (1834–1919) wendet er sich damit gegen den ethischen Dualismus Immanuel Kants und dessen Trennung von theoretischer und praktischer Vernunft. Er versucht nachzuweisen, dass prosoziales Verhalten bereits bei Tieren in Erscheinung tritt, und bietet hierfür eine Fülle an Beispielen bei Bonobos und Schimpansen. Seine Versuchsergebnisse belegen, dass die Affen sich gegenseitig helfen, einfühlbar sind und ein Gespür für Gerechtigkeit besitzen, was sich etwa bei Streitigkeiten oder auch bei der Verteilung von Nah-

rung zeigt. De Waal postuliert, moralisches Verhalten entstehe nicht auf einer »abstrakten geistigen Ebene, sondern durch soziale Interaktionen«. Mit dieser Auffassung wendet er sich explizit gegen namhafte Biologen, angefangen bei Darwins Mitstreiter Thomas Henry Huxley (1825–1895), welcher der Meinung war, dass die Natur niemals etwas Gutes hervorbringen könne, bis hin zu dem schillernden Evolutionsforscher Richard Dawkins.

Ein wichtiges Fundament für ethisches Verhalten sieht der Autor in den Gefühlen, denn es sind »zuerst die Emotionen, welche unsere moralischen Entscheidungen bestimmen; erst dann unternehmen wir den Versuch, diese Entscheidungen rational zu begründen«. Die Tatsache deutlich zu machen, dass auch Tiere sich in andere hineinversetzen können, ist ein zentrales Anliegen de Waals. Ihm zufolge bildet die Fähigkeit, die Bedürfnisse anderer zu erkennen, eine wesentliche Grundlage ethischen Verhaltens – neben Impulskontrolle, Hierarchie und der Angst vor Bestrafung.

Die Religion ist für de Waal somit nicht die Erfinderin der Moral, sondern »vielmehr haben die verschiedenen Religionen universelle menschliche Werte übernommen, sie in ihre jeweiligen Erzählungen eingebettet und so zu ihren eigenen gemacht«. Obwohl der Autor der Religion abspricht, ethisches Verhalten erstmalig hervorge-

bracht zu haben, ist er weit davon entfernt, sie in toto zu verurteilen. Er hält entsprechende Diskussionen für sinnlos, da wir nie wissen könnten, wie Moral ohne Religion aussehen würde. Es existiere weltweit keine areligiöse Kultur – und damit kein Vergleich zwischen ihr und religiösen Gesellschaften, was uns laut de Waal »zu denken geben sollte«. Vehement spricht er sich darüber hinaus gegen einen militanten Atheismus aus, denn »was hat der Atheismus denn zu bieten, das einen Kampf wert wäre?«. Neoatheisten vom Schlag eines Richard Dawkins hält er gar für traumatisiert.

Auch dem Vorschlag, die Wissenschaften an Stelle der Religion zu setzen, erteilt er eine klare Absage, da Wissenschaft per definitionem nichts über Werte aussagen könne. De Waal bezweifelt, »dass die Wissenschaft und die naturalistische Weltanschauung diese Lücke füllen und zu einer Inspiration des Guten werden könnten«. Er ist davon überzeugt, dass sowohl Naturwissenschaft als auch Religion nötig sind, um alle Bereiche des menschlichen Lebens zu erfassen. Überhaupt sieht er nicht die Religion als Feind der Wissenschaft, sondern den Dogmatismus jeglicher Couleur.

Der Autor meint, dass Religion mehr als nur Glaube bedeute und einen tiefen Einfluss auf unser Leben habe. Aus diesem Grund ließe sie sich zumindest so lange nicht abschaffen, bis ein adäquater Ersatz für sie gefunden sei. Diesen sieht de Waal – wenn überhaupt – im Humanismus, also in der Kraft der Vernunft. Damit steht er eindeutig in der Tradition David Humes (1711–1776), der zum einen gezeigt hat, dass die menschliche Moral nicht allein rational begründet werden kann, sondern in der Gefühlswelt wurzelt, zum anderen aber des Verstands als ordnender Instanz bedarf.

De Waals Buch ist spannend zu lesen, informativ, intelligent und undogmatisch. Wer es nicht schon vorher getan hat, wird spätestens nach der Lektüre die Tiere mit anderen Augen sehen. All jenen, die in der Nähe des Menschen zu den Tieren eine Abwertung unserer

Spezies sehen, sei gesagt, dass sie in Wahrheit eine Aufwertung der Tiere bedeutet, die angesichts dessen, was wir diesen täglich antun, dringend erforderlich ist.

So wie seinerzeit Sokrates und sein Gesprächspartner Euthyphron auseinandergingen, ohne die Frage nach der Moral beantwortet zu haben, so geht

auch aus diesem Buch hervor, dass es keine Letztbegründung von Moral geben kann. Warum materielle Strukturen im Zuge der Evolution solche Werte wie Gerechtigkeit oder gar Selbstlosigkeit entwickelten, bleibt auch nach der Lektüre ein tiefes Geheimnis. Unter anderem auf Grund des, trotz allem, »ungeheuren Abstandes zwischen dem zi-

vilisierten Menschen und dem Tier« (Huxley), erscheint gerade die menschliche Moral als eigene und letztlich nicht ableitbare Welt.

Eckart Löhr

Der Rezensent hat Philosophie und Germanistik studiert. Er lebt in Essen und arbeitet unter anderem als Fachjournalist.



Bernhard Mackowiak

Die Erforschung der Exoplaneten

*Auf der Suche nach den Schwesterwelten
des Sonnensystems*

Kosmos, Stuttgart 2015

175 S., € 24,99

ASTRONOMIE

Zweite Erde in Sicht?

Die Exoplanetenforschung macht gewaltige Fortschritte - und spürt immer mehr Gesteinsplaneten ähnlich unserem auf.

Gibt es erdähnliche Planeten außerhalb unseres Sonnensystems? Wenn man den neuesten Ergebnissen der Exoplanetenforschung glaubt, dann ist die Entdeckung solcher Welten, auf denen auch Leben existieren könnte, nur eine Frage der Zeit. Wissenschaftsjournalist Bernhard Mackowiak, der sich auf Astronomie, Raumfahrt und Geowissenschaften spezialisiert hat, unternimmt im vorliegenden Buch zunächst eine Reise durch unser eigenes Sonnensystem, bevor er sich der Suche nach Schwesterwelten der Erde widmet.

Chronologisch sortiert fasst der Autor die Geschichte der Astronomie knapp zusammen – von der Antike bis heute. Mit verständlichem Schreibstil sowie zahlreichen Tabellen, Fotos, Grafiken und einem Glossar der wichtigsten Fachbegriffe erleichtert er seinen Lesern den Einstieg in die Materie. Die erste wissenschaftlich anerkannte Entdeckung eines Exoplaneten, der einen sonnenähnlichen Stern umrundet, ge-

lang 1995 den Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz. Seither wurde die Existenz von rund 2000 weiteren Exemplaren bestätigt; täglich kommen neue hinzu. Um solche fernen Welten aufzuspüren, haben die Astronomen verschiedene Nachweismethoden entwickelt, die Mackowiak ausführlich beschreibt. Dabei bringt er seine Leser auf den aktuellen Stand der technischen Entwicklung erdgebundener und nicht erdgebundener Teleskope.

Viele Exoplanetensysteme, legt der Autor dar, unterscheiden sich sehr stark von unserem eigenen. Aus methodischen Gründen sind in erster Linie Systeme bekannt, in denen gewaltige Gasriesen ihren Stern sehr eng umrunden. Man weiß aber auch: Fast 40 Prozent der uns benachbarten sonnenähnlichen Sterne haben so genannte Supererden als Begleiter, die sich in der habitablen Zone bewegen – dort also, wo flüssiges Wasser dauerhaft auf der Planetenoberfläche existieren kann. Als Supererde

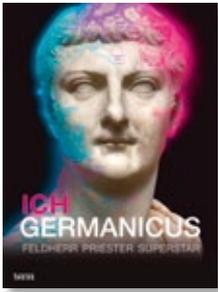
bezeichnen Astronomen einen Typ von Gesteinsplaneten, der nach gängigen Definitionen ein- bis zehnmal so massereich wie die Erde ist. Eine der spannendsten Fragen lautet, ob sich in der Atmosphäre eines solchen Himmelskörpers vielleicht Spuren von Leben nachweisen lassen. Die Anwesenheit von flüssigem Wasser, Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und vor allem natürlich Sauerstoff wären Indizien für eine außerirdische Biosphäre.

Um eine Vorstellung von bereits entdeckten Planetentypen und deren Sonnen zu vermitteln, beschreibt Mackowiak ausgewählte Exoplanetensysteme in Form von Steckbriefen. Darin geht er unter anderem auf technische Daten ein, etwa Masse, Durchmesser und Temperatur des jeweiligen Himmelskörpers, und vergleicht die Eigenschaften der fernen Planeten mit denen der Welten in unserem Sonnensystem.

Zum Schluss wagt der Autor einen Blick in die Zukunft der Exoplanetenforschung. Er behandelt künftige Raumfahrtmissionen, die ferne Sternbegleiter aufspüren sollen, und zeigt Möglichkeiten auf, wie sogar Hobbyastronomen solche Himmelskörper entdecken können. In einem kurzen Kapitel widmet er sich der spannenden Frage, wie Leben auf anderen Planeten aussehen und wie es sich dort entwickelt haben könnte. Ein empfehlenswertes Buch für alle, die an diesem Forschungsgebiet der modernen Astronomie interessiert sind.

Karl Veckes

Der Rezensent ist Informatiker und arbeitet als freier Wissenschaftspublizist und Technologieberater in Freising bei München.



Stefan Burmeister, Joseph Rottmann (Hg.)

Ich Germanicus

Feldherr, Priester, Superstar

Theiss, Darmstadt 2015

112 S., € 19,95

GESCHICHTE

Roms Hoffnungsträger

Der römische Feldherr Germanicus zog für das Imperium gegen die Nordbarbaren. Obwohl militärisch nicht immer erfolgreich, war er allseits beliebt.

Das vorliegende Buch begleitet die gleichnamige Ausstellung im Museum und Park Kalkriese, die vom 20. Juni bis 1. November dauert. Schon das moderne Titelbild mit der optisch veränderten Marmorbüste des Nero Claudius Germanicus (15 v. Chr.–19 n. Chr.) besticht. Das Haupt des römischen Feldherrn ist umrahmt von türkisen, lila und rosa Neonfarben. Auf der Stirn zeichnen sich diffuse, landkartenähnliche Strukturen ab. Spiegeln sie Germanicus' Visionen künftiger Feldzüge wider?

Im Kontrast zum verspielten Cover orientieren sich die Autoren der 14 Textbeiträge (darunter Historiker, Archäologen und Wehrtechnikspezialisten) an harten Fakten. Sie verknüpfen antike Schriftquellen, Bodenfunde und aktuelle Forschungsergebnisse zu einer Gesamtschau der römischen Germanenpolitik in den ersten beiden Jahrzehnten nach der Zeitenwende. Die Autoren befassen sich unter anderem mit Heereslogistik und militärischer Infrastruktur am Rhein, insbesondere in der Zeit nach den erfolgreichen Feldzügen von Tiberius (42 v. Chr.–37 n. Chr.) und Drusus (38–9 v. Chr.). Ebenso diskutieren sie, wo sich die Varusschlacht mutmaßlich zugetragen hat – ein nach wie vor umstrittenes Thema, auch wenn vielen Forschern inzwischen das im Osnabrücker Land gelegene Kalkriese als Favorit gilt.

Der Fokus des Buchs liegt allerdings auf jenem Feldherrn, dessen Büste den Einband ziert und der den Ehrennamen »Germanicus« von seinem Vater Drusus geerbt hatte. Von Kaiser Tiberius adoptiert, galt er nach glänzender Ämterkarriere in Rom als dessen viel versprechender Nachfolger. Zunächst musste er sich jedoch auf Feldzügen in die elbgermanischen Gebiete bewähren, die die Niederlage der Varusschlacht rächen sollten. Obgleich der fähige, oft risikofreudige Heerführer über eine gewaltige Streitmacht und 1000 Schiffe verfügte, gelang ihm der endgültige Sieg über die germanische Koalition des Cheruskerfürsten Arminius auch nach drei Kriegsjahren nicht. Nordische Kälte, schwere Unwetter, Morast und Sturmfluten behinderten das

Heer und schwächten den Kampfgeist der Legionäre. Als Verdienst konnte sich Germanicus allerdings die Bestattung mutmaßlich römischer Gefallener der Varusschlacht anrechnen, ebenso wie die Rückgewinnung zweier Legionsadler, die 16 n. Chr. mit einem Triumphzug in Rom gefeiert wurde.

Der Militärstrategie Tiberius erkannte die Nutzlosigkeit der Kämpfe und schickte seinen Feldherrn auf wichtige diplomatische Missionen in den Osten des Reichs. In Griechenland wurde Germanicus 17 n. Chr. Olympiasieger im Tethrippon (Wagenrennen). Im syrischen Antiochia erkrankte er jedoch unerwartet und starb unter nie aufgeklärten Umständen. Sein plötzlicher Tod stürzte das ganze Reich in tiefe Trauer, denn er war bei Heer und Volk ungewöhnlich beliebt gewesen. Obwohl nicht immer siegreich, überzeugte er – im Gegensatz zu Tiberius – mit natürlichem, konziliantem Wesen und besonderem Charisma.

Nach Germanicus' Tod musste Tiberius die Kaisernachfolge neu regeln. Staunend erfährt der Leser, welche Möglichkeiten sich einer aristokratischen Patchworkfamilie wie der des Tiberius hierbei boten. Adoption, Ehescheidung, Verbannung, Mord und Hungertod waren legitime Mittel; sie wurden hart und skrupellos eingesetzt. In diesem »Sündenbabel« hatten Germanicus und seine Gattin Agrippina maior eine ruhmreiche Ausnahme gebildet. Mit ihrer lebenslangen Treue und ihren neun Kindern, von denen sechs überlebten, waren sie ein Vorbild römischer häuslicher Tugend.

Historisch Interessierte aller Altersstufen werden »Ich Germanicus« mit Gewinn lesen. Dazu tragen nicht zuletzt das reiche Bild- und Kartenmaterial und die weiterführenden Literaturangaben bei. Das Abbildungsverzeichnis wünscht man sich allerdings übersichtlicher.

Eva Grabow

Die Rezensentin ist promovierte Archäologin und freie Mitarbeiterin am Archäologischen Museum der Westfälischen Wilhelms Universität Münster.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen

Unberechtigte Kritik

Der Systemökologe Gunnar Brandt berechnete die Ursachen des Untergangs der Osterinsel-Kultur neu (»Das Rätsel der Rapa Nui«, Forschung aktuell, August 2015, S. 12).

Fabian Cundano Maltez, Erfurt: Die Darstellungen Jared Diamonds als »plakativ« zu kritisieren, erscheint mir von Seiten der Autoren dieses Artikels mehr als unangemessen. Im Gegenteil, Diamond wurde mehrfach für seine interdisziplinären Analysen unter Verknüpfung von Archäologie, Biologie, Geschichte und selbst Linguistik ausgezeichnet (zum Beispiel mit dem »Dickson Prize in Science« im Jahr nach der Herausgabe von »Kollaps«). Seine engen Kontakte und sein breites Wissen über verschiedene Ureinwohnervölker auch der heutigen Zeit sind herausragend. Inwiefern die im Artikel angesprochene Popularität seiner Bücher den Wert seiner Arbeiten schmälern sollte, ist mir ein Rätsel.

