

Spektrum

der Wissenschaft



Neue Serie: Die Zukunft der Menschheit

Das Anthropozän

Ein neuer Abschnitt
der Erdgeschichte beginnt

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

VEITSTANZ Die zwei Gesichter des Huntington-Gens

ARCHÄOLOGIE Der große gesellschaftliche Umbruch am Ende der Eiszeit

TECHNIK Wie der erste Computer funktionierte





IMMUNONKOLOGIE VON
BRISTOL-MYERS SQUIBB

Mehr Informationen auf:
www.krebs.de

Die Entwicklung von immunonkologischen Therapien kann eine neue Perspektive für das Leben ermöglichen.

Die Behandlung von Krebs ist eine Herausforderung, der sich Bristol-Myers Squibb seit über 50 Jahren stellt. Dabei stehen intelligente Lösungen im Mittelpunkt unserer Forschung, um Krebs einen Schritt voraus zu sein.

Wir konzentrieren uns vor allem auf die **Immunonkologie**, die auf die Fähigkeit des körpereigenen Immunsystems setzt, Krebszellen zu bekämpfen.

Unser Ziel ist es, eines Tages möglichst viele Krebsarten mit diesem Therapieprinzip erfolgreich behandeln zu können.

Mehr Informationen zur Immunonkologie auf www.krebs.de



Bristol-Myers Squibb



EDITORIAL WIDER »POSTFAKTISCHEN« UNGEIST

Von Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

»Im Leben hätte ich mir nicht träumen lassen, dass ich einmal echte Angst um die Demokratie verspüren würde.« Die Bekümmernis rund um den großen Sitzungstisch ist mit Händen zu greifen. Dabei bilden die Worte des ergrauten Anthropologieprofessors, der mir direkt gegenüber sitzt, nur eine von vielen bangen Äußerungen, die ich in den zurückliegenden Wochen aus dem Mund von Forschern vernommen habe.

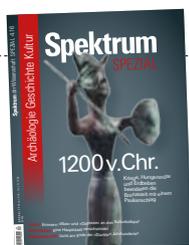
Advent. Hinter mir liegt ein Halbmarathon von Kongressbesuchen, Akademiesitzungen und Vorträgen. Ein ganz normaler Herbst, so gesehen. Doch es war kein normaler Herbst. Das Brexit-Votum, die Repressionen gegen Wissenschaftler und Journalisten in der Türkei, die Wahl Donald Trumps zum US-Präsidenten – die Fragen in den Kaffeepausen waren stets dieselben: Was blüht uns noch in Europa, in Deutschland? Und: Wie dem um sich greifenden Populismus begegnen? Manche Forscherinnen und Forscher treibt auch die Sorge um, gesellschaftlichen Rückhalt für den eigenen Berufsstand zu verlieren, ja als »intellektuelles Establishment« angefeindet zu werden nach der Morgendämmerung des so genannten postfaktischen Zeitalters, an dessen Bedrohungen sich die Tagespresse seit Wochen in Kommentaren abarbeitet.

Wissenschaft ist per se elitär. Sie kann nicht anders sein. Denn wer sie betreiben will, muss sich über viele Jahre immer weiter spezialisieren. Aber sie muss sich nicht elitär aufführen – oder vielmehr abschotten. Wissenschaftler können, ja müssen sich um den Dialog mit der Gesellschaft mühen, indem sie zunächst einmal verständlich erklären, was sie machen, warum und wie. Für diese Art von Kommunikation steht **Spektrum** wie kein anderes Medium in Deutschland; für direkte Dialoge haben wir zudem 2007 das Blogportal SciLogs gegründet (scilog.spektrum.de).

Wissenschaftler debattieren kaum »postfaktisch«, das liegt nicht in ihrer Natur. Würden sich also mehr von ihnen gerade auch in sozialen Netzwerken einbringen, es gäbe wohl mehr Diskurse, in denen Argumente statt Mutmaßungen, Gründe statt Effekte vorherrschen. »Ankoppeln an die Gesellschaft!«, muss die Devise lauten.

Ein frohes Weihnachtsfest und alles Gute für 2017 wünscht Ihnen
Ihr

Carsten Könneker



NEU AM KIOSK AB 23. 12. 2016!

Warum die mächtigsten Reiche der Bronzezeit quasi zeitgleich untergingen, lesen Sie im **Spektrum** Spezial Archäologie – Geschichte – Kultur 4.16.

AUTOREN DIESER AUSGABE



JAN ZALASIEWICZ

Für den Paläobiologen und Vorsitzenden der Arbeitsgruppe Anthropozän der Internationalen Kommission für Stratigraphie spricht vieles dafür, dass wir am Beginn eines neuen Abschnitts der Erdgeschichte stehen (S. 12).



RAÚL ROJAS

Der Informatiker spürt ab S. 64 den Ideen eines genialen Menschen nach, der Konzepte des modernen Computers vorwegnahm, aber sich nicht die Mühe machte, sie ordentlich aufzuschreiben: Konrad Zuse.



SONJA GRIMM DANIELA HOLST

Wie schnell haben sich unsere Vorfahren an einen dramatischen Klimawandel angepasst? Mit dieser Frage im Kopf betrachten die Archäologin Grimm und die Urgeschichtlerin Holst ab S. 76 das Ende der letzten Eiszeit im Detail.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Mogelpaket mit Krokodilen

Warum die Alpen wachsen

Unerklärliche Myonenschwemme

Künstliche Synapsen

Taumelnder Pluto

Wundheilung im Alter

CO₂-Emissionen steigen kaum noch

22 FORSCHUNG AKTUELL

Künstliche Weichtiere

Ein neuer Robotertyp kommt ohne metallische Bauteile aus

Darmbakterien unter Verdacht

Sie könnten eine wichtige Rolle bei der Entstehung der Parkinsonkrankheit spielen

Es muss nicht immer Wohlklang sein

Im Urwald Boliviens kennt man keine Dissonanzen

Genregulation

Ein Einzeller beleuchtet den Ursprung vielzelliger Tiere

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Überraschung!

Was wir vom Versagen der Demoskopen bei Brexit und Trump-Sieg lernen können

62 SCHLICHTING!

Lasst die Korken knallen!

Das Öffnen einer Sektflasche bringt nicht nur uns aus dem Gleichgewicht

75 FREISTETTERS FORMELWELT

Zu groß für dieses Universum

Grahams Zahl ist so gewaltig, dass sie sich nicht berechnen, sondern nur durch eine komplexe Formel darstellen lässt

12 GEOLOGIE **EINE VIELSCHICHTIGE ANGELEGENHEIT**

Neue Serie: Die Zukunft der Menschheit (Teil 1) Der Mensch verändert die Erde und hinterlässt dabei Spuren wie Beton und Ruß, die noch in Jahrmillionen in den Gesteinsschichten erkennbar sein werden. Vermutlich sind wir damit in einen neuen Abschnitt der Erdgeschichte eingetreten: das Anthropozän.

Von Jan Zalasiewicz

32 EVOLUTION **DIE ZWEI GESICHTER DES HUNTINGTON-GENS**

Chorea Huntington beruht auf einem Evolutionsparadox. Ein verlängerter Abschnitt im verantwortlichen Gen ist für unsere Hirnentwicklung unerlässlich, verursacht aber bei übermäßiger Mutation die tödliche Krankheit.

Von Chiara Zuccato und Elena Cattaneo

40 EPIDEMIOLOGIE **WIE GESUND IST DIE MENSCHHEIT?**

Ein Team von Gesundheitsforschern hat einen Supercomputer mit weltweit gesammelten Krankheitsdaten gefüttert und damit eine erste Gesamtdiagnose gestellt. Sie birgt viele Überraschungen.

Von W. Wayt Gibbs

46 ARTENSCHUTZ **DARF MAN BEDROHTE ARTEN UMSIEDELN?**

Manche Tiere und Pflanzen werden den Klimawandel in ihrem Verbreitungsgebiet nicht aushalten. Sollte man sie an geeignete Orte umsiedeln? Diese Option ist umstritten.

Von Richard Conniff

52 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **DAS RÄTSEL DER VERSCHWUNDENEN KOHLE**

Verbrennt man etwas Kohle in einem abgeschlossenen Gefäß, löst sich diese augenscheinlich in nichts auf. Warum wiegt das Gefäß danach dann noch genauso viel?

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

56 ASTRONOMIE **KRIEG DER TELESKOPE**

Bald sollen extrem große Fernrohre ein neues Zeitalter der Astronomie einläuten. Doch der Bau droht an alten Zwistigkeiten zu scheitern.

Von Katie Worth

64 COMPUTERGE SCHICHTE **KONRAD ZUSES GEDANKENFABRIK**

Bereits in seiner ersten Maschine, der Z1 von 1936, hat der Computerpionier Ideen vorweggenommen, die erst Jahrzehnte später zum Tragen kamen – allen voran die Mikroprogrammierung.

Von Raúl Rojas

76 ARCHÄOLOGIE **UMBRÜCHE AM ENDE DER EISZEIT**

Als Wälder die Tundren verdrängten, verschwanden die großen Herden. Jetzt können Forscher detailliert nachvollziehen, wie sich die Menschen an die neuen Bedingungen durch Innovationen anpassten.

Von Sonja Grimm und Daniela Holst

FOTO: ANDREW MEYERS; PROF. STYLING: ANGELA CAMPOS / STOCKLAND MARTEL



12

TITELTHEMA
DAS ANTHROPOZÄN

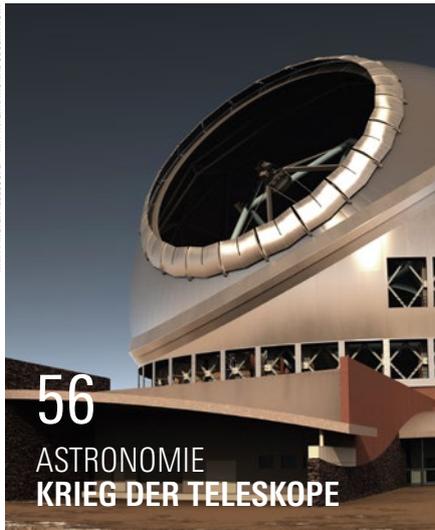
USMAN BASHIR, DUELLERSTRASSMANN RESEARCH GROUP AT WASHINGTON UNIVERSITY IN ST. LOUIS
COMING TOGETHER TO PREVENT COMMUNION DRUG LIENS BY SAUL OLEGA CODEI



32

EVOLUTION
DIE ZWEI GESICHTER
DES HUNTINGTON-GENS

THIRTY METER TELESCOPE - TMT INTERNATIONAL OBSERVATORY



56

ASTRONOMIE
KRIEG DER TELESKOPE

MITTEL: GEN. VON BRAGE, ROJAS



64

COMPUTERGESCHICHTE
KONRAD ZUSES GEDANKENFABRIK



FRANK GEHLENSEN / IZEM

76

ARCHÄOLOGIE
UMBRÜCHE AM
ENDE DER EISZEIT

84 REZENSIONEN

- Rudolf Simek:** Vinland!
- Klaus Taschwer:** Der Fall Paul Kammerer
- Volker Wittkamp:** Fit im Schritt
- Peter Ward, Joe Kirschvink:** Eine neue Geschichte des Lebens
- Jack Challoner:** Die Zelle
- Urs Neu:** Do-it-yourself Wettervorhersage

93 ZEITREISE

Von der Vogelnetzhaut zum Elektronenmikroskop

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Ein planetarer Liebesbrief
Auch ein künstliches Wesen wünscht sich, dass seine Gefühle erwidert werden

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

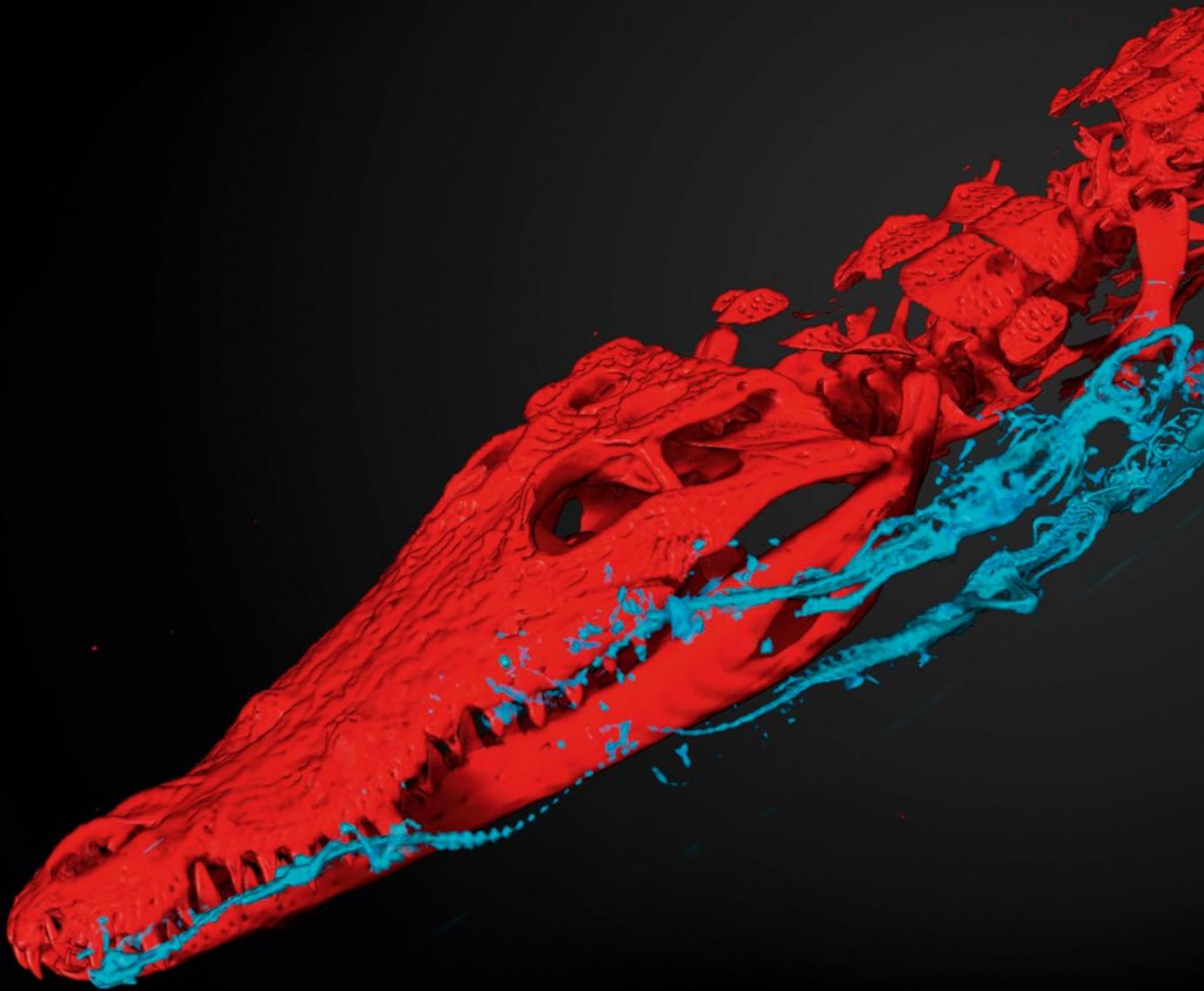
Titelbild: NASA Earth Observatory / Robert Simmon; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

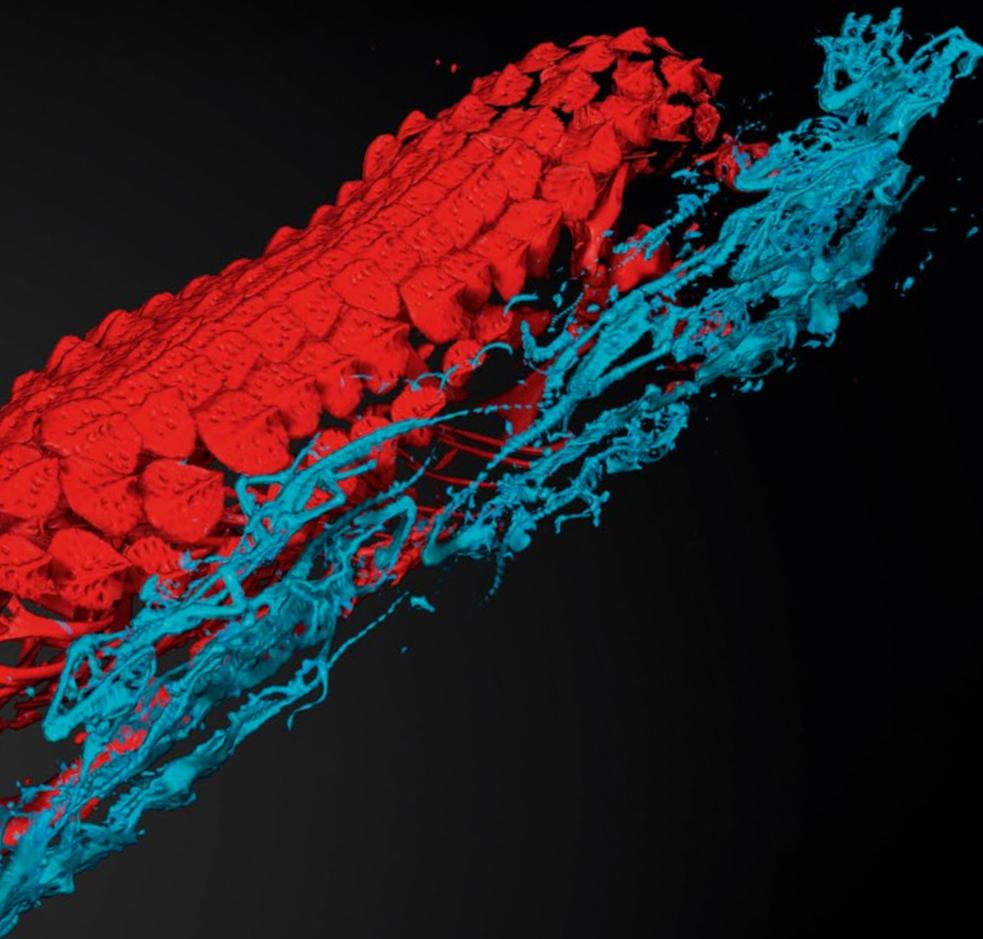


Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM

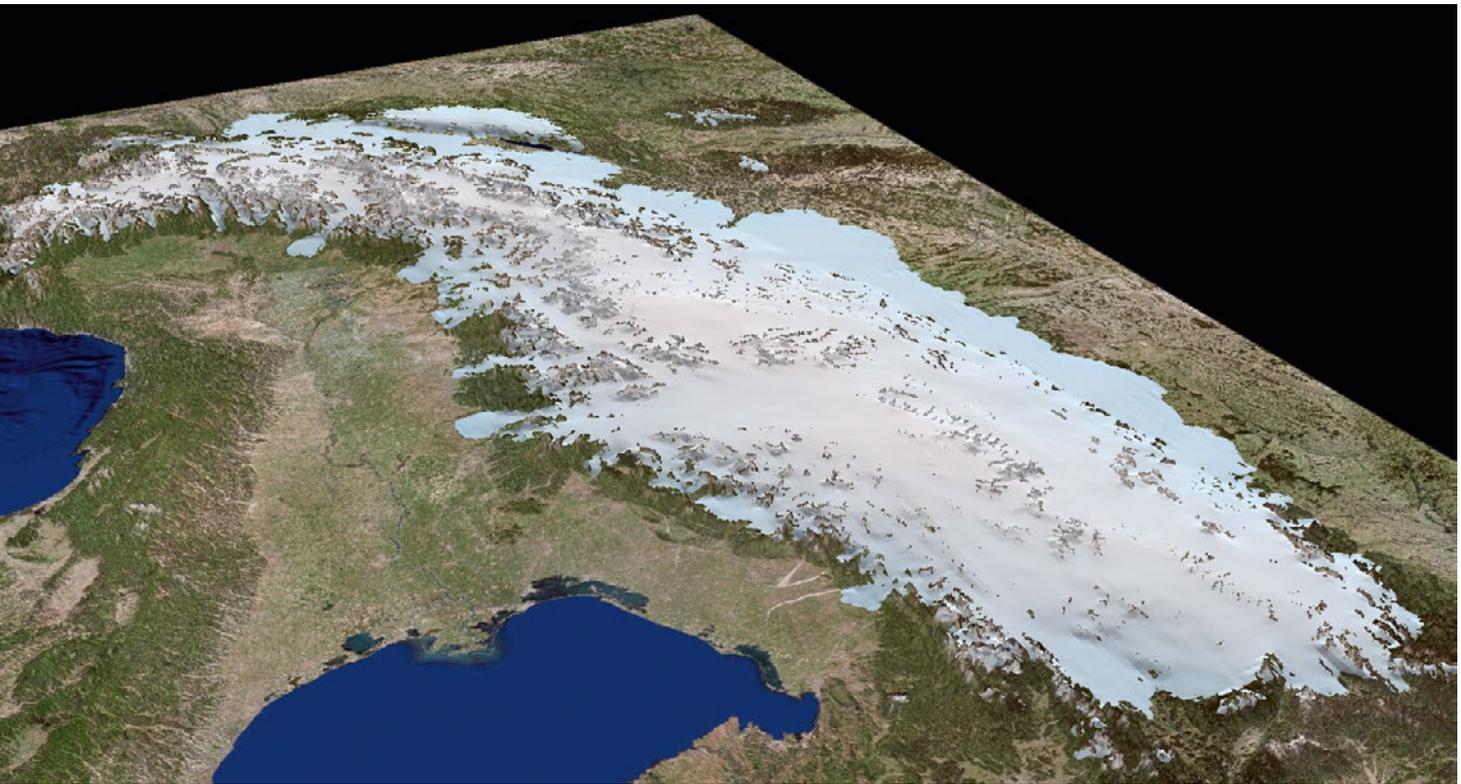




DUTCH NATIONAL MUSEUM OF ANTIQUITIES LEIDEN; SCAN: INTERSPECTRAL (WWW.RMO.NL/ENGLISH/CURRENT/NEWS/BABY-CROCODILES/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/4.0/LEGALCODE)

MOGELPAKET MIT BABYKROKODILEN

► Wissenschaftler des niederländischen Nationalmuseums für Altertümer in Leiden haben beim computertomografischen Scan einer rund 2500 Jahre alten ägyptischen Krokodilmumie zahlreiche beigelegte Babyexemplare (in Blau hervorgehoben) entdeckt. Von ersten Röntgenbildern aus dem Jahr 1996 war bereits bekannt, dass unter den Wickeltüchern des drei Meter langen Exponats zwei junge Tiere in die Form eines größeren (rot dargestellt) gebracht worden waren. Damals waren die weiteren kleinen Skelette noch nicht aufgefallen. Vermutlich hatten die Priester vor einem Opferritual kein hinreichend stattliches Krokodil aufzutreiben können und sich daher so beholfen.



JÜRGEN MEY, UNIVERSITÄT POTSDAM

Dieses computererzeugte 3-D-Modell zeigt die Eiskappe, die während des Höhepunkts der zurückliegenden Kaltzeit auf den Alpen lastete. Italien ist im Bild links unten.

GEOWISSENSCHAFT WARUM DIE ALPEN WACHSEN

► Jedes Jahr gewinnen die Alpen um ein bis zwei Millimeter an Höhe. Forscher vermuteten unter anderem, das hänge mit Erosion zusammen: Wasser und Wind tragen in den Tälern das Gestein ab, und der dadurch bedingte Massenverlust lasse das Gebirge aufsteigen.

Jürgen Mey von der Universität Potsdam und sein Team haben den Prozess nun in Computermodellen nachvollzogen und stellen eine andere These auf. Demnach ist die Hebung der Alpen eine Spätfolge der letzten Kaltzeit. Während des letzteiszeitlichen Maximums

(LGM), also vor 24 000 bis vor 18 000 Jahren, sei das Gebirge von mächtigen Eispanzern nach unten gedrückt worden – und federe seit deren Abschmelzen viskoelastisch zurück. Der Effekt halte bis heute an und sei für etwa 90 Prozent der gegenwärtigen Hebungsrate verantwortlich.

Fachleute hielten es bislang für eher wenig wahrscheinlich, dass dieses Rückfedern, die so genannte isostatische Bodenhebung, die Hauptursache des Alpenwachstums ist. Im Vergleich zu dem tausende Meter dicken Eisschild, der Nordeuropa während des LGM bedeckte, erschien die Vereisung der Alpen eher unbedeutend. Mey und sein Team kommen in ihren

Modellen allerdings zu dem Schluss, die Eislast auf den Alpen habe während des LGM etwa 62 Billionen Tonnen betragen. Seit der letzten Kaltzeit sei der Großteil dieses Eises abgeschmolzen – zugleich aber nur 4 Billionen Tonnen erodierter Sedimente ins Alpenvorland geschwemmt worden. Ein bedeutender Teil der Gesteinsmassen, die in dem Gebirge per Erosion abgetragen wurden, sei in den Alpentälern hängen geblieben und habe infolgedessen keine Last von dem Gebirge genommen. Tektonische Prozesse wiederum tragen in den Alpen nur regional und untergeordnet zur Hebung bei, schreiben Mey und seine Kollegen in ihrer Fachpublikation.

Nat. Commun. 7,13382, 2016

PHYSIK UNERKLÄRLICHE MYONEN- SCHWEMME

► In der kosmischen Strahlung treten hin und wieder Teilchen auf, die zigmillionenfach mehr Energie besitzen als jene, die in irdischen Beschleunigern zirkulieren. Die extremen Exemplare haben bis zu 10^{20} Elektronvolt – vergleichbar der kinetischen Energie eines Tennisballs. Allerdings sind sie sehr selten. Pro Quadratkilometer und Jahr trifft nur etwa eines die Erdatmosphäre. Dort kollidiert es mit Luftmolekülen und erzeugt einen Schauer von tausenden so genannten Sekundärteilchen, von denen einige bis zum

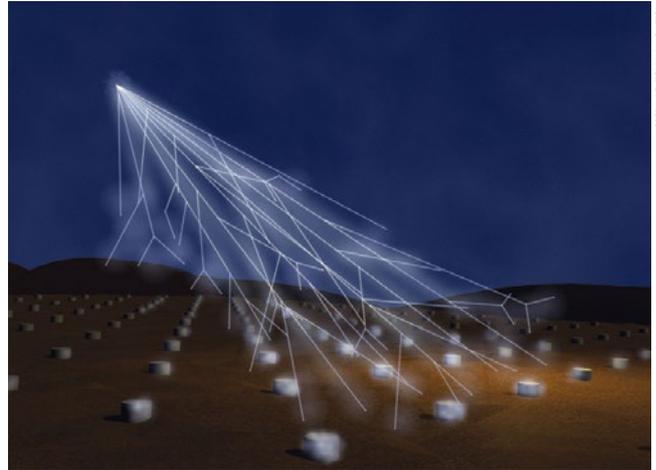
Boden vordringen. Indem man sie mit Detektoren registriert, kann man auf das ursprüngliche Teilchen zurückschließen und ermitteln, welche Prozesse es in der Atmosphäre auslöste.

Messungen mit Hilfe des Pierre-Auger-Observatoriums belegen jetzt allerdings, dass man solche Ereignisse noch unzureichend versteht. Das Observatorium deckt in Argentinien eine Fläche von 3000 Quadratkilometern ab und erfasst deshalb relativ viele Sekundärteilenschauer, die von hochenergetischen kosmischen Teilchen stammen. Die dort arbeitenden Wissenschaftler berichten, sie würden bei entsprechenden Aufprallereignis-

sen einen unerwartet hohen Anteil an Myonen beobachten – kurzlebigen Elementarteilchen, die Elektronen ähneln, aber deutlich mehr Masse besitzen. Laut den Messungen kommen bis zu 60 Prozent mehr Myonen am Observatorium an als erwartet.

Für ihre Analyse haben die Forscher 411 Ereignisse aus mehr als zehn Jahren Messzeit ausgewertet. Damit sind die neuen Daten deutlich aussagekräftiger als frühere Messungen, bei denen sich auf viel schmalere Datenbasis bereits ein Myonenüberschuss angedeutet hatte.

Eine Erklärung dafür steht noch aus. Möglicherweise wirken bei sehr hohen Teilchenenergien



ASPERA / G. TOMA / A. SAFIROU

Partikel der kosmischen Strahlung erzeugen in der Atmosphäre einen Teilchenschauer, den Detektoren am Boden registrieren.

bislang unbekannte Elementarteilchen oder Kräfte. Es könnte auch sein, dass dort Effekte zu Tage treten, die vormals unbemerkt

geblieben waren, weil sie bei geringeren Energien so gut wie keine Auswirkungen haben.

Phys. Rev. Lett. 117, S. 192001, 2016

BIOTECHNOLOGIE KÜNSTLICHE SYNAPSEN

► Nervenzellen kommunizieren miteinander, indem sie an einem synaptischen Spalt Neurotransmitter ausschütten und so Signale auf die Nachbarzelle übertragen.



THOR BALCHIED, LINKÖPING UNIVERSITY

Prototyp einer künstlichen Synapse. Zum Vergleich ist links daneben eine schwedische Zehn-Kronen-Münze abgebildet, die rund zwei Zentimeter Durchmesser besitzt.

gen. Ließe sich dieses Signalsystem technisch nachahmen, könnte man defekte Nervenverbindungen künstlich wiederherstellen.