Zum Zweiten zeigen gerade die Arbeiten Diamonds den großen Schwachpunkt des Analysemodells dieses Bei-

trags: Die Autoren verwenden für den Zeitpunkt der ersten Besiedlung der Osterinsel bis hin zum Zusammenbruch das gleiche mathematische Modell – gesellschaftliche Umwälzungen, kulturelle Veränderungen, Lernprozesse (zum Beispiel beim Anblick schwindender Baumbestände oder bei der Realisierung des Rattenproblems) und hieraus resultierende Veränderungen des Zusammenspiels von Mensch und Natur bleiben weitgehend unberücksichtigt. So unterlag beispielsweise das Verhältnis Ackerbau-Holzverbrauch-Bevölkerungswachstum maßgeblich dem Ressourcenverbrauch zum Bau der enormen Monumente, welcher wiederum durch die vorherrschende Regierungsform bestimmt wurde – und gerade hier ergaben sich im Lauf der Besiedlungsgeschichte große Veränderungen. Die Betrachtung des Zusammenspiels von nur statischen zehn Parametern erscheint mir für die komplexen Vorgänge im Lauf von sechs Jahrhunderten schlicht zu einfach, zumal viele Faktoren/Berechnungen nach Angaben der Autoren so lange angepasst worden sind, bis sie eben zu den belegten Funden passen.



Gewaltige Steinskulpturen, die so genannten Moai, auf Rapa Nui sind für Touristen der Grund, die Osterinsel zu besuchen; im Übrigen ist die Landschaft karg und wenig anziehend.

Eine tiefer gehende Auseinandersetzung mit den Analysen Diamonds an Stelle von plumper Kritik hätte der hier vorgestellten Arbeit der Wissenschaftler sicher gutgetan.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Dr. Gerhard Trageser, E-Mail: redaktion@spektrum.de

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Assistentin des Chefredakteurs: Ann-Kristin Ebert

Redaktionsassistenz: Barbara Kuhn

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirken mit:

Dr. Werner Gans, Dr. Claudia Hecker, Dr. Susanne Kuhlmann-Krieg, Dr. Sebastian Vogel, Prof. Dr. Klaus Volkert.

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 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (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: DE5260100700022706708, BIC: PBNKDEFF
Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBIO) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtanzeigenleitung: Michael Zehentmeier, 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. 36 vom 1.1. 2015.

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 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: © 2015 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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 eingesandene Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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



Antwort des Autors Gunnar Brandt: Vielen Dank für die Kommentierung des Artikels, den Sie keinesfalls als Generalkritik an Jared Diamonds Werk verstehen sollten, denn Wissenschaft lebt von der Kontroverse! Wie Sie schätze ich Diamond sehr für seinen interdisziplinären Ansatz und als außergewöhnlichen Autor. Allerdings erfährt seine im Buch »Kollaps« veröffentlichte Geschichte eines artikulierten Ökozids unter Archäologen mit großer Erfahrung auf der Osterinsel derzeit kaum Zustimmung, weil die aktuelle Datenlage einen derartigen Verlauf nicht stützt.

Zu Ihrem zweiten Punkt: Ein Modell ist per Definition eine (starke) Vereinfachung der Realität und berücksichtigt nie alle Details. Modelle werden daher häufig ob ihrer Einfachheit kritisiert, weil angenommen wird, dass komplexe Modelle bessere Ergebnisse liefern würden. Das Gegenteil ist allerdings oft der Fall! Ein komplexeres Modell zu entwickeln, ist nur dann sinnvoll, wenn man genaue Kenntnisse über die zusätzlich notwendigen Annahmen und Prozesse besitzt, denn mit einem komplexen Modell und hinreichend Freiheit bezüglich der Annahmen und Randbedingungen kann man jede beliebige Datenreihe simulieren, ohne das Systemverständnis zu verbessern.

Es ist natürlich sehr unwahrscheinlich, dass sich das von Ihnen angesprochene Verhältnis über die Jahrhunderte gar nicht änderte, aber nicht einmal Diamond kann genaue und belastbare Angaben zum zeitlichen Verlauf wichtiger Parameter des Mensch-Umwelt-Systems Osterinsel machen. Darüber hinaus präsentieren Terry Hunt und Carl Lipo in ihrem Buch »The Statues that Walked: Unraveling the Mystery of Easter Island« eine überzeugende Alternative zu Diamonds These des ressourcenhungrigen Statuenkults. In einer solchen Situation beachtlicher Unsicherheit bezüglich der Modellannahmen haben wir uns entschieden, mit einem eher einfachen, aber dafür robusten Modell zu arbeiten, um die gesicherten Erkenntnisse der Geschichte der Osterinsel nachzuvollziehen.

Holger Bauer, Moers: Das Foto mit den Moai auf S. 13 wurde beschrieben, ich zitiere: »Gewaltige Steinskulpturen, die so genannten Moai, blicken weit über das Meer.« Das stimmt so nicht, diese Steinskulpturen schauen mit ihrem Gesicht landeinwärts. Eines der Mystereien dieser Kultur.

Antwort der Redaktion: Herr Bauer hat Recht. Bis auf wenige Ausnahmen blicken die Moai landeinwärts zu den Ansiedlungen.

Falsche Signalauswertung?

Der Paläoklimatologe Tas van Ommen berichtete über eine Zeitverzögerung von rund 200 Jahren zwischen Klimaschwüngen auf der Nord- und Südhalbkugel (»Norden stößt Klimaschaukel an«, Forschung aktuell, August 2015, S. 15).

Michael Jungnickl, Neunkirchen am Brand: Im Artikel wird behauptet, das Klima in Grönland führe zu einem Klimawechsel in der Antarktis. Ich bin der gegenteiligen Meinung. Auf S. 16 befindet sich eine Grafik mit einem Rechteck und einem Sägezahn als Verlauf der Temperatur für die Arktis und die Antarktis. Über den Temperaturverlauf der Antarktis lässt sich ein Schmitt-Trigger mit Hysterese legen. Das Signal entspricht dann dem Temperaturverlauf in der Arktis. Auffällig dabei ist, dass sich das Klima in Grönland sprunghaft ändert. Das heißt, es ist entweder instabil oder wird durch Änderungen in der Meeresströmung von außen gelenkt.

Neuer Pfad zu den Wurzeln der Kognition

Schon kleine Kinder kooperieren in Situationen miteinander, stärker und anders als es Affen tun, berichtet Gary Stix (»Gute Zusammenarbeit«, Mai 2015, S. 52).

Peter Wolter, Lübeck: Ein hohes Lob dem Anthropologen Michael Toma-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

sello, der einen neuen Pfad zu den Wurzeln der Kognition zu beschreiten wagt. Kooperation als evolutionäre Komponente menschlicher Kulturentwicklung wird wahrscheinlich nicht unwidersprochen bleiben, implementiert es doch systemische Grundlagen, die von einem Teil der Sozialwissenschaftler (und auch der Laien) als »ideologischer« Irrweg angesehen werden dürften. Das junge Forschungsgebiet wird noch viel Arbeit erfordern, und man darf gespannt sein, wann die Zusammenhänge der Kooperation sich zu konkretisieren beginnen. Es bleibt dann zu hoffen, dass auch die Ursachen der Kooperationsverweigerung, die der Menschheit jahrtausendlang so viel Leid aufluden, näher beleuchtet und erklärt werden können.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

AM TANNHÄUSER TOR

VON ERIC GARSIDE

Ric Williamson lag im Gras und sah zu, wie über ihm die Sterne dahinzogen. Daraus schätzte er, dass die »Gaia« ungefähr auf halbem Weg zwischen Saturn und Uranus angelangt war.

»Ric, eine Frage«, kündigte das kleine grauhäutige Wesen an, das neben ihm lag.

»Schieß los, Norbert.«

»Was wird aus meinem Bewusstsein, wenn ich tot bin?«

Ric grinste und verschränkte die Hände hinter dem Kopf.

»Na, nichts. Das bedeutet tot nun mal.«

»Habe ich etwas getan, was dich ärgert? Brauchst du mich nicht mehr?«

Ric lachte auf.

»Aber nein, Norbert. Wir werden dich immer brauchen. Dein Neudruck wird beginnen, sobald unser Mutterschiff Gaia das Tor passiert hat.«

Dann verging ihm das Lachen. Das war nicht das erste Mal, dass er einen Synthetic auf den Tod vorbereiten musste, aber trotzdem fiel es ihm schwer, das digitale Herz des Freunds zu brechen.

»Wie viele Male bin ich gestorben, Ric?«

»Elf.«

Wellen von Trauer und Verwirrung überschwemmten Norberts synthetischen Geist.

»Ich will nicht sterben, Ric.«

»Streck deine Hand aus«, antwortete

er, griff tief in den Boden und riss eine Hand voll Erde heraus. »Weißt du, was das ist? Der Tod. Stücke toter Sterne, toter Planeten; Spuren von Pflanzen, Reste von Tieren. Alle Dinge sterben, Norbert. Aber in ihrem Tod schlägt neues Leben Wurzeln.«

Der Synthetic knetete das Häufchen Erde mit seinen Fingern.

»Unser Leben und unser Tod liegen in deiner Hand, Norbert. Du musst zurückbleiben und das Sprungtor zerstören, sobald die Gaia drüben angekommen ist. Wenn die Schwarze Masse herausfindet, wohin wir verschwunden sind, kann sie uns sonst folgen.«

Ohne den Blick von dem Erdklumpen abzuwenden, antwortete sein Freund schlicht: »Ich verstehe.«

Norbert kletterte die Leiter zum Cockpit seines Raumjägers hinauf, dicht gefolgt von dem Menschen. Während er sich anschnallte, holte Ric etwas aus seiner Hosentasche. An einer kurzen Plastikschnur baumelte ein seltsam geformtes Stück Metall, das er feierlich in Norberts Hand legte.

»Das ist ein Glücksbringer.«

»Aber du hast mir gesagt, an Glück glauben nur Leute, die den Zufall persönlich nehmen.«

Norberts stoischer Blick begegnete einem letzten spöttischen Zwinkern, bevor sich die Pilotenkapsel schloss.

»Denk manchmal an mich, Norbert«, schrie Ric. Seine Stimme drang kaum durch die Hülle.

Das mondgroße Mutterschiff schlingerte auf das Sprungtor zu. Strahlen aus reinem Chaos schossen in alle Richtungen, als es aktiv wurde. Ein gleißender Lichtblitz – und die Gaia war verschwunden. Während ihre Spur verblasste, erwachte der Bordcomputer im Raumjäger.

PRIMÄRZIEL ERREICHT; GAIA HAT DEN SEKTOR VERLASSEN.

NEUES PRIMÄRZIEL VORBEREITET: ZERSTÖRE DAS TANNHÄUSER TOR.

Die Waffensysteme des Raumjägers waren nun scharf, und Norbert ging an die Arbeit. Das Tor war riesig. Allein der Flug um seinen Rand dauerte jedes Mal fast eine Stunde, und die Zerstörung musste sehr gründlich erfolgen. Zuerst kamen die Schildgeneratoren dran, dann die Backup-Reaktoren, als Nächstes die Primärreaktoren und schlussendlich die Datenzentren.

Eine Explosion nach der anderen markierte den Rundkurs, und jede Runde ließ weniger vom Tor übrig. Nach langen, aufreibenden Arbeitsstunden detonierte das letzte Datenzentrum in einem kurzen Flammenmeer.

PRIMÄRZIEL ERREICHT; DAS TANNHÄUSER TOR IST DEAKTIVIERT.

TABULA RASA VORBEREITET.

Mit angstverzerrtem Gesicht sah der Synthetic auf den Monitor. Die manuelle Steuerung des Jägers war nun lahmgelegt, und der Autopilot hatte Kurs auf die Feuerhölle genommen. Furcht beherrschte Norberts Emotionskern so stark, dass dieser sich automatisch abschaltete, um eine Überlastung zu verhindern.

REAKTIONSHEMMER DEAKTIVIERT;
ÜBERLASTUNG IN UNGEFÄHR FÜNF
MINUTEN.

Das Emotions subsystem des synthetischen Humanoiden ging wieder online, und erneut wurde Norbert seine Sterblichkeit bewusst. Panisch versuchte er eine Steuereinheit nach der anderen zu aktivieren, um den drohenden Untergang abzuwenden. Jeder Knopf blockierte, jeder Joystick hingegen bewegte sich widerstandslos, doch ohne Wirkung zu zeigen.

Mutlos ließ der Synthetic den Kopf hängen. Da fiel sein Blick auf das Metallstück, das Ric ihm zum Abschied geschenkt hatte und das ihm nun auf der Brust baumelte. Er ließ die Finger über Zacken und Kerben gleiten. Es fühlte sich an wie ...

Norbert hatte eine Eingebung. Er fasste unter seinen Sitz und schob die Bodenplatte zurück. Darunter lag der Deckel des manuellen Notschalters. War die Aussparung dort ein Schlüsselloch? Er steckte das Metall hinein, schloss die Augen und drehte es vor-

sichtig nach links. Ein leises Klicken ertönte. Der Deckel sprang auf.

Darunter kam ein ziemlich großer roter Knopf zum Vorschein, umgeben von Warnhinweisen und mit einem grell leuchtenden »Abwurf Thermonukleares Triebwerk« beschriftet. Norbert schlug mit aller Kraft darauf ein, und im nächsten Moment spürte er, wie ein Ruck durch seinen Jäger ging. Für einen Sekundenbruchteil flackerte das Licht, dann sprang der Reserveantrieb an.

ALLE SYSTEME AUF RESET!

Ein Mensch hätte nun wohl Freudenstränen vergossen, doch dem Synthetic fehlten die dafür notwendigen biomechanischen Bausteine. Die Notabschaltung hatte alles Überflüssige deaktiviert – auch die Steuerungsautomatik. Norbert hatte wieder das Kommando über sein Schiff.

Seine Überlebenschance war zweifellos geringer als gering. Vielleicht besaß der Raumjäger noch genug Energie, um der Schwarzen Masse zu entkommen, aber was dann? Und wozu? Und wie lange?

In diesem Moment erkannte der Synthetic den Sinn des Lebens.

Leben wollen. Ganz einfach.

Norbert war nicht länger bloß ein Gebilde aus Drähten, Dioden und synthetischen Emotionen: Er war Leben. Mit festem Griff packte er die Steuerung, richtete den Blick auf die Sterne und wagte sein Glück. 🌠

DER AUTOR

Eric Garside unterrichtet Softwareentwicklung. Er liebt Wissenschaft, Technik und Astronomie.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 523, S. 632, 30. Juli 2015

Das Rätsel der Dunklen Materie

Das Universum hat mehr zu bieten als nur die leuchtende Materie, da sind Astrophysiker sich sicher. Bei ihrer Suche nach der Natur einer unsichtbaren Komponente konzentrierten sie sich bisher auf ein einziges Teilchen. Möglicherweise verbirgt sich hinter der Dunklen Materie aber eine ganze Teilchenwelt, die mit gewöhnlicher Materie kaum wechselwirkt.

RON MILLER

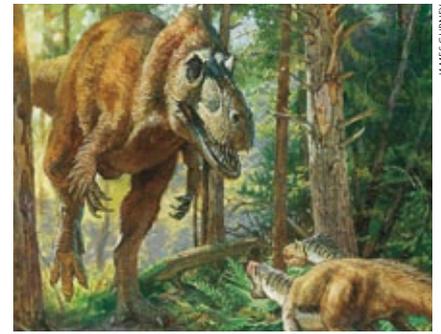


Quantenoptik auf dem Sprung

Wenn Physiker die Wechselwirkungen von Licht und Materie ergründen, ergeben sich oft auch praktische Anwendungen – der Laser ist der wohl größte Erfolg. Doch neue Konzepte aus den Labors in die Industrie zu bringen, ist eine Herausforderung für sich. Was dürfen wir demnächst erwarten?