Magnus Berggren und sein Team von der Universität Linköping (Schweden) haben nun den Prototyp einer winzigen Pumpe vorgestellt, die Botenstoffe ausschüttet, sobald sie ein elektrisches Eingangssignal erhält – und zwar annähernd so schnell wie Neurone, nämlich innerhalb von 50 000stel Sekunden. Das Gerät verfügt über sechs verschiedene Austrittskanäle, die sich individuell ansteuern lassen. Die Pumpe kann verschiedene Neuronenarten, die jeweils auf spezifische Neurotransmitter reagieren, gezielt aktivieren. Das bietet große Vorteile gegenüber der herkömmlichen Reizung mit elektrischen Impulsen, die undifferenziert alle in der Nähe befindlichen Zellen anregen.

Bisher testeten die Forscher ihre Miniaturpumpe nur im Labor. Im nächsten Schritt gilt es, die Technik an Zellen anzuwenden. In Zukunft könnten Mediziner entsprechende Geräte in den menschlichen Körper einsetzen, um damit Schmerz-, Epilepsie- oder Parkinsonpatienten zu behandeln.

Sci. Adv. 2, e1601340, 2016

PLANETOLOGIE TAUMELNDER PLUTO

► Der Zwergplanet Pluto könnte in der Vergangenheit um bis zu 60 Grad gekippt sein, einhergehend mit einer Wanderung seiner Pole. Zwei Forschergruppen entnehmen das ihrer Analyse einer der markantesten Strukturen auf dem Zwergplaneten, der Eisebene Sputnik Planitia, die man wegen ihres Aussehens auch »Herz von Pluto« nennt.

Beide Teams gehen davon aus, Sputnik Planitia sei der Rest eines großen Einschlagbeckens, das vor mehr als vier Milliarden Jahren entstand. Damals prallte wohl ein größerer Bolide auf den Pluto und hinterließ einen riesigen Krater, der sich später infolge geologischer Aktivitäten verformte. Heute befindet sich dort eine rund 1000 Kilometer große Senke. In ihr haben sich gewaltige

Mengen an Stickstoff-, Methan- und Kohlenstoffmonoxideis abgelagert – vermutlich mehrere Kilometer dick.

Die Eismassen müssen ein beträchtliches Gewicht haben und dürften Pluto damit eine Unwucht verleihen. Wahrscheinlich führte das in den zurückliegenden Jahrmilliarden dazu, dass sich der Himmelskörper neu ausrichtete – und zwar so, dass Sputnik Planitia an die so genannte Gezeitenachse heranrückte, die Pluto mit seinem Hauptmond Charon verbindet. Beide Himmelskörper befinden sich heute in einer Hantelrotation, wenden sich also immer die gleiche Seite zu, weil ihre Eigenrotationen exakt so lang dauern wie ein Umlauf um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, nämlich rund 6,4 Tage.

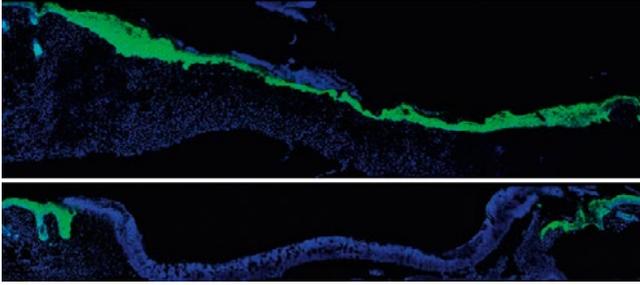
Im Zuge dieser Neuausrichtung drehte sich Pluto um schätzungsweise 60 Grad gegenüber der Rotationsachse. Seine Kruste muss dabei unter erhebliche Spannung geraten und aufgerissen sein. Das erklärt die weit verzweigten Verwerfungen und Grabenbrüche, die auf der Oberfläche des Zwergplaneten zu sehen sind. Wie dieses Netzwerk von Bruchlinien entstand, konnte eines der beiden Forscherteams im Computermodell nachvollziehen. Unklar ist jedoch, welche Rolle ein mutmaßlicher Ozean spielte, der sich 150 bis 200 Kilometer unter Plutos Oberfläche befinden soll. Indizien dafür, dass er existiert, waren erst vor wenigen Monaten entdeckt worden (siehe **Spektrum** September 2016).

Nature 10.1038/nature20148 und 10.1038/nature20120, 2016

In der Frühzeit des Sonnensystems traf ein großer Bolide den Pluto und schuf einen rund 1000 Kilometer großen Krater. Wie die Zeichnung illustriert, füllte sich dieser später mit Eis und entwickelte sich zur Eisebene Sputnik Planitia.

ILLUSTRATION: JAMES TUTTLE KEANE

LAB OF MAMMALIAN CELL BIOLOGY AT ROCKEFELLER UNIVERSITY



Neue Zellen (grün) schließen verletzte Mäusehaut (blau) – aber nicht bei gestörtem Signalaustausch mit Immunzellen (unten).

ZELLBIOLOGIE WUNDHEILUNG IM ALTER

Im Alter heilen Hautverletzungen deutlich langsamer, weil bestimmte Oberhautzellen, die hornbildenden Keratinozyten, weniger aktiv sind und nur noch eingeschränkt mit Immunzellen kommunizieren. Das haben Forscher um Elaine Fuchs von der Rockefeller University in New York jetzt herausgefunden.

Die Forscher verglichen die Wundheilung in der Haut von wenige Monate alten Mäusen mit der von zwei Jahre alten Tieren – also im Jugendalter und gegen Lebensende. Bei verletzten Jungtieren vermehren sich die Keratinozyten im umliegenden Hautgewebe und wandern in die Wunde, um sie zu schließen. Außerdem signalisieren sie Immunzellen, Mitogene (zellteilungsanregende Proteine) zu produzieren, die ihrerseits den Wundverschluss fördern.

Bei verletzten alten Mäusen teilen und bewegen sich die Keratinozyten hingegen langsamer, wie die Experimente zeigten. Außerdem regen sie die Immunzellen deutlich weniger zur Mitogenpro-

duktion an. Das Verheilen der Wunde dauert deshalb einige Tage länger als bei jungen Tieren. Behandelte das Team die alten Mäuse aber mit dem Botenstoff Interleukin-6, der Keratinozyten mobilisiert und deren Kommunikation mit den Immunzellen wiederherstellt, dann heilten die Verletzungen doppelt so schnell. Hier könnte ein Ansatzpunkt für verbesserte medizinische Behandlungen älterer Patienten liegen.

Cell 167, S. 1323–1338, 2016

KLIMASCHUTZ CO₂-EMISSIONEN STEIFEN KAUM NOCH

Die Kohlenstoffdioxid-Emissionen der Menschheit sind in den zurückliegenden zwei Jahren fast nicht mehr angestiegen – trotz wachsender Wirtschaft. Das geht aus der globalen Kohlenstoffbilanz 2016 hervor, die Forscher um Corinne Le Quéré von der University of East Anglia (Großbritannien) nun veröffentlicht haben.

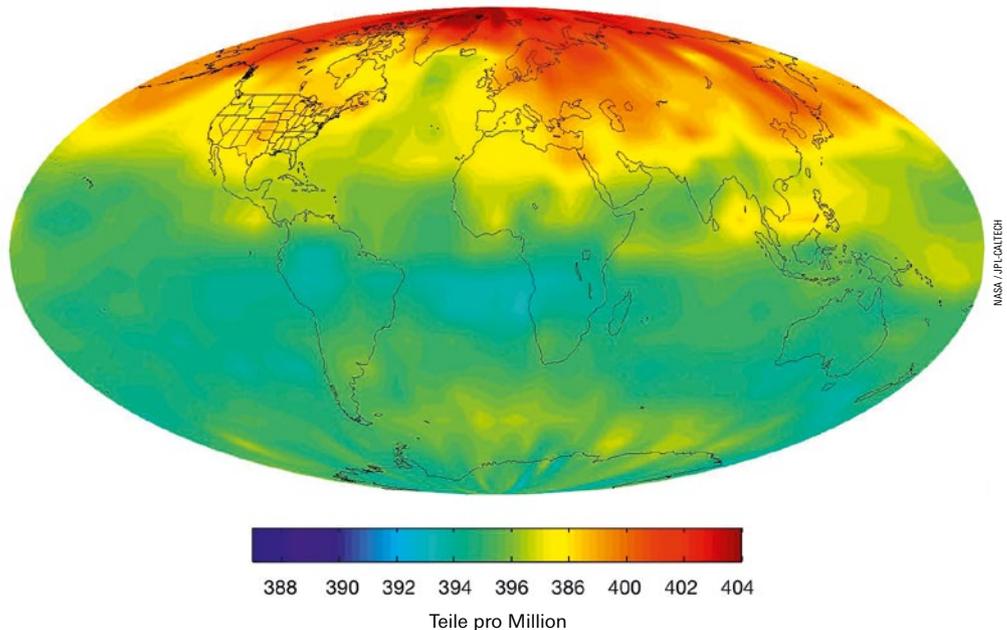
Der Anstieg der weltweiten CO₂-Emissionen lag im Jahr 2015 demnach bei nahezu null und im Jahr 2016 bei 0,2 Prozent. Das ist deutlich weniger als in den Jahren zwischen 2006 und 2015, als die Emissionen jährlich um 1,8 Prozent gestiegen waren. Maßgeblich zu der Trendverlangsamung beige-

tragen hat vor allem China, das dank höherwertiger Kohle beziehungsweise dem Umstieg von Kohle auf Öl und Gas seinen CO₂-Ausstoß in den zurückliegenden zwei Jahren leicht drosselte.

Allerdings bedeutet das keineswegs, die atmosphärische CO₂-Konzentration werde nun sinken. Denn die Menschheit stößt immer noch deutlich mehr Kohlenstoffdioxid aus, als das Erdsystem der Atmosphäre entzieht. Hinzu kommen vorübergehend erhöhte CO₂-Einträge in die Luft auf Grund des Klimaphänomens El Niño.

Die Forscher betonen deshalb, es sei nicht nur eine Stabilisierung, sondern eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen nötig, um den Temperaturanstieg – wie 2015 in Paris beschlossen – auf unter zwei Grad zu begrenzen.

Earth Syst. Sci. Data 8, S. 605–649, 2016



Kohlenstoffdioxid-Konzentration in 5 bis 9 Kilometer Höhe über dem Erdboden, gemessen im April 2013 mit Hilfe des Instruments AIRS an Bord des NASA-Forschungssatelliten »Aqua«.

GEOLOGIE

EINE VIELSCHICHTIGE

ANGELEGENHEIT

NEUE SERIE: DIE ZUKUNFT DER MENSCHHEIT Der Mensch verändert die Erde tief greifend und hinterlässt dabei Spuren, die noch in vielen Jahrmillionen klar in den Gesteinsschichten erkennbar sein werden. Geologen zufolge sind wir damit in einen neuen Abschnitt der Erdgeschichte eingetreten: das Anthropozän.



Jan Zalasiewicz ist Professor für Paläobiologie an der University of Leicester in England und Vorsitzender der Arbeitsgruppe Anthropozän der Internationalen Kommission für Stratigraphie. Sein besonderes Interesse gilt den Graptolithen, einer ausgestorbenen Gruppe polypenähnlicher mariner Tiere.

► spektrum.de/artikel/1420973

► Es war nur eine Formulierung aus dem Stegreif, doch sie prägte eine neue geowissenschaftliche Bezeichnung. Im Jahr 2000 nahm Paul Crutzen – niederländischer Meteorologe und Träger des Nobelpreises für Chemie – in Mexiko an einem Symposium teil. Dort diskutierten Experten über globale Umweltveränderungen im Holozän, jenem erdgeschichtlichen Abschnitt, der vor 11 700 Jahren begann und bis heute andauert. Crutzen, der mit seiner These berühmt geworden war, ein großer Atomkrieg könne einen nuklearen Winter auslösen und alles tierische und pflanzliche Leben auslöschen, wurde sichtlich immer ärgerlicher. Schließlich platzte es aus ihm heraus: »Nein! Wir sind nicht mehr im Holozän. Wir sind im ...«, er dachte einen Moment lang nach, »... Anthropozän!«. Im Saal wurde es still. Crutzen hatte offensichtlich einen Nerv getroffen. Im weiteren Verlauf der Tagung kam der Begriff immer wieder zur Sprache.

Wirklich neu war die Bezeichnung zwar nicht: Der Kieselalgenforscher Eugene F. Stoermer hatte sie schon einige Jahre zuvor benutzt, und die Begriffe Anthropozische Ära und Anthropozoikum stammen sogar aus dem 19. Jahrhundert. Nach dem erwähnten Symposium jedoch, als der renommierte und eloquente Crutzen gemeinsam mit Stoermer einen einschlägigen Artikel verfasste, begann sich die Bezeichnung unter tausenden Wissenschaftlern zu verbreiten. Die Anzeichen für einen neuen Abschnitt der Erdgeschichte seien eindeutig, argumentierten die beiden Autoren in ihrem Aufsatz: Seit Beginn der Industrialisierung habe der Mensch die Zusammensetzung der Atmosphäre und Ozeane verändert sowie die

SERIE

Die Zukunft der Menschheit

- Teil 1: Januar 2017
Eine vielschichtige Angelegenheit
von Jan Zalasiewicz
- Teil 2: Februar 2017
120 Jahre alt werden
von Bill Gifford
- Teil 3: März 2017
Reiche Welt – arme Welt
von Mara Hvistendahl
- Teil 4: April 2017
Keimbahntherapie durch die Hintertür
von Stephen S. Hall
- Teil 5: Mai 2017
Gespaltene Gesellschaft
von Angus Deaton
- Teil 6: Juni 2017
Der unsterbliche Mensch
von Hillary Rosner
Apokalypse oder Aufbruch?
von David Grinspoon

So gut erhalten wie auf diesem Foto dürften unsere Hinterlassenschaften in Millionen von Jahren nicht mehr sein. Gleichwohl wird man sie in den Sedimenten nachweisen können.

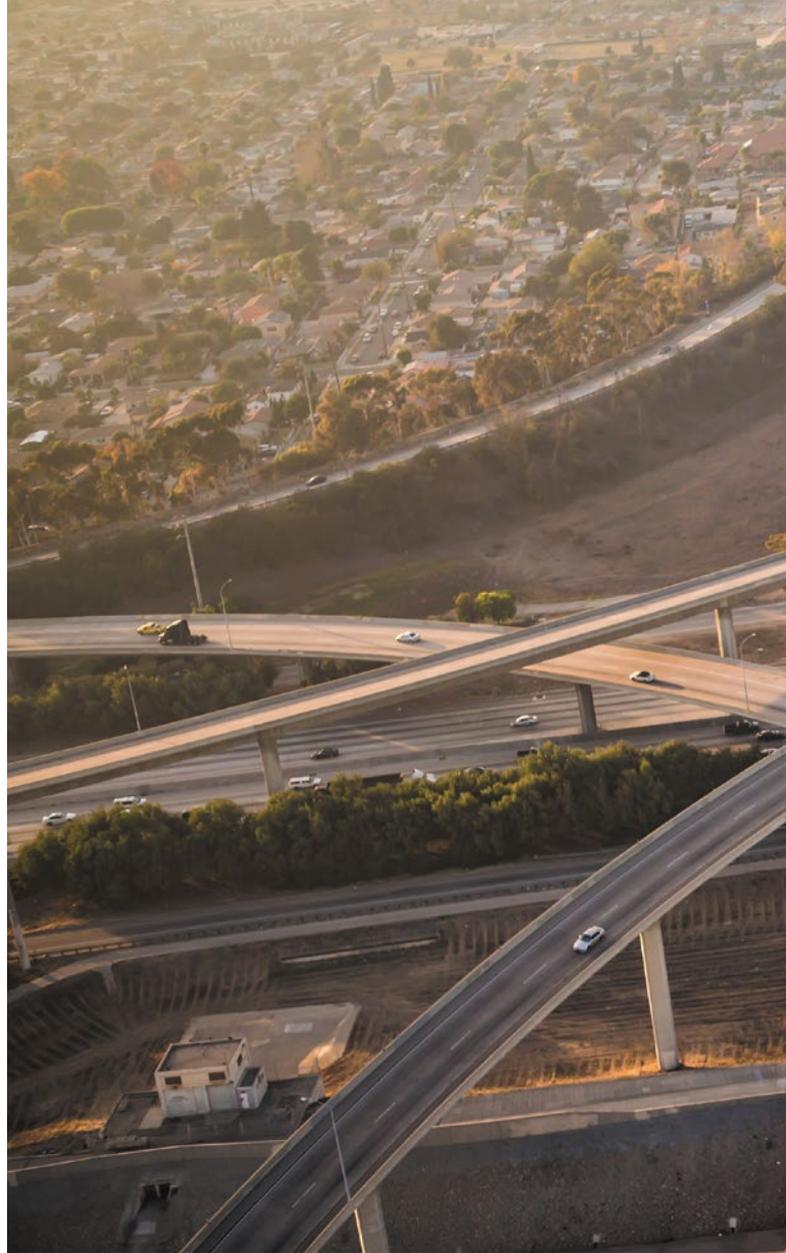


Landschaft und die Biosphäre maßgeblich beeinflusst. Der Mensch bestimmt ganz wesentlich den aktuellen Zustand der Erde, welcher sich von früheren Epochen deutlich unterscheidet. Crutzens und Stoermers Artikel bewirkte, dass der Begriff Anthropozän von nun an überall auf der Welt in der wissenschaftlichen Fachpresse auftauchte.

Doch greift der menschengemachte Wandel wirklich derart tief, dass er Spuren in Gesteinsschichten rund um den Globus hinterlässt – dass er also mit *stratigrafisch erfassbaren* Veränderungen einhergeht und eine neue *geochronologische* Epoche begründet? Stoßen wir Menschen wirklich Ereignisse an ähnlich jenen, die sich zwischen 18 000 und 8000 Jahren vor heute abspielten, während des Übergangs vom Pleistozän zum Holozän? Als ausgedehnte Gletscher abschmolzen, die zuvor große Teile der Erdoberfläche bedeckt hatten, so dass der Meeresspiegel um rund 120 Meter anstieg? Reicht der Einfluss des Menschen tatsächlich so weit wie der jener Prozesse, die vor 2,6 Millionen Jahren zur Vergletscherung der Arktis führten – zeitlich zusammenfallend mit dem Beginn des Pleistozäns? Menschengemachte Veränderungen auf dem Planeten spielen erst seit ein paar Jahrhunderten eine maßgebliche Rolle; ist es da berechtigt, sie mit geologischen Umbrüchen zu vergleichen, die sich auf Zeitskalen von Jahrtausenden abspielen?

Vermessener Anspruch des *Homo sapiens*?

Dass dem tatsächlich so sein könnte und damit auch ein neuer Epochenbegriff notwendig wäre – diese Idee kam bereits während des 19. und im frühen 20. Jahrhundert auf. Der italienische Geistliche Antonio Stoppani und der amerikanische Naturforscher Joseph LeConte benutzten Begriffe wie Anthropozoikum und Psychozoikum, stießen hiermit jedoch auf Ablehnung seitens zeitgenössischer Geologen. Wie könnte menschliche Aktivität, so spottete



GETTY IMAGES / SHABDRI PHOTO

AUF EINEN BLICK NEUER ABSCHNITT DER ERDGESCHICHTE

- 1** Die Menschheit verändert die Erde. Geologen erörtern, ob das dauerhafte Spuren in Gesteinsschichten hinterlässt, die einen geochronologischen Abschnitt namens Anthropozän zu definieren rechtfertigt.
- 2** Dafür spricht, dass die Ablagerung von Aluminium, Plastik, Beton, Rußpartikeln und radioaktiven Substanzen mittlerweile ein flächendeckendes Phänomen ist.
- 3** Geologen suchen nach einer charakteristischen Veränderung in den Sedimenten, an der sich der Beginn des Anthropozäns festmachen lässt. Wahrscheinlich kann man sie für die Mitte des 20. Jahrhunderts belegen.

man damals, sich je mit der Entstehung oder dem Untergang ganzer Ozeane und Gebirge messen oder mit gewaltigen Vulkanausbrüchen und Einschlägen riesiger Meteoriten? Verglichen damit erschienen anthropogene Einflüsse unbedeutend und flüchtig.

Tatsächlich liegt die Messlatte, um einen neuen geochronologischen Zeitabschnitt zu definieren, ausgesprochen hoch. Nur wenn Experten der Internationalen Kommission für Stratigrafie (ICS) voll und ganz davon überzeugt sind, dass der Mensch den Verlauf der Erdgeschichte grundlegend verändert, ist es möglich, als neue Epoche das Anthropozän festzulegen. Geologische Bezeichnungen wie Jura, Kreide oder Holozän sind nicht bloß Etiketten; sie sind genau definierte Unterteilungen, die erst nach jahrzehntelanger Datenerhebung und Diskussion akzeptiert wurden und als Bestandteile einer grundlegenden geologischen Zeitskala beschreiben, wie sich die Erde in den zurückliegenden 4,6 Milliarden Jahren entwickelt hat.

Das Anthropozän muss diesen wissenschaftlichen Bewertungsprozess weit gehend noch durchlaufen. Mit



GETTY IMAGES / SHABDRI PHOTO

Die Menschheit verändert das Landschaftsbild, bewegt mehr Erdkruste als Flüsse und Wind zusammen und hinterlässt ihren Fußabdruck in den Gesteinsschichten.

Paul Crutzen hat ein hochgeachteter Wissenschaftler den Begriff populär gemacht, doch Crutzen ist Atmosphärenchemiker und Umweltforscher – und kein Experte für Gesteinsschichtenkunde (Stratigrafie), der bewerten könnte, ob das Anthropozän formal als Epoche gelten kann. Trotzdem wurde der Begriff in Veröffentlichungen zunehmend so verwendet, als handle es sich tatsächlich um eine solche. Dies erkannten die Wissenschaftler der Stratigrafischen Kommission der Geologischen Gesellschaft von London 2008 an und beschlossen, die Entwicklung näher unter die Lupe zu nehmen. Eines ihrer Mitglieder, der Geologe Philip Gibbard, regte die Gründung einer Arbeitsgruppe an, die seither dieser Frage nachgeht. Im August 2016 bestätigte sie auf dem Internationalen Geologischen Kongress in Kapstadt die Thesen von Crutzen und Stoermer. Als Nächstes wird es nun darum gehen, eine charakteristische Veränderung in den Sedimenten zu suchen, an der sich der Beginn des Anthropozäns festmachen lässt.

Damit das Anthropozän formal als eigenständige Epoche anerkannt werden kann, müssen Forscher nachwei-

sen, dass die menschlichen Einflüsse klare Spuren in Gesteinsschichten zurücklassen, die in dutzenden oder hunderten Millionen Jahren noch nachweisbar sind. Der Fokus auf Gesteinsschichten ist dabei von wesentlicher Bedeutung. Schicht für Schicht lagern sich Sedimente und Vulkanite (vulkanische Ergussgesteine) übereinander ab; je tiefer also eine Schicht liegt, umso länger ist die Epoche her, in der sie entstand. Eine so genannte Stufe – die Grundeinheit der Chronostratigrafie, die einem definierten Abschnitt der Erdgeschichte entspricht – muss sich klar von darunter und darüber liegenden Stufen unterscheiden: etwa durch das weltweit erste Auftreten bestimmter Pflanzen- oder Tierarten, erkennbar an deren Fossilien; durch Anomalien in der Element- oder Isotopenverteilung; durch Umkehr der magnetischen Polarisierung und so weiter. Nur wenn das Anthropozän diese Voraussetzung erfüllt, ist es eine eigene chronostratigrafische Einheit. Doch trifft dies tatsächlich zu? Auf jeden Fall gibt es hierfür einige gute Argumente.

Ein wichtiger Bestandteil der Gesteine sind Metalle. In natürlicher Form liegen sie fast immer in Verbindungen

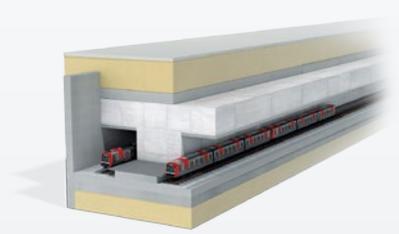
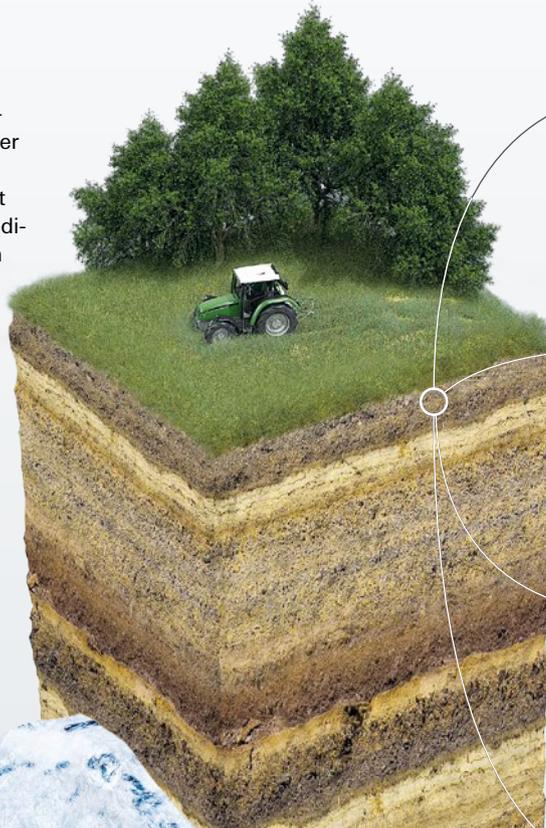
SPUREN DES MENSCHEN

Die Hinterlassenschaften des modernen Menschen sind so allgegenwärtig, dass Substanzen wie Plastik und Beton die sich heute bildenden Gesteinsschichten durchziehen. Außerdem werden anthropogen freigesetzte Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid und Methan in Luftbläschen in Eisschilden eingeschlossen.



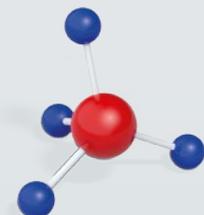
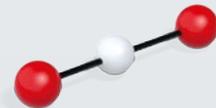
Erdreich

Schicht für Schicht setzen sich Sedimente und Vulkanite übereinander ab. Damit das Anthropozän als eigener erdgeschichtlicher Abschnitt gelten kann, müssen sich seine Sedimente klar von zuvor abgelagerten Schichten unterscheiden.



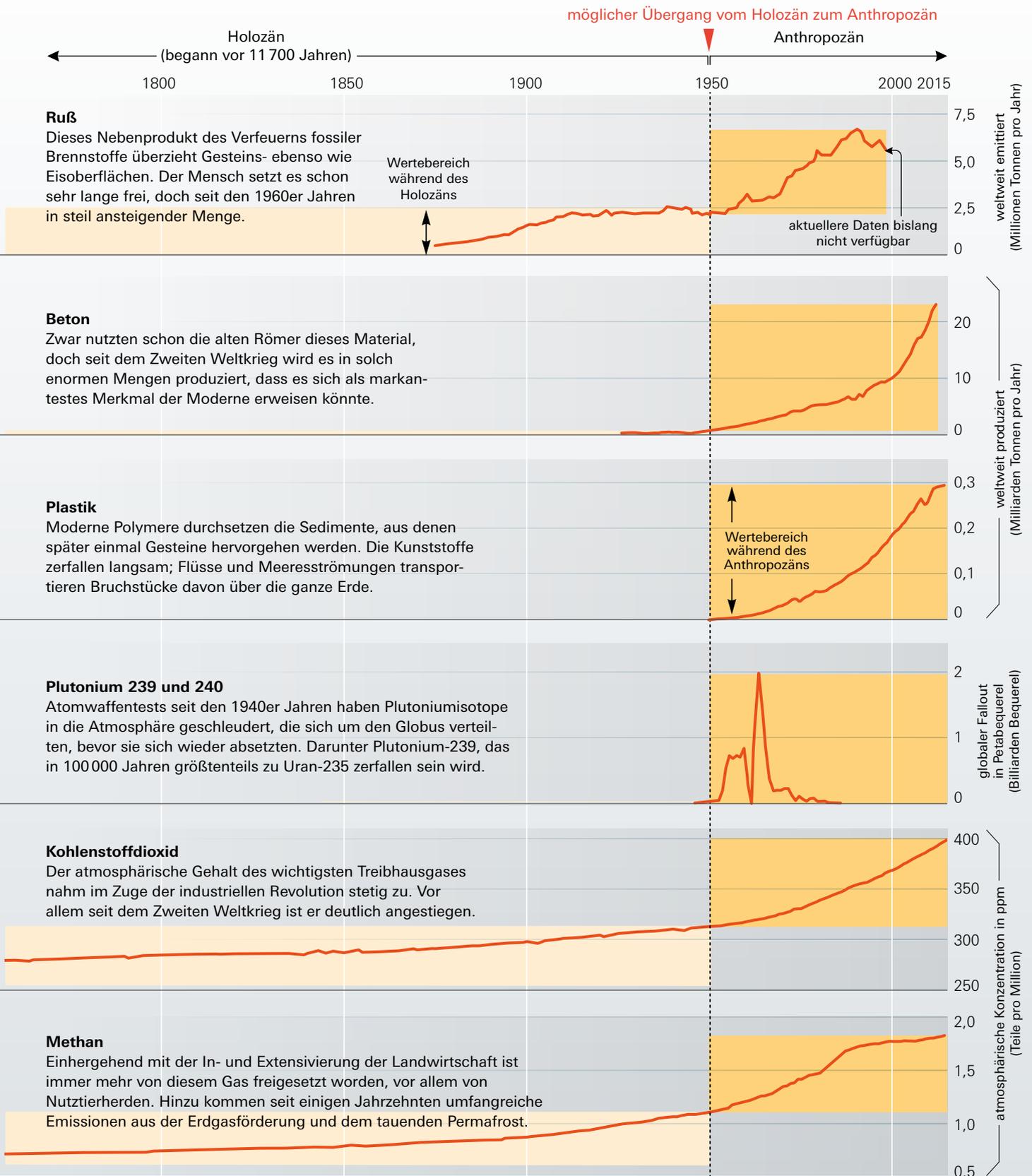
Eis

Auf den Landeischilden setzt sich Jahr für Jahr eine neue Eisschicht ab. Darin eingeschlossen werden kleine Luftbläschen. Analysiert man solche Lufteinschlüsse in altem Eis, kann man die Gaszusammensetzung der Atmosphäre zu früheren Zeiten ermitteln – teils mehrere hunderttausend Jahre zurück.



Wann beginnt das Anthropozän?

Es häufen sich die Anzeichen dafür, dass wir einen neuen geochronologischen Abschnitt eingeläutet haben: das Anthropozän. Wissenschaftler prüfen derzeit, ob und seit wann diese Epoche klar vom Holozän unterscheidbar ist, das vor 11 700 Jahren mit dem Rückzug der Gletscher am Ende der letzten Kaltzeit begann. Es spricht einiges dafür, als Grenze zwischen den beiden Epochen das Jahr 1950 festzulegen. Kennzeichen des Anthropozäns sind mittlerweile rund um den Globus zu finden.



Berge von Kunststoff, wie hier auf einer Müllhalde in Jakarta, werden dauerhafte Spuren in der Erdkruste hinterlassen – ebenso wie die Betonwüste New Yorks.



GETTY IMAGES / ULET IFRANSATI

wie Oxiden, Karbonaten oder Silikaten vor, abgesehen von wenigen Ausnahmen, etwa Gold. Aus diesen Verbindungen trennt der Mensch sie heute in riesigen Mengen heraus. Aluminium beispielsweise ist seit dem Zweiten Weltkrieg in einer Menge von mehr als 500 Millionen Tonnen gewonnen worden – genug, um ganz Europa mit Metallfolie zu bedecken. Milliarden Getränke- und Konservendosen, Haushaltsgeräte, weggeworfene Aluminiumfolie und anderer Schrott liegen heute überall in der Landschaft und in Müllhalden herum. Reines Aluminium wird also zunehmend zum Bestandteil frischer Sedimentschichten – ein klares Unterscheidungsmerkmal zu vergangenen Epochen.

In der Plastikära

Eine der drastischsten Veränderungen in der mineralischen Zusammensetzung der Gesteine erfolgte vor etwa 2,5 Milliarden Jahren. Damals reicherte sich die Erdatmosphäre mit Sauerstoff an, und es entstanden massenhaft Oxide und Hydroxide, unter anderem Rost. Der Mensch verursacht heute ähnlich gravierende Umwälzungen, indem er mineralische Verbindungen herstellt und freisetzt, die zuvor in diesen Mengen nicht vorkamen. Dazu gehört Wolframkarbid, ein Bestandteil von Werkzeugen und Kugelschreibern. Besonders bemerkenswert sind die so genannten Mineraloide: mineralähnliche, aber nicht-kristalline Stoffe wie Glas oder Plastik. Vor dem Zweiten Weltkrieg waren Kunststoffe nur in wenigen Erzeugnissen zu finden, zu nennen sind hier Schellack, Bakelit und Viskosefasern. In der Nachkriegszeit jedoch schnellte ihr Gebrauch rasant in die Höhe. Heute stellt die Menschheit jährlich rund 300 Millionen Tonnen Kunststoffe her – etwa so viel wie die Körpermassen aller Menschen zusammengekommen. Die Haltbarkeit, die wir an Plastik so schätzen, bedeutet, dass diese Stoffe viele, viele Jahre lang in der Umwelt verweilen werden – an Land wie in den Ozeanen.

Plastikmüll hinterlässt im terrestrischen Untergrund bereits sehr deutliche Spuren. Eine noch größere geologische Bedeutung hat er jedoch in den Meeren. Dort nehmen Tiere die Kunststoffe häufig mit der Nahrung auf, und wenn sie sterben, lagern sich die synthetischen Verbindungen mit ihren Kadavern im marinen Sediment ab, ein erster Schritt zur Fossilisierung. Sehr wichtig dabei ist das mit bloßem Auge meist nicht sichtbare Mikroplastik, das beispielsweise in Form synthetischer Textilfasern vorliegt. Weit, weit draußen im Meer, fern jeder Küste, finden Wissenschaftler inzwischen auf jedem Quadratmeter Meeresboden Tausende dieser Fasern.

Auch in Form künstlicher Gesteine, allen voran Beton, verewigt sich der Mensch überall. Bis heute haben wir etwa eine halbe Billion Tonnen davon hergestellt, das entspricht einem Kilogramm auf jeden Quadratmeter der Erdoberfläche. Aus Beton bestehen sowohl Gebäude als auch Straßen und Staudämme, und in Form von Bruchstücken macht er einen erheblichen Anteil des Untergrunds von Städten aus. Zusammen mit Ziegeln und Keramik ist Beton damit ein Leitgestein des Anthropozäns. Zudem verteilen wir große Teile der Erdkruste ständig um, indem wir landwirtschaftlich genutzte Böden umgraben oder Baugruben anlegen. Dadurch bewegen wir heute mehr Sediment als Flüsse und Wind zusammengekommen.

Metalle, Kunststoffe und Beton lagern sich aber nicht nur direkt in den globalen Gesteinsschichten ab. Auch ihre Herstellung, einhergehend mit dem Verfeuern großer Mengen fossiler Brennstoffe, erzeugt eine weltweite chemische Signatur – in Form von Verbrennungsprodukten, die sich in Sedimenten anreichern. Der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre steigt seit der industriellen Revolution 100-mal schneller als zu Beginn des Holozäns, als sich die Gletscher zurückzogen. Das Treibhausgas wird für lange Zeit in den Luftbläschen der polaren Schnee- und Eiskappen eingeschlossen.



GETTY IMAGES / GEORGE HAMMERSTEIN

Das Verfeuern fossiler Stoffe lässt auch Ruß entstehen: winzige, unvollständig verbrannte und chemisch träge Partikel. Indem sie weltweit zu Boden sinken, erzeugen sie in Sedimenten eine dauerhafte Spur. Besonders deutlich sieht man das am Übergang zwischen Kreide- und Paläogenschichten (nach alter Benennung: Kreide- und Tertiärschichten), der Rückstände verheerender Brände enthält, ausgelöst von einem gewaltigem Meteoriteneinschlag. Und die Verbrennung schlägt sich noch auf weitere Weise nieder – da fossile Brennstoffe einen hohen Gehalt an ^{12}C -Isotopen aufweisen, verdünnt das massenhafte Verfeuern fossilen Kohlenstoffs die ^{14}C -Menge in der Atmosphäre. Heute lebende Pflanzen und Tiere enthalten somit relativ wenig ^{14}C . Sofern sie nach ihrem Tod zu Fossilien werden, liefern sie über ihre Isotopenzusammensetzung ein klares Indiz für das Anthropozän im Sediment.

Globale Folgen der Landwirtschaft

Weitere Spuren legt der Mensch mit der Landwirtschaft. Zwar begannen unsere Vorfahren schon vor etwa 10 000 Jahren mit Ackerbau und Viehzucht, aber erst seit dem frühen 20. Jahrhundert setzen Landwirte in riesigen Mengen Stickstoffdünger ein – ermöglicht durch das Haber-Bosch-Verfahren, mit dessen Hilfe sich der Stickstoff aus der Luft binden und nutzen lässt. Neu ist auch der massive Gebrauch von Phosphatdüngern. Die Folgen dieser agrarischen Innovationen sind heute unübersehbar: Selbst in abgelegene Gewässer trägt der Wind die Düngemittel ein. Gelangen diese mit Abwässern in Flüsse und schließlich ins Meer, regen sie das Algenwachstum an. Es entstehen große Planktonblüten, die den Sauerstoff im Meerwasser verbrauchen und hunderttausende Quadratkilometer große »Todeszonen« hervorbringen, denen unzählige Meeresorganismen zum Opfer fallen. Deren Fossilien werden künftig Zeugnis vom Anthropozän ablegen.

Zu nennen sind ebenso langlebige organische Schadstoffe wie Insektizide oder toxische Industriechemikalien wie Dioxine. Sie verunreinigen inzwischen zahlreiche Sedimente und dürften, wenigstens teilweise, über geologische Zeiträume erhalten bleiben. Vergleichbares ist Paläontologen bereits bekannt: Die langkettigen Kohlenstoffverbindungen einiger prähistorischer Algenarten benutzen Wissenschaftler heute als Marker, um das Klima vor einigen zehn Millionen Jahren zu rekonstruieren.

Die deutlichsten Rückstände des Anthropozäns sind die winzigen radioaktiven Partikel, die sich im Zuge zahlreicher Atombombenexplosionen global verteilt haben. Zwar sind »nur« zwei Bomben bei kriegerischen Konflikten eingesetzt worden. Zwischen Mitte der 1940er und Ende der 1990er Jahre ließen die Atomkräfte jedoch mehr als 500 Kernwaffen in Tests detonieren. Die freigesetzten, strahlenden Teilchen finden sich heute im Boden, im Eis der Polkappen und in Sedimenten am Meeresgrund, und sie werden von zahllosen Tieren und Pflanzen aufgenommen – ein bleibender Fingerabdruck unserer Zivilisation.

Immer offensichtlicher wird der Einfluss, den wir auf die Biosphäre ausüben. Er dürfte sich in den Gesteinsschichten der Zukunft widerspiegeln: als Übergang von

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



NASA / JPL / SUW-GRAFIK

einer Fossilienvergesellschaftung zu einer neuen. War der Mensch noch vor wenigen Jahrtausenden eine Tierart unter vielen, so hat er sich inzwischen zum dominanten Raubtier entwickelt, zu Wasser wie zu Land. Wir beanspruchen nicht nur rund ein Viertel der gesamten Produktion der irdischen Biosphäre für uns. Auch stellt unsere Art ein Drittel der Gesamtkörpermasse aller Landwirbeltiere. Die übrigen zwei Drittel sind im Wesentlichen Nutztiere, die uns als Nahrungslieferanten dienen. Die echten Wildtiere tragen kaum mehr als fünf Prozent bei und sind damit inzwischen eine Randerscheinung. Zudem haben wir die verbliebenen Wildtierbestände global durchmischt und weltweit vereinheitlicht. Der Planet erlebt einen menschengemachten Artenverlust, der bald Ausmaße vergleichbar jenem an der Kreide-Paläogen-Grenze erreichen könnte, als die Dinosaurier verschwanden.

Die Menschen stellen ein Drittel der Gesamtkörpermasse aller Landwirbeltiere

Hinterließen frühere Lebewesen ihre Spuren etwa in Form von Dinosaurierfußabdrücken oder Grabgängen mariner Würmer, so schafft der Mensch heutzutage ein ganzes Arsenal solcher Erinnerungsstücke. Bergwerke und Bohrlöcher dringen etliche Kilometer in den Untergrund vor und prägen den Planeten dauerhaft, ebenso wie Fundamente, Leitungen und U-Bahn-Systeme im Untergrund.

Alles in allem hinterlässt die Menschheit also enorm viele geologische Signaturen auf dem Planeten. Um zu beantworten, inwieweit sie überdauern, lohnt ein Blick auf die Gesteinsschichten der zurückliegenden vier Milliarden Jahre. Wo sich die Erdkruste hebt, etwa in Gebirgsbildungsregionen, erodiert die Oberfläche und wird als Sediment ins Meer geschwemmt. Wo sich die Kruste senkt – etwa unter großen Flussdeltas –, sammeln sich geschichtete Sedimente an und schließen allerlei Ablagerungen ein, so dass selbst flüchtige Strukturen wie die von Blättern, Zweigen und Fußabdrücken vielfach erhalten bleiben. San Francisco, von tektonischen Kräften gehoben, wird im Lauf der Zeit verwittern und vermutlich keine Spuren zurücklassen. New Orleans, Schanghai und Amsterdam dagegen sinken ab, was viele ihrer großen und komplexen Baustrukturen konservieren dürfte – neben Aluminium-, Plastik- und Keramikerzeugnissen sowie Skeletten mit metallischen Zahnfüllungen und künstlichen Hüften. Kehrt sich dieser Prozess in vielen Jahrmillionen um, so dass die absinkenden Schichten durch tektonische Kräfte wieder aufsteigen, dürften an künftigen Felswänden Gesteinsschichten sichtbar werden, die sich im Anthropozän abgelagert haben – mitsamt ihren Einschlüssen.

Tatsächlich könnte der anthropogene Einfluss den Planeten ähnlich verändern wie der Meteoriteneinschlag am Ende der Kreidezeit. Zwar war dessen direkte Stoßwelle nach wenigen Stunden vorüber, doch der Aufprall hatte

Konsequenzen für Jahrmillionen und im Grunde bis heute: Ohne ihn gäbe es uns wohl nicht. Analog dazu könnte auch unser Dasein nachwirken, wenn wir schon längst verschwunden sind. Viele Entwicklungen, die wir anstoßen, verstärken sich über Rückkopplungsschleifen selbst, beispielsweise klimatische Veränderungen und das Artensterben. Sie befinden sich derzeit gerade erst im Frühstadium. Unabhängig davon, wie schnell wir damit aufhören, fossile Brennstoffe zu verbrauchen: Die Auswirkungen dieser Wirtschaftsform klingen erst in Jahrtausenden ab.

Zusätzlich schafft der Mensch einen Faktor, der weit komplexer ist als Meteoriteneinschläge oder abschmelzende Gletscher. Mit unseren kognitiven Fähigkeiten, unserem Manipulationsvermögen und unseren Möglichkeiten, Wissen weiterzugeben, haben wir eine Technik erzeugt, die uns am Leben erhält und mit wachsendem Tempo selbst zu evolvieren beginnt. Diese »Technosphäre« lässt sich als Auswuchs der Biosphäre ansehen, doch ihre Entwicklung hat eine eigene Dynamik angenommen, die wir nur noch zum Teil kontrollieren. Es ist nicht ausgeschlossen, dass dereinst eine computerbasierte Intelligenz entsteht, die uns Konkurrenz macht. Unter all den globalen Veränderungen, die die Zukunft der Erde prägen werden, ist die Technosphäre der Joker. Sie könnte ein revidiertes Anthropozän hervorbringen dergestalt, dass der Mensch darin nicht länger der entscheidende Faktor ist.

Falls sich die Geologen tatsächlich für die Einführung eines Anthropozäns entscheiden, müssen sie festlegen, wann dieses begann beziehungsweise beginnt. Die Spanne der Vorschläge ist enorm breit und reicht von dem Zeitpunkt, als menschlicher Einfluss erstmals erkennbar wurde – vor einigen tausend Jahren – bis weit in die Zukunft, wenn die Auswirkungen viel deutlicher als heute zum Tragen kommen werden. Aus verschiedenen Gründen scheint es am sinnvollsten zu sein, den Beginn des Anthropozäns in die Mitte des 20. Jahrhunderts zu legen. Damals nahmen die Bevölkerungszahl, der Energieverbrauch und der Grad der Industrialisierung stark zu, einhergehend mit einem steil ansteigenden Umsatz von Beton, Plastik und Plutonium und deutlichen Veränderungen in Flora und Fauna, die in künftigen Gesteinsschichten erkennbar sein werden (siehe »Spuren des Menschen«, S. 16/17).

Was die Geologen jetzt brauchen, um den Beginn des Anthropozäns klar zu definieren, ist ein »Golden Spike«: Eine charakteristische Veränderung in den Sedimenten, die sich möglichst weltweit nachweisen lässt. Was könnte das sein? Radioaktive Stoffe oder Plastikpartikel? Oder ein Indikator für biochemische Veränderungen, die sich etwa in Baumringen oder Wachstumsbändern von Korallen niederschlagen? Die Suche hat begonnen. ◀

QUELLEN

Biello, D.: The Unnatural World. Scribner, New York 2016

Renn, J., Scherer, B.: Das Anthropozän. Matthes & Seitz Berlin, Berlin 2015

Schwägerl, C.: Menschenzeit. Goldmann, München 2012

Vince, G.: Adventures in the Anthropocene. Milkweed Editions, Minneapolis 2014

Der richtige Arzt – einen Klick entfernt.

**Einfach, schnell und überall den
passenden Mediziner finden.**

Die FOCUS-GESUNDHEIT Arztsuche umfasst rund 280.000 Ärzte in Deutschland aus allen Fachgebieten und die von der Redaktion empfohlenen Top-Mediziner – auch in Ihrer Nähe.

Vertrauen Sie bei Ihrer Suche auf fachkundige Empfehlungen von Ärzten und auf die Recherche der FOCUS-GESUNDHEIT-Redaktion.

**Website und kostenlose App:
focus-arztsuche.de**



**JETZT
ONLINE**

**Wissen, das hilft. FOCUS
GESUNDHEIT**



RYAN L. TRUBY UND MICHAEL WEHNER: MAZZOLA, E., MATOLI, V.: GENERATION SOFT. IN: NATURE 538, S. 400-401, FIG. 1. MIT FRIEDL. GEN. VON MICHAEL WEHNER

»Octobot«, der Weichroboter aus Harvard, ist gänzlich aus deformierbaren Materialien aufgebaut. Er kann seine acht Beine bewegen, indem der Treibstoff Wasserstoffperoxid (in diesem Bild zur Demonstration violett eingefärbt) sich an bestimmten Stellen (violette Rechtecke) zersetzt und dadurch die Beine an- und wieder abschwellen lässt.

ROBOTIK KÜNSTLICHE WEICHTIERE

An der Harvard University unternimmt ein Roboter ohne metallische Bauteile und ohne elektrische Energiequelle erste Kriechversuche.

Quallen, Tintenfische und Nacktschnecken machen es uns vor: Man braucht nicht unbedingt harte Knochen oder ein Chitin-Außenskelett, um zu überleben. Ein nachgiebiger Körper bietet sogar gewisse Vorteile. Zum Beispiel kann er sich so dünn machen, dass er vielleicht sogar durch die Türritze kommt; und Ereignisse wie einen Sturz aus großer Höhe übersteht er deutlich besser als unsereins.

Eine Maschine nach dem Vorbild des Tintenfischs erscheint dagegen zunächst abwegig. Vor allem einen Roboter stellen wir uns eigentlich mit metallischen Gliedern vor, die von Elektromotoren bewegt werden. Aber eine weiche Version ist zumindest im Prinzip machbar. Eine Gruppe am Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering der Harvard University unter Leitung von

Michael Wehner und Ryan L. Truby hat einen Prototyp hergestellt. Er hat einen Rumpf und acht Beine wie ein Oktopus, weswegen ihn seine Schöpfer »Octobot« taufen (Bild oben).

Im Prinzip könnte er ungefähr so kriechen, wie ein Insekt krabbelt: zwei rechte und zwei linke Beine auf den Boden aufsetzen und nach hinten drücken, wodurch der Rumpf sich vorwärtsbewegt, dann dieselbe Aktion mit den vier anderen Beinen und so weiter. Diesen Bewegungsablauf beherrscht der Prototyp zwar noch nicht, aber er kann immerhin recht überzeugend mit den Beinen wackeln.

Bisherige Weichroboter können sogar schon einigermaßen laufen, aber nur an der Leine: Energie und Steuerung werden mit konventionellen metallischen Mitteln – Batterie, Computerchip, Kupferleitungen – bereitgestellt und kommen über ein Kabel oder einen Schlauch. Bei dem neuen Modell dagegen ist alles Nötige an Bord – und im Wesentlichen nicht aus Metall.

Dem biologischen Vorbild hätte es entsprochen, wenn die Tüftler aus Harvard ihre Tierchen mit so etwas wie Muskeln ausgestattet hätten. Stattdessen griffen sie auf ein Prinzip zurück, das in der Tierwelt weniger zur Fortbe-

wegung als vielmehr zu geschlechtlichen Zwecken verwendet wird: das des Schwellkörpers. Indem Flüssigkeit in einen Körperteil gepumpt und am Abfließen gehindert wird, ändert sich dessen Form ebenso wie dessen Härte. Beim biologischen Vorbild wird dieser Bewegungsablauf zwar nicht in rascher Folge wiederholt, aber im Prinzip steht dem nichts entgegen. Wenn der Druck immer wieder auf- und abgebaut wird, entsteht eine periodische Bewegung.

Das Abgas ist reiner Sauerstoff – und das Abwasser reines Wasser

In dieser Form würde der Bewegungsapparat jedoch eine Pumpe erfordern, um den Druck bereitzustellen. Das wäre in der Tierwelt das Herz, womit das Problem, einen Muskel nachzubilden, nur verlagert wäre. Und die technische Lösung – eine konventionelle Pumpe aus hartem Material – sollte es auch nicht sein. Als Energiequelle verwendeten Wehner und Kollegen stattdessen ein altes Hausmittel: Wasserstoffperoxid. Das Molekül H_2O_2 ist schon auf einen geringen Anlass hin bereit, eines seiner beiden Sauerstoffatome von sich zu stoßen, so dass gewöhnliches Wasser (H_2O) zurückbleibt. Diesen Anlass bietet hier an geeigneter Stelle angebrachtes Platin. In den üblichen Anwendungen wirkt der Sauerstoff im Wesentlichen ätzend; zum Beispiel blondiert er dunkle Haare durch Zersetzen des in ihnen enthaltenen Melanins. Aber derlei chemische Aktivitäten sind hier gar nicht gefragt; es genügt, wenn er als schlichtes Gas den Hohlraum anschwellen lässt, in dem er sich befindet.

Dadurch bewegt sich ein Bein des Roboters. Es schwillt wieder ab und kehrt in seinen Ruhezustand zurück, sobald

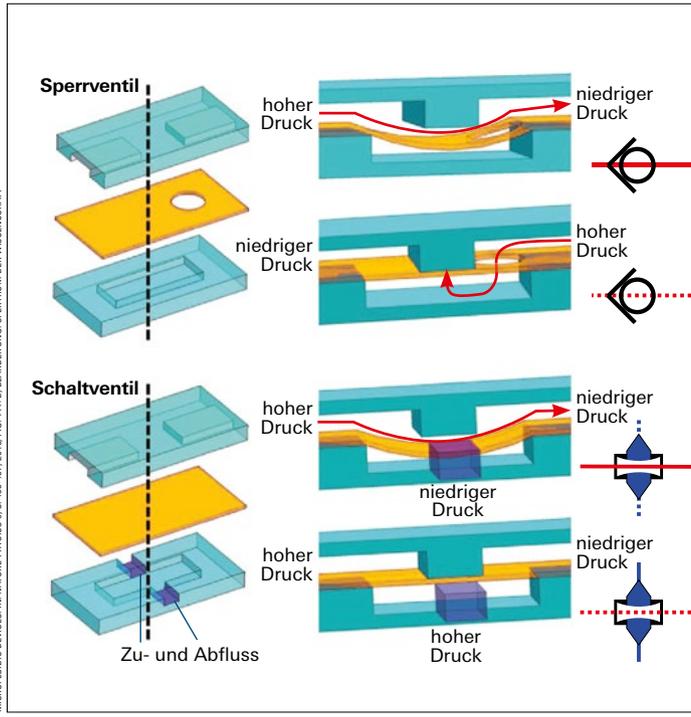
ein Ventil sich öffnet und das umweltfreundlichste aller Abgase – reinen Sauerstoff – in die Umwelt entlässt. Aber wie kann ein solches Bauteil funktionieren, wenn es nicht aus Metall bestehen darf, und wie wird es angesteuert? Die Frage stellt sich nicht nur für das Auslassventil, sondern auch für den Mechanismus, der periodisch den Kraftstoff in die Zielorgane strömen lässt.

Das Problem würde man heute standardmäßig mit einer elektronischen Ansteuerung lösen – die einem Weichroboter mangels Stromquelle nicht zur Verfügung steht. Stattdessen gingen die Konstrukteure aus Harvard zu den logischen Wurzeln der Computerei zurück: Sie besannen sich darauf, dass die Elektronen in einem Computerchip nichts anderes tun, als logische Verknüpfungen auszuführen, und dass gewöhnliche Flüssigkeiten das im Prinzip auch können, vorausgesetzt, man leitet sie durch die logischen Äquivalente von Transistoren und ähnlichen elektronischen Bauteilen.

Solche Gatter für Flüssigkeiten gibt es tatsächlich. Ihre elementaren Bestandteile heißen Sperrventil (»check-valve«) und Schaltventil (»switch-valve«), und eine multinationale Arbeitsgruppe an der University of Michigan in Ann Arbor unter Leitung von Shuichi Takayama hat sie bereits vor mehreren Jahren gänzlich aus weichen Materialien konstruiert. Allerdings sind manche Komponenten weicher als andere (siehe »Dioden und Transistoren für Flüssigkeiten«, unten).

Verglichen mit ihren elektronischen Gegenstücken sind die »Fluidik«-Bauteile geradezu lächerlich groß und quälend langsam. Aber dass ein Fluidik-Transistor ein paar Zehntelsekunden braucht, um von einem Zustand in den anderen zu wechseln, kommt den Konstrukteuren des

MUSCARELLI, B. ET AL. INTEGRATED ELASTOMERIC COMPONENTS FOR AUTONOMOUS REGULATION OF SEQUENTIAL AND OSCILLATORY FLOW SWITCHING IN MICROFLUIDIC DEVICES. IN: NATURE PHYSICS 5, S. 463-471, 2011. DOI: 10.1038/NPHYS1487



Dioden und Transistoren für Flüssigkeiten

Diese beiden elementaren Bauteile der »Fluidik« (»Flüssigkeitslogik«) sind sandwichartig aufgebaut: zwei Begrenzungen, die zusammen einen speziell geformten Kanal ergeben, mit einer elastischen Membran (gelb) dazwischen. Das ganze Bauteil ist deformierbar und die Membran noch weicher als die Außenteile.

Das Sperrventil (oben) wirkt wie eine Diode: Es lässt den (Flüssigkeits-)Strom nur in einer Richtung durch (im Bild von links nach rechts) und sperrt ihn in der Gegenrichtung.

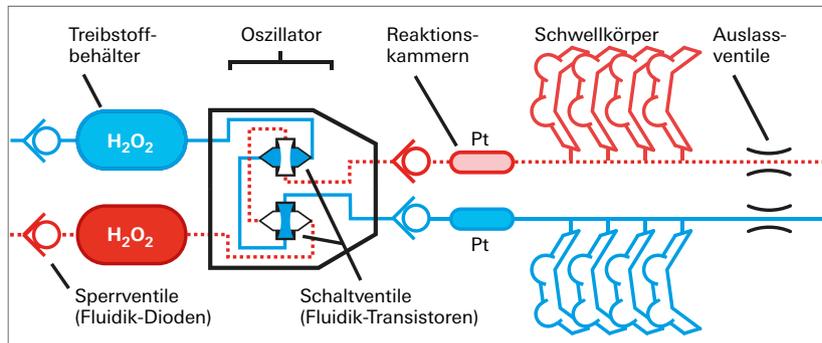
Das Schaltventil (unten) entspricht einem Transistor. Strom fließt ungehindert von links nach rechts (oder in Gegenrichtung), es sei denn, Flüssigkeit aus einer anderen Leitung dehnt den Ballon (blau) und versperrt damit den Weg.

Ein Oszillator für Flüssigkeiten

Mit zwei einander kontrollierenden Schaltventilen erzeugt der Octobot eine periodisch pulsierende Flüssigkeitsströmung.

Die beiden Treibstoffbehälter werden mit reichlich 50-prozentiger Wasserstoffperoxid-Lösung gefüllt. Indem sich die Wände der Behälter elastisch dehnen, erzeugen sie einen konstanten Druck in der Flüssigkeit. Der Inhalt beider Behälter ist chemisch derselbe; dass er hier in verschiedenen Farben dargestellt wird, dient nur der Verdeutlichung.

In der gezeigten Situation ist der Druck im blauen Behälter geringfügig höher als im roten. Daher sperrt die blaue Flüssigkeit der roten den Weg durch das obere Schaltventil und strömt ihrerseits ungehindert durch das untere. Daraufhin gelangt sie in die Reak-



tionskammer, wo sie sich in Gegenwart des Platin-Katalysators in (gasförmigen) Sauerstoff und Wasser zersetzt. Der dadurch erhöhte Druck bewegt die blauen Schwellkörper, während das Sperrventil dem Treibstoff den Rückweg versperrt. Nach getaner Arbeit fließt das Wasser ab, und der Sauerstoff entweicht.

Durch den Abfluss lässt der Druck im blauen System nach. Dagegen staut sich der rote Treibstoff auf, bis das untere Schaltventil anspricht und dem blauen den Weg versperrt. Daraufhin strömt der rote ungehindert aus und verrichtet sein Werk, bis der blaue wieder genug Druck aufgebaut hat und sich der Zyklus wiederholt.

Octobots gerade recht; denn dadurch lässt sich mit nur zwei Transistoren ein periodisch schwingendes System (ein Oszillator) bauen. Der wiederum treibt die Beinbewegungen im richtigen Tempo (siehe »Ein Oszillator für Flüssigkeiten«, oben). Mit mehr Bauteilen wäre das ganze System auch zu weiteren Bewegungsformen oder zu Reaktionen auf äußere Reize fähig.