Versteckter Hörverlust

Pressluftschlämmer, Rockkonzerte und andere Lärmquellen können unser Hörvermögen vorübergehend schwächen. Auf perfide Weise schädigen sie das Gehör aber auch noch, wenn die in üblichen Tests messbare Beeinträchtigung wieder verschwunden ist: über einen bislang unbekanntem Mechanismus.



JAMES GURNEY

Der Ursprung der Tyrannosaurier

Endlich kennen Paläontologen genügend Fossilien, um den Stammbaum der größten Raubdinosaurier zu rekonstruieren. Zu ihnen gehörte eine unvermutete Vielfalt sehr unterschiedlicher, großer wie kleiner Arten. Erst nach 100 Millionen Jahren brachte die Gruppe den berühmten *Tyrannosaurus rex* hervor.



CALIFORNIA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES

Gefährliche Dürre in Kalifornien

Der Sonnenstaat leidet unter der schlimmsten Trockenheit seiner Geschichte. Nur durch extrem tiefe Grundwasserbohrungen lassen sich die Folgen für die Landwirtschaft bisher in Grenzen halten. Die globale Erwärmung verheißt jedoch auf Dauer nichts Gutes.

NEWSLETTER

Möchten Sie immer über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.de/newsletter

JETZT BESTELLEN:
DAS SPEKTRUM-DER-WISSENSCHAFT-ABO
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



1. 54 BIT DRIVER KIT :

Das umfassende Standardset mit Präzisionsschraubeinsätzen enthält 54 ausgewählte 4-mm-Bits.

JAHRES- ODER GESCHENKABO

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger als der Normalpreis. Weitere Vergünstigungen unter: www.spektrum.de/aboplus

+ WUNSCHGESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

+ PÜNKTLICHE LIEFERUNG:

Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



2. Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de



Oder QR-Code per Smartphone scannen und Angebot sichern!



naturejobs
CAREER EXPO | DÜSSELDORF

 **#NJCE15**

REGISTER FOR THE **INAUGURAL** *NATUREJOBS* CAREER EXPO DÜSSELDORF! **26 NOVEMBER 2015**

For the very first time, the *Naturejobs* Career Expo will be in Düsseldorf!

This global career fair and conference offers the perfect opportunity for attendees to:

- **Attend** all conferences and workshops for **free**
- **Meet** employers face-to-face
- Benefit from **one-to-one CV checking**
- **Network** with leading scientific institutions of your interest
- Learn how to **enhance your employability**
- **Maximize** your career prospects

Register today! **bit.ly/njce-dusseldorf**

natureconferences

naturejobs

DER MENSCHEN PLANET

AUFBRUCH
INS ANTHROPOZÄN



VERANTWORTUNG

DIE IDEE EINES
NEUEN ERDZEITALTERS

ENERGIEWENDE

EINE ZUKUNFT OHNE
CO₂-EMISSIONEN

VERSCHWENDUNG

DAS ENDE DER
WEGWERFMENTALITÄT

GDCh

GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER



*»DIE GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER
UND IHRE MITGLIEDER UNTERSTÜTZEN
UND FÖRDERN EINE NACHHALTIGE UND DAUERHAFT
ENTWICKLUNG IN GESELLSCHAFT, WIRTSCHAFT
UND UMWELT. SIE HANDELN STETS AUCH IM BEWUSST-
SEIN IHRER VERANTWORTUNG GEGENÜBER
KÜNFTIGEN GENERATIONEN.«*

Die Wurzeln der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) reichen zurück bis ins Jahr 1867. Damals wurde in Berlin die Deutsche Chemische Gesellschaft gegründet, die nach dem Zweiten Weltkrieg zusammen mit dem 1887 gegründeten Verein Deutscher Chemiker zur heutigen GDCh verschmolz.

Mit mehr als 31 000 Mitgliedern aus Wissenschaft, Wirtschaft und freien Berufen gehört die GDCh zu den größten chemiewissenschaftlichen Gesellschaften der Welt. Sie gliedert sich in 27 Fach-

gruppen, Sektionen sowie weitere Arbeitskreise und Arbeitsgemeinschaften, die spezielle Fachgebiete vertreten. Die rund 9000 Studenten, Doktoranden und Berufsanfänger sind im »JungChemiker-Forum« organisiert.

Die gemeinnützige GDCh hat zum Ziel, die Chemie in Lehre, Forschung und Anwendung zu fördern. Darüber hinaus will sie Verständnis und Wissen von der Chemie sowie von chemischen Zusammenhängen in der Öffentlichkeit vertiefen.

Neben den »Nachrichten aus der Chemie« gibt die GDCh zahlreiche Fachzeitschriften heraus – darunter mit der deutschen und internationalen Edition der »Angewandten Chemie« eine der weltweit renommiertesten überhaupt.

Der »Karl-Ziegler-Preis« und der »Otto-Hahn-Preis« – Letzteren verleiht die GDCh gemeinsam mit der Stadt Frankfurt am Main und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft – zählen zu den höchstdotierten Auszeichnungen für Naturwissenschaftler in Deutschland.

WWW.GDCH.DE

» W I L L K O M M E N I M A N T H R O P O Z Ä N «

IM RAHMEN DER GLEICHNAMIGEN SONDERAUSSTELLUNG
DISKUTIERTEN IN MÜNCHEN EXPERTEN ÜBER DIE ZUKUNFT DER
ERDE. ORGANISIERT WURDE DIE VERANSTALTUNG VON HELMUTH
TRISCHLER (DEUTSCHES MUSEUM) UND KLAUS GRIESAR (GDCH)

Seit Jahren streiten Experten über ein neues geologisches Zeitalter: das Anthropozän. Warum ist das ein Thema für das Deutsche Museum?

Helmuth Trischler: Für uns ist das in der Tat ein ungewöhnliches Thema. Aber wir wollen neue Wege beschreiten. Fast alle unserer Ausstellungen werden innerhalb der nächsten zehn Jahre neu gestaltet. Im Vorfeld dieser großen Erneuerung ist die Anthropozän-Ausstellung für uns ein wichtiges Pilot- und Leitprojekt. Hinzu kommt, dass wir die Expertise dafür im Haus haben. Denn zusammen mit der Ludwig-Maximilians-Universität betreiben wir das international größte Zentrum für Umweltforschung zum Thema Mensch und Gesellschaft, das Rachel Carson Center. Von dort kam ursprünglich auch die Idee für diese Ausstellung. International sind wir damit Pioniere, »Willkommen im Anthropozän« ist weltweit die erste große Präsentation zu diesem Thema überhaupt.

Wie kam es zur Zusammenarbeit mit der Gesellschaft Deutscher Chemiker? Welche besonderen Bezüge zur Chemie gibt es?

Klaus Griesar: Viele Entwicklungen, die für eine neue Erdepoche sprechen, sind chemischer Natur – zum Beispiel die CO₂-Konzentration der Atmosphäre, die Versauerung der Meere oder die vor der Erfindung der Atombombe in der Natur nicht existenten Radionuklide. Daraus ergeben sich – insbesondere für uns Chemiker – große Herausforderungen, etwa hinsichtlich Ressourcenmanagement, Klimawandel oder Energiewende. Hier müssen Industrie und Forschung bei der Lösung von Problemen helfen – etwa bei Stromspeicherung und Energiekonvertierung. Weil wir Innovationen nur im Schulterschluss mit der Gesellschaft umsetzen können, haben wir in der GDCh die Arbeitsgemeinschaft »Chemie und Gesellschaft« gegründet, die einen Dialog mit allen gesellschaftlichen Gruppen anstrebt, darunter Sozialwissenschaftler, Theologen und Umweltverbänden.



B. WACKERBAUER

UMSCHLAGBILD

Plastikmüll findet sich mittlerweile fast überall – auch in scheinbar unberührten Unterwasserwelten. Die Folgen sind unabsehbar, denn es dauert Hunderte von Jahren, bis die Kunststoffe zerrieben und gelöst sind.

Bildnachweis: © Electrolux

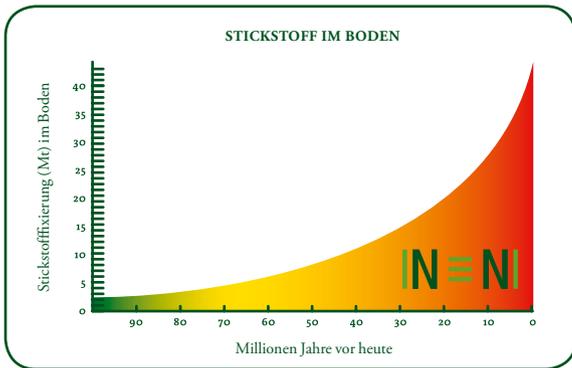
DAS ANTHROPOZÄN

DIE ERDE IN DER MENSCHENZEIT

KONZEPTION: KAI NIEBERT
 GESTALTUNG: KALISCHDESIGN.DE

IN ≡ NI


 VOR **200 000** JAHREN
 HOMO SAPIENS ENTSTEHT



ORGANISMEN DÜNGEN DEN BODEN

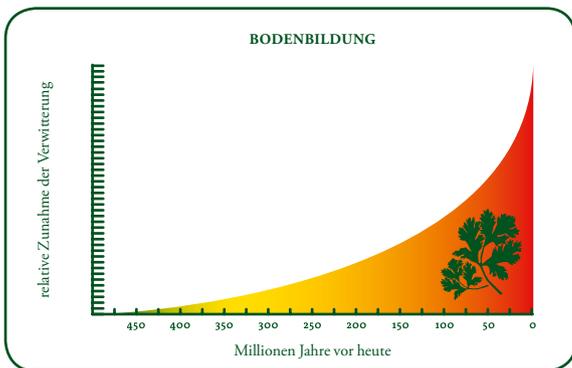
Stickstoff ist für Pflanzen der wichtigste Nährstoff. Erst nachdem die Evolution Stickstoff bindende Bakterien und Pilze hervorgebracht hatte, konnten sich die Landpflanzen massenhaft verbreiten.

VOR **100 MIO.** JAHREN
 STICKSTOFFBINDUNG IM BODEN


 VOR **200 MIO.** JAHREN
 ZEITALTER DER DINOSAURIER



VOR **500 MIO.** JAHREN
 ERSTE LANDPFLANZEN BREITEN SICH AUS

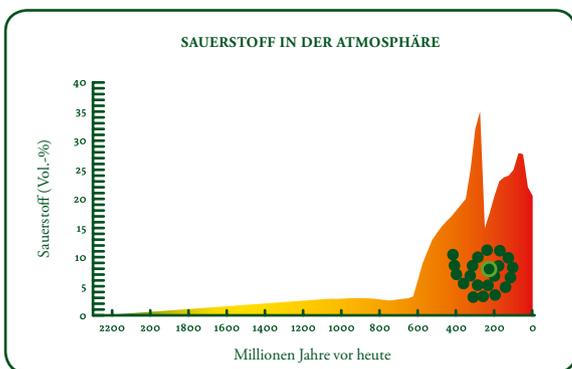


WIE DER BODEN FRUCHTBAR WURDE

Erst durch Verwitterung wurde aus nacktem Fels fruchtbarer Boden. Mit ihren Wurzeln beschleunigten Pflanzen den Verwitterungsprozess und bereiteten so vor 500 Millionen Jahren die Grundlage für ihre eigene Ausbreitung.



VOR **700 MIO.** JAHREN
 ERSTE ALGEN UND WEICHTIERE ENTSTEHEN



DIE SAUERSTOFFREVOLUTION

Als Cyanobakterien vor mehr als 2,7 Milliarden Jahren begannen, Photosynthese zu betreiben, begann die Sauerstoffproduktion. Vor 2,3 Milliarden Jahren nahm die Menge an atmosphärischem O₂ deutlich zu. Die sogenannte Sauerstoffrevolution hatte einen enormen Einfluss auf die Evolution der Organismen.


 VOR **2,3 MRD.** JAHREN
 CYANOBAKTERIEN LASSEN SAUERSTOFFKONZENTRATION STEIGEN

LEGENDE:

-  gefährlich
-  riskant
-  sicher

KLIMAWANDEL	STICKSTOFF IM BODEN	WASSERVERBRAUCH	LANDWIRTSCHAFT	OZEANVERSÄUERUNG
				
CO ₂ -in der Atmosphäre: 400 ppm	121 Mio. Tonnen/Jahr	2600 km ³ /Jahr	bis zu 50 % der nutzbaren Landfläche	Carbonatsättigung im Oberflächenwasser: 2,9 Omega-Einheiten

GEGENWART

DIE MENSCHENZEIT
Für Geologen beginnt ein neues Erdzeitalter, wenn es in kurzer Zeit zu Veränderungen kommt, die weltweit in Sedimenten dokumentiert sind. In den letzten 250 Jahren hat die Menschheit die Erde so intensiv verändert, dass sich ihre Spuren auch in Millionen Jahren noch nachweisen lassen.



VOR **4,5 MRD.** JAHREN
ENTSTEHUNG DER ERDE

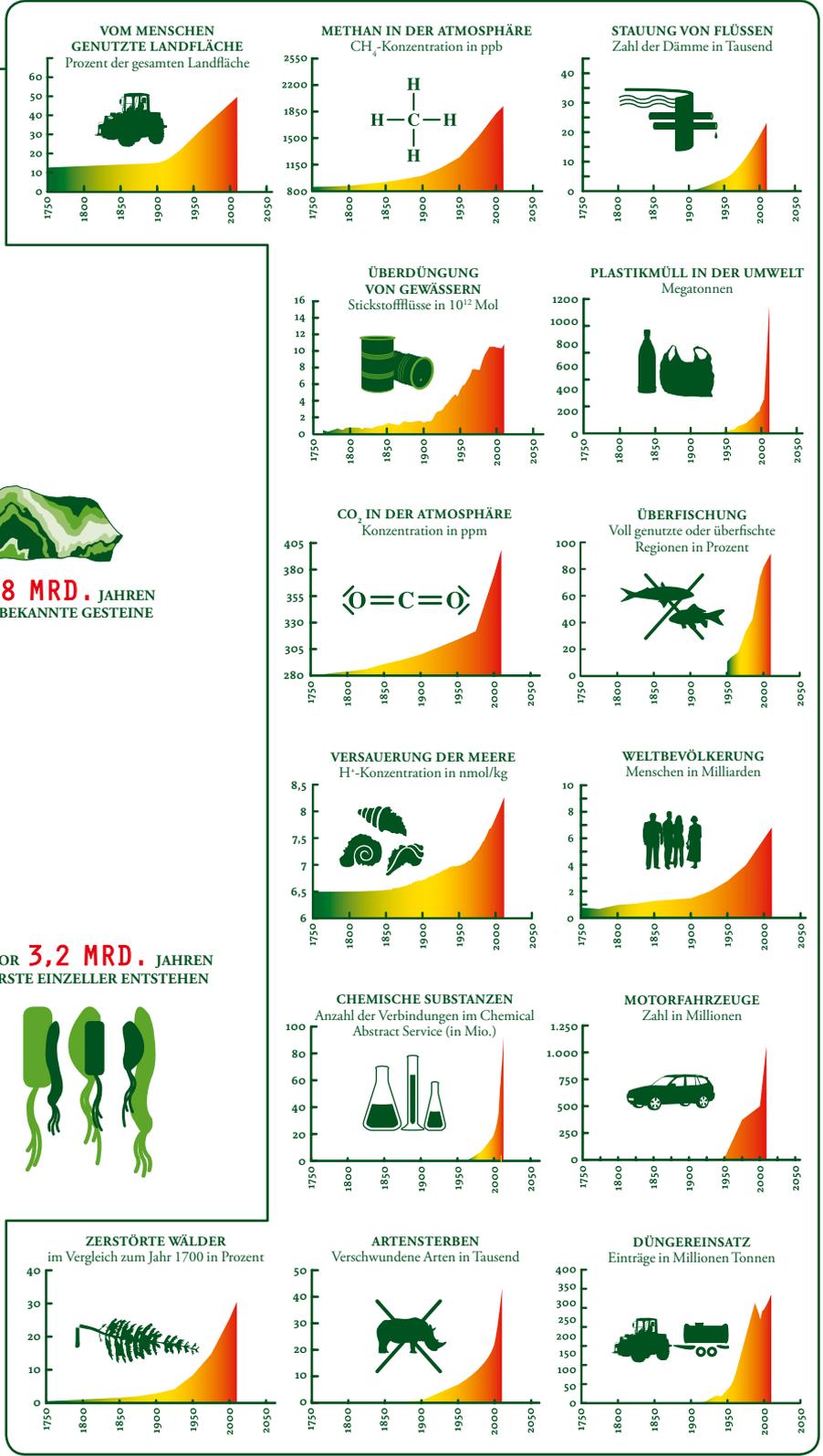


VOR **3,8 MRD.** JAHREN
ÄLTESTE BEKANNTE GESTEINE

VOR **3,2 MRD.** JAHREN
ERSTE EINZELLER ENTSTEHEN



Noch nie hat ein Lebewesen das Gesicht des Planeten Erde in so kurzer Zeit so grundlegend verändert. Mit der Industrialisierung ist der Mensch eine geologische Kraft geworden. Die dramatischsten Veränderungen setzten in den 1950er Jahren ein; seitdem zeigen alle Kurven steil nach oben. Eine neue Epoche hat begonnen: Das Anthropozän – die Menschenzeit.



CHEMISCHE
UMWELTVERSCHMÜTZUNG

PHOSPHOR IM BODEN

BIODIVERSITÄTS-
VERLUST

OZONABBAU



Belastungsgrenze
noch unbestimmt



9,5 Mio. Tonnen/Jahr



>100 Arten
pro Million Arten/Jahr



Ozon in der Stratosphäre:
283 Dobson-Einheiten

DIE PLANETARISCHEN GRENZEN

Um weiterhin sicher leben zu können, müssen wir rasch umdenken und innerhalb bestimmter Grenzen der Umwelt wirtschaften. Forscher halten neun Grenzen für besonders wichtig, mehrere davon sind bereits überschritten – es drohen irreversible Umweltveränderungen.

Schlesinger, W. H. (1997). Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. Academic Press, 458 S. Steffen, W. et al. (2005). Global Change and the Earth System. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 336 S. Ehlers, E. et al. (2006). Earth System Science in the Anthropocene. 10.1007/b137853. Roekström, J. et al. (2009). A safe operating space for humanity. Nature, 461, 471–475.



AUS DEM ALL MÜTEN DIE VON
MIKROORGANISMEN GEFÄRBTEN
SALZFELDER AM UFER DES GREAT
SALT LAKE IN UTAH BEINAHE
SURREALISTISCH AN.

An aerial photograph of a river delta, showing a complex network of channels and distributaries. The water is a mix of brown and white, indicating sediment and possibly snow or ice. The surrounding land is a mix of brown, tan, and green, suggesting a mix of natural and agricultural land. A large, semi-transparent green rectangular box is centered over the image, containing the title text.

ZEITALTER DER VERANTWORTUNG

VIELE FORSCHER FORDERN DIE AUSTRUFUNG EINES NEUEN ERDZEITALTERS. DOCH DIE DEBATTE UM DAS ANTHROPOZÄN IST KEINE REIN AKADEMISCHE. VIELMEHR GEHT ES UM DIE FRAGE, OB WIR POSITIV IN DIE ZUKUNFT SCHAUEN UND LANGFRISTIG AUF DER ERDE LEBEN KÖNNEN.

Eines gönnte sich Astronaut Alexander Gerst möglichst jeden Tag, als er im vergangenen Jahr fünf Monate lang auf der Internationalen Raumstation um die Erde kreiste: Nach getaner Arbeit glitt er kurz vor dem Schlafengehen noch einmal schnell in die Beobachtungskuppel, ließ die Aussicht auf sich wirken und fotografierte und twitterte als »Astro_Alex« seine stärksten Eindrücke an die rasch wachsende Fanggemeinde.

Der damals 38-jährige Geophysiker tauchte mit dem Raumschiff durch magisch wirkende Polarlichter und sah die Atmosphäre als blau schimmerndes und zugleich beängstigend dünnes Band. Auf der Nachtseite unseres Planeten konnte er die Umriss der Kontinente erkennen – und zwar nur deshalb, weil sie von Städten erleuchtet werden. Er musste auch mit ansehen, wie im Gazastreifen Raketen flogen und Bomben explodierten. Ihm war klar: Mit jedem Lichtblitz sterben dort unten Menschen. Mit bloßem Auge erkannte Gerst auf Erdgasfeldern riesige Flammensäulen. Und über den Amazonasregenwald zogen kilometerlange Rauchfahnen. »Brandrodungen unserer grünen Lunge« kommentierte er das Foto, das er an seine Follower schickte. Er sah, wie sich die Schneisen der Landnahme wie Krebsgeschwüre in Wälder fraßen. »Wie würden wir das wohl einem außerirdischen Besucher erklären?«, fragte er und gab gleich die Antwort: »Sie hielten uns für primitive Barbaren, die ihre eigenen Lebensgrundlagen zerstören!«

Der Mensch hat die Erdoberfläche innerhalb von nur fünf bis sechs Generationen großräumig und tiefgreifend verändert. Er entwaldete riesige Regionen, trug Berge ab, begradigte Flüsse und veränderte das Klima. Wir verwandelten Luftstickstoff in Dünger und schufen Stoffe und Organismen, die es vorher in ihrer Umwelt nicht gab. Wir sind längst nicht mehr Teil der Natur, wir sind zu ihrem Beherrscher geworden.

Doch gibt es diese von Menschenhand gänzlich unberührte Natur überhaupt noch? Der Geograf Erle Ellis von der Universität Maryland ist dieser Frage mit-

hilfe unzähliger, hoch aufgelöster Satellitenbilder auf den Grund gegangen.

Seine Erkenntnis ist ernüchternd: Nur noch etwas mehr als ein Fünftel der Erdoberfläche befindet sich demnach in unberührtem Zustand, ist also »Wildnis«. Knapp 80 Prozent der Erdoberfläche sind hingegen mehr oder weniger vom Menschen geprägt – Städte, Straßen, Kanäle, Äcker, Weiden, Plantagen, Rodungen, Bergwerke, Industrieanlagen, Pipelines, Müllhalden. Nur in den entlegensten Regionen der Hochgebirge, der Regenwälder, der Wüsten und an den Polen gibt es noch urwüchsige Natur – wenn man davon absieht, dass viele Schadstoffe aus der Zivilisation über die Luft letztlich auch in diese menschenleeren Gebiete gelangen. Die Erde, so Ellis, sei inzwischen ein »Humansystem mit eingebetteten, natürlichen Ökosystemen«.

DAS ZEITALTER DES MENSCHEN

Mit dieser Einschätzung ist Ellis längst nicht mehr alleine. Vielen Forschern und Umweltschützern geht es darum, anzuerkennen, dass die Grenzen zwischen Natur und Kultur zunehmend verschwimmen, dass wir mit dem Erdsystem auf Gedeih und Verderb verbunden sind und dass wir es selbst in der Hand haben, ob es für uns eine Zukunft auf diesem Planeten gibt. Auch wenn viele Menschen nach wie vor Opfer von Naturkatastrophen werden, müssen sich die meisten heute kaum noch gegen die Natur behaupten. Stattdessen gilt es, diese vor dem zerstörerischen Werk des Menschen zu schützen.

So ist es nicht verwunderlich, dass in den vergangenen Jahren eine beinahe in Vergessenheit geratene Idee plötzlich wieder Aufwind bekommt und zahlreiche Fürstreiter findet: Die Idee, eine neue erdgeschichtliche Epoche auszurufen, das Anthropozän, was so viel bedeutet wie »das durch den Menschen bedingte Neue«, das Zeitalter des Menschen.

Bereits 1873 hatte der italienische Geologe Antonio Stoppani die »Anthropozoische Ära« als neues Erdzeitalter vorgeschlagen. Seither war das Thema

immer wieder Gegenstand akademischer Diskussionen. Doch erst dank des niederländischen Meteorologen und Atmosphärenchemikers Paul Crutzen erhielt es die Aufmerksamkeit einer breiten Öffentlichkeit. Er war in den 1970er Jahren einer der Ersten gewesen, die erkannt hatten, wie wirksam die Ozonschicht uns vor der aggressiven UV-Strahlung der Sonne schützt. Und, dass dieser Schutzschirm von bestimmten Fluorchlorkohlenwasserstoffen zersetzt wird, die beispielsweise als Kältemittel, Treibgase und Lösungsmittel eingesetzt waren. Seine Forschungen zum Ozonloch inspirierten zahlreiche Wissenschaftler und führten letztlich dazu, dass 1989 das Montreal-Protokoll in Kraft trat – der bislang wirkungsvollste völkerrechtlich verbindliche Umweltvertrag überhaupt.

Dieser regelte die schrittweise Reduktion von schädlichen Gasen, die unter anderem in Kühlschränken und Spraydosen enthalten waren, und verhinderte gerade noch rechtzeitig eine globale Umweltkatastrophe. Zwar gibt es das Ozonloch nach wie vor, doch hat sich die Ozonschicht seither deutlich regeneriert. Im Jahr 1995 erhielt Crutzen gemeinsam mit Mario J. Molina und Frank Sherwood Rowland, zwei weiteren Erforschern der Ozonschicht, für seine bahnbrechenden Forschungen den Chemie-Nobelpreis.

Ein einflussreicher Mann also, der das Thema Anthropozän eher beiläufig auf die Agenda brachte: Im Jahr 2000, bei einer Tagung des Internationalen Geosphären-Biosphären-Programms (IGBP) – einer Forschungsinitiative, die sich mit dem globalen Wandel beschäftigt – reagierte er einigermaßen ungehalten auf einen Kollegen, der über das Holozän sprach, die aktuelle geologische Erdepoche, die seit dem Ende der letzten Eiszeit vor 11 700 Jahren gilt: »Hören Sie endlich auf, vom Holozän zu sprechen«, platzte es aus Crutzen heraus, »wir sind längst im ..., im Anthropozän!«

Es war nur ein spontaner Einwurf, der jedoch derart einschlug, dass der Forscher bald unter Zugzwang stand. Akribisch sammelte er daraufhin Argumente, die er

zwei Jahre später in dem Artikel »Geology of Mankind« im angesehenen Wissenschaftsmagazin *nature* zusammenfasste: Seit mehr als 200 Jahren verändere der Mensch ganz entscheidend die natürliche Umwelt, zunehmend nicht mehr nur lokal, sondern auch auf globaler Ebene.

Als wichtigste Veränderungen betrachtete Crutzen die enorme Erhöhung der atmosphärischen Konzentration von Treibhausgasen, die Zunahme des Energieverbrauchs während des 20. Jahrhunderts um das 16-fache sowie die Tatsache, dass mittlerweile mehr Stickstoff in der Landwirtschaft in Form von Kunstdünger eingesetzt wird, als in allen natürlichen Ländökosystemen gebunden ist. Zudem beschreibt er unter anderem das antarktische Ozonloch, die intensive Landnutzung, die Überfischung der Meere und die massiven technischen Eingriffe in Flusslandschaften. Sein Fazit: »Wenn nicht gerade eine globale Katastrophe passiert – ein Meteoriteneinschlag, Weltkrieg oder eine Pandemie –, wird die Menschheit auf Jahrtausende die vorherrschende Kraft in der Umwelt werden.

tiges politisches Statement. Innerhalb kürzester Zeit setzten sich zahlreiche Natur- und Geisteswissenschaftler mit dem Begriff »Anthropozän« auseinander. Inzwischen gibt es vier Fachjournale, die ihn in ihrem Namen führen. Das renommierte Wirtschaftsmagazin *The Economist* widmete dem Thema in 2011 eine Titelseite, und das Deutsche Museum in München präsentiert bis Ende 2016 die eindrucksvolle Ausstellung »Willkommen im Anthropozän«. Sie ist weniger Bestandsaufnahme oder geologischer Rückblick, sondern der Versuch, einen kreativen Blick in die Zukunft zu werfen.

Reinhold Leinfelder, Geowissenschaftler an der Freien Universität Berlin und Gründungsdirektor des im Bau befindlichen Berliner »Haus der Zukunft«, hat die Ausstellung mitinitiiert. Für ihn ist die Anthropozän-Idee eine »untermauerte Hypothese, dass das Wirken des Menschen zu einem maßgeblichen Erdsystemfaktor geworden ist« und zugleich »eine Riesenchance«, das Verhältnis von Mensch und Natur kritisch zu hinterfragen und einem großen Publikum vor

Augen zu führen, »welche Risiken und Möglichkeiten vor uns liegen«.

Der Begriff »Anthropozän« hat sich in vielen Debatten längst etabliert. Ob er in der Tat das Ende des Holozäns bedeutet und offizieller Teil der geologischen Chronologie wird, ist jedoch ungewiss. Denn die Entscheidung darüber trifft ein exklusiver Zirkel von Geologen, die International Commission on Stratigraphy (ICS), eine Unterorganisation der International Union of Geological Sciences. Die ICS hat dafür nun eine 37-köpfige Arbeitsgruppe eingesetzt, an der auch Ökologen, Klimaforscher und Juristen beteiligt sind.

DIE GEOLOGEN STREITEN

Leinfelder, Crutzen und Ellis sind Mitglieder dieses Gremiums, das bis Ende 2016 eine Empfehlung auszuarbeiten hat, die als Grundlage für eine Entscheidung dienen soll. Doch einfach werde das nicht, weiß Jan Zalasiewicz, Geologe an der Universität Leicester und derzeit Vorsitzender der Arbeitsgruppe. Denn die Experten sind sich alles andere als einig. Manche Kollegen sind überzeugt, es gebe überhaupt keinen Grund, eine neue geologische Epoche einzuläuten.

Experten wie Zalasiewicz, die sich mit der Stratigraphie beschäftigen, der Wissenschaft der geologischen Schichten und Chronologie, sind generell nicht

»LAUDATO SI – GELOBT SEIST DU«

Mit seinem Lehrschreiben zum Umweltschutz stellte Papst Franziskus erstmals ökologische Fragen in den Mittelpunkt einer Enzyklika und erhielt damit weltweit mehr Gehör als die meisten Politiker.

Insbesondere in den USA erntete er indes auch heftige Kritik. Der Papst, so hieß es bei den Republikanern, solle sich auf seine Aufgaben als Kirchenoberhaupt beschränken.

Wissenschaftler und Ingenieure stehen vor der großen Herausforderung, die Gesellschaft in der Ära des Anthropozäns zu einem nachhaltigen Wirtschaften und Management zu bewegen.«

Crutzen hatte damit einen Nerv getroffen und zugleich jene Experten herausgefordert, welche die offizielle Zeitrechnung der Erde definieren. Denn die Anthropozän-Idee ist eine wissenschaftliche Hypothese und zugleich ein mäch-



GETTY IMAGES / ALBERTO PIZZOLI

»WIR HABEN DIE VERANTWORTUNG, DEN SCHADEN WIEDERGUT- ZUMACHEN.«

NUR EIN KLEINER TEIL DER ERDE IST
NOCH VOM MENSCHEN UNBERÜHRT.

IMMER MEHR FORSCHER WOLLEN DESHALB EIN NEUES
ERDZEITALTER AUSRUFEN: DAS ANTHROPOZÄN.

REINHOLD LEINFELDER ERKLÄRT DIE IDEE, DIE DAHINTER STECKT.

Welche Bedeutung hat die neue Epoche aus wissenschaftlicher Sicht?