Entsprechend dem Material, aus dem sie bestehen, werden Octobots nicht montiert (es gibt keine Schrauben festzudrehen), sondern im Wortsinn gebacken, und zwar in Rückenlage, mit den Füßen nach oben. An die Stelle des Konditors, der die Zuckermasse mit der großen Spritze dekorativ auf den Kuchen verteilt, tritt ein 3-D-Drucker, der auf ein zuvor hergestelltes Rückenteil Würste aus einem speziellen Kunststoffmaterial dorthin legt, wo später der Treibstoff fließen soll. Nach diesem Arbeitsschritt wird noch der Bauch aufgegossen und härtet aus – alle Materialien sind Kunststoffe mit sorgfältig kalibrierter Biegsamkeit –, und dann wandert das Ganze in den Backofen. Bei 95 Grad verdampft das Wurstmaterial und hinterlässt passend geformte, abgedichtete Röhren. An manchen Stellen war das Material mit etwas Platin angereichert; das setzt sich an den Wänden der Röhren ab und veranlasst im Betrieb den Treibstoff H_2O_2 , sich zu zersetzen und damit seine Arbeit zu leisten.

Den frisch gebackenen Roboter muss man nur noch auf die Füße stellen und »füttern«, das heißt die beiden Treib-

stofftanks mit 50-prozentiger Wasserstoffperoxidlösung füllen. Eine Kraftstoffpumpe erübrigt sich; das Einfüllen dehnt den Körper des Octobots in der Umgebung der Tanks und erzeugt dadurch einen Überdruck. Daraus macht der Oszillator, angestoßen durch ein kleines Ungleichgewicht am Anfang, die pulsierende Flüssigkeitsströmung, die schließlich die Bewegung erzeugt.

Wie könnte ein Weichroboter sich nützlich machen? Es fällt zur Zeit schwer, sich das vorzustellen; noch sind seine Körper- und Geisteskräfte viel zu bescheiden dafür. Immerhin ist es denkbar, dass ein mit mehr Kraft und Flüssigkeitslogik ausgestatteter Roboter nach einem Erdbeben amöbenartig durch die Trümmer eines eingestürzten Hauses kriecht, wo sein harter Kollege über lose Steine stolpert oder nicht durch enge Löcher in Hohlräume vordringen kann. ◀

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

QUELLEN

Mosadegh, B. et al.: Integrated Elastomeric Components for Autonomous Regulation of Sequential and Oscillatory Flow Switching in Microfluidic Devices. In: Nature Physics 6, S. 433–437, 2010

Wehner, M. et al.: An Integrated Design and Fabrication Strategy for Entirely Soft, Autonomous Robots. In: Nature 536, S. 451–455, 25. August 2016

PARKINSON DARMBAKTERIEN UNTER VERDACHT

In den meisten Fällen ist der Auslöser für die Parkinsonkrankheit unbekannt. Möglicherweise spielen hier die Bewohner unseres Verdauungstrakts eine wichtige Rolle.

► Eine der größten Sammlungen menschlicher Gehirne befindet sich im Universitätsklinikum Ulm, wo Heiko Braak und Kelly del Tredici-Braak forschen. Die Neuropathologen möchten herausfinden, wie die Alzheimer- und die Parkinsonkrankheit entstehen. Mehr als 7000 Gehirne hat das Ehepaar bereits untersucht und konnte daran zeigen, dass beide Erkrankungen in bestimmten Regionen beginnen und sich dann langsam und stufenweise im Gehirn ausbreiten. In den meisten Fällen ist allerdings unklar, was die fatale Entwicklung ausgelöst hat.

Die Forscher vermuten jedoch, dass die Parkinsonkrankheit von einem Pathogen verursacht werden könnte, das über den Verdauungstrakt in den Körper gelangt. Tatsächlich tauchen für Parkinson typische Proteinablage-

rungen, so genannte Lewy-Körper, zuerst im Nervensystem des Darms auf und erst später in den unteren Hirnregionen und schließlich im Mittelhirn. Dort sterben dadurch mit der Zeit immer mehr Nervenzellen ab. Die betroffenen Neurone schütten normalerweise Dopamin aus und regulieren darüber Körperbewegungen. Ihr zunehmender Verlust führt zu Bewegungseinschränkungen und dem typischen Zittern. Meist wird die Krankheit erst dann erkannt, wenn bereits ein Großteil dieser Zellen zerstört ist und die ersten solchen Symptome auftreten. Doch oft leiden die Patienten schon Jahre vorher unter Verstopfung und Appetitlosigkeit. Derartige Anzeichen, die das Verdauungssystem betreffen, könnten mit dem frühen Auftreten von Proteinablagerungen dort zusammenhängen.

Lewy-Körper entstehen, wenn sich das Protein alpha-Synuclein falsch faltet und so genannte amyloide Strukturen bildet: Klumpen ähnlich denen aus Beta-Amyloid bei Alzheimerpatienten. Dabei verklebt alpha-Synuclein mit weiteren Proteinen, so dass mit der Zeit immer größere Ablagerungen entstehen, die zelluläre Prozesse lahmlegen. Forscher vermuten, dass viele amyloidbildende Proteine – darunter auch alpha-Synuclein – eine Kettenreaktion auslösen können, indem falsch gefaltete Moleküle die gesunden dazu bringen, ebenfalls die schädliche Struktur anzunehmen. Der Mechanismus ist bereits von den Prionen her



**STERNE UND
WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2017

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 fantastische Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich; darüber hinaus zum Teil vom Weltraumteleskop Hubble und der Raumsonde Rosetta. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2017 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.

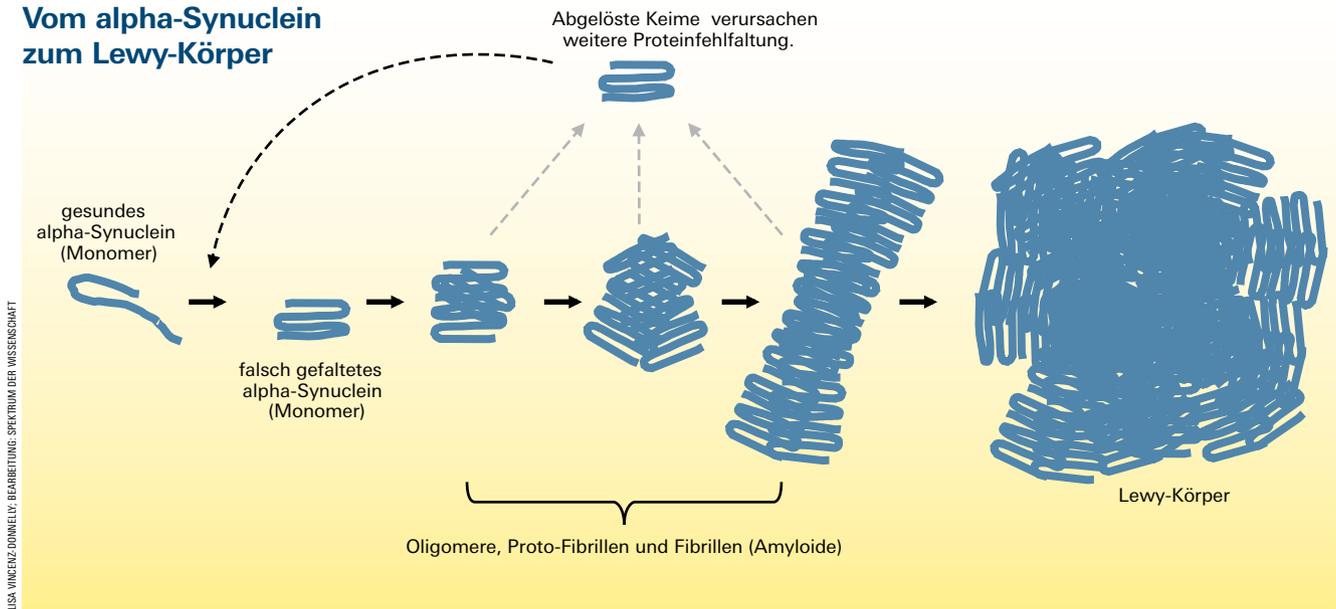
14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand



So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
sterne-und-weltraum.de/kalender
E-Mail: service@spektrum.de

MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!

Vom alpha-Synuclein zum Lewy-Körper



Im Gehirn von Parkinsonpatienten verkleben falsch gefaltete alpha-Synuclein-Proteine zu Lewy-Körpern. Von den zunehmend größeren Verklumpungen lösen sich neue Keime ab und verursachen die Fehlfaltung weiterer Monomere.

bekannt. Er war dafür verantwortlich, dass in den 1990er Jahren hunderte Menschen, vor allem in Großbritannien, an einer Variante der Creutzfeldt-Jakobs-Krankheit (CJK) erkrankten. Hier lösten schädliche Prionen aus verzehrtem Rindfleisch die Krankheit über den Verdauungstrakt aus. Laut Del Tredici-Braak und Braak könnte auch Parkinson über derartige pathogene Proteine entstehen.

Die lange Wanderung eines Protein vom Darm ins Gehirn

Eine große Frage dabei ist, wie ein solcher Erreger überhaupt vom Verdauungstrakt ins Mittelhirn gelangen könnte. Mehrere Forschergruppen identifizierten kürzlich den Vagusnerv, der Hirn und Verdauungstrakt verbindet, als eine mögliche Route. Im Jahr 2014 demonstrierte ein Team um Jia-Yi Li von der Universität Lund in Schweden, dass der Vagus bei Ratten tatsächlich alpha-Synuclein ins Gehirn transportiert. Die Wissenschaftler hatten die falsch gefalteten alpha-Synuclein-Proteine aus den Gehirnen verstorbener Parkinsonpatienten gewonnen und sie Ratten in den Darm gespritzt. Anschließend konnten sie beobachten, wie die Moleküle von dort aus langsam über den Vagusnerv ins Hirn gelangten.

Einigen Forschern zufolge könnte dies beim Menschen schleichend, über einige Jahrzehnte hinweg geschehen. Das würde aber auch bedeuten, dass sich der Prozess unterbrechen ließe, indem man diese Verbindung frühzeitig durchtrennt. Ein solcher Eingriff, Vagotomie genannt, den Ärzte in der Vergangenheit gelegentlich zur Behandlung von Magen-Darm-Geschwüren durchführten, müsste

folglich vor Parkinson schützen. So lautete zumindest eine Hypothese von Elisabeth Svensson von der Universität Aarhus in Dänemark. Um sie zu testen, analysierte ihr Team 2015 die Krankenakten aller Menschen Dänemarks, denen mindestens 20 Jahre zuvor Äste des Vagus unterhalb des Zwerchfells gekappt wurden (trunkuläre Vagotomie). Tatsächlich waren von diesen insgesamt 5339 Patienten in der Zwischenzeit deutlich weniger an Parkinson erkrankt als von einer Vergleichsgruppe aus der übrigen Bevölkerung. Allerdings war der Effekt insgesamt zu gering, um als statistisch aussagekräftig zu gelten. Dennoch liefert er laut vielen Forschern zumindest einen weiteren Hinweis darauf, dass die Krankheit im Darm beginnt.

Aber warum faltet sich das erste alpha-Synuclein im Darm überhaupt falsch und löst somit die Krankheit aus? Robert Friedland von der University of California in San Diego vermutet, dass bakterielle Proteine, die von einigen jener Billionen Mikroorganismen in unserem Darm stammen, dies verursachen könnten.

Viele Bakterien und Pilze produzieren ständig amyloidbildende Proteine. Denn mit klebrigen Amyloid-Fibrillen haften sie besser an Oberflächen, formen Biofilme und produzieren schützende Sekrete. So kommen etwa Bakterien, die ein solches Protein namens Curli produzieren, sehr häufig vor – auch im menschlichen Darm. Da Curli der Struktur von alpha-Synuclein teilweise ähnelt, vermuten Friedland und sein Team, dass es dieses zur Fehlfaltung anstiften könnte. Um die These zu testen, gaben sie alternden Ratten über mehrere Monate hinweg Bakterien zu fressen, die Curli absondern. Anschließend konnten die Forscher tatsächlich in verschiedenen Hirnregionen vermehrt Lewy-Körper nachweisen, auch wenn die Ratten zumindest während der Dauer des Experiments nicht an Parkinson erkrankten. Die kürzlich veröffentlichte Studie zeigt, dass Bakterien vom Darm aus die pathologische

Faltung und Ablagerung von alpha-Synuclein im Gehirn auslösen können. Ob sie das auch im menschlichen Körper tun, bleibt noch zu klären.

Allmählich schält sich die wichtige Rolle heraus, welche die Darm-Hirn-Achse bei der Parkinsonkrankheit spielt. Im Jahr 2015 zeigten mehrere Forschergruppen, dass das Mikrobiom bei Betroffenen anders zusammengesetzt ist als bei gesunden Menschen. Parkinsonpatienten haben auch häufig eine zu durchlässige Darmwand, was zusätzlich zur Fehlkommunikation zwischen Darm und Hirn führen und verstärkt Bakterien oder deren Produkte passieren lassen könnte. Es scheint daher auch plausibel, dass die genaue Zusammensetzung der Darmflora beeinflusst, ob wir Parkinson bekommen oder nicht. ◀

Lisa Vincenz-Donnelly ist Biochemikerin und Wissenschaftsjournalistin in München.

QUELLEN

Chen, S. G. et al.: Exposure to the Functional Bacteria Amyloid Protein Curli Enhances Alpha-Synuclein Aggregation in Aged Fischer 344 Rats and *Caenorhabditis elegans*. In: *Scientific Reports* 6, S. 1–10, 2016

Holmqvist, S. et al.: Direct Evidence of Parkinson Pathology Spread from the Gastrointestinal Tract to the Brain in Rats. In: *Acta Neuropathologica* 128, S. 805–820, 2014

Svensson, E. et al.: Vagotomy and Subsequent Risk of Parkinson's Disease. In: *Annals of Neurology*, S. 522–529, 2015

KOGNITION ES MUSS NICHT IMMER WOHLKLANG SEIN

Die Tsimane, ein indigenes Volk Boliviens, unterscheidet sich nicht zwischen konsonanten und dissonanten Zweiklängen – eine essenzielle Polarität in der westlichen Musiktradition. Doch bestätigt dieser Befund tatsächlich, dass deren Wahrnehmung nicht angeboren, sondern kulturell erworben ist?

Spannung und Entspannung, Dissonanz und Konsonanz, das sind die Pole, zwischen denen sich die uns vertraute Musik bewegt, ob Bachkantate oder Heavy Metal. Wird diese Regel gebrochen, etwa im Jazz, geschieht dies meist um bestimmter Effekte oder Klangfarben willen. Ist diese Wahrnehmung angeboren oder erlernt? Ein Forscherteam um den Neurowissenschaftler Josh McDermott vom Massachusetts Institute of Technology suchte Antworten auf diese Frage – im bolivianischen Urwald.

Genauer gesagt in einem Dorf der Tsimane. Da es nur mit dem Kanu zu erreichen ist und über keine Stromerzeuger verfügt, sollten seine Bewohner mit westlicher Musik wenig in Berührung gekommen sein. Und tatsächlich

unterscheidet sich ihre eigene davon bereits in einem zentralen Punkt: Sie ist einstimmig.

Diesen Indios präsentierten die Forscher Zusammenklänge mittels Kopfhörer; wie angenehm sie diese empfanden, bewerteten die Probanden auf einer Skala von 1 bis 4. Als Kontrollgruppen fungierten US-Amerikaner mit einem oder zwei Jahren Erfahrung im Spielen eines Instruments sowie Einwohner einer bolivianischen Kleinstadt und der Hauptstadt La Paz.

Ist Konsonanz das Ergebnis einfacher Frequenzverhältnisse aller erklingenden Obertöne?

Schon in der griechischen Antike suchten Gelehrte nach einer Erklärung, warum der Zusammenklang zweier Töne je nach ihrem Abstand als beruhigend oder spannungsgeladen erlebt wird. Laut Überlieferung erkannte der griechische Philosoph Pythagoras (6. Jahrhundert v. Chr.) durch Teilen einer schwingenden Saite, dass gleichzeitig gehörte Töne dann als angenehm empfunden werden, wenn ihre Frequenzen in einfachen Relationen stehen wie die Quinte (Frequenzverhältnis 3:2). Hingegen gilt zum Beispiel die große Septime mit der Relation 8:15 als stark dissonant. Eine physikalische Erklärung sieht den Grund darin, dass natürliche Klangkörper neben einem Grundton auch Vielfache davon erzeugen – die so genannten Teiltöne beziehungsweise Obertöne verleihen dem Klang Farbe. Spielt ein Musiker also zwei Töne auf seinem Instrument gleichzeitig, erklingen tatsächlich weit mehr. Stehen diese in den richtigen Verhältnissen zueinander, so die These, bewertet das Ohr den Zweiklang als angenehm beziehungsweise spannungsgeladen.

Wäre dies der einzige Grund der fraglichen Polarität, müsste sie eigentlich allen Musiktraditionen zu eigen sein. Doch zeigt bereits die europäische Musikgeschichte, dass es komplizierter ist. Beispielsweise wird die große Terz (Frequenzverhältnis 5:4) erst seit etwa 1500 als »unvollkommene Konsonanz« wahrgenommen. Zudem gibt es Kulturen, die andere Konzepte von Mehrstimmigkeit verfolgen, wie bereits ein Blick nach Osteuropa zeigt: Traditionelle bulgarische Frauenchöre singen die Melodie in parallelen Abständen eines Ganztons, um den Klang zu verbreitern und zu schärfen.

Auch den Tsimane ist die Konsonanz-Dissonanz-Polarität offenbar fremd: Sie äußerten keinerlei Präferenzen für eine Form des Zusammenklangs. Dieses Ergebnis konnten die Forscher mit verschiedenen Stimuli verlässlich reproduzieren. Elektronisch erzeugte Zweiklänge ergaben dasselbe Ergebnis wie Gesangsstimmen, ja sogar wie aufgenommene, dann frequenzveränderte und überlagerte Lieder der Tsimane. McDermott und seine Kollegen konnten auch ausschließen, dass die harmonische Indifferenz andere Ursachen hätte. Die Indios erkannten, dass sie zwei verschiedene Töne hörten; außerdem unterschieden sie angenehme und unangenehme Lautäußerungen wie Lachen und Keuchen.

Demnach kamen die Forscher zu dem Schluss, dass eine Vorliebe für konsonante Tonkombinationen nicht



Feldstudie in einem Dorf im bolivianischen Urwald. Der Proband hört zwei Töne über Kopfhörer; die Klangquelle ist ein Laptop, dessen Akku mit einem Generator geladen wird.

angeboren sei, sondern durch das Hören von Musik mit solchen harmonischen Relationen erlernt wird. Dem Kognitionsforscher Robert Zatorre vom Montreal Neurological Institute der McGill University geht dies aber zu weit.

Denn Experimente zur Plastizität des Gehirns zeigten, dass die neuronale Reaktion auf Tonfrequenzen und andere akustische Merkmale davon abhängt, welchen Klängen ein Mensch in der frühen Kindheit ausgesetzt war. Es wäre also möglich, dass die Tsimane eine ursprünglich vorhandene Fähigkeit, Konsonanz und Dissonanz zu trennen, im Lauf ihrer Kindheit verlieren, weil in ihrer Kultur Mehrstimmigkeit einfach nicht vorkommt. Eine Bestätigung dieser Vermutung findet Zattore darin, dass die Probanden laut der Studie so genannte Rauigkeit nicht mochten. Dieses Phänomen entsteht, wenn zwei bis auf maximal 30 Hertz identische Töne überlagert werden. Außerdem verwenden diese Indios in ihren eigenen Melodien große Sekunden, kleine Terzen und reine Quarten, also Intervalle, die auch in der westlichen Musik vorherrschen.

Die Studie wirft also viele Fragen auf, auch nach dem generellen Studiendesign solcher von Ethnologen etwas spöttisch »Beethoven-im-Busch« genannten Feldexperimente. Laut dem Musikpsychologen Reinhard Kopiez von der Hochschule für Musik, Theater und Medien Hannover

sind sie schwer zu kontrollieren, angefangen von der »Blackbox« Übersetzer bis hin zu kulturbedingten Interaktionen. Obendrein lasse sich eine Beeinflussung durch westliche Musik heutzutage selbst im tiefsten Dschungel nicht ausschließen – Batterien und Radios gibt es auf Märkten zu kaufen. Und wer »Tsimane« googelt, entdeckt Hinweise auf Kontakte zur westlichen Welt. Der Hannoveraner Neurophysiologe Eckard Altenmüller kritisiert zudem: Die Bewertung von Klängen als angenehm setzt eine emotionale Wahrnehmung von Musik voraus, wie sie in unserer Kultur tief verankert ist und bei anderen nicht vorausgesetzt werden kann.

Eine Musik, die nicht bewegt, ist das denkbar? Vor 42000 Jahren schnitzten Menschen auf der heutigen Schwäbischen Alb Flöten aus Tierknochen. Aber wollten sie damit Melodien hervorbringen oder Naturgeräusche imitieren? Eine Ahnung, wie frühe Menschen Musik erlebten, könnten Experimente geben, wie sie McDermott gemeinsam mit Marc Hauser von der Harvard University 2007 unternahm: Sie spielten Affen konsonante und dissonante Klänge vor. Auch ihnen war dies einerlei. Sie bevorzugten vielmehr – Stille. ◀

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLEN

McDermott, J. H. et al.: Indifference to Dissonance in Native Amazonians Reveals Cultural Variation in Music Perception. In: Nature 535, S. 547–550, 2016

Zatorre, R.: Amazon Music. In: Nature 535, S. 496–497, 2016

EVOLUTIONSGENETIK GENREGULATION IM VORFELD DER TIERE

Ein Einzeller beleuchtet den Ursprung der Tiere. Er besitzt genetische Elemente, die in deren Evolution wichtig waren.

Ein entscheidender Schritt für die Evolution der Tierwelt, von den Schwämmen bis zum Menschen, war der Übergang zur Vielzelligkeit. Zwar spielten dafür einst auch massive Umweltveränderungen wie der steigende Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre eine Rolle sowie die Tatsache, dass komplexe Zellen entstanden waren, die kleinere Zellen in sich eingeschlossen hatten und sich zu Nutze machten. Doch erst genauere Einblicke ins Genom und in die Steuerung der Gene machen den Übergang wirklich verständlich. Eine Forschergruppe um Arnau Sebé-Pedrós von der Universität Barcelona – derzeit am Weizmann-Institut für Wissenschaften in Rehovot (Israel) tätig – untersucht deswegen das Erbgut und die molekulare Ausstattung eines amöbenhaften Einzellers, der zu den allernächsten Verwandten vielzelliger Tiere zählt: *Capsaspora owczarzaki* ist ein mikroskopisch winziger Parasit einer tropischen Süßwasserschnecke.

Jetzt haben sich die Wissenschaftler dessen Genregulation genauer angeschaut. Und tatsächlich wirkt *Capsaspora* in der Hinsicht wie ein Übergangsstadium zu vielzelligen Tieren. Denn bei diesem Organismus deuten sich schon bestimmte Steuerungsmechanismen der Genaktivierung an, die für Tiere typisch und unverzichtbar sind. Der einzellige Parasit erlaubt somit einen Blick auf das genregulatorische Ausgangsmaterial im Vorfeld ihrer Entstehung. In welcher Weise mögen diese alten Mechanismen zur Tierevolution beigetragen haben?

Vor mehr als 600 Millionen Jahren ermöglichte eine Reihe genetischer Neuerungen Vorläufern der vielzelligen Tiere, ökologische Nischen einzunehmen, die sich damals erst eröffneten. Die genetischen Eigenschaften jener Lebewesen lassen sich heute nur noch indirekt anhand ähnlicher heutiger Lebensformen erschließen. Den tiefsten Einblick lieferten bisher Vergleiche der Erbanlagen jetziger Tiere mit denen von Kragengeißeltierchen (Choanoflagellaten) sowie mit *Capsaspora*. Beide zählen zu ihrer nächsten Verwandtschaft (siehe »Alte Mechanismen zur Gensteuerung«, S. 10, und Bild rechts).

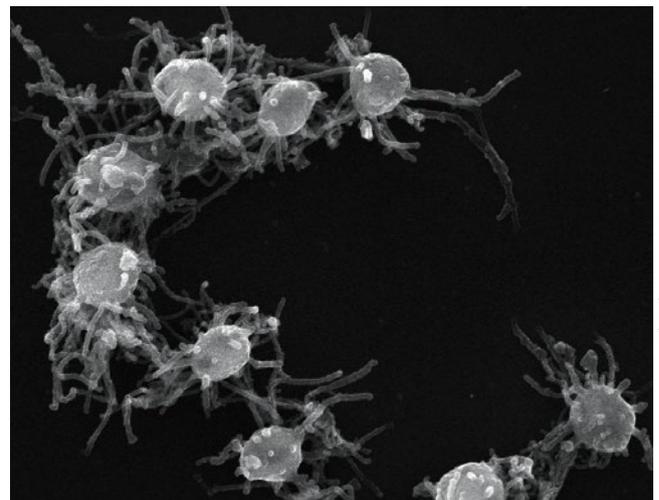
Diese Studien brachten Unerwartetes ans Licht: Jene einzelligen Organismen verwenden schon in vielem das gleiche Genwerkzeug wie die Tiere. So besitzen sie etwa Gene für Integrine, Cadherine und andere so genannte Zelladhäsionsproteine. Sie haben auch bereits Erbsequenzen für lebenswichtige Signalübertragungsproteine, darunter die Rezeptortyrosinkinasen. Das bedeutet: Viele typische »Tiergene« sind tatsächlich älter als die vielzelligen Tiere.

Aber selbstverständlich ist eine Fliege oder eine Fledermaus nicht lediglich die Summe ihrer Gene. Erst eine räumlich und zeitlich gesteuerte Genaktivierung verhilft dazu, dass aus einer Eizelle ein Embryo wird und daraus etwa eine Fliege. Auch Beine und Flügel müssen an den richtigen Stellen wachsen. Das Ablesen von Genen regnet bei den Vielzellern, auch bei den Pflanzen und Pilzen, so genannte Transkriptionsfaktoren an, indem sie zu Regulationsregionen dicht am Gen Kontakt aufnehmen. Genauer gesagt interagieren sie dort mit als Promotoren bezeichneten Sequenzen. Eine derartige Gensteuerung »aus der Nähe« entstand somit eindeutig vor den Tieren. Wahrscheinlich ist sie sogar für jedes zelluläre Leben unverzichtbar – eine vereinfachte Version davon findet sich bereits in Bakterien.

Hingegen kennt man bisher nur bei Tieren eine Regulation der Transkription über teils weit vom Gen entfernt liegende DNA-Sequenzen, so genannte Enhancer (Transkriptionsverstärker). Die Forscher vermuten, dass die raumzeitlich koordinierte Zelldifferenzierung während der Entwicklung eines Tiers wesentlich auf einer derartigen »Fernsteuerung« beruht. Allerdings lassen sich solche Transkriptionsverstärker nicht leicht aufspüren, weil sie oft in komplizierte regulatorische Netzwerke eingebettet sind. Die Frage war darum, ob sie nicht doch bereits eher in der Evolution vorkamen.

Die Gruppe um Sebé-Pedrós wollte daher wissen, welche Formen der Regulation von Genaktivität dem Auftritt mehrzelliger Tiere tatsächlich Vorschub geleistet hatten. *Capsaspora* bot sich für solche Studien aus mehreren Gründen an: Der Organismus lässt sich im Labor leicht züchten; er kann zwischen dem Leben als Einzeller und dem als mehrzelliges Aggregat wechseln. Und er verfügt über zahlreiche Transkriptionsfaktoren, die auch Tiere besitzen.

Wie sich nun zeigte, treten bei ihm sogar die beiden Proteine Myc und Brachyury auf, die in der Tierentwick-



Die Amöbe *Capsaspora owczarzaki* überrascht mit genetischen Tricks, die man ausschließlich Tieren zugetraut hatte.

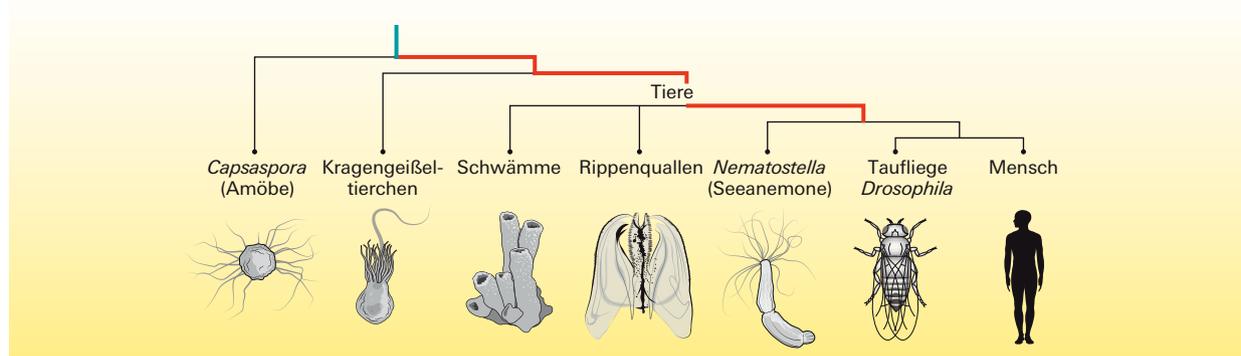
ARNAU SEBÉ PEDRÓS UND IMAKI RUIZ TRILLO / CAPSASPORO. CELLS (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/12041118@N07/258568676) / CC BY 2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/RV2.0/LEGALCODE)

Alte Mechanismen zur Gensteuerung

Einige Genregulationsnetzwerke der Tiere stammen ursprünglich offenbar aus ihrer Vorzeit (blaue Linie im Stammbaum). Denn zwei ihrer Transkriptionsfaktoren, Myc und Brachyury, besitzt bereits der

Einzeller *Capsaspora owczarzakii*. Diese Faktoren erhielten dann Aufgaben in der Entwicklung der Tiere. Über größere Entfernung arbeitende so genannte Enhancer (Transkriptionsverstärker) weist

Capsaspora noch nicht auf. Solche Regulatoren sind bisher als Frühestes von einer Seeanemone bekannt. Sie könnten schon mit den ersten Tieren evolviert sein (rote Linien).