Wenn wir das Anthropozän ausrufen, wäre das die wissenschaftliche Akzeptanz des menschlichen Einflusses auf die Erde. Diese sind so tiefgreifend, dass sie sich bereits in geologischen Ablagerungen wiederfinden. Für die Ausrufung brauchen wir Orte, an denen wir die Grenze zu den darunterliegenden Schichten genau definieren und zeitlich möglichst exakt einordnen können. Für das Anthropozän spricht, dass wir an vielen Stellen der Erde bereits Ablagerungen von Technofossilien wie beispielsweise Plastik und viele andere Stoffe aus der Industrialisierung finden. Und wir haben insbesondere die Niederschläge der Atombombenversuche – eine chemische Signatur, die man über Hunderttausende von Jahren nachweisen kann. Das alles spricht dafür, dass der Mensch tatsächlich zu einem geologischen Faktor geworden ist.

Bis Ende 2016 wird die Anthropozän-Arbeitsgruppe, in der Sie mitarbeiten, der International Commission on Stratigraphy seine Einschätzung vorlegen. Wie lange wird es dauern, bis eine Entscheidung getroffen wird?

Bei früheren Entscheidungsprozessen sind teilweise Jahrzehnte ins Land gegangen. Aber ich bin zuversichtlich, dass es in diesem Fall zügiger

voran geht. Meine Prognose ist, dass es spätestens 2018 zu einer Entscheidung kommt. Die Faktenlage ist bereits jetzt so überzeugend, dass das Anthropozän vermutlich ausgerufen wird.

Weiteren Forschungsbedarf sehen Sie also nicht?

Doch natürlich. So sitzen wir derzeit an einer Studie zur globalen Verteilung von Plastik – nicht nur im Meer und an den Stränden, sondern auch innerhalb von Sedimentablagerungen. Da müssen wir noch einiges tun.

Ist das Anthropozän-Konzept auch ein politisches Statement?

Wir können daraus einen Verantwortungsgedanken ableiten. Wenn wir die Erde schon so tiefgreifend verändern, sollte man das auch ins Positive kehren können. Das hat natürlich eine politische und gesellschaftliche Relevanz. Aus der Erkenntnis des Schadens, den wir in den Ökosystemen in den letzten Jahrzehnten angerichtet haben, erwächst die Verantwortung, diesen, wo es noch möglich ist, wiedergutzumachen. Im Hinblick auf kommende Generationen sollte sich der von Hans Jonas formulierte »ökologische Imperativ« durchsetzen: »Handle so, dass die Wirkungen deiner Handlungen verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden.« Wir brauchen ein wissenschaftsbasiertes gestalterisches

Prinzip im Umgang mit der Erde, eine Haltung des behutsamen, achtsamen Gärtners, der im Dialog mit anderen nach Lösungen für die Probleme der Welt sucht. Bei der Rettung der Ozonschicht hat das gut funktioniert. Der Umgang mit dem Klimawandel, die Vermüllung der Meere und der nachhaltige Umgang mit Ressourcen sind die großen Herausforderungen.

Kritiker der Anthropozän-Idee finden, dass der Mensch sich zu wichtig nimmt, wenn er sich zu einer geologischen Kraft erklärt und sich anmaßt, unsere komplexe Welt zu managen. Was entgegnen Sie darauf?

Es ist ein Missverständnis, dass es sich um ein anthropozentrisches Konzept handelt und dass dessen Anhänger glauben, mit Geoengineering die Welt retten zu können. Mit der Idee verbunden ist vielmehr der Gedanke eines Menschheitserbes. Dass die Atmosphäre, die Ozeane, die Regenwälder, die Süßwasserreserven allen gehören und dass auch alle dafür verantwortlich sind. Wir sind schlicht von diesem Erdsystem abhängig und müssen schon allein deshalb daran interessiert sein, dass es funktionsfähig bleibt. Bald neun Milliarden Menschen können auf diesem Planeten nur dann in Würde miteinander leben, wenn sie solidarisch sind und mit den Ressourcen gerecht haushalten. ☺



CLAUDIA MEINERS

ZUR PERSON

Der Berliner Geologe und Paläontologe Reinhold Leinfelder forscht an der Freien Universität sowie an der Humboldt-Universität.

Seit September 2014 ist er zudem Gründungsdirektor des in Bau befindlichen Hauses der Zukunft in Berlin. Bis 2010 war er Generaldirektor des Berliner Naturkundemuseums. Er ist Mitglied der Anthropozän-Arbeitsgruppe der International Commission on Stratigraphy, die einen Vorschlag zur geologischen Definition des Anthropozäns erarbeiten soll.

leicht zu überzeugen. Bevor sie eine neue geologische Epoche ausrufen, benötigen sie handfeste Beweise, dass sich in einem Zeitraum der Erdgeschichte etwas grundlegend und weltweit verändert hat. Das kann durch eine Schicht mit bestimmten Fossilien oder Meeressedimenten dokumentiert sein, durch besondere Gesteinsformationen oder charakteristische Einschlüsse in Eisbohrkernen.

Neben der Überlegung, ob solche konkreten Hinweise eine neue Zeitrechnung überhaupt rechtfertigen, ist vor allem die Frage nach dem genauen Beginn des Anthropozäns entscheidend. Bislang gab es dafür bereits ein halbes Dutzend Vorschläge. Als Marker eignet sich etwa der Methangehalt in der grönländischen Eisschicht, der um das Jahr 3020 v. Chr. ein Minimum aufweist und danach kontinuierlich ansteigt. Als Ursache gilt die Ausbreitung des Reisanbaus in Asien und die in allen Kulturen jener Zeit zunehmende Viehhaltung. Denn sowohl auf Reisfeldern als auch in den Mägen von Rindern entstehen beachtliche Mengen des hoch wirksamen Treibhausgases.

Andere Forscher schlagen die Anfänge der Feuernutzung vor etwa einer Million Jahren, die Ausrottung großer Säugetierarten durch die eiszeitlichen Jäger, den Beginn der Bergbauaktivitäten vor rund 3000 Jahren oder die industrielle Revolution gegen Ende des 19. Jahrhunderts als Beginn des Menschenzeitalters vor. Doch keines dieser Ereignisse liefert das eine globale, in geologischen Schichten nachweisbare Signal, das eindeutig genug wäre, um die strengen Anforderungen der Stratigraphen zu erfüllen.

Andere Optionen brachten kürzlich die Geowissenschaftler Mark Maslin und Simon Lewis vom Londoner University College ins Gespräch. In einem Beitrag in *nature* plädieren sie unter anderem dafür, den Beginn des Anthropozäns in die Zeit zwischen 1570 und 1620 zu legen. Für diesen Zeitraum lässt sich in Eisbohrkernen nämlich ein erheblicher Rückgang des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre feststellen. Nach einem Tiefstand im Jahr 1610 steigt die Kon-

zentration des Treibhausgases seither kontinuierlich an.

Die Forscher führen dies darauf zurück, dass damals nach Ankunft von immer mehr europäischen Siedlern in der Neuen Welt ein Großteil der amerikanischen Ureinwohner kriegerischen Auseinandersetzungen und eingeschleppten Krankheiten zum Opfer fiel. Von schätzungsweise rund 60 Millionen Indianern waren nach zwei Generationen nur noch etwa sechs Millionen übrig. Als Folge dieses massiven Bevölkerungseinbruchs, so Lewis und Maslin, hätten rund 65 Millionen Hektar ungenutzten Agrarlands für einige Jahrzehnte brachgelegen und seien von Wäldern überwuchert worden. Diese hätten der Atmosphäre enorme Mengen CO₂ entzogen. Bei der Ausbreitung der europäischen Siedler nach Westen sind diese Wälder dann jedoch wieder den Äxten zum Opfer gefallen.

AM 16. JULI 1945, 5:29 UHR
Paul Crutzen, der ursprünglich die Industrialisierung als Beginn des Anthropozäns im Sinn hatte, vertritt inzwischen, zusammen mit Reinhold Leinfelder, Erle Ellis und 24 weiteren Mitgliedern der Anthropozän-Arbeitsgruppe, den Vorschlag, dass das Menschenzeitalter am 16. Juli 1945 um exakt 5:29 Uhr Ortszeit begann. Denn an diesem Tag zündeten Wissenschaftler des Manhattan-Projekts im Süden New Mexicos die erste Atombombe mit dem Codenamen »The Gadget«, das Ding. Zum ersten Mal sahen Menschen die gigantische, typisch pilzförmige Explosionswolke, die bis in 12 Kilometer Höhe reichte. Die Druckwelle war noch in 160 Kilometern Entfernung spürbar. Der Sand in der Umgebung der Detonation schmolz zu grünlichem Glas.

Bis zum Teststoppabkommen im Jahr 1963 – dem 120 Nationen beigetreten sind – und vereinzelt auch noch danach sind weltweit mehr als 500 oberirdische Atomversuche dokumentiert. Radioaktive Partikel aus diesen Kernwaffentests driften rund um den Globus und bildeten Ablagerungen, die auch in Jahrtausenden noch von unserer Zivilisation zeugen

werden. Diese weltweit nachweisbaren Radionuklide erfüllen damit wesentliche stratigraphische Kriterien: Sie sind zeitlich scharf eingrenzbar, in geologischen Ablagerungen rund um den Erdball nachweisbar und markieren eine langfristige Veränderung des Erdsystems.

»Die **Transformation** ist **moralisch** ebenso geboten wie die **Abschaffung** der **Sklaverei**.«

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung »Globale Umweltveränderung«

Zudem setzte nach dem Zweiten Weltkrieg eine atemberaubende technologische und wirtschaftliche Entwicklung ein, die bis heute weitgehend ungebremst anhält und ihre Spuren im gesamten Erdsystem hinterlässt – es ist die Zeit der »Großen Beschleunigung« (siehe S. 4–5): Aluminium- und Plastikprodukte in unzähligen Formen, Zusammensetzungen und Funktionen fluten seither den Markt und häufen sich nach ihrem Gebrauch zu gigantischen Müllbergen an. Die Nachfrage nach Kunstdünger, Papier, Benzin und Beton schoss weltweit in die Höhe. Mehr als 70 Millionen unterschiedliche chemische Produkte entstanden bis heute, die meisten davon künstlich synthetisiert.

NEUE WELTORDNUNG

Während 1945 weltweit insgesamt gerade einmal rund eine Million Automobile hergestellt wurden, waren es 2014 bereits fast 90 Millionen. Ebenso rapide nahmen seither unter anderem der globale Rohstoff- und Wasserverbrauch, die Weltbevölkerung, der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre und das Artensterben zu. Die ungezügelt Nutzung von Öl, Kohle, Gas und anderen Ressourcen ermöglichte ein exponentielles Wachstum – im positiven wie im negativen Sinn –, das nun zunehmend an seine Grenzen stößt oder diese bereits sprengt.

Auch wenn all dies für das Jahr 1945 als Geburtsstunde des Anthropozäns spricht, bleibt der Stratigraph Jan Zalasiewicz zurückhaltend. Die Anthropozän-

Arbeitsgruppe müsse noch mehr überzeugende Belege sammeln, bevor sie ihre Ergebnisse dem ICS präsentiere. »Und dann geht die eigentliche Auseinandersetzung erst richtig los, mit endlosen, pedantischen Debatten.« Doch ganz gleich, wie dieser Expertenstreit ausgehen wird,

Nobelpreisträger Paul Crutzen hat erreicht, was er wollte: Ein Ausrufezeichen setzen, eine gesellschaftliche Diskussion in Gang bringen und einen Appell an Wirtschaft und Politik richten, dass es höchste Zeit ist, umzudenken.

Doch wie lässt sich der Übergang in eine naturverträgliche, Ressourcen schonende und gerechtere Weltordnung auf den Weg bringen und letztlich realisieren?

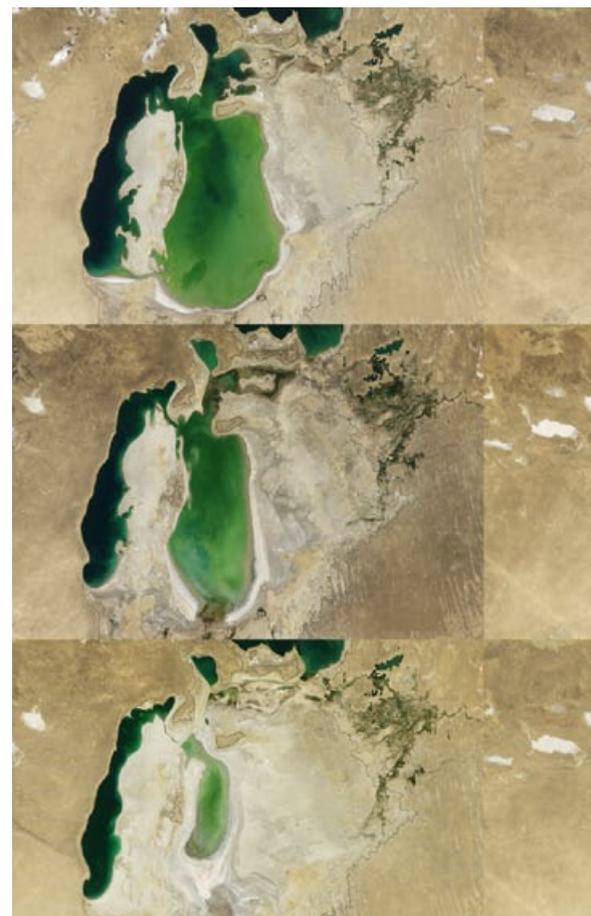
Fast zeitgleich mit der Reaktorkatastrophe von Fukushima im März 2011 präsentierte der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung »Globale Umweltveränderungen« (WBGU), ein Gremium von führenden Umwelt-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaftlern, seinen Bericht mit dem Titel »Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation«.