BOOTH, D.S., KING, N.: GENE REGULATION IN TRANSITION. IN: NATURE 534, S. 482-483, 2016. FIG. 1. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

lung wesentliche Funktionen haben. Ersteres regelt dort übergeordnet die Zellvermehrung. Und Brachyury tritt in Aktion, wenn sich der frühe Embryo zu einem Becher einstülpt und sich die drei »Keimblätter« bilden: Es sorgt für die Differenzierung des Mesoderms, aus dem unter anderem Knochen, Muskeln und viele Organe entstehen. Bei Tieren wirken beide Faktoren über Enhancer: Indem sie sich an die betreffenden DNA-Abschnitte anlagern, regulieren sie die Aktivitäten gleich eines ganzen Netzwerks davor liegender Gene. Zum Erstaunen der Forscher kommen jene Netzwerke bereits bei *Capsaspora* vor. Sie müssen somit sehr alt sein.

Dass der Einzeller das Myc-Netzwerk aufweist, wundert weniger. Schließlich pflegen sich auch seine Zellen zu vermehren. Doch das Vorhandensein des Transkriptionsfaktors Brachyury überrascht, da bei *Capsaspora* weder ein Becherkeim noch ein Mesoderm vorkommen. Dennoch regelt dieser Faktor anscheinend die gleichen Gentyphen wie bei Tieren. Es scheint sich so zu verhalten wie mit bestimmten Molekülen zur Zelladhäsion und zur Signalübermittlung: Die entsprechenden Gene waren schon früher vorhanden und erhielten bei den Tieren neue Aufgaben. Das heißt, auf dem Weg zur Vielzelligkeit wurden offenbar einige schon vorher vorhandene Genregulationsnetzwerke in Gänze zum Steuern von jetzt erst erforderlichen Entwicklungsprozessen herangezogen.

Diese Übernahmen allein erklären den Ursprung der Tiere jedoch nicht. Hinzu kamen auch neue Gene – wie jenes für das nur ihnen eigene Signalübertragungsprotein Wnt – sowie die erwähnten Enhancer, die Genaktivitäten von fern verstärken. Und während Tiergenome lange genfreie Abschnitte aufweisen, besitzt *Capsaspora* ein

kompaktes Genom, in dem die Forscher keinerlei Hinweise auf eine Fernsteuerung der Transkription fanden, auch nicht im mehrzelligen Stadium. Außerdem entdeckte das Team um Sebé-Pedrós bei *Capsaspora* keine Promotoren, die gewissen Prototypen bei Tieren entsprechen, welche nur in bestimmten Entwicklungsphasen anspringen.

Wann in der Tierrevolution mögen diese neueren Promotortypen entstanden sein? Und wann traten erstmals Enhancer auf? Noch fehlen entsprechende Studien zu Kragengeißeltierchen, Schwämmen und Rippenquallen, also einfachsten Tieren und ihren nächsten Verwandten. Vielleicht besitzen diese Arten sogar noch völlig andere Genregulationsmechanismen, die nur noch niemand entdeckt hat. Selbst für *Capsaspora* wäre das nicht ausgeschlossen. Die Untersuchungen von Sebé-Pedrós und seinen Mitarbeitern machen deutlich, dass sich das genetische Erbe der ersten Tiere allein an den bekannten Modellorganismen der Genetik nicht aufzeigen lässt. Erforderlich ist dazu vielmehr auch, sich mit anderen urtümlichen Organismen zu befassen. ◀

David S. Booth und **Nicole King** arbeiten an der University of California in Berkeley. Sie erforschen die genetische Evolution früherer Vielzeller anhand ihrer nächsten einzelligen Verwandtschaft.

QUELLEN

Sebé-Pedrós, A. et al.: The Dynamic Regulatory Genome of *Capsaspora* and the Origin of Animal Multicellularity. In: *Cell* 165, S. 1224–1237, 2016

(©) Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature 534, S. 482–483, 23. Juni 2016



SPRINGERS EINWÜRFE ÜBERRASCHUNG!

Was lehren uns Brexit und Trump-Sieg?

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

» spektrum.de/artikel/1427441

Beide Male waren sich die Meinungsforscher einig: Die Briten würden im Juni 2016 mehrheitlich für den Verbleib in der Europäischen Union stimmen, und im November sollte Hillary Clinton die US-Präsidentschaft gewinnen. Zwar gab es jeweils ein Kopf-an-Kopf-Rennen wechselnder Mehrheiten, aber üblicherweise sind die Algorithmen der Demoskopien durchaus fähig, aus ein paar tausend Befragungen zuverlässige Voraussagen über den Ausgang einer Wahl zu treffen.

Diesmal blamierten sich die Prognostiker gleich doppelt. Großbritannien verlässt die EU, und ein politisches Greenhorn tritt an die Spitze der mächtigsten Nation der Erde. Beide Ereignisse haben nicht nur die Demoskopien völlig überrascht, sondern auch die internationale Wissenschaftlergemeinschaft tief erschüttert (*Nature 539, S. 337–339, 2016*).

Offenbar verbergen sich in den Industrieländern scharf abgegrenzte Milieus, die mit »Abgehängte« versus »Etablierte« nur grob charakterisiert sind. Während Letztere die – vor allem durch Wissenschaft geprägte – Entwicklung moderner Produktionstechnik mitmachen, bleiben die anderen hoffnungslos zurück. So etwas hat es im Lauf der industriellen Entwicklung immer wieder gegeben: Im deutschen Ruhrgebiet etwa sind mit Kohlebergbau und Schwerindustrie auch die dort beschäftigten Arbeiter verschwunden.

Doch wie sagt schon Mackie Messer: »Man sieht die im Lichte, die im Dunkeln sieht man nicht.« Die Menschen verschwinden nicht wirklich. Sie werden arbeitslos, im besten Fall umgeschult, und ihre Kinder bedienen Computer. Das ging im Ruhrgebiet nicht ohne harte Arbeitskämpfe ab, aber immerhin ohne die Verelendung ganzer Landstriche und sozialer Schichten.

Wie Brexit und Trump-Wahl demonstrieren, ist das keineswegs überall gelungen. In Europa und den USA haben sich im Lauf der Deindustrialisierung politisch vernachlässigte Milieus gebildet und mit der Zeit so

stark abgekapselt, dass deren Existenz Meinungsforscher und Politiker jetzt völlig überraschte.

Die modernen Medien zementieren die Abkapselung. In den USA favorisieren die Bewohner von Ost- und Westküste ihre liberalen Fernsehsender, während im Rostgürtel Fox News die Klimaforschung als Komplott gegen Kohle und Stahl denunziert. Evangelikale Strömungen füttern die Menschen zusätzlich mit wissenschaftsferner Desinformation. In solchen kompakten Milieus hält sich, wie der Soziologe Carter T. Butts von der University of California in Irvine betont, selbst unter 40 Prozent der ausreichend Gebildeten die Meinung, der Mensch sei vor weniger als 10000 Jahren durch übernatürlichen Eingriff entstanden (*Science 354, S. 286–287, 2016*).

Zwar machen sich mehr als 60 Prozent aller Amerikaner Sorgen um die globale Erwärmung, aber das sind nicht diejenigen, die Trump gewählt haben. Seine Anhänger halten den Klimawandel für eine Einbildung des wissenschaftlichen Establishments (*Nature 539, S. 329, 2016*) – oder mit Trump gar für eine chinesische Erfindung zur Schwächung Amerikas.

Hinzu kommt die selbstverstärkende Wirkung der sozialen Medien, die ein Team um den Soziologen Noah E. Friedkin von der University of California in Santa Barbara kürzlich untersucht hat (*Science 354, S. 321–326, 2016*). Im Netz darf private Wut beliebig aufflammen, wird schnell durch Zustimmung halb öffentlich bestätigt und durch Widerspruch erst recht angefacht. Es entstehen verschworene Onlineverbände, welche die vermeintlich Schuldigen an der ganzen Misere gemeinsam verdammen.

So werfen die demoskopischen Überraschungen der letzten Zeit letztlich ein grelles Licht auf große Menschengruppen, die vom technisch-wissenschaftlichen Wandel erfasst und, da politisch alleingelassen, von ihm überrollt wurden. Jetzt schlagen sie wild zurück.

EVOLUTION DIE ZWEI GESICHTER DES HUNTINGTON-GENS

Die Kra
einem
längerte
für unse
des Gut

» spektrum.de



USMANI, BASHIR. QUELLER: STRASSMAN, RESEARCH GROUP AT WASHINGTON UNIVERSITY IN ST. LOUIS; COMMONS WIKIMEDIA ORGANISATION; DISCOIDEUM_43.JPG / CC BY-SA 4.0; CREATIVE COMMONS ORGANISATION; LEGAL CODE

Krankheit Chorea Huntington beruht auf
Evolutionparadox: Ein auffällig ver-
er Abschnitt im verantwortlichen Gen ist
ere Hirnentwicklung unerlässlich. Zuviel
en führt dagegen in die Katastrophe.

/artikel/1427445

Die Amöbe *Dictyostelium*
vermehrt sich über Fruchtkör-
perbläschen. Schon sie
besitzt das Gen *Huntingtin*.



USMAN BASHIR, QUELLER/STRASSMANN, RESEARCH GROUP AT WASHINGTON UNIVERSITY IN ST. LOUIS (COMMONS:WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:DICTYOSTELIUM_DISODIUM_2.JPG) / CC-BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BSYSA4.0/LEGALCODE)



Chiara Zuccato (links) und **Elena Cattaneo** haben Professuren an der Universität Mailand am Institut für Biowissenschaften. Die Expetinnen für Huntington zählten schon zu den Autorinnen eines Artikels über die Krankheit bei **Spektrum** im Januar 2004.

► Mitarbeiter von Lebensversicherungen pflegen mögliche Erkrankungsrisiken genau zu prüfen, und genetische Tests liefern hierüber eine Menge Informationen. Jedoch beschlossen britische Versicherungsunternehmen Anfang der 2000er Jahre, dass sie solche Daten bei Vertragsabschlüssen unter bestimmten Voraussetzungen nicht nutzen wollen. Mit einer Ausnahme: der Veranlagung für Chorea Huntington, früher Veitstanz genannt.

Denn die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Träger von gewissen Varianten des Gens dieser Krankheit einmal erliegen werden, ist viel höher als bei anderen Risikofaktoren wie Rauchen, Alkoholkonsum oder Motorradfahren. Gegenmittel gibt es bislang so gut wie keine. Die ersten Symptome treten meistens im Alter zwischen 30 und 50 Jahren auf, manchmal später, mitunter aber sogar viel früher – was anscheinend davon abhängt, wie stark das Gen von der Norm abweicht. Oft machen sich anfänglich Stimmungsschwankungen oder Gedächtnisstörungen bemerkbar, zu denen bald unwillkürliche Zuckungen, unkontrollierte Bewegungen der Gliedmaßen und Spasmen, auch im Gesicht, hinzukommen. Typisch für dieses Stadium ist der absonderlich zappelnde, »tanzende« Gang. Mit der Zeit gehen sämtliche Körperfunktionen verloren. Am Ende, oft etwa 15 bis 20 Jahre nach dem Ausbruch, ist der Patient völlig bewegungsunfähig, kann sich nicht mehr äußern und nicht einmal mehr schlucken.

Ein lebensnotwendiges Gen von großer Variabilität

Schuld an der Krankheit sind Mutationen in einem *Huntingtin* genannten Gen, was Forscher schon seit mehr als zwei Jahrzehnten wissen. Dieses Gen und das gleichnamige Protein Huntingtin besitzen wir alle: Es ist für die vorgeburtliche Entwicklung des Nervensystems unerlässlich. Allerdings unterscheidet sich seine Länge geringfügig von Mensch zu Mensch. Das erklärt, wieso manche Individuen erkranken und andere nicht.

Genauer gesagt weist dieses Gen in einem bestimmten Abschnitt mehrfach hintereinander das gleiche Dreierpaket von Nukleotiden (DNA-Bausteinen) auf, nämlich die Folge C-A-G für die Kernbasen Cytosin, Adenin und Guanin. Dieses »Triplet« kodiert die Aminosäure Glutamin. Bei gesund bleibenden Personen kommt es hier zwischen 8- und 35-mal vor. Entsprechend lang ist die Glutaminkette im Huntingtin-Protein. Liegt die Anzahl in einem der beiden von den Eltern vererbten *Huntingtin*-Gene höher, so tritt die Krankheit auf, die 1872 der New Yorker Arzt George Huntington (1850–1916) erstmals beschrieb. Wer einen betroffenen Elternteil hat, muss also mit 50 Prozent Wahr-

scheinlichkeit damit rechnen, ebenfalls zu erkranken. In Europa und Amerika trifft es einen von 10000 Menschen.

Dass bei Chorea Huntington Neurone in Bereichen des Endhirns absterben, und zwar im Corpus striatum (Streifenkörper) und in der Großhirnrinde, weiß man ebenfalls schon länger. Jene Gebiete beteiligen sich an der Bewegungskontrolle und an höheren geistigen Funktionen. Aber wieso veranlasst eine längere Glutaminkette im Protein solche Hirnschädigungen? Dieser Frage sowie der Suche nach Gegenmitteln widmet sich ein Großteil der Forschung über das Leiden. Unser Mailänder Labor ist dabei nur eines von vielen.

Manche von uns denken seit Jahren darüber nach, wieso die schädlichen Genversionen nicht über die Generationen langsam der natürlichen Selektion zum Opfer fallen. Liegt hier etwa eine biologische Gratwanderung vor? Bringt eine mäßig lange Glutaminkette womöglich irgendwelche Vorteile, während die Situation bei zu vielen Triplets im *Huntingtin*-Gen plötzlich kippt?

Tatsächlich stellte sich heraus, dass eine CAG-Kette Hirnzellfunktionen steigert, solange die kritische Länge nicht überschritten ist. Und das gilt erstaunlicherweise nicht nur für den Menschen, sondern ebenfalls für verschiedene Tiere. Das *Huntingtin*-Gen scheint sogar schon für die Evolution von Tieren eine wichtige Rolle zu spielen sowie bei den Wirbeltieren und ihren Vorfahren für die Entwicklung des Nervensystems. So gesehen handelt es sich bei Chorea Huntington offenbar nicht um eine Erbkrankheit im herkömmlichen Verständnis, die durch eine Ausfallmutation entsteht. Vielmehr scheint hier ein an sich vorteilhafter evolutionärer Vorgang aus dem Ruder gelaufen zu sein. Eigentlich macht die Mutation wohl klüger, doch paradoxerweise darf die Anhäufung der Triplets nicht zu weit getrieben sein.

Die Untersuchung dieser Zusammenhänge führte die Forscher mehr als eine Milliarde Jahre zurück: zum Übergang zwischen Paläo- und Mesoproterozoikum, als es noch keine Tiere gab. Damals lebten anscheinend Organismen, die erstmals ein *Huntingtin*-Gen aufwiesen, obwohl

es sich von der menschlichen Version unterschied. Denn von diesen Lebensformen stammen nicht nur alle Tiere ab, sondern auch die zeitweise »soziale« Aggregate bildende Amöbe *Dictyostelium discoideum*. Forscher glauben, dass ein gemeinsamer Vorfahr aller Tiere ihr ähnelte.

Diese Amöbe lebt in Waldböden auf zerfallendem Pflanzenmaterial. Ihr *Huntingtin*-Gen fand 2009 eine Forschergruppe um Miguel Andrade-Navarro, der damals am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin arbeitete. Dem Gen fehlt allerdings besagtes CAG-Triplett. Offenbar braucht *D. discoideum* das Protein Huntingtin, wenn sie von der ein- in die mehrzellige Lebensform wechselt, um mit widrigen Umweltbedingungen besser zurechtzukommen: Bei Nahrungsmangel etwa schließen sich die Einzelzellen zu Verbänden zusammen, die dann gestielte, Pseudoplasmodien genannte Körper mit einem Köpfchen bilden, das zur Verbreitung Sporen in die Luft freisetzt. Ohne Huntingtin vermögen die Zellen schlecht zu kriechen und sich nicht normal zu aggregieren. Das entdeckten 2011 Michael Myre und James Gusella vom Massachusetts General Hospital in Boston.

Futter erkennen, Verbände bilden:

Diverse Rollen einer urzeitlichen Erbsequenz

Anscheinend hat das Gen für die Amöbe noch mehr lebenswichtige Zwecke. So bestimmt es den Zeitpunkt der Reproduktion und reguliert ihre Reaktion auf Umweltreize, wenn sie auf Futter zukriecht. Wir fanden zudem heraus, dass die Genversion von *Dictyostelium* Säugetierzellen davor schützt, sich auf bestimmte Reize hin selbst umzubringen – also einen so genannten programmierten Zelltod, Apoptose genannt, einzuleiten.

Ein ähnlicher Organismus dürfte schon existiert haben, bevor sich die frühen Tiere vor mehr als 550000 Jahren in die beiden großen heutigen Äste aufspalteten: einerseits die Protostomier (»Urmünder«), zu denen die meisten wirbellosen Tiergruppen zählen, darunter die Insekten, Krebse, Schnecken und Muscheln; andererseits die Deuterostomier (»Neumünder«). Hierhin gehören die Wirbeltiere und einige Gruppen von Wirbellosen. Zoologen erkennen die Zugehörigkeit von Tieren zu einem dieser beiden Äste unter anderem an ihrer frühen Keimesentwicklung, wenn sich die Zellen zu ordnen und zu differenzieren beginnen und hiermit die Lage der Körperöffnungen und Organe vorgeben. Das Besondere an den Deuterostomieren: Nur bei Tiergruppen von diesem Ast haben sich im *Huntingtin*-Gen im Lauf der Evolution die erwähnten CAG-Triplets angehäuft.

Wie wir 2008 entdeckten, tritt das Phänomen überraschenderweise auch schon bei den stammesgeschichtlich ziemlich basalen Stachelhäutern auf – so beim Purpurseeigel *Strongylocentrotus purpuratus*. Als wir zusammen mit Bioinformatikern unserer Universität die Sequenz vom *Huntingtin*-Gen dieses »Neumünder« bestimmten, fanden wir in dessen vorderem Teil zwei CAG-Triplets hintereinander.

Die DNA-Sequenz des Seeigelgens unterscheidet sich noch deutlich von der menschlichen Version. Diese Stachelhäuter verfügen zwar über ein einfaches Nervensystem, aber sie verwenden Huntingtin vorwiegend in anderen Ge-

AUF EINEN BLICK PARADOX CHOREA HUNTINGTON

- 1** Die Huntington-Krankheit beruht auf einer genetischen Abweichung, wodurch Hirnzellen degenerieren. Eine Dreiergruppe – ein Triplett – von Bausteinen in einem Gen wiederholt sich bei Betroffenen zu oft.
- 2** In seiner Ursprungsform ist dieses Gen uralte. Schon Vorgänger der Tiere besaßen es. Sie benötigten es unter anderem für Zellaggregate.
- 3** Später kam eine neue Funktion hinzu: Einfluss auf die neuronale Entwicklung – der mit der Länge jener Triplettreihe wuchs. Beim Menschen ist dies maximal ausgeprägt, kann sich allerdings fatal übersteigern.

Entwicklungsgeschichte nachspielen

Das Gen *Huntingtin*, das Chorea Huntington verursacht, beeinflusst offenbar die Gehirnevolution der Wirbeltiere. Eine seiner Eigenarten – und Ursache für die Krankheit – ist die wiederholte Nukleotidsequenz CAG an einer bestimmten Stelle, die sich dort im Lauf der Evolution anhäufte. Im entsprechenden Abschnitt des zugehörigen Proteins, Huntingtin genannt, reihen sich dadurch Glutamin-Aminosäuren aneinander. Mehr Glieder in der Kette erlauben es, im Embryonalstadium komplexere neuronale Strukturen anzulegen.

Wir haben das Phänomen in Zellkulturen mit Stammzellen von frühen Mäuseembryonen untersucht. Mit Substanzen, welche die Entwicklung des Nervensystems lenken, entstehen aus ihnen Neuro-

epithelzellen. Diese gruppieren sich im Kulturmedium um eine zentrale Höhlung und bilden typische so genannte neuronale Rosetten – was dem Neuralrohr des Embryos entspricht, aus dem das Zentralnervensystem wird.

Zunächst wiesen wir nach, dass *Huntingtin* für die Rosettenbildung nötig ist: Ohne funktionsfähiges Gen vermögen die Zellen nicht entsprechend aneinanderzuhaften, weil dann ein Enzym die Haftproteine an ihrer Oberfläche zerschneidet. Mit in Stand gesetztem Erbfaktor bilden sich wieder die Rosetten.

Dann tauschten wir das Gen der Mäusestammzellen gegen die entsprechenden DNA-Abschnitte einer Reihe anderer Organismen unterschiedlicher evolutionärer

Entwicklungshöhe aus. Mit dem *Huntingtin* der Amöbe *Dictyostelium*, die nahen Vorfahren aller Tiere ähneln dürfte, erfolgte keine Rosettenbildung – das Gen weist noch keine solche CAG-Sequenz auf. Erste Anmutungen einer unvollständigen Rosettenstruktur aus relativ wenig Zellen erbrachte das Gen von Lanzettfischchen mit seinen zwei CAGs in Folge. Je mehr Wiederholungen von CAG das Gen enthielt, um so größer, deutlicher und zellreicher wurden die Rosetten und um so weiter war die Höhlung. Schon das Fischgen mit vier CAGs führte zu schönen Gebilden aus wesentlich mehr Zellen. Die besten, größten und am meisten strukturierten Rosetten aus vielen Zellen aber brachte ein menschliches *Huntingtin* mit 15 CAGs.

weben. Vermutlich waren auf frühen evolutionären Entwicklungsstufen also weder das Gen noch die Triplets für Nervensysteme sonderlich bedeutend.

Über die Protostomier wissen wir in dieser Hinsicht noch nicht viel. Fest steht bisher aber, das bei ihnen solch ein CAG-Triplett im *Huntingtin*-Gen höchst selten vorkommt und bei den meisten ihrer Tierstämme wohl gar nicht. Doch Bienen zum Beispiel haben eines, allerdings tatsächlich nur ein einziges.

Die Situation bei verschiedenen Zweigen der Deuterostomier haben wir uns in den späten 2000er Jahren genauer angeschaut. Am meisten haben uns die Lanzettfischchen verblüfft, deren *Huntingtin*-Gen wir zusammen mit der Arbeitsgruppe von Mario Pesarinos von der Universität Genua untersuchten. Die kleinen, urtümlich gebauten Chordatiere werden zu den »Schädellosern« gestellt. Sie zählen nicht zu den Fischen, aber der polare Aufbau ihres Nervensystems markiert einen wesentlichen Entwicklungsschritt von dessen Evolution im Vorfeld der Wirbeltiere. Denn ihr Neuralrohr, das sich vom Vorder- zum Hinterende des Tiers zieht, bildet vorn ein einfaches Bläschen. Diese Struktur deuten Biologen als einen frühen Vorläufer des Wirbeltiergehirns.

Wie beim Seeigel enthält das *Huntingtin*-Gen von Lanzettfischchen zwei CAG-Triplets hintereinander. Doch anders als bei Ersterem gleichen die DNA-Sequenzen in der Umgebung des Triplett-paars bereits denen von Wirbeltieren. Zudem beschränkt sich das zugehörige Protein jetzt weitgehend auf Nervengewebe. Ist der Unterschied

gegenüber dem Seeigelgen womöglich daran beteiligt, dass Lanzettfischchen ein einfaches Gehirn mit der für Wirbeltiere typischen Längsausrichtung ausbilden?

Anschließend untersuchten Forscher jenes Gen bei verschiedenen Wirbeltieren. Wie sich zeigte, steigert sich die Anzahl der CAG-Triplets im Lauf ihrer Evolution bei Arten mit komplexeren Nervensystemen merklich (siehe »Evolution eines Gens«, S. 36/37). Besonders fällt das bei den Säugetieren auf: So haben Opossums sechs CAGs, Mäuse sieben, Hunde zehn, Hausrinder 15 und Schweine 18. Bei einigen Gruppen, etwa bei Primaten, kann die Anzahl zwischen den Individuen derselben Art schwanken – bei Menschen von acht an aufwärts bis zu über 200.

Längere Glutaminkette im Huntingtin-Protein ergibt mehr Hirnleistung

Die Wirbeltiere schrieben ein neues Kapitel der Hirnevolution. Ihr Gehirn entsteht aus dem verbreiterten vorderen Ende des schlauchförmigen embryonalen Neuralrohrs. An dessen Ausformung wirkt das *Huntingtin*-Gen mit, wie eine Forschergruppe um Marcy MacDonald vom Massachusetts General Hospital in Charlestown 1997 erkannte. Diesen Befund bestätigten und erweiterten wir 2012 mit dem Nachweis, dass sich in Zellkulturen unter Beteiligung von *Huntingtin* einem Neuralrohr ähnelnde Strukturen herausbilden.

Zu der Zeit hatten verschiedene Studien mit ursprünglich ganz anderen Zielrichtungen bereits Hinweise auf eine weitere Funktion der angehäuften CAG-Triplets geliefert,

nämlich ihren Beitrag zu gesteigerter Hirnleistung. Diese Forschungen erwuchsen teils aus den Bemühungen seit den 1970er Jahren, das Gen zu finden, das Chorea Huntington verursacht. 1993 schließlich gelang es der Genetikerin und Neuropsychologin Nancy Wexler und 57 weiteren Forschern der Huntington's Disease Collaborative Research Group, den Erbfaktor zu isolieren und seine DNA-Sequenz zu bestimmen. Sie entdeckten ihn auf Chromosom 4. Diese Arbeit ermöglichte es, die krank machende Wirkung von zu vielen – mindestens 36 – CAG-Tripletts zu erkennen.

Der Genetiker David C. Rubinsztein lieferte 1994 Hinweise darauf, dass der Abschnitt im *Huntingtin*-Gen mit den CAG-Tripletts mitunter von einer Generation zur nächsten länger wird. Im selben Jahr entdeckte der Chemie-nobelpreisträger von 1962 Max Perutz (1914–2002), dass Glutamin – die von dem Tripletts kodierte Aminosäure – die Bindung eines Proteins an andere Proteine fördert. Danach traten diese Forschungen lange auf der Stelle. Man hielt derartige Sequenzvervielfachungen eher für genetischen Schrott ohne Funktion und konzentrierte sich lieber auf die nichtpathologischen Funktionen solcher Genabschnitte.

Warum werden zu lange Gene nicht ausgemerzt?

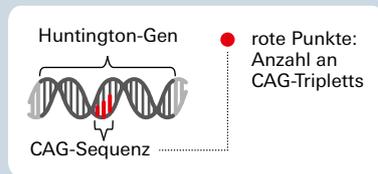
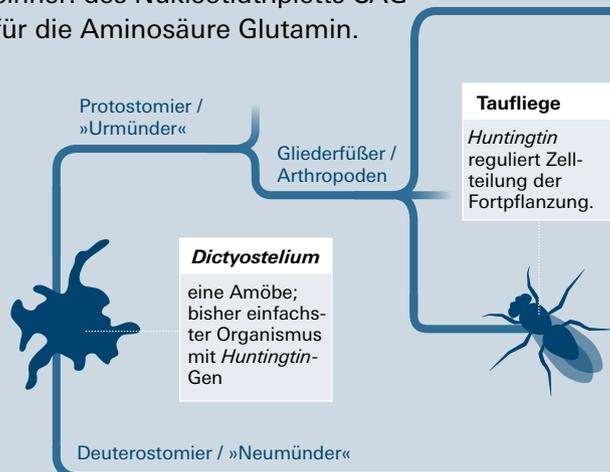
Neuerliches Interesse an jenen Tripletts im *Huntingtin*-Gen weckten 2008 John W. Fondon III, der heute an der University of Texas in Arlington arbeitet, und David G. King von der Southern Illinois University Carbondale. Sie fragten nämlich, ob solche wiederholten ganz kurzen DNA-Sequenzen – die auch bei einigen anderen erblichen neurodegenerativen Krankheiten vorkommen – wohl für die Entwicklung und Evolution des Nervensystems eine Rolle spielen beziehungsweise gespielt haben. Möglicherweise, spekulierten sie, käme ein Mehr an CAG-Tripletts im *Huntingtin*-Gen dem Verstand zugute, würde also schon bei Tieren die kognitiven Fähigkeiten steigern und somit Sozialkompetenzen nicht zuletzt rund um die Fortpflanzung fördern.