Darin heißt es: »Das kohlenstoffbasierte Weltwirtschaftsmodell ist auch ein normativ unhaltbarer Zustand, denn es gefährdet die Stabilität des Klimasystems und damit die Existenzgrundlagen künftiger Generationen. Die Transformation zur Klimaverträglichkeit ist daher moralisch ebenso geboten wie die Abschaffung der Sklaverei und die Ächtung der Kinderarbeit. Der Gesellschaftsvertrag kombiniert eine Kultur der Achtsamkeit (aus ökologischer Verantwortung) mit einer Kultur der Teilhabe (als demokratische Verantwortung) sowie mit einer Kultur der Verpflichtung gegenüber zukünftigen Generationen (Zukunftsverantwortung).«

Das WBGU-Gutachten fand sowohl in Deutschland als auch international große Beachtung. Es ist eine Anleitung für den Weg in die Zukunft, mit detaillierten Empfehlungen für entsprechende Maßnahmen in Wirtschaft, Forschung und Politik sowie bei der internationalen Zusammenarbeit. Sie reichen von der globalen Klima- und Energiepolitik über bessere Landnutzung, umweltfreundliche Investitionslenkung und das Umgestalten von Städten bis hin zur Mitwirkung der Bürger bei der Schaffung nachhaltiger Strukturen. Das Fazit der Wissenschaftler macht Mut und ist zugleich eine Mahnung: »Es gibt Alternativen, die allen Menschen zumindest die Chance auf ein gutes Leben in den Grenzen des natürlichen Umweltraumes eröffnen können.«

Doch um das zu erreichen, müsse man so schnell wie möglich aus dem »fossil-nuklearen Metabolismus« der Industriegesellschaft aussteigen. »Je länger wir an ihm festhalten«, so die Wissenschaftler, »desto höher wird der Preis für die nachfolgenden Generationen sein.«

Ein steiniger Weg wie dieser ist aber nur gangbar, wenn technische, politische



und wirtschaftliche Innovationen mit einem ethischen und kulturellen Wandel Hand in Hand gehen. »Der Wandel wird nicht durch moralische Appelle gelingen«, ist der Münchener Sozialethiker Markus Vogt überzeugt, »sondern nur durch ein allmähliches Umfärben unserer Vorstellungsmuster von Fortschritt und Lebensqualität.« Ein wichtiger Schritt in diese Richtung sei auch die aktuelle Umweltzyklika des Papstes (siehe S. 9). »Sie ist weit mehr als ein Appell zur Umkehr. Sie hinterfragt unser Selbstverständnis als Mensch im Verhältnis zur Welt und erreicht viele Menschen, die sich mit dem Klimawandel zuvor noch nicht auseinandergesetzt haben.«

Letztlich geht es darum, ein Bewusstsein dafür zu entwickeln, dass wir alle Teil eines großen vernetzten Systems sind, in dem nichts, was wir tun, ohne Folgen bleibt. Denn wir sind längst durch und durch globalisiert, ob wir das wollen oder nicht. Lange bevor wir uns über Telefon und Internet mit den entlegensten Winkeln der Welt verbinden konnten, waren unsere Körper schon kosmopolitisch. »Die Geschichte des Actins und Myosins in unseren Muskeln beginnt in den abgebrannten Regenwäldern Brasiliens, wo Soja (...) angebaut wird, die wichtigste Proteinquelle der europäischen Rinder«, schreibt Christian Schwägerl in seinem Buch »Menschenzeit«: »Die Geschichte

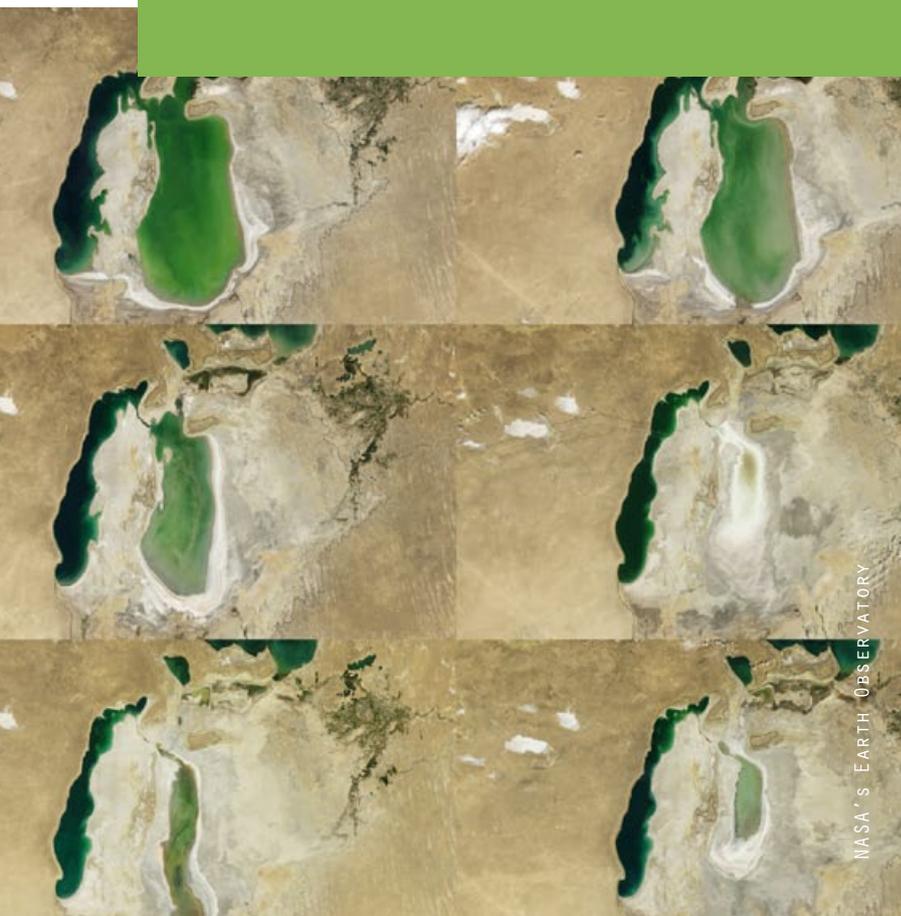
der fetthaltigen Zellwände in unseren Gehirnen beginnt in der Tiefe des Atlantiks, wo kubikkilometergroße Netze den Meeresboden plätten und das Wasser durchsieben, um die schwindenden Fischschwärme emporzuholen. Die Koffeinmoleküle, die an Rezeptoren unserer Nervenzellen andocken und ihre Aktivität erhöhen, stammen aus dem Hochland Äthiopiens oder Kolumbiens. Der Fettansatz an unseren Bäuchen ist indonesischen Ursprungs, aus den Palmölplantagen, die sich in die Wälder Borneos und Sumatras fressen.«

Im Anthropozän könnte angesichts der drohenden Umweltkatastrophe der Durchbruch zu einer besseren, gerechteren Welt gelingen, wenn sich das Bewusstsein durchsetzt, dass wir Probleme auf internationaler Ebene wie Klimawandel, Migration, Energiesicherung, Lebensmittel- und Ressourcenverteilung nur miteinander und nicht gegeneinander lösen können. Das setzt die Überwindung nationaler Egoismen, ein Umsteuern der Ökonomie hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise und ein hohes Verantwortungsbewusstsein des einzelnen Verbrauchers in den Industrieländern voraus. Die WBGU-Experten setzen neben verbindlichen internationalen Abkommen auf eine »Weltbürgerbewegung« als Motor für die zukünftige Politik. »Was wir vor allem brauchen«, sagt der Geobiologe Reinhold Leinfelder, »ist so etwas wie ein behutsames, selbstkritisches gärtnerisches Gestalten der Welt, das die Komplexität des Gesamtsystems im Blick hat.«

Wie hilfreich es ist, einen Blick für das Ganze zu haben, hat kaum jemand so intensiv erlebt wie Astronaut Alexander Gerst. Ihn hat der Blick aus der Ferne tief beeindruckt. Seine Reise ins All hat ihm gezeigt, dass er Teil eines komplexen, verletzlichen und begrenzten Organismus ist, den es zu erhalten gilt. Er fühle sich heute mehr als Erdenbürger, denn als Europäer oder Deutscher. Der Blick aus dem All auf den Menschenplaneten hat ihn verändert. Er hat ihn nachdenklicher, aber auch sensibler und achtsamer gemacht. ☺

DAS ENDE DES ARALSEES

Seit den 1960er Jahren speist der Aralsee riesige Bewässerungsanlagen. Die Folgen für den See sind dramatisch: Bis 1997 sank der Wasserspiegel von 53 auf 35 Meter. Seine Fläche schrumpfte um fast 45 Prozent, sein Wasservolumen gar um 90 Prozent. Diese Bilderserie zeigt nur die Entwicklung seit dem Jahr 2000. Heute ist der einst viertgrößte Binnensee der Erde fast verschwunden. Es gibt viele solcher Bilderserien. Sie zeigen wuchernde Städte, schmelzende Gletscher oder schwindende Tropenwälder.



DIE ENERGIEREVOLUTION

UM DIE KATASTROPHALEN FOLGEN DES KLIMAWANDELS
ABZUWENDEN, MÜSSEN WIR BIS ENDE DES JAHRHUNDERTS
CO₂-NEUTRAL WIRTSCHAFTEN. EXPERTEN SIND
ÜBERZEUGT: DAS GEHT!

SO STELLEN SICH DAVID ARNOLD UND
ALEXA RATZLAFF VOM PROJEKT ZERO-FIFTY
DIE ENERGIEVERSORGUNG DER ZUKUNFT VOR:
IN DEN GROBSTÄDTEN ENTSTEHEN RIESIGE
TÜRME, IN DENEN SICH JEWEILS
MEHRERE WINDTURBINEN DREHEN.
DER BAU FINANZIERT SICH DURCH DEN
VERKAUF VON GESCHÄFTEN, BÜROS UND
WOHNUNGEN IN DEN UNTEREN STOCKWERKEN.
(WWW.ZERO-FIFTY.COM)

»SHANGHAI 2050« CREATED BY ZERO-FIFTY. SKY UNDER-
LAY »BLUE FROM TOWER« RELEASED ON FLICKR BY SWAMI
STREAM AND REPRODUCED UNDER CC BY 2.0. CITYSCAPE
UNDERLAY »SHANGHAI PANORAMA 2006« AND »SHANGHAI
PANORAMA 2006 2« RELEASED ON WIKIMEDIA BY DON-KUN
AND REPRODUCED UNDER CC BY 3.0.



Die Welt im Jahr 2050: Erneuerbare Energien sind die vorherrschende Quelle von Strom und Wärme. Die Wasserkraft wird genauso genutzt wie die Wärme aus der Erdkruste. Vielerorts prägen Windräder und Solaranlagen die Landschaft. Doch das Rückgrat der Energieversorgung sind die vielen Haushalte, Fabriken und Firmengebäude, die als Kleinkraftwerke fungieren. Sie erzeugen mehr Energie, als sie benötigen, und speichern diese mit neuartigen Batterien. Intelligente Leitungssysteme, die sowohl Strom als auch Daten transportieren, vernetzen weltweit die Länder miteinander und minimieren das Risiko von regionalen Stromengpässen. Es gibt zwar noch Kohle- und Gaskraftwerke, doch ihre Abgase gelangen nicht mehr in die Atmosphäre. Stattdessen werden sie mithilfe von Mikroorganismen, speziellen Katalysatoren oder künstlicher Photosynthese in nützliche Rohstoffe umgewandelt.

Es ist – zugegeben – ein sehr optimistischer Zukunftsentwurf, den aber Energieexperten wie Claudia Kemfert vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung durchaus für möglich erachten. Der Entwurf setzt auf die Dynamik der

technischen Innovation und die Vernunft der Menschen im fortschreitenden »Anthropozän«, die gelernt haben, die Verantwortung für ihre Umwelt zu übernehmen, und sich auf dem besten Weg in eine klimaneutrale Energienutzung befinden. Denn ob die menschliche Zivilisation nur einen Wimpernschlag in der Erdgeschichte dauern wird oder ob unsere Spezies eine längere Zeitspanne, eine echte geologische Epoche, vor sich hat, das hängt maßgeblich davon ab, wie wir dem Klimawandel begegnen und unsere Energieversorgung sicherstellen. Beides ist eng miteinander verknüpft.

ENDE DER ARKTIS

Zumindest im Hinblick auf den Klimawandel liegen die aktuellen Fakten seit 2014 auf dem Tisch. Auf insgesamt rund 4000 Seiten haben mehr als 800 Experten aus 85 Ländern im Auftrag des Weltklimarats den gegenwärtigen Stand der Klimaforschung zusammengefasst und analysiert. Einige der »Kernbotschaften« dieses inzwischen fünften Sachstandsberichts betreffen direkt oder indirekt die weltweite Energienutzung: Die Wissenschaftler kommen zu dem Ergebnis, dass

sich ein Klimawandel bereits eindeutig nachweisen lässt und dass der Anstieg des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre durch die Nutzung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Erdgas maßgeblich dazu beiträgt.

Es gibt kaum jemanden, der bezweifelt, dass der Mensch die Erde durch den verstärkten Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, Methan und Distickstoffmonoxid erwärmt. Um 0,85 Grad Celsius hat sich die mittlere globale Temperatur seit dem Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert bereits erhöht und sie wird bis zum Ende dieses Jahrhunderts wahrscheinlich um weitere drei bis vier Grad steigen – falls wir unsere Energienutzung in den nächsten Jahrzehnten nicht grundlegend ändern.

Jede Temperaturerhöhung um ein Grad Celsius führt dazu, dass die Atmosphäre sieben Prozent mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann. Die Folgen: Die Niederschläge werden zwar heftiger, dafür aber seltener und kürzer. In ohnehin schon vom Wassermangel betroffenen Regionen kommt es daraufhin häufiger zu lang anhaltenden Dürren. Außerdem wird weltweit die Zahl der Extremwetterereignisse zunehmen.



Das Wasser der Ozeane wird nicht nur wärmer. In Folge der steigenden CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre bildet sich im Wasser mehr Kohlensäure, die insbesondere kalkschalige Organismen gefährdet. Korallen sind davon genauso betroffen wie das mikroskopisch kleine Plankton, das die Grundlage der marinen Nahrungsketten bildet. Durch die temperaturbedingte Ausdehnung des Meerwassers und das Abschmelzen kontinentaler Eismassen kommt es bis zum Jahr 2100 im äußersten Fall zu einem Meeresspiegel-

Zwei-Grad-Ziel in Cancún von 194 Nationen völkerrechtlich beschlossen – ohne jedoch konkrete Einsparziele für einzelne Länder zu vereinbaren. Diese sollen nun endlich bei dem bevorstehenden Gipfeltreffen Ende dieses Jahres in Paris festgelegt werden.

Jene Zwei-Grad-Grenze wird indes nur noch einzuhalten sein, wenn wir rasch mit dem Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe beginnen. Viele Forscher gehen davon aus, dass sich die globalen Risiken einigermaßen beherrschen lassen,

»Es dauerte fünf Millionen Jahre, bis sich das Erdöl gebildet hatte, das heute in einem Jahr konsumiert wird.«

Hans Joachim Schellnhuber, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

anstieg von rund 80 Zentimetern. Das arktische Meereis dürfte in den Sommermonaten dann vollständig verschwinden! »Es ist bereits fünf nach zwölf!«, mahnt der Paläoklimatologe Gerald Haug von der ETH Zürich. »Wenn wir so weitermachen, haben wir bald Bedingungen wie im Pliozän vor über drei Millionen Jahren – mit eisfreier Nordhemisphäre.«

Ein besonderes Problem stellen die riesigen Permafrostgebiete in Alaska, Kanada, Grönland und Sibirien dar. Wenn diese auftauen, werden ungeheure Mengen Methan freigesetzt. Das Gas, das beim Abbau der organischen Substanzen entsteht, ist in seiner Wirkung als Treibhausgas etwa 25-fach stärker als Kohlendioxid. Die Erderwärmung würde auf diese Weise zusätzlich beschleunigt. Hinzu kommt: Die Veränderungen vollziehen sich innerhalb so kurzer Zeit, dass viele Ökosysteme damit überfordert sind und sich nicht rechtzeitig anpassen können. Ein massenhaftes Artensterben wäre die Folge.

Um solch eine »Heißzeit« mit ihren noch nicht absehbaren Konsequenzen zu verhindern, forderten die EU-Vertreter 2009 auf dem Weltklimagipfel in Kopenhagen, den Anstieg der mittleren globalen Temperatur auf zwei Grad Celsius zu begrenzen. Ein Jahr später wurde das

wenn wir spätestens bis zum Ende dieses Jahrhunderts CO₂-neutral wirtschaften. »Irgendwo muss man eine Linie ziehen, und bei diesem Wert nehmen wir schon in Kauf, dass wohl einige Inselstaaten im Meer verschwinden«, verteidigt Hans Joachim Schellnhuber, Leiter des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, das Zwei-Grad-Ziel, das von manchen Fachleuten als »nicht ausreichend« kritisiert wird. Um es mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent einzuhalten, dürfte der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre allerdings nicht wesentlich über 450 Moleküle CO₂ pro einer Million Luftteilchen (ppm) steigen. 400 ppm haben wir jedoch bereits erreicht – ein Wert, wie er in den vergangenen 800 000 Jahren nicht vorgekommen ist. Seit der industriellen Revolution ist der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre um ein Drittel angestiegen. Die Forscher des Weltklimarats fordern daher eine »Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen in allen Sektoren bis zum Jahr 2050 von 40 bis 70 Prozent gegenüber dem Jahr 2010.« Diese sei ebenso notwendig wie Emissionen nahe null oder darunter im Jahr 2100.