Eine Reihe von daraufhin durchgeführten Untersuchungen bestärken diese These. Beispielsweise zeigten Forscher um Michael Hayden von der University of British Columbia in Vancouver: Jeder 17. Mensch trägt ein »gesundes« *Huntingtin*-Gen mit zwischen 27 und 35 CAGs, also eine ziemlich hohe, jedoch noch nicht schädliche Anzahl. Solche Menschen haben tendenziell mehr Neurone im Pallidum als Menschen mit weniger Tripletts – in einem Hirngelände, das sich an höheren kognitiven Prozessen beteiligt und die Bewegungsplanung und -steuerung kontrolliert. Hierzu könnte der Befund unserer Arbeitsgruppe passen, wonach in Zellkulturen bei mehr Tripletts komplexere, einem Nervensystem stärker ähnelnde Strukturen entstehen (siehe »Entwicklungsgeschichte nachspielen«, S. 35).

Gute kognitive Leistungen zeigen zunächst ebenfalls Personen, die wegen einer zu hohen Tripletanzahl an Chorea Huntington erkranken werden. Solange sie noch gesund sind, schneiden sie nach einer Untersuchung von Carsten Saft und Christian Beste von der Ruhr-Universität Bochum von 2012 in verschiedenen Wahrnehmungstests sogar besser ab als Menschen mit nicht krankhaften *Huntingtin*-Varianten.

Evolution eines Gens

Der bisher einfachste Organismus, bei dem das *Huntingtin*-Gen in Erscheinung tritt, ist die Amöbe *Dictyostelium discoideum*. Mit Hilfe des Gens kann sie strukturierte Verbände bilden. Es bekam in der Evolution der Tiere immer mehr Funktionen – zuerst in der Embryonalentwicklung und später noch der des Gehirns. Damit geht eine zunehmende Anzahl einer bestimmten kurzen DNA-Sequenz einher: des Nukleotidtripletts CAG für die Aminosäure Glutamin.

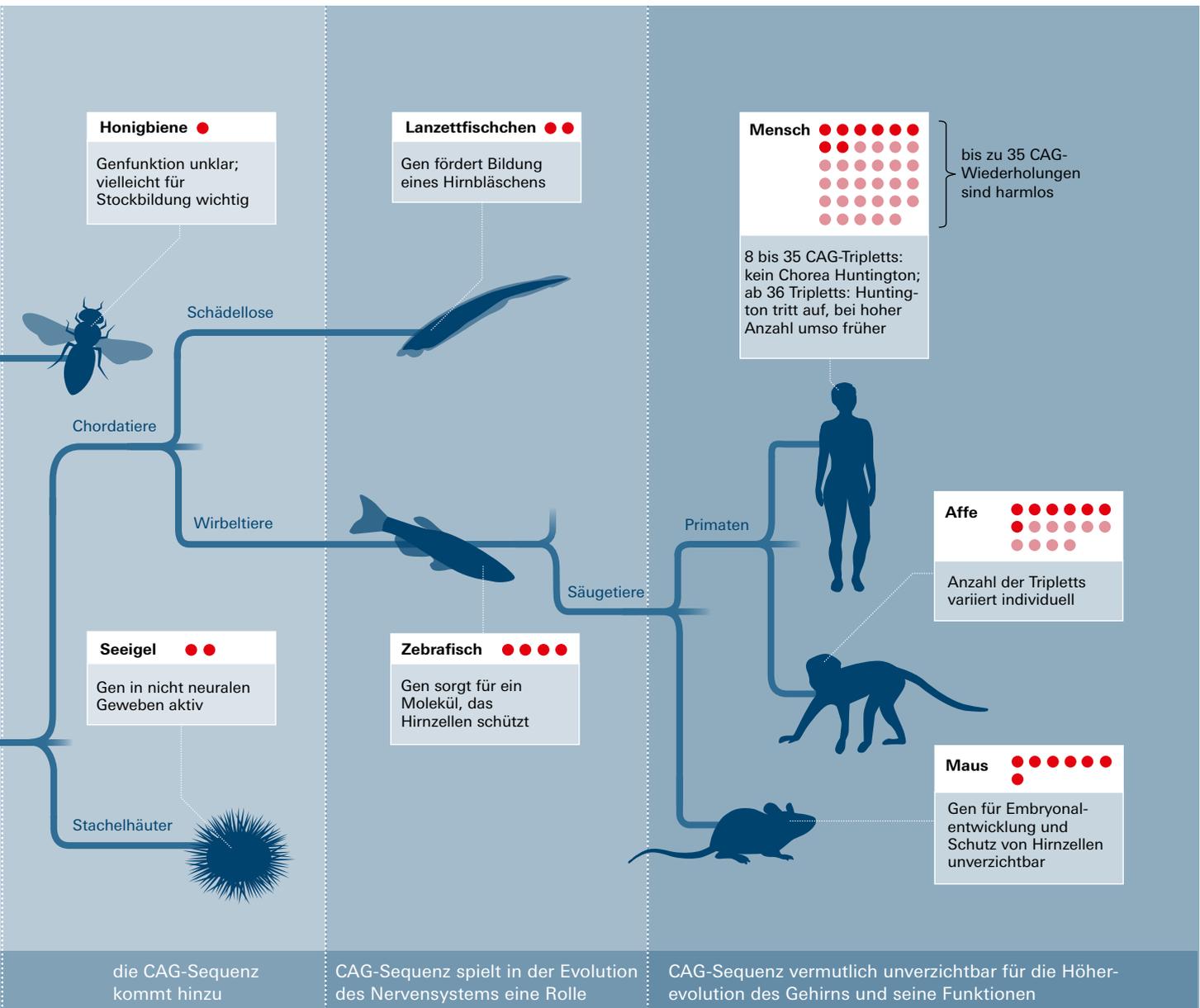


Huntingtin-Gen noch ohne die betreffende CAG-Sequenz

AMANDA MONTANEZ, SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2010, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Welche speziellen Aufgaben mögen dieses Gen und sein Protein im Gehirn erfüllen? Als Forscher es im Gehirn von Mäusen ausschalteten, starben Hirnzellen ab. Die Tiere entwickelten nun ähnliche Symptome wie Mäuse, denen man ein krank machendes *Huntingtin* verpasst hatte. Wir selbst wiesen in Zellkulturen nach, dass eine »gesunde« Version die Nervenzellen widerstandsfähiger und stressfester macht. Wir zeigten außerdem, dass über das Gen die Synthese des Wachstumsfaktors BDNF (Brain-derived neurotrophic factor) stimuliert ist. Dieses Protein unterstützt die Bildung von neuronalen Netzen und die Signalübertragung im Gehirn.

Am aktivsten und vermutlich am wichtigsten ist das *Huntingtin*-Gen jedoch in der frühen Embryonalentwicklung. Wenn es fehlte, kämen wir gar nicht erst zur Welt, denn der Keim geht früh zu Grunde. Das Gen tritt während der so genannten Gastrulation in Aktion: der Phase der



Embryogenese, in der sich die Keimblase einstülpt – eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung der Hauptgewebetypen. In einer späteren Phase reguliert es die Bildung neuer Neurone und trägt dazu bei, dass sie Kontakt miteinander aufnehmen.

Trotz der vielen wissenschaftlichen Erkenntnisse bleibt Chorea Huntington für die Forscher ein Paradox. Auf der einen Seite könnte im Zusammenhang mit unserer Hirnentwicklung die wichtigste evolutionäre Errungenschaft des verantwortlichen Gens sein, dass es einen sich stetig verlängernden CAG-Trakt erwarb. Auf der anderen Seite drohen Betroffenen verheerende Auswirkungen, wenn die Länge jener Triplets eine Grenze überschreitet.

Die Triplett-Anhäufung wird die Forscher noch viele Jahre beschäftigen. Warum zum Beispiel variiert ihre Anzahl so stark – gerade auch bei Menschen, die nicht krank werden? Wieso sind ausgerechnet 36 Wiederho-

lungen plötzlich gefährlich? Und was mag sich im Gehirn verändern, wenn sich die Genlänge dieser Grenze von unten her nähert?

Die Erkenntnis, dass dieses Gen sowohl Segen als auch Fluch bedeutet, befreit die Huntington-Krankheit zumindest vom Stigma klassischen genetischen Versagens. Hier liegt kein Erbdefekt im üblichen Sinn vor. Vielmehr schießt ein biologischer Vorgang übers Ziel hinaus, der letztlich zu unserem Menschsein beitrug. ◀

QUELLEN

Lo Sardo, V. et al.: An Evolutionary Recent Neuroepithelial Cell Adhesion Function of Huntingtin Implicates ADAM10-Ncadherin. In: Nature Neuroscience 15, S. 713–721, 2012

Zuccato, C. et al.: Molecular Mechanisms and Potential Therapeutic Targets in Huntington's Disease. In: Physiological Reviews 90, S. 905–981, 2010

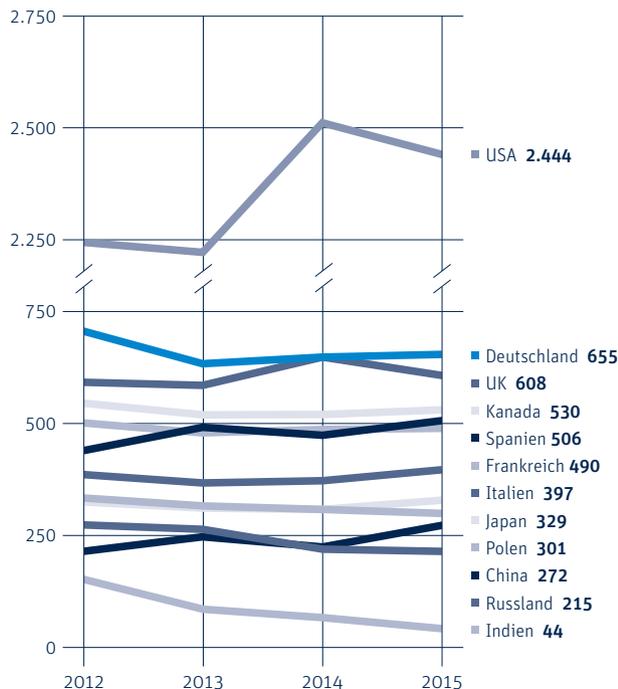
Heute schon die Medizin von morgen: Arzneimittelstudien in Deutschland

Ehe neue Medikamente zugelassen werden, erproben Pharma-Unternehmen sie in Zusammenarbeit mit Ärzten in klinischen Studien mit Patienten und auch Gesunden. Darüber hinaus wird in weiteren Studien nach der Zulassung beispielsweise untersucht, wie sich diese Medikamente mit anderen Mitteln kombinieren lassen. Bei klinischen Studien, die von Pharma-Unternehmen veranlasst werden, ist Deutschland Europameister – weltweit nur noch übertroffen von den USA. Dass medizinische Einrichtungen hierzulande an so vielen Studien beteiligt sind, ist gut für die Patienten und den Fortschritt der Medizin.

Die starke Stellung Deutschlands ist aus dem internationalen öffentlichen Studienregister Clinicaltrials.gov zu ersehen. Demnach haben sich hiesige medizinische Einrichtungen an insgesamt 655 klinischen Studien von Pharma-Unternehmen beteiligt, die 2015 begonnen wurden (Stand: November 2016). Damit

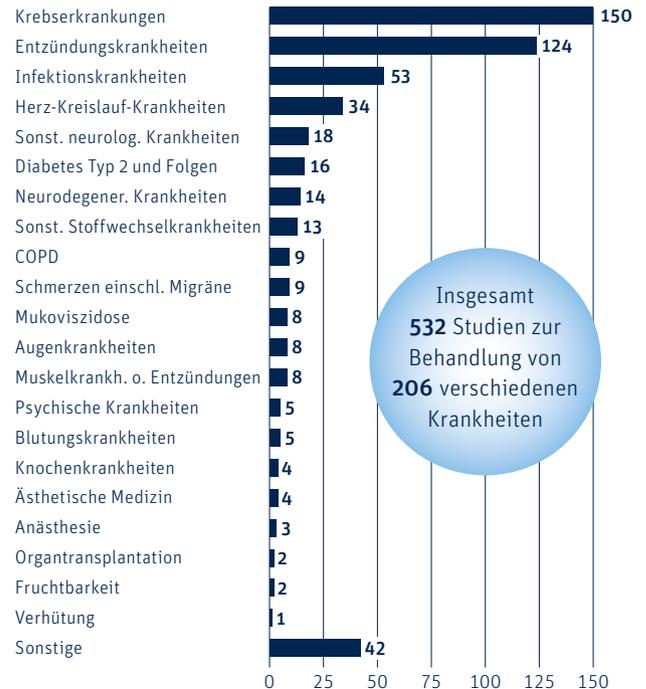
liegt Deutschland vor UK (608) und Kanada (530), nur überboten von den USA (2.444 Studien). Zu den meisten dieser Studien tragen Kliniken oder Arztpraxen vieler Länder bei, weil nur so genügend Patienten für eine aussagefähige Auswertung zusammenkommen. Gerade bei den großen letzten

Beteiligung verschiedener Länder an klinischen Studien von Pharma-Unternehmen nach Jahr des Studienbeginns 2012–2015



Quelle: vfa auf Basis des Studientregisters Clinicaltrials.gov; Stand November 2016

Krankheitsgebiete der klinischen Studien mit Patienten in Deutschland, die 2015 von Pharma-Unternehmen begonnen wurden (Studien der Phasen II, III und IV)



Quelle: vfa auf Basis des Studientregisters Clinicaltrials.gov; Stand November 2016

Studien vor der Zulassung (den sogenannten Phase-III-Studien) können es bis zu 55 Länder sein. Überall muss die Studie dabei auf gleiche Weise durchgeführt werden. 2015 waren 44 % der Studien mit deutscher Beteiligung solche Phase III-Studien.

In der Regel werden in den Studien zwei Behandlungen verglichen (etwa die Behandlung mit einem neuen und mit einem schon eingeführten Medikament), und es entscheidet das Los, wer welche Behandlung erhält. Deutsche Kliniken und Arztpraxen stehen in dem Ruf, Studien besonders gewissenhaft durchzuführen und zu dokumentieren. Das hat sicherlich dazu beigetragen, dass sie so häufig beteiligt sind. Es hat auch dazu geführt, dass fast jedes Medikament, das auf den Markt kommt, zuvor schon unter deutscher Mitwirkung erprobt wurde.

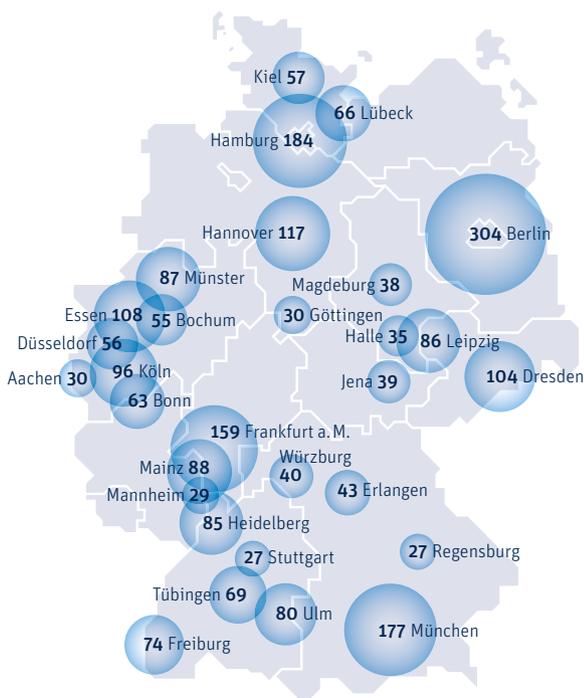
Besonders viele Studien zu Krebserkrankungen

Die meisten von Unternehmen veranlassten Studien mit Patienten, die 2015 in Deutschland begonnen wurden, betrafen entweder Krebserkrankungen (150) oder Entzündungskrankheiten wie Asthma, Multiple Sklerose oder Morbus Crohn (124). Insgesamt wurden von den Unternehmen Studien zu 206 verschiedenen Krankheiten durchgeführt. Das zeigt, dass sich die Pharmaforschung nicht nur auf wenige häufige Krankheiten konzentriert.

An klinischen Studien wirken neben großen Kliniken auch regionale Krankenhäuser und Arztpraxen mit.

Mitwirkung an klinischen Studien von Pharma-Unternehmen, die 2015 begonnen wurden

TOP 30 (nach Anzahl der Studien)



Quelle: vfa auf Basis des Studienregisters Clinicaltrials.gov; Stand November 2016

Sicherheit und Patientenrechte haben Vorrang

Bei klinischen Studien ist die Sicherheit der Teilnehmenden wichtiger als alles andere. So dürfen überhaupt nur Medikamente erprobt werden, die sich zuvor in Tests im Labor und mit Tieren bewährt haben. Jede Studie muss einzeln von einer Arzneimittelbehörde und einer Ethik-Kommission genehmigt werden; diese achten darauf, dass die Teilnehmerinteressen gewahrt werden. Jeder, der sich für eine Teilnahme interessiert, muss umfassend über die Studie und Behandlungsalternativen aufgeklärt werden. Er oder sie wirkt nur nach schriftlicher Einwilligung mit und kann diese jederzeit zurücknehmen. Auch erhält jeder Teilnehmer



einen Versicherungsschutz. Dass die Studie korrekt durchgeführt wird, überprüfen Mitarbeiter der Arzneimittelbehörde und des Herstellers.

Mehr über klinische Studien steht in der Broschüre „Patienten in klinischen Studien“, die kostenfrei unter www.vfa.de/ publikationen bestellt werden kann.

2015 waren (wie in den Jahren zuvor) Berliner medizinische Einrichtungen Spitzenreiter: Sie beteiligten sich an 304 Studien. Es folgten Hamburg (184) und München (177).

Was Patienten und die Medizin von den Studien haben

Der Wert klinischer Studien besteht nicht nur darin, dass sie zur Entwicklung neuer Medikamente beitragen. Für viele Studienteilnehmer bedeuten sie die Chance, mit neuen Medikamenten behandelt zu werden. Diese – aber auch die Teilnehmer, die die herkömmliche Behandlung erhalten – können im Rahmen der Studie umfassender untersucht und intensiver betreut werden, als das in der Routineversorgung möglich ist. Zudem halten sich die mitwirkenden Kliniken und Praxen medizinisch auf dem aktuellen Stand, was auch Patienten außerhalb der Studien zugutekommt.

Dass hierzulande so viele Kliniken und Arztpraxen bereit sind, mit forschenden Pharma-Unternehmen in der Arzneimittelprüfung zu kooperieren, stärkt die medizinische Innovationskraft und nicht zuletzt das deutsche Gesundheitswesen.

Der vfa ist der Verband der forschenden Pharma-Unternehmen in Deutschland. Er vertritt die Interessen von 44 weltweit führenden Herstellern und ihren über 100 Tochter- und Schwesterfirmen in der Gesundheits-, Forschungs- und Wirtschaftspolitik. Mehr unter www.vfa.de

vfa. Die forschenden
Pharma-Unternehmen

EPIDEMIOLOGIE WIE GESUND IST DIE MENSCHHEIT?

Globale Aussagen über den Krankenstand der Erdbevölkerung sind schwierig zu treffen. Ein Team von Gesundheitsforschern hat jetzt einen Supercomputer mit weltweit gesammelten Daten gefüttert und der Menschheit eine erste Gesamtdiagnose gestellt. Sie birgt viele Überraschungen.



In vielen Ländern sind Gesundheitsdaten Mangelware. Oft sind die Epidemiologen auf eigene Erhebungen angewiesen.



W. Wayt Gibbs lebt als Wissenschaftsjournalist in Seattle (US-Bundesstaat Washington) und schreibt regelmäßig für »Scientific American«. Außerdem publiziert er für eine teilweise von der Bill & Melinda Gates Foundation finanzierte Investmentgesellschaft.

» spektrum.de/artikel/1427444

Als Christopher Murray zehn Jahre alt war, packte seine Familie in Golden Valley (Minnesota) ein paar Koffer und einen tragbaren Generator zusammen, um per Flugzeug, Auto und Schiff über Spanien und Marokko quer durch die Sahara zu dem Dorf Diffa in Niger zu reisen. Im folgenden Jahr errichtete und betrieb die fünfköpfige Familie – der Vater Arzt, die Mutter Mikrobiologin – das örtliche Krankenhaus. Während der junge Murray die Spitalsapothekete betreute und Besorgungen erledigte, fiel ihm zunehmend auf, dass die Nigrer an vielen seltsamen Krankheiten litten, die daheim in Minnesota niemals auftraten. Warum waren die Menschen an manchen Orten so viel kränker als anderswo?

Mit der Zeit wurde der Junge unzufrieden. Er und seine Familie hatten hart gearbeitet, um den Einwohnern von Diffa zu helfen. Aber am Ende des Jahres hatte er den Eindruck, kaum etwas erreicht zu haben, und fragte sich: Wie können dauerhafte Verbesserungen gelingen?

Mit dieser Frage im Hinterkopf drängte Murray in den folgenden vier Jahrzehnten Ärzte und Gesundheitspolitiker, sich mehr um die großen Zusammenhänge zu kümmern – um die langfristigen Trends, die unnötigerweise so viele Menschen schon in jungen Jahren das Leben kosten. Er widmete seine ganze Karriere dem Aufbau eines Systems, das der globalen Gesundheitspolitik endlich etwas dringend Nötiges liefert, das nur allzu oft fehlt: verlässliche Daten.

Wie Murray erkannte, haben wir nur ein unklares Bild von unseren Leiden, weil Politiker peinliche Zahlen zurückhalten oder frisieren. Auch lassen sich zwischen unterschiedlichen Staaten nur schwer statistische Vergleiche ziehen. Also versuchte Murray ein neuartiges Instrument zu schaffen, das Informationslücken schließt, den wahren Zustand der Weltgesundheit enthüllt und zeigt, wie sich künftigen Generationen helfen lässt.

Im 19. und 20. Jahrhundert revolutionierte die weite Verbreitung des Mikroskops das Gesundheitswesen: Die Entdeckung der winzigen Krankheitskeime führte zu besserer Hygiene sowie zur Entwicklung von Antibiotika und Impfstoffen. Murrays neues Instrument war gewissermaßen das Gegenteil. Sein »Makroskop« sollte nützliche Krankheitsdetails in großem Maßstab aufklären – über Ländergrenzen und Kontinente hinweg, die gesamte Menschheit erfassend.

Ein Makroskop für ein Gesamtbild der Weltgesundheit

Einen ersten Versuch zur Entwicklung eines solchen Instruments machte Murray 1993, als er für die Weltbank mit einigen Koautoren einen bahnbrechenden Bericht zur globalen Gesundheit zusammenstellte. 2007 gründete er

dann das Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) an der University of Washington in Seattle und begann ein weltumspannendes Netzwerk von Mitarbeitern zu installieren – für ein viel feineres und umfassenderes Makroskop.

Wie die meisten Neuerungen des 21. Jahrhunderts besteht das Makroskop aus Software und riesigen Datenmengen. An einem Ende fließen Gigabytes von Gesundheitsstatistiken ein, gesammelt in jedem Winkel des Planeten und kontrolliert von einem multinationalen Team aus mehr als 1000 Forschern. Am anderen Ende kommen interaktive Grafiken und Tabellen heraus, die höchst detailliert und genau alle möglichen Krankheits-, Verletzungs- und Todesursachen in aller Welt verzeichnen, vom Herzinfarkt bis zum Eselsbiss. Dazwischen arbeitet ein Supercomputer mit ausgeklügelten Methoden der mathematischen Statistik, um Fehler zu beheben, unzuverlässige Daten zu beseitigen und intelligente Schätzungen für die zahlreichen Weltregionen anzustellen, aus denen es keine belastbaren Zahlen gibt.

Nach zehn Jahren und vielen Millionen Dollar Entwicklungskosten liefert das System nun Momentaufnahmen des Gesundheitszustands von Homo sapiens, die fast einer jährlichen Routineuntersuchung gleichen. Das IHME veröffentlichte erstmals 2012 eine umfassende Statistik, weitere 2014 und 2016, und im Zweijahresabstand sollen Updates folgen. Mit jedem Mal werden die Schnappschüsse – die nicht nur die Gegenwart, sondern auch die Vergangenheit erfassen – immer exakter, detailreicher und vollständiger.

Diese Berichte summieren sich zu einer Langzeitstudie namens Global Burden of Diseases, Injuries, and Risk Factors Study (GBD), die überraschende Trends auf so unterschiedlichen Gebieten wie Luftverschmutzung, Nierenleiden und Brustkrebs offenbart – und zwar in

AUF EINEN BLICK SCHNAPPSCHÜSSE DER WELTGESUNDHEIT

- 1 Wie sehr die Menschen in welchen Regionen an welchen Krankheiten leiden, ist erstaunlich unklar. Oft fehlen entsprechende Daten ganz, oder sie wurden nach national unterschiedlichen Kriterien erhoben.
- 2 Seit Jahrzehnten sucht der Arzt und Ökonom Christopher Murray nach weltweit gültigen Messmethoden für Krankheit und Behinderung. Mit Hunderten von Experten entwickelt er eine umfangreiche Datenbank.
- 3 Erste Ergebnisse besagen, dass die globale Versorgung mit sauberem Trinkwasser unerwartete Fortschritte gemacht hat. Hingegen klaffen große Lücken in den Daten über Typhus, Masern und Hepatitis.

armen wie in reichen Ländern. Einige Befunde haben heftige Kontroversen ausgelöst, da sie den Veröffentlichungen der Weltgesundheitsorganisation WHO und anderer UNO-Organisationen widersprechen.

Doch Agnes Binagwaho, Gesundheitsministerin von Ruanda, gehört mit vielen anderen in den Entwicklungsländern zu den Fans des Makroskops. »Es ist nicht bloß ein neues Werkzeug, sondern eine Revolution«, sagte sie 2013 bei seiner offiziellen Vorstellung. »Wir gewinnen damit eine Universalsprache für Wissenschaftler und Gesundheitspolitiker ... und ein besseres Leben für unsere Menschen.«

Einen wichtigen Anstoß gab Anfang der 1990er Jahre der Weltbankökonom Dean Jamison, der das weltweite Zusammenspiel von Gesundheit und Wirtschaft analysieren wollte. Jamison beauftragte Murray, den wirtschaftlichen Verlust zu bewerten, den Krankheiten und Verletzungen im Jahr 1990 verursacht hatten. Später kam Alan Lopez hinzu, ein Epidemiologe der WHO.

Bescheidene Anfänge in einer Scheune

»Wir arbeiteten hauptsächlich in Christophers Scheune in Maine«, erzählt Lopez, der jetzt an der University of Melbourne in Australien für das GBD-Projekt tätig ist. »Wir jagten gnadenlos nach allen verfügbaren Daten zu 120 Krankheiten und zehn Risikofaktoren. Wir schufteten 20 Stunden pro Tag, völlig besessen.«

Verglichen mit der aktuellsten GBD-Studie, die 317 Ursachen für Tod und Behinderung in jedem Land mit mehr als 50 000 Einwohnern erhebt, fiel der Weltbankbericht von 1993 recht bescheiden aus. Dennoch erwies er sich als äußerst einflussreich. Microsoft-Mitgründer Bill Gates und

»Wir jagten gnadenlos nach allen verfügbaren Daten. Wir schufteten 20 Stunden pro Tag, völlig besessen«

seine Frau Melinda widmeten daraufhin den größten Teil ihrer gemeinnützigen Stiftungsgelder von gut 37 Milliarden Dollar dem Kampf gegen ansteckende Krankheiten (siehe »Eine Stiftung zur Erforschung der globalen Gesundheit«, S. 44). Und 1998 beauftragte Gro Harlem Brundtland, die damalige WHO-Generaldirektorin, Murray damit, für ihre Organisation ein ähnliches System zu entwickeln.

Murrays Team wagte dabei einen Leistungsvergleich verschiedener nationaler Gesundheitssysteme. Die Rangordnung provozierte einen Sturm der Kritik – sowohl von professionellen Epidemiologen als auch von Regierungsbeamten, deren Länder schlecht abschnitten. Die USA kamen beispielsweise auf Rang 37, Russland auf den 130sten Platz. Die WHO, die ihren Mitgliednationen verpflichtet ist, hat nie wieder solche Ranglisten publiziert. »Es gab heftigen politischen Streit«, berichtet Murray. Dadurch kam sein ganzes WHO-Projekt zum Erlie-

gen. Er verließ die Weltgesundheitsorganisation und ging 2003 an die Harvard University in Cambridge (Massachusetts). Das Ganze war ihm eine Lehre: »Wir müssen unsere Arbeit unbedingt strikt gegen Regierungseinflüsse abschirmen.«

Murray begann sich nach privater Unterstützung für ein von politischer Einmischung freies Forschungsinstitut umzusehen. In Seattle traf er Bill Gates, mit dem er fast sofort einig wurde. Die Bill & Melinda Gates Foundation spendete 105 Millionen Dollar für die Gründung des IHME – und schon bald nahm das Makroskop Form an.

Aufwändige Kontrolle der Krankheitsdaten

Es ist nicht leicht, in einer ungeordneten Welt einen echten Überblick über gesundheitliche Leiden zu gewinnen. Doch Murray fand Forscher, die wie er die Mängel der Statistiken von Regierungen, Interessengruppen, der WHO und anderer UNO-Organisationen beheben wollten – nicht zuletzt, um langfristig Leben zu retten.