Wer auf die gegenwärtigen Entwicklungen in der Welt schaut, der kann

angesichts dieser Herausforderung verzweifeln. Viele Klimaforscher sind skeptisch. Doch fragt man Energie- und Wirtschaftsexperten, sagen immerhin einige: Warum nicht? Und verweisen auf die einzigartige Erfolgsgeschichte der erneuerbaren Energien.

Als Kanzlerin Angela Merkel nach dem Reaktorunfall in Fukushima den Ausstieg aus der Atomwirtschaft in Deutschland ankündigte, stellte sich die Frage, wodurch die Energie der abgeschalteten Kernkraftwerke ersetzt werden soll. Die »Energiewende« wurde zu einem geflügelten Wort, und eine Reihe von Studien belegten, dass nicht nur in Deutschland bis zum Ende dieses Jahrhunderts ein intelligenter Mix von Wasserkraft, Erdwärme, Solar-, Wind- und Bioenergie den Energiebedarf durchaus decken könnte.

»100 Prozent Erneuerbare sind möglich!«, war die Mut machende Botschaft und befeuerte zusätzlich einen Boom, der bereits in den 1990er Jahren seinen Anfang genommen hatte. Im vergangenen Jahr lieferten erneuerbare Energien bereits mehr als ein Viertel der Bruttostromerzeugung in Deutschland. Sie hat sich damit seit dem Jahr 1998 mehr als versechsfacht. Weltweit blicken viele derzeit mit Bewunderung auf das deutsche Experiment: Wird es einer der führenden Wirtschaftsnationen wirklich gelingen, von der Abhängigkeit von Öl, Kohle, Erdgas und Kernenergie loszukommen?

FOSSILE BRENNSTOFFE VERLIEREN AN BEDEUTUNG

Doch Länder wie Norwegen, Schweden oder Costa Rica sind noch weiter. Sie produzieren dank eines hohen Wasserkraftanteils bereits mehr als die Hälfte ihres Bedarfs aus erneuerbaren Energien. Indien hat seine Windkraftleistung in den vergangenen zehn Jahren verzehnfacht. Selbst Emissionsweltmeister China hat 2014 erstmals mehr Anlagenkapazitäten im Bereich der Erneuerbaren aufgebaut als im Kohlektor.

Inzwischen stammt fast ein Fünftel der weltweit genutzten Energie aus regenerativen Quellen. Das geht aus dem aktuellen

»Globalen Status Report Erneuerbare Energien« hervor. In dem Bericht des renommierten politischen Netzwerks REN21 steht auch: In 2014 wuchs die Weltwirtschaft zum ersten Mal seit vier Jahrzehnten, ohne dass zugleich auch die CO₂-Emissionen anstiegen. Für die Autoren ist dies ein Indiz für die schwindende Bedeutung fossiler Brennstoffe.

Dafür spricht, dass auch der Finanzmarkt in Bewegung kommt. Immer mehr Investoren ziehen ihr Geld aus dem einst so krisensicheren Öl-, Gas und Kohlegeschäft ab – auch, weil sie das wachsende Risiko einer »Kohlenstoffblase« fürchten. Denn wenn die Förderung fossiler Brennstoffe infolge eines internationalen Überkommens reduziert würde, verlören große Energiekonzerne wie Exxon, Shell oder BP massiv an Wert.

Selbst die Experten der eher konservativen Internationalen Energieagentur (IEA) – einer autonomen Einrichtung der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) – sehen mittlerweile angesichts der wachsenden Investitionen in die regenerativen

gelöst werden. »Die größten Schwierigkeiten in der Versorgung mit erneuerbaren Energien liegen derzeit nicht in der Energiegewinnung, sondern vielmehr in der Verteilung«, kritisierte die Energieökonomin Claudia Kemfert auf der GDCh-Diskussionsveranstaltung »Willkommen im Anthropozän« in München. »Vor allem die Netze müssen intelligenter und nachhaltiger werden: Sie sollen Strom- und Datenmengen transportieren und Schwankungen von Sonnen- und Windenergie auffangen.«

Zusätzlich müssen bessere Energiestandards bei Neubauten und effektivere Wärmedämmung durchgesetzt und sukzessiv alternative Mobilitätskonzepte realisiert werden. Denn die herkömmlichen Benzin- und Dieselmotoren sind regelrechte Energievernichtungsmaschinen. Sie setzen gerade einmal 30 Prozent der im Treibstoff enthaltenen Energie in Vorwärtsbewegung um. Elektromotoren schaffen 80 Prozent.

Eine weitere wichtige Hürde findet bislang nur wenig Beachtung: Viele Industrieanlagen wie Stahl- und Betonwerke heizen ihre Öfen nicht nur mit

Rohstoff zu nutzen, meint Robert Schlögl vom Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion. Wissenschaftler in aller Welt arbeiten derzeit mit Hochdruck daran, das reaktionsträge Gas mit Katalysatoren oder Bakterien in verwertbare Substanzen wie Methan, Ethanol oder Kunststoffe umzuwandeln. Erste Testanlagen sind unter anderem in Deutschland und China bereits im Einsatz.

PREISWERTE ENERGIEWENDE

Der Boden für eine CO₂-arme Wirtschaft ist also bereitet, die maßgeblichen Technologien sind vorhanden. Entsprechend nah wähnt der amerikanische Ökonom, Politikberater und Publizist Jeremy Rifkin auch die Energierevolution. Entscheidend dafür sei aber, dass sich die politischen Rahmenbedingungen in Europa, den USA und den großen Schwellenländern verändern und die Investitionen dafür aufzubringen sind. Die Einsicht, dass dies passieren muss, ist offensichtlich bereits vorhanden.

Beim Gipfel der G-7-Staaten auf Schloss Elmau verständigten sich die anwesenden Staats- und Regierungschefs immerhin darauf, im Laufe des 21. Jahrhunderts auf fossile Energieträger zu verzichten und eine »Dekarbonisierung« der Weltwirtschaft zu erreichen. Die IEA geht von 26 Billionen Dollar aus, die Staaten und Unternehmen weltweit bis 2030 ohnehin in neue Infrastrukturen und Energieversorgungen investieren müssen. Lediglich elf Billionen seien zusätzlich nötig, um mithilfe von regenerativen Energien den Klimawandel in Grenzen zu halten.

Und so ist Jeremy Rifkin auch überzeugt, dass die »dritte industrielle Revolution« gelingen wird: »Im 21. Jahrhundert werden Hunderte von Millionen Menschen ihre eigene grüne Energie erzeugen – in ihren Häusern, in Büros, in Fabriken – und diese mit anderen über intelligente dezentrale Stromnetze – »Internetze« – teilen, so wie die Menschen heute ihre eigenen Informationen erstellen und über das Internet mit anderen teilen.«

»Wir sollten nicht von Dekarbonisierung reden. CO₂ ist nicht das böse Molekül! Präziser ist der Terminus »Defossilisierung«.

Robert Schlögl, Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion

Energiequellen noch eine realistische Chance, das Zwei-Grad-Ziel einzuhalten. Allerdings sind dafür zusätzliche Anstrengungen für mehr Energieeffizienz, die Streichung der Subventionen für fossile Energieträger, reduzierte Methanemissionen in der Öl- und Erdgasproduktion sowie das konsequente Abschalten alter Kohlekraftwerke nötig. »Die Kosten für den Klimaschutz werden von Jahr zu Jahr höher«, sagt IEA-Chefin Maria van der Hoeven: »Schnell zu handeln, ist jetzt entscheidend.«

Vor allem die Probleme beim Netzausbau sowie bei der Speicherung – zum Ausgleich von Spitzen und Flauten bei der Solar- und Windenergie – müssen rasch

großen Mengen von Kohle und Öl, sondern auch mit alten Autoreifen oder Abfällen aus dem Dualen System. Umweltverbände und Energieexperten fordern, dass solche extrem schmutzigen Anlagen sowie Kohlekraftwerke – von denen viele noch längere Laufzeiten vor sich haben – ihre Abgase künftig nicht mehr einfach in die Luft blasen dürfen. In einer Zeit des Übergangs sollen ihre Betreiber das Klimagas stattdessen herausfiltern und unschädlich machen. Ein Verpressen und Speichern im Boden ist technisch möglich, aber kostspielig und umstritten.

Eine interessante Alternative könnte sein, das CO₂ aus solchen Anlagen als



HERMAN MILLER

DER BÜROSTUHL VON HERMAN MILLER
WIRD NACH DEM CRADLE-TO-
CRADLE-KONZEPT HERGESTELLT –
ALSO AUS RECYCELTEN
MATERIALIEN, DIE SICH
IHRERSEITS LEICHT WIEDER-
VERWENDEN LASSEN.

ENDE DER VERSCHWENDUNG

IN EINIGEN JAHRZEHTEN WERDEN 10 MILLIARDEN MENSCHEN DIE ERDE BESIEDELN. DAMIT UNSERE NACHKOMMEN IN WOHLSTAND LEBEN KÖNNEN, MUSS DIE WEGWERFMENTALITÄT EIN FÜR ALLE MAL EIN ENDE HABEN.

Von Weitem wirken die berühmten Lummenfelsen auf Helgoland idyllisch wie immer. Rund 20 000 Seevögel zieht es jedes Jahr zu dem roten Sandsteinkliff inmitten der Nordsee, um dort zu brüten. Möwen, Trottellummen, Basstölpel, Alke und Eissturmvögel sitzen dicht an dicht, kreischen, schnattern und schreien aufgeregt durcheinander. Jeder noch so kleine Felsvorsprung ist besetzt und durch Vogelkot weiß getüncht.

Doch beim Näherkommen sind vielerorts grelle, unnatürliche Farben zu erkennen: gelbe, blaue, grünliche und orange Flecken. Denn immer häufiger polstern die Meeresvögel ihre Nester statt mit Tang und Seegras mit bunten Plastikfetzen und Überresten von Fischernetzen aus. Das Material finden sie auf hoher See oder am Strand. Dabei verheddern sich immer wieder Tiere in dem Kunststoffmüll und verenden jämmerlich. Manche Kadaver hängen jahrelang am Felsen.

Der Abfall wird nicht nur in den Nestern verbaut, sondern auch gefressen. Nils Guse, Biologe am Forschungs- und Technologiezentrum Westküste in Büsum, fand heraus: Über 90 Prozent aller Eissturmvögel in der Nordsee haben Plastik-

müll im Magen, im Durchschnitt 30 Partikel. »Wir leben im Plastoän«, sagte Guse im Juli 2015 der ZEIT.

Kaum noch eine Meereszone ist wirklich frei davon, auch wenn man das Material meistens kaum sieht, weil Wellen und UV-Strahlung es mit der Zeit in winzige Teilchen zerlegen. Etwa 70 Prozent davon sinken über kurz oder lang auf den Meeresboden, schätzen Experten des Umweltbundesamtes. Ein Teil wird an die Strände gespült. Einiges kommt in die Nahrungskette, weil viele Meeresorganismen, vom Zooplankton bis zur Seeschildkröte, die bunten Schwebstoffe für Nahrung halten.

Ins Meer gelangt der Kunststoffmüll häufig über Flüsse, etwa wenn er irgendwo im Hinterland von schlecht gesicherten Deponien verweht oder einfach in die Landschaft geworfen wird. Und obwohl es international längst verboten ist, entsorgen Schiffsbesatzungen ihre Abfälle noch immer häufig auf offener See. Zudem verlieren die Fischfangflotten unzählige Netze und Gerätschaften.

Eine schnelle Lösung der Misere ist nicht in Sicht: Eine Plastiktüte etwa treibt zwischen 10 und 20 Jahren umher, bis sie

vollständig zerrieben ist. Fangnetze und Nylonangelschnüre benötigen gar an die 600 Jahre, bis sie sich aufgelöst haben.

Die Folgen der Kunststoffschwemme sind nicht nur in den Ozeanen und an den Stränden zu beobachten. Selbst im Sand entlang des glasklaren Gardasees fanden Wissenschaftler kürzlich bis zu 1000 Mikroplastikpartikel pro Quadratmeter. Und an der Küste von Hawaii entdeckten Geologen so viele Gebilde aus geschmolzenen Kunststoffen, Vulkangestein, Korallenfragmenten und Sandkörnern, dass sie ein neues Gestein taufen: Plastiglomerat.

Es ist ein Synonym für die große Verschwendung unserer Zeit, die natürlich nicht auf Kunststoffe beschränkt ist. Auch Gold, Kupfer, Aluminium und seltene Erden landen noch immer überwiegend achtlos auf Deponien. In einem Bericht der United Nations University heißt es, dass der Berg von Elektroschrott in 2014 eine Rekordmenge von 41,8 Millionen Tonnen erreicht hat – das entspricht der Ladung von mehr als einer Million Lastwagen, die aufgereiht eine Länge von 23 000 Kilometern ergäben. Nur ein Sechstel des Elektroabfalls, so

heißt es in der Studie, werde wiederverwertet. Ein schrecklicher Fehler, denn in dem recycelten Teil konnten so unter anderem immerhin 300 Tonnen Gold wiedergewonnen werden, ein Zehntel der Jahresproduktion von 2013!

»Wir interessieren uns viel zu wenig dafür, was mit Konsumgütern geschieht, nachdem wir sie genutzt haben«, kritisiert der Chemiker Armin Reller, Professor für Ressourcenstrategie an der Universität Augsburg. So würden viele Rohstoffe in einem Maß »verteilt, vermischt oder verdünnt«, dass wir sie nicht wirtschaftlich effizient in den Stoffkreislauf zurückführen können. Titandioxid etwa, das ein wichtiger Bestandteil von Sonnencremes ist, gelangt durch sonnenhungrige Touristen in die letzten Winkel der Erde und geht in Seen und Meeren unwiederbringlich verloren. Ähnliches gilt für die winzigen Mengen seltener Erden und anderer Wertstoffe in Milliarden von Mobiltelefonen.

DIE HERAUSFORDERUNG: GLOBAL DENKEN

Ohne eine weltweit funktionierende Kreislaufwirtschaft werden Konflikte um Wasser, Rohstoffe und Nahrung immer bedrohlicher. Bereits jetzt leben wir über unsere Verhältnisse: Nach Berechnungen des Global Footprint Network hat die Menschheit in 2014 innerhalb von acht Monaten die globalen Ressourcen des ganzen Jahres verbraucht. Alles danach war: Raubbau.

Doch wie kann der Übergang von der Wegwerfwelt zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Lebensweise schnell genug gelingen? Indem wir Müll möglichst vermeiden? So, wie es die New Yorker Studentin Lauren Singer vormacht, deren Abfall eines Jahres in drei Einmachgläser passt? In ihrem Blog www.trashisfortossers.com – »Abfall ist etwas für Idioten« – informiert sie ihre wachsende Anhängerschaft, wie ihr das gelingt. Askese als hipper Lifestyle. Originell und bewundernswert, aber sicherlich nicht massentauglich.

Da ist das Konzept der »Sharing Economy« vielversprechender: Teilen und

Tauschen, vom Fahrrad bis zum Sattelschlepper. »Wenn man bedenkt, dass beispielsweise ein Carsharingauto rund acht private Pkw ersetzt«, so der Nachhaltigkeitsexperte Harald Heinrichs von der Leuphana-Universität Lüneburg, »dann werden natürlich Ressourcen geschont.« Nur auf den globalen Müllberg haben solche Initiativen bislang kaum Auswirkungen.