Bevor die von Gesundheitsministerien, Hilfsorganisationen oder aus der Fachliteratur stammenden Rohdaten in Murrays System gespeist werden, durchlaufen sie strenge Qualitätskontrollen. »Bei jedem neuen Datensatz ist unsere erste Frage: Was stimmt damit nicht?«, betont Lopez. »Wir sortieren Datenmüll aus – zum Beispiel Tod durch »höhere Gewalt« – und finden an seiner Stelle wissenschaftlich begründete Ursachen.« Durch diese Kontrolle werden statistische Ausreißer aufgespürt. So treten in Frankreich scheinbar besonders wenige Todesfälle durch Herzkrankheiten auf – trotz starker Risikofaktoren. Wie sich herausstellte, geben französische Ärzte bei Herzinfarkt häufiger einen Nebengrund als Todesursache an. »Diese kulturell geprägte Praxis erklärt rund die Hälfte des so genannten französischen Paradoxons«, meint Theo Vos, ein leitender Wissenschaftler bei IHME.

Hunderte Experten aus aller Welt, die jede Krankheit und Region kennen, normieren die Datensätze, indem sie regional unterschiedliche Krankheitsdefinitionen berücksichtigen. Auf diese Weise, erklärt Lopez, »können wir Krebs in Ungarn mit demselben Leiden in El Salvador, Südafrika oder sonst wo vergleichen.«

Nicht zuletzt spielt politischer Einfluss eine Rolle. »Zwar fällt es den Regierungen immer schwerer, der WHO und der UNO Zahlen zu diktieren«, berichtet Murray, »aber es gibt subtilere Einwirkungen. UNAIDS (das UNO-Programm gegen die Aids-Pandemie) schätzt jedes Jahr die Verbreitung von Aids, doch einigen Ländern wie China passt das nicht. Also werden die Zahlen für diese Länder nicht veröffentlicht.« 2015 betraf das 83 Staaten.

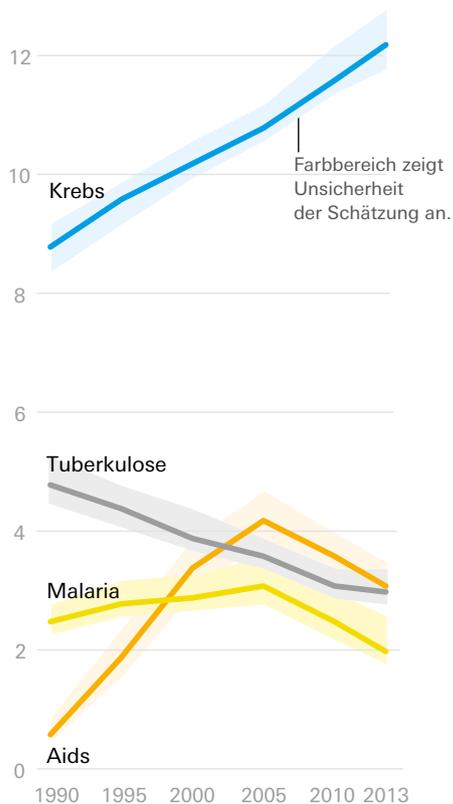
Das größte Problem sind fehlende Daten. Gerade für die gesundheitlich instabilsten Regionen der Welt gibt es einfach keine verlässlichen Krankheitsstatistiken. Das GBD-Team stopft die Lücken auf zwei Arten. Erstens verarbeitet es Daten, die eine kleine Armee von Interviewern bei Besuchen von Dorf zu Dorf – oder gar von Haus zu Haus – durch Auswertung handgeschriebener Aufzeichnungen oder bei Gesprächen über Krankheit und Tod in der Familie gesammelt hat. Nach dieser Methode arbeitet gegenwärtig die groß angelegte Million Death

Krebs in den Entwicklungsländern

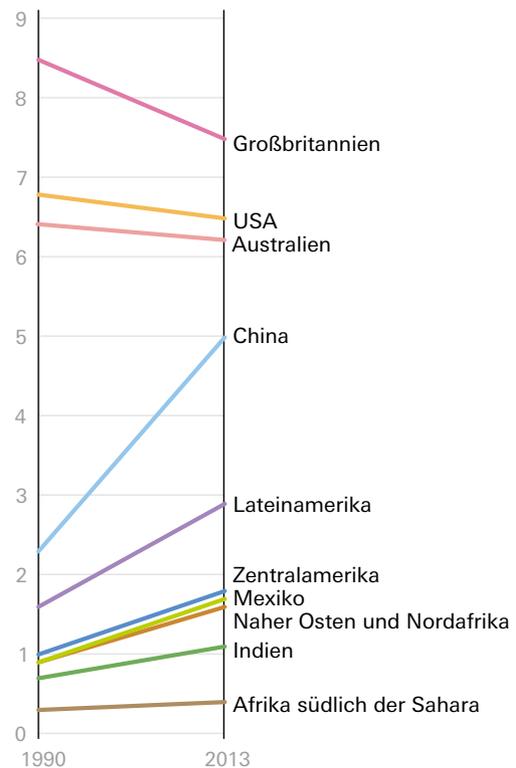
Tumoren gelten als Problem der reichen Industrienationen, doch das Makroskop liefert ein anderes Bild. In Zentralamerika, wo die Frauen wegen des gestiegenen Lebensstandards älter werden, erkranken nun viele an Brustkrebs. Bei Mexikanerinnen ist die einschlägige Sterberate seit 1990 um 75 Prozent gestiegen – oder um 17 Prozent, wenn man die Alterung der Gesellschaft berücksichtigt. Ähnliches gilt für die Nachbarländer. Generell fordern alle Arten von Krebs

rund 50 Prozent mehr Tote in den ärmeren Weltregionen als Aids, Tuberkulose und Malaria zusammengenommen (A). Dennoch gibt die Weltgemeinschaft relativ wenig für entsprechende Vorsorge aus – etwa für Impfungen gegen humane Papillomviren oder für Aufklärung über die Risiken von Rauchen, schlechter Ernährung und Bewegungsmangel –, obwohl solche Maßnahmen die Krebshäufigkeit in einigen reicheren Ländern deutlich reduziert haben (B).

A Todesfälle in Entwicklungsländern (in Prozent der Gesamtzahl)



B Verlust an gesunden Lebensjahren durch Brust-, Lungen- und Darmkrebs (in DALY-Prozent)



Was ist ein DALY?

»Gute Gesundheit bedeutet viel mehr als bloß am Leben zu bleiben«, betont Christopher Murray. Um den Gesundheitszustand zu quantifizieren, haben er und Alan Lopez als Einheit das DALY (disability-adjusted life year) eingeführt. Im Prinzip bedeutet ein DALY den Verlust eines bei guter Gesundheit verbrachten Lebensjahrs. Für die

Berechnung geht man davon aus, dass jeder Mensch, ob reich oder arm, ob jung oder alt, die maximale Lebenserwartung – in der neuesten Studie 86 Jahre – bei guter Gesundheit erreicht. Einem fünfjährigen Kind, das plötzlich an Malaria stirbt, entsprechen demnach 81 DALYs; ein 85jähriger, der nie krank war und beim Überqueren

der Straße getötet wird, verliert nur 1 DALY. Behinderungen, die das Leben zwar erschweren, aber nicht unbedingt verkürzen, erhalten ein DALY-Maß, das nach Krankheitsstatistiken und neuerdings nach allen möglichen Lebensläufen ermittelt wird. Beispielsweise wird für ein Jahr Behinderung durch Erblinden ein Drittel DALY veranschlagt.

Study in Indien. Laut ihren vorläufigen Resultaten für 2010 tötet die Malaria in Indien mindestens zehnmal mehr Menschen, als die WHO angibt, die sich vorwiegend auf Krankenhausdaten stützt und dadurch viele daheim Sterbende übersieht.

Die zweite Art, fehlende Daten zu ergänzen, nutzt bekannte Muster für spezielle Krankheiten, Verletzungen und Risikofaktoren. Zum Beispiel grassiert die Malaria während oder kurz nach der Regenzeit am stärksten; Krebs tritt mit zunehmendem Alter häufiger auf; Aids ist besonders verbreitet in den Nachbarländern von Staaten mit vielen HIV-Positiven. Auf Grund solcher Zusammenhänge lässt sich von statistisch gut erfassten Weltregionen auf Gebiete mit lückenhaften Daten schließen.

»Unsere Datenbank umfasst 200 gut bekannte Variable«, sagt Vos, »vom Breitengrad über Bevölkerungsdichte und Niederschlag bis zum Konsum von Zigaretten und Verzehr von Schweinefleisch.« Das System erzeugt unzählige Kombinationen von Werten für diese Variablen, füttert damit zahlreiche unterschiedliche mathematische Modelle und stellt fest, welche Kombination eine bestimmte Krankheit am besten vorhersagt. Dieser Ansatz, die so genannte Ensemblemodellierung, wird meist bei der Wettervorhersage verwendet, aber auch im Finanz- und Versicherungswesen. Viele Epidemiologen scheuen allerdings den enormen Rechenaufwand, meint Vos.

Das GBD-Projekt verfolgt jetzt mehr als 1000 Gesundheitsindikatoren für 188 Länder über 25 Jahre hinweg und überprüft sie anhand von 20 bis 40 statistischen Modellen. Das Team lässt jedes Modell 1000-mal laufen, wobei die Input-Daten in einem plausiblen Rahmen variieren, damit Fehlerbereiche abgesteckt werden können. Im Supercomputer des IHME brauchen 12000 Hochleistungsprozessoren vier ganze Tage, um einen einzigen Schnappschuss des Planeten fertigzustellen – ein Gesundheitszeugnis für die Menschheit.

»Schon die Tatsache, dass jemand diese Zahlen veröffentlicht und ihnen Fehlermargen zuweist, präzisiert die Diskussion«, betont Gates. »Seit das IHME einen zentralen Datenspeicher anbietet, muss man nicht mehr Hunderte von Artikeln lesen und versuchen, sich selbst ein Bild zu machen. Über bestimmte Zahlen lässt sich streiten, aber wenn die Methode im Prinzip stimmt, wird entweder da und dort die Fehlermarge präzisiert oder eine neue Untersuchung den Kenntnisstand verbessern.«

Unerwartete Ergebnisse

Die erste Veröffentlichung von GBD-Zahlen im Jahr 2012 verstörte einige Länder, die sich viel auf ihre Krankheitsstatistiken zugutehalten. Zum Beispiel waren die Verantwortlichen in Großbritannien überrascht, dass die Gesundheit der Briten hinter der ihrer europäischen Nachbarn

Eine Stiftung zur Erforschung der globalen Gesundheit

Die Bill & Melinda Gates Foundation finanziert unter anderem das Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) und dessen Langzeitstudie namens Global Burden of Diseases, Injuries, and Risk Factors Study (GBD). Autor W. Wayt Gibbs sprach mit Bill Gates darüber.

Gibbs: Sie haben Christopher Murray geholfen, unabhängig von der Weltgesundheitsorganisation WHO eine Statistik der weltweiten Krankheiten zu erarbeiten. Warum kam es dazu?

Gates: Ich traf Chris 2001, als er für die WHO erstmals eine Rangordnung der nationalen Gesundheitssysteme aufstellte. Einige Länder sträubten sich dagegen, weil sie mit ihrer Einstufung nicht einverstanden waren. Um ein zuverlässiges Bild des Gesundheitszustands vor allem der armen Länder zu gewinnen, gaben wir der University of Washington Geld für die Gründung des IHME.

Gibbs: Aber die WHO und andere UNO-Organisationen sammeln und

publizieren doch schon viele Gesundheitsstatistiken aus aller Welt. Warum ist es nötig, eine separate Initiative zu starten, die dasselbe Ziel verfolgt?

Gates: Die WHO leistet wichtige Arbeit, aber sie gehört zur UNO, und das schafft gewisse Probleme. Als Chris innerhalb der WHO eine Rangordnung der Länder aufstellen wollte, erwies sich nicht nur die Finanzierung, sondern auch die Konfliktbereitschaft der WHO als unzureichend. Sie musste ja Ländern, die zu ihren Geldgebern gehören, schlechte Noten geben.

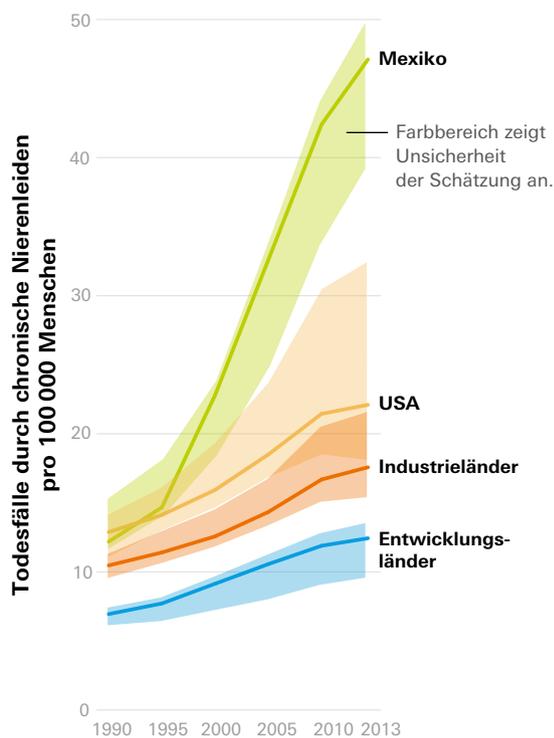
Gibbs: Wie sehen Sie die globale Gesundheit unserer Spezies? Sind wir alles in allem gesünder als vor 20 Jahren?

Gates: Unbedingt. Das ist eine unglaubliche Erfolgsgeschichte. Leider bekommt eine gute Nachricht ohne Bösewicht nur schwer die verdiente Aufmerksamkeit. Schauen Sie nur nach Vietnam, Kambodscha, Sri Lanka, Ruanda, Ghana – praktisch alle ansteckenden Krankheiten gehen zurück. Die einzige Infektionskrankheit, die trotz unserer Bemühungen zunimmt, ist das Denguefieber. Allerdings wächst die Bürde der nicht ansteckenden Krankheiten in den Entwicklungsländern. Es gibt eine Diabetesepidemie, eine Explosion der Gesundheitskosten. Doch global gesehen hat es in den letzten 20 Jahren enorme Fortschritte gegeben.

Das Rätsel der Nierenerkrankungen

Chronische Nierenerkrankungen sind auf dem Vormarsch. Nach Schätzungen des IHME ist die einschlägige Sterberate in den USA seit 1990 um 72 Prozent gestiegen; 2013 lag sie um 50 Prozent höher als bei Brustkrebs. Anderswo ist die Lage sogar noch schlimmer. In Mexiko war 1990 nur einer von 40 Todesfällen auf Nierenprobleme zurückzuführen, 2013 schon einer von elf.

Der GBD-Studie zufolge erklärt die wachsende Häufigkeit von Übergewicht und Diabetes ein Viertel des Anstiegs, Bluthochdruck ein weiteres Viertel. Doch zu einem großen Teil bleibt die Häufung von Nierenerkrankungen rätselhaft.



NIGEL HAVTIN, IACH: INSTITUTE FOR HEALTH METRICS AND EVALUATION, GLOBAL HEALTH DATA EXCHANGE (GHDX), WWW.HEALTHDATA.ORG, SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2016

zurückbleibt. »Auf Grund unserer Risikofaktorenanalyse setzten sie andere Prioritäten und stellten die Ernährung in den Vordergrund«, berichtet Murray. Mindestens 33 Länder, darunter China, Brasilien, Deutschland und Russland, haben nun begonnen, ihre Gesundheitsstatistiken zu verbessern; die so gewonnenen Daten werden in das globale Makroskop einfließen.

Einige Resultate des GBD-Systems werden kontrovers diskutiert, weil sie vermeintlich unumstößlichen Zahlen widersprechen. Beispielsweise besagte eine 2014 publizierte GBD-Analyse zur Verbreitung von Aids, dass die UNAIDS-Schätzungen für den Zeitraum von 2005 bis 2012 um 17 bis 19 Prozent zu hoch lagen – was immerhin einen Unterschied von 6,6 Millionen Erkrankten und 635 000

Toten bedeutet. Die niedrigen Zahlen legen nahe, dass bestimmte Präventions- und Behandlungsstrategien – etwa Sexualaufklärung und Kondomnutzung – besser anschlagen als erwartet und deshalb stärker genutzt werden sollten.

Einer ebenfalls umstrittenen IHME-Schätzung zufolge waren 2013 die Malariatodesopfer zu einem Drittel Erwachsene. Nach herrschender Ansicht trifft diese Krankheit zwar auch viele Ältere, tötet aber fast ausschließlich Kinder. »90 Prozent der Experten glauben, dass Murray falschliegt«, räumt Gates ein. In den nächsten Jahren sollen bessere Erhebungen den Streit schlichten.

Die GBD-Resultate enthalten auch sehr gute Nachrichten. Zum Beispiel sind die – vor allem durch infiziertes Wasser verursachten – Durchfallerkrankungen zwischen 1990 und 2013 weltweit um 70 Prozent zurückgegangen. Murrays Team schlägt darum vor, in manchen Regionen die Entwicklungshilfe statt auf Brunnenprojekte besser auf Maßnahmen gegen Verkehrsunfälle zu konzentrieren. Während Kinder früher an schmutzigem Wasser starben, sind sie nun oft eher als Fußgänger, Radler und halbwegsige Autofahrer gefährdet.

Zugleich offenbart das Makroskop blinde Flecken in der globalen Statistik. »Es ist unerträglich, wie wenig wir über Ausbrüche von Typhus und Cholera wissen«, klagt Gates, der neuerdings zu jedem Treffen mit Verantwortlichen und Entwicklungshelfern GBD-Tabellen mitbringt. Wegen der lückenhaften Datenlage kann das IHME nur ganz grob schätzen, dass Typhus für den Verlust von 6 bis 18,3 Millionen Jahren gesunden Lebens verantwortlich ist. Ähnlich ungewiss ist die Auswirkung von Keuchhusten, Masern sowie Hepatitis A und C.

Murray ist davon überzeugt, dass das Makroskop mit der Zeit immer schärfere Bilder liefern wird. Die Gesundheitsbehörden können sich dann stärker auf die jährlichen Trends konzentrieren statt auf die absoluten Krankenzahlen. Murray zieht eine Parallele zur Volkswirtschaftslehre, wo man sich weniger für das mittlere Einkommen, die Gesamtzahl der Arbeitsplätze oder den Geldwert des Bruttoinlandsprodukts an sich interessiert, sondern vor allem für das Veränderungstempo dieser Größen. Statt kleinlaut zu fragen »Können wir mehr erreichen?« wird es künftig heißen: »Wie können wir schneller vorankommen?« ◀

QUELLE

Murray, C. J. L. et al.: Global, Regional, and National Disability-Adjusted Life Years (DALYs) for 306 Diseases and Injuries and Healthy Life Expectancies (HALE) for 188 Countries, 1990–2013: Quantifying the Epidemiological Transition. In: *Lancet* 386, S. 2145–2191, 2015

LITERATURTIPP

Smith, J. N.: *Epic Measures: One Doctor, Seven Billion Patients.* Harper Wave, New York 2015
Erzählt von Christopher Murrays *Erforschung der Weltgesundheit*

WEBLINK

Interaktive Darstellung der Studie »Global Burden of Disease«:
www.healthdata.org/results/data-visualizations



GETTY IMAGES / JIMMY DOONES / FRANIS LOUING

ARTENSCHUTZ DARF MAN BEDROHTE ARTEN UMSIEDELN?

Wegen des Klimawandels werden es manche Tiere und Pflanzen in ihrem jetzigen Verbreitungsgebiet bald nicht mehr aushalten. Sollte man sie unterstützen, indem man sie in andere Lebensräume bringt?



Richard Conniff schreibt als Wissenschaftsautor und Kommentator für verschiedene namhafte Zeitungen und Zeitschriften, im Schwerpunkt über Verhalten von Mensch und Tier. Für seine Arbeiten, darunter einige Bücher, erhielt er mehrfach Auszeichnungen.

► spektrum.de/artikel/1430283

Die urtümlichen Brückenechsen Neuseelands sind vom Aussterben bedroht: Für sie wird es zu warm. Sollte man die Art weiter südlich in kälteren Gefilden ansiedeln?

North Brother Island ist eine kleine, raue Felsinsel in der Cookstraße zwischen der Nord- und der Südinsel Neuseelands. Hier leben einige der letzten der vom Aussterben bedrohten Brückenechsen oder Tuataras, wissenschaftlich *Sphenodon punctatus*. Das Tier gilt als »lebendes Fossil«, denn die Blütezeit dieser Reptilien lag tief im Erdmittelalter. Voraussichtlich wird es aber auf jenem Felsen bald nicht mehr vorkommen. Der Grund: Die Männchen nehmen rapide überhand. Als Biologen das Ungleichgewicht Ende der 1990er Jahre bemerkten, waren 62,4 Prozent des Bestands männlich. Inzwischen sind es schon mehr als 70 Prozent.

Forscher machen den Klimawandel dafür verantwortlich. Bei Tuataras bestimmt die Boden- und somit Bruttemperatur das Geschlecht. Unterhalb von ungefähr 18 bis 20 Grad Celsius entstehen Weibchen, darüber Männchen. Sollte der Anteil Letzterer auf 85 Prozent steigen, wird sich der Bestand nicht mehr lange halten können. Die Weibchen legen dort in so großen Abständen Eier, dass Brutnester schon jetzt sehr selten geworden sind.

Viele Tiere und Pflanzen, denen die globale Erwärmung zu schaffen macht, lassen sich womöglich nur noch retten, indem man sie an Orte umsiedelt, wo diese Arten bisher nicht heimisch waren. Forscher bezeichnen das als begleitete Kolonisation oder assistierte Migration. Zu den Artenschutzexperten, die solche Maßnahmen in die Diskussion brachten, gehört die Ökologin Jessica Hellman von der University of Minnesota in Minneapolis. Sie spricht auch für ihre Kollegen, wenn sie sagt, dass sie natürlichere Hilfestellungen bei Weitem bevorzugen würde. Es wäre besser, die Arten fänden von allein in andere, für sie nun günstigere Lebensräume, indem sie zum Beispiel über natürliche Korridore dorthin gelangten. Das ist Populationen auf Inseln oder Bergen allerdings oft nicht möglich. In zahlreichen anderen Fällen hat der Mensch geeignete Verbindungswege längst gekappt. Deswegen ziehen manche Naturschützer eine Umsiedlung bedrohter Arten in andere Gebiete inzwischen ernstlich in Erwägung.

Einzelne Projekte haben schon begonnen. Doch einige Forscher hegen dagegen große Bedenken. Schließlich kann eine fremde Art am neuen Ort verheerende ökologische Schäden anrichten. Beispiele dafür gibt es genug. Außerdem ist völlig ungewiss, ob die neu eingebrachten Tiere an dem Standort überhaupt zurechtkommen. Wer in langjähriger Arbeit erlebt, wie schwierig es sein kann, zum Beispiel in den USA Wölfe wieder in den Yellowstonepark einzugliedern oder Bisons in die Prärie, der mag Vorbehalte haben, Tiere in einen ihnen bis dahin völlig fremden Lebensraum zu entlassen.

Doch jetzt, da sich erste Auswirkungen des Klimawandels für die Natur vielerorts deutlich abzuzeichnen beginnen, weicht die ablehnende Haltung gegen Umsiedlungsprojekte langsam einer vorsichtigen Akzeptanz – mit dem Vorbehalt, dass solche Eingriffe strengen Richtlinien folgen. Die amerikanische Onlinezeitschrift »Elementa: Science of the Anthropocene« befragte 2300 Biodiversitätsforscher zu ihrer Einstellung und stellte fest: Unter bestimmten rigiden Vorgaben würden die meisten dieser Experten eine assistierte Kolonisation befürworten. Das erste Kriterium wäre, dass die Art ohne die Maßnahme nicht gerettet werden könnte. Ebenso dürfte die Ansiedlung dem neuen Habitat nicht oder höchstens sehr wenig schaden.

Als hätte man es vorhergesehen: Geglückte Rettung eines Kängurus

Wie überlebensentscheidend solche Programme unter Umständen sein können, erfuhr Australien Ende 2015 mit einem früher häufigen, heute sehr seltenen Beuteltier, das nur noch in einem kleinen Naturschutzgebiet im Südwesten des Kontinents vorkommt. Das Gilbert-Kaninchenkänguru (*Potorous gilbertii*) galt bereits als ausgestorben, doch eine kleine Kolonie wurde 1994 wiederentdeckt. Im November 2015 fielen 15 von den damals schätzungsweise 20 Tieren des Reservats einem Buschbrand zum Opfer. Das zerstörte Habitat hätte auch für die übrigen das Todesurteil bedeutet und damit das Ende der Art. Doch nach der Wiederentdeckung hatte man einige Tiere auf eine nahe, raubtierfreie Insel gebracht, wo sie sich gut vermehrten.

In diesem Fall wurde die neue Kolonie in angestammten Lebensräumen der Art etabliert. Das gilt als viel weniger kritisch als die Umsiedlung in ein völlig neues Gebiet. Auch auf den Florida Keys, der langen Koralleninselnkette im Süden Floridas, versucht man, Populationen vom Key-Weißwedelhirsch, einer kleinen Unterart dieses amerikanischen Hirschs, vor dem Meeresspiegelanstieg zu retten, indem man sie innerhalb ihres Verbreitungsgebiets in höhere Lagen umsiedelt. Ähnlich verfuhr man dort mit dem baumhohen Key-Kaktus. Das soll den beide Arten wenigstens in den nächsten Jahrzehnten eine Überlebenschance geben.

Für die australische Bramble-Cay-Mosaikschwanzratte (*Melomys rubicola*) käme solche Hilfe inzwischen zu spät. Sie fiel den wiederholten Überflutungen ihrer abgelegenen Koralleninsel hoch im Norden des Great-Barrier-Riffs zum Opfer. Im Juni 2016 erklärten Forscher der University of Queensland die Spezies für ausgestorben, nachdem sie über mehrere Jahre kein Tier mehr hatten finden können.

AUF EINEN BLICK UMSTRITTENE UMZUGSHILFE

- 1 Durch die Klimaerwärmung verlieren viele Tier- und Pflanzenarten ihren bisherigen Lebensraum. Wenn sie nicht irgendwohin ausweichen können, drohen sie auszusterben.
- 2 Naturschützer ersinnen nun Wege, um solche bedrohten Arten an zukünftig besser geeigneten Orten anzusiedeln. Erste Versuche von »assistierter Migration« gibt es bereits.
- 3 Derartige Maßnahmen bergen viele Risiken, nicht nur für die umgesiedelte Art, sondern vor allem für das ausgewählte Ökosystem. Unter strengen Auflagen kann das mitunter dennoch die beste Option sein.



LINKS: GETTY IMAGES / NATIONAL GEOGRAPHIC / JASON EDWARDS



LINKS: GETTY IMAGES / OXFORD SCIENTIFIC / ROBIN BUSH; RECHTS: ISTOCK / HANQAR



Bergbilchbeutler (*Burrmys parvus*)

Die Art droht auszusterben, weil sie in den wärmer werdenden Hochgebirgsregionen Südwestaustraliens nirgendwohin ausweichen kann. Bei einer Umsiedlung müsste man ihr bevorzugtes Beutetier, einen Schmetterling, wohl mitnehmen.

Hihi oder Gelbbandhonigfresser (*Notiomystis cincta*)

Die letzten Refugien auf Neuseelands Nordinsel werden der Art bald keinen geeigneten Lebensraum mehr bieten. Wird man sie auf der Südinsel ansiedeln können?

Key-Weißwedelhirsch (*Odocoileus virginianus clavium*)

Auf den Florida Keys leben noch weniger als 1000 Tiere dieser kleinen Unterart des amerikanischen Weißwedelhirschs. Wegen des ansteigenden Meeresspiegels werden sie in höhere Lagen umgesiedelt.

Nach ihrer Einschätzung verzeichnete man hiermit erstmals den Untergang einer Säugetierart durch den vom Menschen verursachten Klimawandel.

Mitunter dürfte eine Verpflanzung in eine andere Gegend tatsächlich die letzte Lösung sein. Die Westliche Sumpfschildkröte – oder Falsche Spitzkopfschildkröte (*Pseudemys umbrina*) –, die nur in Feuchtgebieten in Südwestaustralien bei Perth vorkommt, ist nicht nur vom Klimawandel bedroht, sondern auch von der sich ausdehnenden Großstadt und dadurch, dass der Grundwasserspiegel infolge des hohen Wasserverbrauchs absinkt.

Tracy Rout von der University of Queensland und ihre Kollegen haben mit aufwändigen Rechenprogrammen 13000 Orte der Region daraufhin geprüft, ob sie für eine Umsiedlung der Schildkröte in Frage kämen. Die vielversprechendsten Habitate nahmen sie dann in Augenschein. Übrig blieben einige wenige Standorte mehrere Autostunden südlich von Perth. Diese scheinen die Bedürfnisse der Art auch in einigen Jahrzehnten bei einem wahrscheinlich noch trockeneren Klima erfüllen zu können. Nachdem die Maßnahme offiziell zugelassen worden war, setzten die Forscher dort im August 2016 die ersten Sumpfschildkröten aus, und zwar Zuchttiere aus Gefangenschaft.