Und Recycling? Es gibt sie ja hierzulande seit geraumer Zeit: die Mülltrennung, die Gelben Säcke und eine florierende Recyclingindustrie. »Der Begriff ›Kreislauf‹ klingt ungemein beruhigend«, moniert Jens Kersten, Autor des Buches »Das Anthropozän-Konzept« und Rechtswissenschaftler an der Ludwig-Maximilians-Universität München: »Im Kreislauf gibt es keine Verluste, alles ist Ressource. Nur: So einfach funktioniert das natürlich nicht.« Wie Kersten ausführt, landen viele Stoffe nach ein paar Recyclingdurchgängen eben doch in der Müllverbrennungsanlage. Außerdem würden wir einen guten Teil unseres Mülls, vor allem Elektroschrott, nach wie vor ins Ausland exportieren.

Auch eine Steigerung der Ressourceneffizienz scheint eine sinnvolle Maßnahme gegen die Rohstoffverschwendung zu sein. Tatsächlich hat sich das Verhältnis von eingesetzten Rohstoffen und Produktivität in vielen Industriestaaten stark verbessert. Deutschland nimmt dabei einen Spitzenplatz ein: Während in den Jahren 2000 bis 2010 das Wirtschaftswachstum stark anstieg, sank der Rohstoffbedarf gut 11 Prozent. Ein Erfolg, der das Thema hoch auf die politische Agenda hievt. In der Abschlusserklärung des G-7-Gipfels in Elmau heißt es: »Wir streben eine Verbesserung der Ressourceneffizienz an, die wir für die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie, für Wirtschaftswachstum und Beschäftigung sowie für den Schutz der Umwelt, des Klimas und des Planeten für entscheidend halten.«

Gerade im Bereich der chemischen Industrie, die stark von fossilen Rohstoffen abhängig ist, sind viele Produktions-

prozesse heute deutlich wirtschaftlicher als vor 20 Jahren. »Mit nachhaltiger, »grüner« Chemie sparen viele Unternehmen echtes Geld«, sagt GDCh-Präsident Thomas Geelhaar. »Nach der Energie- und Mobilitätswende werden wir eine Chemiewende anpacken müssen.«

DIE CHEMIE DES KOMPOSTES

Mark Gronnow vom Biorenewables Development Centre im britischen York sieht gute Chancen, dass sich aus Abfällen aus der Landwirtschaft und der Lebensmittelproduktion bis 2050 fast die Hälfte der Massenchemikalien herstellen lassen. Langfristig reiche eine optimierte Rohstoffnutzung aber nicht aus, es müsse einen echten Sinneswandel im produzierenden Gewerbe geben, fordert Klaus Kümmerer, Direktor des Instituts für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie in Lüneburg. Beispielsweise sei ein Hersteller von Desinfektionsmitteln bislang in erster Linie daran interessiert, möglichst große Mengen davon zu verkaufen. Dabei sei doch seine eigentliche Expertise die »Keimfreiheit«. »Wenn er sich also für das Keimmanagement statt für Kanister mit Desinfektionslösung bezahlen ließe, wäre er selbst erpicht darauf, so wenig wie möglich davon einzusetzen.«

Michael Braungart geht das alles nicht weit genug. Der Chemiker und Verfahrenstechniker hält das »Basteln« an immer effizienteren Lösungen, die weniger giftig sind oder weniger Rohstoffe benötigen, für vertane Zeit – und sogar für gefährlich: »Indem wir das Falsche perfekt machen, machen wir es perfekt falsch«, sagt er provokativ. »Ein Produkt, das zu Abfall wird, ist einfach ein schlechtes Produkt.«

Braungart eckt gerne an – um auf diese Weise zum Nachdenken zu animieren. Er will das Ende der Verschwendung erreichen, indem er die Dinge neu erfindet, anstatt sie »schrittchenweise« zu verbessern. »Unternehmen sollen Verbrauchsgüter so umweltfreundlich produzieren, dass man sie bedenkenlos auf den Kompost werfen kann. Gebrauchsgüter hingegen soll man so herstellen, dass sie nach

der Benutzung wieder und wieder recycelt werden können.«

Für Braungart gibt es keinen Abfall, nur »Nährstoffe«, die sich entweder rückstandslos abbauen oder dauerhaft in Produktionskreisläufe zurückführen lassen, ohne substanziiell an Materialwert zu verlieren. »Die entwickelten Produkte sollen nicht nur unschädlich, sondern in besonderer Weise nützlich für Mensch und Umwelt sein.« Er will durch intelligentes Produktdesign »upcyclen«, einen steten Zuwachs an Innovation und Nutzen generieren.

Das ist mit knappen Worten das Cradle-to-Cradle-Designkonzept, »von der Wiege zur Wiege«, kurz C2C, das er und sein Partner, der amerikanische Architekt William McDonough, vor mehr als einem Jahrzehnt entwickelt haben. Michael Braungart ist seither viel unterwegs – besonders häufig in den USA und den Niederlanden, wo seine Ideen mehr Resonanz als hierzulande finden. Der 57-Jährige lehrt an der Rotterdam School of Management, leitet die Environmental Protection Encouragement Agency (EPEA) in Hamburg und ist Mitbegründer von McDonough Braungart Design Chemistry in Charlottesville. Brad Pitt und Steven Spielberg sind erklärte Fans seiner Ideen. Bill Clinton schreibt im Vorwort über das aktuelle Buch von McDonough und Braungart, »Intelligente Verschwendung«: »Es ermutigt uns, allein durch genaues Hinschauen Lösungen und Innovationen zu finden und diese mutig in die Tat umzusetzen.«

Im »Showroom« der EPEA vis-à-vis des Hamburger Rathauses stapeln sich Produkte, die nach den C2C-Prinzipien entwickelt wurden. In einer Ecke sind verschiedenfarbige Teppichmuster aufgeschichtet, aus einem Material, das nicht nur wesentlich mehr Feinstaub binden kann als herkömmliche Gewebe, sondern sich nach Abnutzung auch vollständig wiederverwerten lässt. Daneben steht ein recycelbarer Staubsauger. Schaufensterpuppen tragen Kleidungsstücke, vom Trainingsanzug bis zur Berufskleidung. Darunter auch ein T-Shirt, das sich



UM EIN GRAMM GOLD ZU
GEWINNEN, MÜSSEN MINEN-
BETREIBER 1 TONNE GESTEIN
AUFBEREITEN. GENAUSO VIEL
GOLD STECKT IN
40 MOBILTELEFONEN.

kompostieren lässt und innerhalb weniger Monate rückstandslos zersetzt. Im gesamten Herstellungsprozess des Baumwollstoffs fallen keinerlei unverwertbaren oder problematischen Stoffe an.

Um Seminartische stehen Schreibtischstühle, deren Material sich rund 200-mal recyceln lässt, und Bürostühle, deren Sitzbezüge – im Prinzip jedenfalls – essbar sind. »Die schmecken natürlich nach nichts«, merkt Michael Braungart an, »aber Ballaststoffe sollen ja gesund sein.« Er präsentiert unter anderem Papierhandtücher und Toilettenpapier, die das Wasser »ausnahmsweise nicht mit Halogenverbindungen kontaminieren«, zeigt giftfrei geegerbtes Leder, das mit Auszügen aus Olivenblättern behandelt ist, und den ersten Flachbildfernseher, der 30 000-mal weniger Stoffe an die Umgebung abgibt als andere Geräte. Dachpappen aus Pflanzenölen und umweltfreundliche Dämmmaterialien sind zu sehen, Styroporersatz aus geschäumter Polymilchsäure und viele andere unterschiedliche

Verpackungsmaterialien – alle entweder biologisch abbaubar oder aus sortenreinem, leicht recycelbarem Kunststoff.

Braungart und seinem Team geht es meist darum, Herstellungsprozesse bis ins kleinste Detail zu analysieren und problematische Stoffe und Produktionsschritte durch umweltverträgliche zu ersetzen. Für das Papierhandtuch musste er 29 von 30 Prozesschemikalien austauschen, bis das Produkt wirklich vollkommen unschädlich war. »Der Aufwand ist am Anfang hoch, aber dann sind die meisten dieser Produkte auch nicht teurer herzustellen als vergleichbare Waren«, betont Braungart.

Manchmal sind es schon kleine Änderungen, die große Wirkung zeigen. Etwa im Fall der Bierdose der Firma Carlsberg, deren Grün erst auf den zweiten Blick von der gewohnten Farbe abweicht. Der Grund: Der Lack ist von anderer Zusammensetzung. Dafür ist er völlig giftfrei und liefert Energie für das Einschmelzen der Dose.

Tatsächlich stoßen die Cradle-to-Cradle-Ideen in der Industrie durchaus auf Interesse – und zwar nicht nur, weil sie einem grünen Image dienen. Hersteller wie Shaw Floors, Steelcase oder Trigema verdienen inzwischen mit C2C gutes Geld und weiten permanent ihr Angebot aus. Inzwischen gibt es über 2000 C2C-Produkte. Das fünfgeschossige Woodcube-Holzhaus in Hamburg erfüllt die Kriterien genauso wie Containerschiffe der dänischen Reederei Maersk. »Ich bin wirklich verblüfft, wie schnell sich die Idee verbreitet«, sagt Braungart. Er habe damit gerechnet, dass sie sich allenfalls mit der Geschwindigkeit des Frauenwahlrechts durchsetzen würde.

Er ist überzeugt, dass auf der Erde auch zehn Milliarden Menschen gut leben können – wenn wir es schaffen, entsprechend zu handeln. »Der Wandel vollzieht sich natürlich nicht blitzartig. Aber vom solarbetriebenen Google-Campus bis zur Phosphatrückgewinnung aus Abwässern in den Niederlanden, in Kanada, in Japan und anderswo: Die Revolution ist schon in Gang gekommen.«

FÜR DIE AUSSTELLUNG »WILLKOMMEN IM ANTHROPOZÄN« IM DEUTSCHEN MUSEUM IN MÜNCHEN ZEICHNETEN 30 JUNGE KÜNSTLERINNEN UND KÜNSTLER COMICS ZUM THEMA. SO WIE RUOHAN WANG, STUDENTIN AN DER UNIVERSITÄT DER KÜNSTE IN BERLIN, DEREN GESCHICHTE ZUR BRAUNKOHLE WIR HIER ZEIGEN.



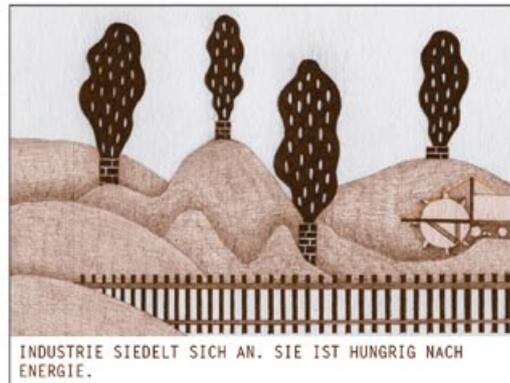
SEIT JAHRMILLIONEN LIEGEN BRAUNKOHLESCHICHTEN UNTER DER ERDE.



WENN DIE KOHLE ABGEBAUT WERDEN SOLL, MÜSSEN SICH DIE MENSCHEN EINE NEUE BLEIBE SUCHEN.



DER ABBAU DER KOHLE WIRKT SICH AUF DAS GRUNDWASSER, DIE VEGETATION UND DIE GESAMTE LANDSCHAFT AUS.



KOHLENDIOXID TRÄGT ZUR ERDERWÄRMUNG BEI. FOLGEN SIND NATURKATASTROPHEN UND DER ANSTIEG DES MEERESSPIEGELS.



DIE MENSCHEN MÜSSEN WIEDER UMZIEHEN. WO WERDEN SIE IN ZUKUNFT SICHER SEIN?

Aus: Hamann, A. et al. (2015). Anthropozän – 30 Meilensteine auf dem Weg in ein neues Erdzeitalter. Eine Comic-Anthologie. Deutsches Museum München, 80 S.



LINKS

PAUL CRUTZEN – THE GEOLOGY OF MANKIND

WWW.STUDGEN.UNI-MAINZ.DE/BOSE04/SCHWERP3/EXPOSE/GEOLOGY.PDF

INTERNATIONAL COMMISSION ON STRATIGRAPHY – ANTHROPOCENE WORKING GROUP

WWW.QUATERNARY.STRATIGRAPHY.ORG.UK/WORKINGGROUPS/ANTHROPOCENE

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

WWW.IPCC.CH

BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN

WWW.WBGU.DE

WELCOME TO THE ANTHROPOCENE

WWW.ANTHROPOCENE.INFO

WILLKOMMEN IM ANTHROPOZÄN – SONDERAUSSTELLUNG IM DEUTSCHEN MUSEUM (BIS ENDE 2016)

WWW.DEUTSCHES-MUSEUM.DE/AUSSTELLUNGEN/SONDERAUSSTELLUNGEN/2014/ANTHROPOZAEN

HAUS DER ZUKUNFT – DAS BLOG

WWW.HAUSDERZUKUNFT.BLOGSPOT.DE

DAS ANTHROPOZÄN-PROJEKT

WWW.HKW.DE/DE/PROGRAMM/PROJEKTE/2014/ANTHROPOZAEN/ANTHROPOZAEN_2013_2014.PHP

ENVIRONMENTAL PROTECTION ENCOURAGEMENT AGENCY – CRADLE TO CRADLE®

WWW.EPEA-HAMBURG.ORG

POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG

WWW.PIK-POTSDAM.DE

KLIMANAVIGATOR

WWW.KLIMANAVIGATOR.DE

TIME MAGAZINE – TIMELAPSE

[HTTP://WWW.WORLD.TIME.COM/TIMELAPSE](http://WWW.WORLD.TIME.COM/TIMELAPSE)

BÜCHER

CHRISTIAN SCHWÄGERL

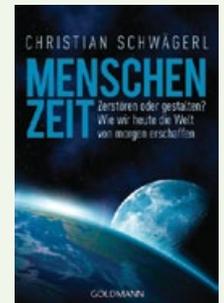
MENSCHEN-ZEIT

2012

Goldmann

384 Seiten

€ 9,99



JEREMY RIFKIN

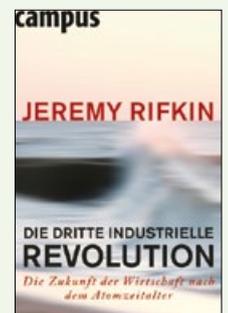
DIE DRITTE INDUSTRIELLE REVOLUTION

2011

campus

304 Seiten

€ 29,99



RELLER/HOLDINGHAUSEN

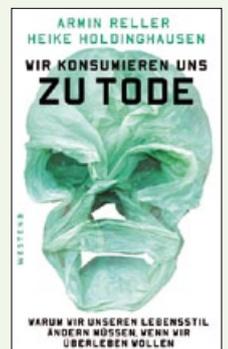
WIR KONSUMIEREN UNS ZU TODE

2013

Westend

224 Seiten

€ 14,99



BRAUNGART/MCDONOUGH

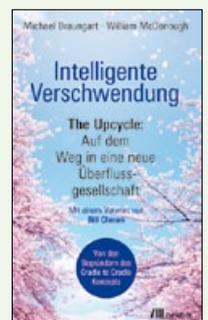
INTELLIGENTE VERSCHWENDUNG

2014

oekom

208 Seiten

€ 17,95





GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER
VARRENTAPPSTR. 40-42, 60486 FRANKFURT/MAIN
VERLAG: TEMPUS CORPORATE GMBH – EIN UNTERNEHMEN DES
ZEIT VERLAGS, BÜRO BERLIN, ASKANISCHER PLATZ 3,
10963 BERLIN, WWW.TEMPUSCORPORATE.ZEITVERLAG.DE,
INFO@TEMPUSCORPORATE.ZEITVERLAG.DE;
GESCHÄFTSFÜHRUNG: ULRIKE TESCHKE, JAN HAWERKAMP;
PROJEKT- UND REDAKTIONSLEITUNG: DR. JOACHIM SCHÜRING
AUTOR: RÜDIGER BRAUN
EINE KOOPERATION MIT SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, HEIDELBERG