Für den Bergbilchbeutler (*Burrmys parvus*) ein neues Habitat zu finden, dürfte noch schwieriger sein. Diese stark bedrohte Art, die in alpinen Gebieten Südwestaustraliens vorkommt, war bis 1966 nur von Fossilien bekannt. Ihr karger, schneereicher Lebensraum erwärmt sich heute so schnell, dass man die Tiere nicht mehr einfach vor Ort in noch höhere Lagen bringen kann. Und vermutlich müsste man ihre Hauptnahrung, den Bogong-Falter (*Agrotis infusa*), im neuen Gebiet gleich mitansiedeln.

Der Ansatz, von der Klimaerwärmung betroffene Arten zu verpflanzen, ist nicht völlig neu. Schon seit 1999 erproben ihn die Ökologen Stephen G. Willis von der Durham University in England und Jane K. Hill, die heute an der University of York lehrt. Sie wollten wissen, wie britische Schmetterlingsarten mit dem Wandel zurechtkommen, darunter der recht häufige Schachbrettfalter und der Ockergelbe Braun-Dickkopffalter. In ihren Studien fanden sie durchaus geeignete Habitate nördlich von deren Ver-

breitungsgebiet, wo die Arten aber von allein bisher nicht hingelangt sind.

Offenbar können manche Organismen mit einer klimatischen Veränderung nicht einfach dadurch Schritt halten, dass sie in eine günstigere Umwelt abwandern. Solche Arten verlagern ihr Verbreitungsgebiet nicht so rasch, wie es ihnen gut täte – oft sogar dann nicht, wenn durchaus noch natürliche Korridore dafür existieren. Dass Bäume träge reagieren, hätte man erwartet, doch sogar Vögel und viele Säugetiere verhalten sich ähnlich. Möglicherweise haben sich in den Habitaten, die sich zur Umsiedlung anbieten würden, einige für die Art wichtige ökologische Details noch nicht herausgebildet.

Baldiges Aus für einen beliebten Pfeilgiftfrosch

Die zeitliche Kluft zwischen dem Verlust des alten Lebensraums und dem Finden eines neuen kann auch aus geografischen Gründen unüberbrückbar sein. Der Biologe Joshua J. Lawler von der University of Washington in Seattle glaubt beispielsweise, dass der Gelbgebänderte Baumsteiger (*Dendrobates leucomelas*), ein südamerikanischer Pfeilgiftfrosch des Regenwalds, mehr Trockenheit und Wärme schlecht aushalten wird. Um zu überleben, müsste er Hunderte von Kilometern nach Südwesten gelangen, was völlig unmöglich erscheint.

Bei den britischen Schmetterlingen haben Willis und Hill es geschafft, eine Fallstudie zu erstellen. Die Aktion wurde ihnen genehmigt, zum einen, weil die angezielten Habitate in Steinbrüchen und Stadtgebieten lagen, somit nicht »echte« Wildnis waren, zum anderen, weil sie wussten, dass in den Zielgebieten vorhandene Arten unter den neuen Schmetterlingen nicht leiden würden. Schachbrettfalter ließen sie 65, Dickkopffalter 35 Kilometer nördlich ihres alten Lebensraums frei. Dass solche Programme größte Umsicht und Vorsicht erfordern, ist ihnen durchaus bewusst. Strengste Richtlinien sind ihres Erachtens unverzichtbar. Wie Willis betont: Man wolle auf keinen Fall unwissentlich eine Katastrophe wie die Kaninchenplage in Australien auslösen.

Risiken bringt allerdings jede Umsiedlung mit sich. Anthony Ricciardi von der McGill University in Montreal



Westliche Sumpfschildkröte (*Pseudemydura umbrina*)

Der Lebensraum dieser stark bedrohten, kleinsten Australischen Schlangenhalschildkröte wird zu trocken. Tiere aus Gefangenschaftszuchten werden in besser geeigneten, auch zukünftig noch feuchten Gebieten ausgewildert.

Gelbgebänderter Baumsteiger (*Dendrobates leucomelas*)

Der Pfeilgiftfrosch dürfte seinen Lebensraum in den tropischen Wäldern im nördlichen Südamerika verlieren, wenn das Klima wärmer und trockener wird. Pläne zu seiner Rettung gibt es noch keine.

Schachbrett oder Damenbrett (*Melanargia galathea*)

Der in weiten Teil Europas häufige Tagfalter ist nicht bedroht. In England breitet er sich trotz des veränderten Klimas aber nicht von selbst weiter nach Norden aus. Mit etwas Nachhilfe schafft er das hingegen.

und Daniel Simberloff von der University of Tennessee in Knoxville thematisierten das 2009 in einer ausführlichen schriftlichen Stellungnahme. Sie ermahnten die Artenschützer, kein ökologisches Roulette zu spielen. Ihres Erachtens würden die Befürworter von Umsiedlungen völlig unterschätzen, wie schwierig bis unmöglich es selbst mit den differenziertesten Analysen ist, langfristige Auswirkungen auf das Ökosystem vorherzusagen.

Als abschreckendes Beispiel erwähnen sie den Beschluss Neufundlands von 1960, das amerikanische Gemeine Rothörnchen (*Tamiasciurus hudsonicus*) in seinen Schwarzfichtenwäldern auszusetzen, wo es bisher nicht vorkam. Es sollte als Nahrung für den Fichtenmarder (*Martes americana*) erhalten, dessen Bestand zurückging. Nur leider fraßen die Marder keine Rothörnchen. Diese hatten im neuen Umfeld kaum Feinde und lebten wie im Schlaraffenland: Die Bäume hatten sich 9000 Jahre lang nicht an ein so gefräßiges Nagetier adaptieren müssen. Infolgedessen brach nun der Bestand der auf ihre Zapfen spezialisierten neufundländischen Unterart des Fichtenkreuzschnabels (*Loxia curvirostra percna*) zusammen und gilt inzwischen als gefährdet.

Wie sich solche Desaster verhindern lassen, möchten Nathalie Pettorelli von der Zoological Society of London und ihre Kollegen aufzeigen. Das Beispiel in ihren 2013 veröffentlichten Analysen ist der neuseeländische Hihi, auch Gelbbandhonigfresser (*Notiomystis cincta*). 34 Millionen Jahre Evolution trennen diese Art von ihren nächsten lebenden Verwandten. Ursprünglich war der kleine Singvogel mit den schwarz und gelb gefiederten Männchen und dem typischen Schwirflughover vielerorts auf der Nordinsel Neuseelands und einigen kleinen Inseln heimisch. Doch zuletzt lebte nur noch auf einem der Eilande eine winzige Population. Es gelang seit den 1980er Jahren, die Vögel auf weiteren Inseln und an zwei Orten auf dem neuseeländischen Festland mit intensiven Schutzmaßnahmen wieder anzusiedeln – sie werden etwa mit Zuckerrispe gefüttert, ähnlich wie in Nordamerika Kolibris.

Die Studie der Londoner Forscher ergab, dass die jetzigen Standorte dem Hihi in einigen Jahrzehnten immer

weniger zusagen werden. Für die Art geeignete Habitate dürften dagegen mit dem Klimawandel auf der Südinsel Neuseelands entstehen. Ausdrücklich zielten Pettorelli und ihre Mitarbeiter mit ihren Analysen nicht darauf ab, Empfehlungen zu geben, zu welchem Zeitpunkt eine Umsiedlung geboten, wie sie durchzuführen sei und an welche Orte die Vögel gebracht werden sollen. All das müssten die Verantwortlichen vor Ort entscheiden. Die Studie soll ihnen aber Orientierung bieten.

Unter anderem erörtert die Forschergruppe mögliche Gefahren durch die Umsiedlung für die neue Umwelt und ihre Ressourcen. Dazu zählen: das ökologische Risiko bei einer Gefährdung schon vorhandener Arten; das Krankheitsrisiko durch ins Ökosystem eingeschleppte neue Erreger; das Risiko, dass die neue Art sich über das vorgesehene Gebiet hinaus ausbreitet und mit dortigen Arten konkurriert; das Risiko einer genetischen Vermischung mit ansässigen nahe verwandten Arten; nicht zuletzt auch das sozioökonomische Risiko in Form von ökologischen und anderen Kosten für die dort lebenden Menschen. Außerdem vergleicht die Studie das jetzige und das erwartete Ausmaß diverser Klimafaktoren von altem und neuem Habitat. Sie fragt beispielsweise nach dem Grad der Trockenheit in der trockenen Jahreszeit und nach der Verteilung der Niederschläge im Lauf des Jahres.

Aufruf zur Zusammenarbeit mit der Wissenschaft

Pettorelli weiß auch, dass bei solchen Projekten die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern und Entscheidungsträgern sowie Verantwortlichen vor Ort oft noch besser werden müsste. Viele Beteiligte würden sich zwar mehr Kooperation zwischen den verschiedenen Instanzen wünschen, aber die Umsetzung scheitert häufig am ungenügenden Austausch und an fehlenden Kontakten. Daher würden sogar heute noch viele Artenschutzentscheidungen ohne Bezug auf Forschungsergebnisse getroffen. Doch die Untersuchung zu den Hihis trägt Früchte: Neuseeländische Naturschützer befassen sich jetzt damit, ob es sinnvoll wäre, auf der Südinsel eine Population zu begründen.

Unter Umständen müssen die Befürworter von assistierter Migration allerdings damit rechnen, dass sie vorschnell eingreifen. Denn manchmal findet die Natur tatsächlich von selbst einen Ausweg. In den Rocky Mountains setzt die Klimaerwärmung der alpinen Flora nachweislich zu. Dadurch gibt es in Höhenlagen wesentlich weniger Blüten mit sehr tiefem Kelch als noch vor wenigen Jahrzehnten. Doch genau auf solche haben sich bestimmte Hummelarten spezialisiert, indem sie besonders lange Rüssel entwickelt. Wie nun ein Vergleich früherer und heutiger Rüssellängen ergab, haben sich zwei Hummelarten in den letzten 40 Jahren an die neuen Verhältnisse angepasst: Ihre Rüssel sind um ein Viertel kürzer geworden, was diesen Insekten ein breiteres Blütenspektrum eröffnet.

Ein Organismus kann unter Umständen mit veränderten Bedingungen viel besser zurechtkommen als erwartet. In Südaustralien starteten Forscher eines Unternehmens für Hummerfang 2010 einen Test mit dem Südlichen Felsenhummer (*Jasus edwardsii*). 10000 Tiere holten sie aus kühlem, tieferem Wasser und brachten sie nicht etwa in kältere, südlichere Gewässer, sondern in küstennahes, flaches Wasser näher beim Äquator. Die Wissenschaftler wollten erkunden, wie die Art auf die prognostizierte globale Erwärmung reagieren würde. Völlig unerwartet gediehen die Tiere in der Wärme prächtig. Sie wuchsen vier Mal so schnell wie sonst, und die Weibchen steigerten ihre Eierproduktion erheblich.

Inwieweit lassen sich solche Reaktionen vorhersehen? In einer Studie des Ökologen Chris D. Thomas von der University of York zur Verfassung von 155 britischen Schmetterlingsarten kam heraus, dass ungefähr die Hälfte davon heute besser dasteht, die andere Hälfte schlechter als vor 40 Jahren. Für jede Art zählen dabei andere Faktoren. Hat bei der einen die Sommertemperatur einigen Einfluss, so ist es bei einer anderen eher die Wintertemperatur. Bei manchen Arten hängt viel vom Frühlingsregen ab, und so fort. Fast jede Spezies zeigt ihr eigenes Reaktionsmuster und bewertet anders, wie sehr sich für sie relevante Parameter verändert haben und welche Details für sie günstiger oder schlechter geworden sind.

Welche Schlussfolgerungen ergeben sich damit für die eingangs erwähnte neuseeländische Brückenechse? Weniger als 100000 Exemplare des urtümlichen Reptils dürften derzeit noch auf ein paar Inseln leben, auf North Brother Island sind es höchstens 500. Ein Tuatara-Männchen kann sich im Prinzip jedes Jahr fortpflanzen, ein Weibchen unter anderem wegen der langwierigen Eiproduktion und Bewachung des Nests nur im Abstand mehrerer Jahre. Auf North Brother Island sind es sogar neun Jahre, und die Gelege enthalten dort durchschnittlich nur sechs Eier. Setzte diese Geschlechterdiskrepanz den Weibchen schon früher beträchtlich zu, weil sie sich der deutlich größeren Männchen erwehren und mit ihnen konkurrieren mussten, so verschärft deren Überzahl die Situation noch. Das greift ihre Widerstandskraft und Gesundheit an. Und bis zur Geschlechtsreife verstreichen mindestens zehn Jahre. Weil North Brother Island kaum Schatten bietet, auch wenig dunkle Spalten und dergleichen, zeigt sich hier zuerst, wie die Art die rasche Klimaerwärmung verkraften wird.

Nicola Mitchell von der University of Western Australia in Perth erforscht die Verhältnisse vor Ort seit mehreren Jahren. Zusammen mit Kollegen erörterte sie 2014 in einem Artikel die Optionen, welche Forscher, Politiker und nicht zuletzt die Maoris haben, die Tuataras als Totemtiere ansehen. Es würde sich zum Beispiel empfehlen, auf der sehr kleinen Insel heute nicht mehr benötigte Gebäude abzureißen sowie an vergleichsweise kühlen Stellen Nistgelegenheiten einzurichten. Oder man müsste Gelege suchen, die Eier entnehmen, sie künstlich bei niedriger Temperatur ausbrüten und den Nachwuchs später wieder aussiedeln. So könnte man gezielt junge Weibchen ausbringen und gleichzeitig einen Teil der erwachsenen Männchen entfernen.

Laut Mitchell sind natürliche Gelege inzwischen allerdings selten, außerdem meist bestens versteckt und schwierig zu finden. Die Alternative, die Brückenechsen von

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FOTOLIA / FRANK WASSERFÜHRER

North Brother Island an einen anderen Ort zu verpflanzen, wäre wiederum sehr aufwändig. Auf einigen nahen Inseln hat man im Übrigen schon Tuataras derselben Unterart, wenn auch einer anderen genetischen Gruppe, als so genannte Sicherungspopulationen angesiedelt. Daher wird jetzt überlegt, ob man den Bestand von North Brother Island unberührt lässt und lediglich abwartet.

Letztlich laufen solche Entscheidungen darauf hinaus, wie Naturschützer und Gesellschaft sich zu der Frage stellen, wann sie eingreifen sollten und wann nicht – was auch bedeuten kann zu entscheiden, manche Arten zu retten und andere ihrem Schicksal zu überlassen. Jessica Hellman von der University of Minnesota bringt es auf den Punkt: Einige Maßnahmen fühlten sich an, als ob man an natürlichen Prozessen mitwirke, andere eher wie gärtnern. Man könne aber nicht die gesamte Biodiversität wie einen Garten bearbeiten. ◀

QUELLEN

Hannah, L. (Hg.): Saving a Million Species: Extinction Risk from Climate Change. Island Press, Washington D. C. 2011

Root, T. L. et al. (Hg.): Biodiversity in a Changing Climate: Linking Science and Management in Conservation. University of California Press, Berkeley 2015

LITERATURTIPP

Nijhuis, M.: Herren über Leben und Tod, In: Spektrum der Wissenschaft 2/2013, S. 70–75
Eine Erörterung, nach welchen Kriterien sich Artenschützer für und gegen den gezielten Erhalt von Organismen entscheiden

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

DAS RÄTSEL DER VERSCHWUNDENEN KOHLE

Verbrennt man etwas Kohle in einem abgeschlossenen Gefäß, löst sich diese augenscheinlich in nichts auf. Dennoch wiegt das Gefäß danach gleich viel. Warum? Die Erklärung liefert das Massenerhaltungsgesetz der Chemie, das Naturforscher schon im 17. und 18. Jahrhundert entdeckten.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe.

Marco Oetken ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» spektrum.de/artikel/1427446

► Zu den zentralen Merkmalen chemischer Reaktionen gehört außer der Bildung neuer Stoffe und dem Energieumsatz die Tatsache, dass die Gesamtmasse aller beteiligten Substanzen gleich bleibt. Es war der russische Naturforscher Michail Wassiljewitsch Lomonosow (1711–1785), der dieses Prinzip 1748 erstmals postulierte. Später hat es der französische Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) genauer formuliert. Die grundlegenden Versuche dazu hatte allerdings bereits ein Jahrhundert zuvor Robert Boyle (1627–1692) angestellt.

Anfangs noch Anhänger der Alchemie, entwickelte sich der englische Naturforscher mit gut durchdachten, sorgsam ausgeführten und detailliert publizierten Experimenten zum Mitbegründer der modernen Physik und Chemie. So untersuchte er die »chemischen Spielregeln« bei der Reaktion von Metallen mit Luftsauerstoff in einer geschlossenen Apparatur. Der französische Chemiker Joseph Louis Proust (1754–1826) führte diese Arbeiten fort und erkannte, dass bei chemischen Umsetzungen die beteiligten Elemente in einem bestimmten Massenverhältnis miteinander reagieren.

Darauf begründete John Dalton (1766–1844) schließlich 1803 die Lehre von den Atomen. Die große Leistung des englischen Naturforschers und Lehrers war aber nicht nur die Wiederentdeckung und Weiterentwicklung der schon von dem altgriechischen Philosophen Demokrit aufgestellten Theorie, wonach alle Materie aus »unteilbaren« kleinsten Teilchen besteht, sondern die Verknüpfung zwischen den Begriffen Element und Atom. Indem Dalton die Massenkonstanz bei chemischen Reaktionen sowie das Zu-

sammentreten der Atome in bestimmten Zahlenverhältnissen postulierte, konnte er viele der experimentellen Ergebnisse Lomonosows, Lavoisiers und Prousts erklären. Sein Atommodell entwickelte sich so zu einer der fundamentalsten und tragfähigsten Theorien der Naturwissenschaften.

Die historischen Versuche Boyles zur Verbrennung von Metallen in einem abgeschlossenen System sind für Laien nicht ohne weiteres nachvollziehbar. Wir möchten hier deshalb ein anderes Experiment vorstellen, mit dem Sie das Gesetz von der Erhaltung der Masse selbst überprüfen können. Statt eines Metalls wird dabei schlicht Kohle verbrannt.

Für die meisten von Ihnen dürfte das eine vertraute Erfahrung sein – wer hat nicht schon an einem lauen Sommerabend einen Grill angezündet? Dabei bietet der Versuch durch das helle Aufglühen der Kohle auch durchaus etwas für das Auge und hat den zusätzlichen Reiz, dass sein Ergebnis im ersten Moment durchaus verblüfft, weil es der intuitiven Erwartung des naiven Betrachters widerspricht: Obwohl die Kohle im abgeschlossenen Glasbehälter verschwindet, nimmt dessen Gewicht nicht ab!

Für den Versuch benötigen Sie eine auf ein Milligramm genaue Präzisionswaage (zum Beispiel das Modell FC20 der Firma G&G Messtechnik), einen 500-Milliliter-Rundkolben, einen Korkring, einen Gummistopfen mit Bohrung, ein Glasrohr, einen Gummischlauch, ein Reduzierstück aus Plastik, einen Luftballon, einen Bunsenbrenner, eine Abdampfschale, eine Tiegelzange, eine Stativklemme, einen Dreifuß, Aktivkohle und Sauerstoff. All diese Materialien



Wird Aktivkohle in einem Glaskolben mit Sauerstoff erhitzt, verbrennt sie unter intensivem Leuchten.

PÄDAGOGISCHE HOCHSCHULE FREIBURG, ABTEILUNG CHEMIE

erhalten Sie unter anderem im Internet (etwa bei Amazon) oder (wie Aktivkohle und Sauerstoff) in der Apotheke.

Wiegen Sie 200 bis 300 Milligramm von der Kohle ab. Um eventuell anhaftende Feuchtigkeitsreste auszutreiben, sollten Sie das schwarze Pulver zunächst kurz ausglühen, indem Sie es in der Abdampfschale mit der Tiegelzange ungefähr eine halbe Minute über die Brennerflamme halten. Anschließend schütten Sie die Kohle in den Rundkolben, spülen ihn mit Sauerstoff und verschließen ihn mit dem Gummistopfen, in dessen Bohrung Sie das Glasrohr gesteckt haben. Dieses verbinden Sie über den Gummischlauch und das Reduzierstück schließlich mit dem Luftballon.

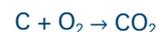
Das Experiment kann beginnen!

Die Versuchsapparatur ist damit fertig zusammengebaut (Bild S. 54, links) und kann gewogen werden – vergessen Sie nicht, das Gewicht zu notieren. Stellen Sie den Kolben nun auf den Dreifuß und erhitzen ihn mit dem darunter platzierten Bunsenbrenner, bis die Kohle zu glühen beginnt. Dann packen Sie das Glasgefäß mit der Stativklemme am Hals und wirbeln durch rüttelnde Bewegungen mit dem Handgelenk das Pulver auf, damit es besser mit dem Sauerstoff in Kontakt kommt (Bild oben). Eventuell zurückbleibende größere Kohlebröckchen, müssen Sie noch einmal bis zum Glühen erhitzen.

Nach vollständiger Verbrennung lassen Sie den Kolben etwa zwei bis drei Minuten auf dem Dreifuß stehen, bevor Sie ihn unter fließendem Wasser auf Raumtemperatur abkühlen und nach gründlichem Abtrocknen schließlich

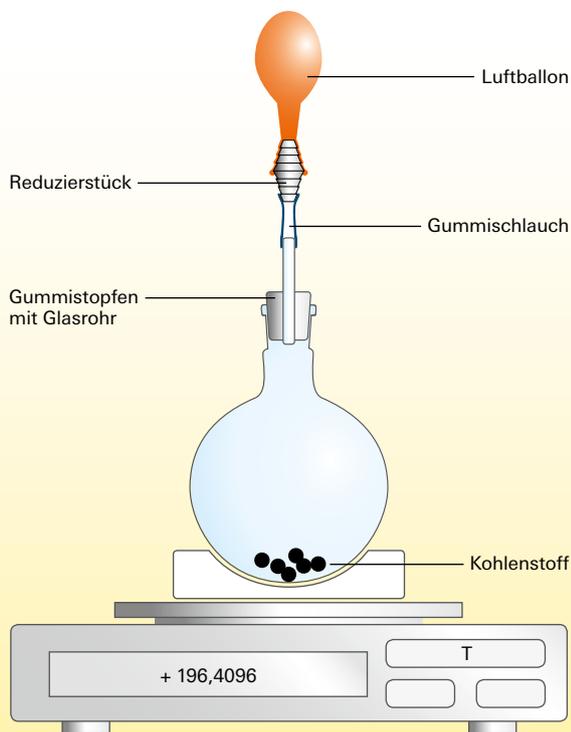
wiegen. Das Abkühlen ist wichtig, um korrekte Ergebnisse zu erhalten. Beim Erhitzen des Kolbens dehnt sich das Gas in seinem Inneren nämlich aus, wodurch sich der Luftballon aufbläht. Vor dem Wiegen muss er wieder auf seine ursprüngliche Größe geschrumpft sein. Anderenfalls ergäbe sich ein zu geringes Gewicht, weil sich durch den höheren Auftrieb des aufgeblähten Ballons die auf die Waage wirkende Kraft verringert.

Wenn Sie den Versuch richtig durchgeführt haben, werden Sie feststellen, dass die Apparatur nach der Reaktion noch genauso viel wiegt wie zu Anfang, obwohl doch scheinbar Masse verschwunden ist. Die Erklärung für dieses der Anschauung widersprechende Ergebnis liefert Daltons Atommodell in Kombination mit Lavoisiers Erkenntnis, dass sich ein Stoff beim Verbrennen mit Sauerstoff verbindet. In unserem Fall verwandelt sich die Kohle dadurch in Kohlendioxid. Die entsprechende Reaktionsgleichung lautet:

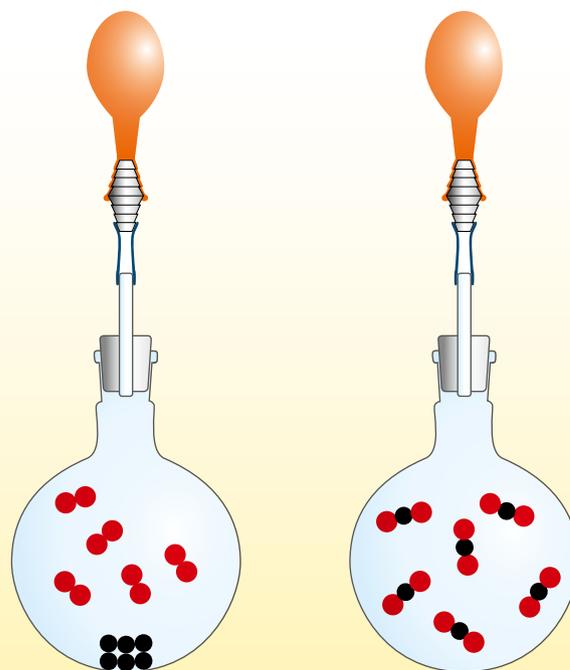


Demzufolge hat sich an der Zahl der Teilchen (Atome) bei der Verbrennung nichts geändert. Diese wurden lediglich umgruppiert (Bild S. 54, rechts). Zwar ist der feste Kohlenstoff verschwunden, aber dafür hat das Gewicht der mit ihm reagierenden Gasteilchen zugenommen.

Wissenschaftlich vorgebildeten Lesern mag das selbstverständlich oder gar trivial erscheinen. Dass viele, vor allem auch jüngere Menschen Schwierigkeiten haben, die Zusammenhänge zu durchschauen, beweist jedoch eine



Versuchsaufbau für die Verbrennung von Kohlenstoff in einem abgeschlossenen System und für den Nachweis, dass sich dessen Gewicht dabei nicht ändert.



Eine Betrachtung der Verbrennungsreaktion auf der Teilchenebene macht deutlich, warum die Masse des Gesamtsystems gleich bleibt: Es geht keine Materie verloren, die Kohlenstoff- (schwarz) und Sauerstoffatome (rot) sind nach der Verbrennung (rechts) nur anders arrangiert als davor (links).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH MARIO DETKEN

empirische Untersuchung zu dem hier vorgestellten Experiment, die wir vor einigen Jahren durchgeführt haben. Es handelte es sich um eine Fragebogenerhebung unter Gymnasiasten der Jahrgangsstufen acht bis zwölf. Obwohl alle diese Schüler das Massenerhaltungsgesetz aus dem Chemieunterricht kannten, konnte es ein großer Teil von ihnen nicht oder nur unzureichend auf die Verbrennung von Kohlenstoff in einem geschlossenen System anwenden. Hier sind einige typische Antworten auf die Frage nach dem mutmaßlichen Ergebnis des Experiments:

»Die Masse nimmt ab, weil gasförmige Stoffe leichter sind als feste Stoffe.« (Schülerin, Klasse 8)

»Ich denke, die Masse nimmt ab, weil nach der Reaktion kein Kohlenstoff mehr vorhanden ist. C und O haben miteinander reagiert und es ist ein Gas entstanden, das eigentlich nichts wiegen dürfte.« (Schülerin, Leistungskurs Chemie Klasse 12)

»Die Masse bleibt gleich, da die Kohle nur ihren Aggregatzustand geändert hat. Von fest zu gasförmig.« (Schüler, Klasse 8)

»Die Masse nimmt zu, weil Kohlenstoff mit dem Sauerstoff reagiert. Es entsteht Kohlenstoffdioxid, und das ist schwerer als Sauerstoff.« (Schüler, Klasse 9)

Solche Aussagen zeigen, wie fest Alltagsvorstellungen in den Köpfen verankert sind. Offenbar lassen sie sich nur schwer durch wissenschaftliches Denken vertreiben. Ein Experiment wie das hier beschriebene kann einen wesentlichen Beitrag dazu leisten. Vielleicht machen Sie sich den Spaß, es vor Freunden oder Bekannten durchzuführen und

diese vorab angeben zu lassen, was ihrer Meinung nach herauskommt. Das könnte ebenso unterhaltsam wie lehrreich sein.

Zum Schluss sei noch die Antwort einer Schülerin aus der elften Klasse zitiert, die von einer bemerkenswert tiefen Einsicht zeugt. Sie liefert nicht nur die korrekte Erklärung, sondern geht noch ein Stück darüber hinaus, indem sie Einsteins moderne Erkenntnisse zur Äquivalenz von Masse und Energie einbezieht:

»Da der Aufbau verschlossen ist, gilt das Gesetz der Erhaltung der Masse. Da aber ein extrem kleines Stück der Materie in Energie umgewandelt wird, nimmt das Gewicht unmerklich ab. Die Waage wird wahrscheinlich keinen Unterschied messen.«

Dem ist nichts hinzuzufügen. ◀

QUELLEN

Jansen, W. et al.: Der Weg zum Dalton'schen Atommodell. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 35, S. 34–40, 1986

Jansen, W. et al.: Die Dalton'sche Atomtheorie und die Entwicklung der chemischen Formel, In: Chimica Didacticae 16, S. 3–33, 1990

Johannsmeyer, F. et al.: Die Masse des »Nichts« – der Boyle-Versuch im neuen Lichte. In: Chemkon 8, S. 156–157, 2001

Petermann, K. et al.: Orientierung an Schülervorstellungen – Erprobung und Evaluation einer Unterrichtseinheit zum Gesetz der Erhaltung der Masse. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 8, S. 11, 2009

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 89,- inkl. Inlandporto (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Buch »Das 6. Sterben«:

Ausgezeichnet mit dem Pulitzer-Preis. Wie keine andere Gattung zuvor haben wir Menschen das Leben auf der Erde verändert. In dem Bestseller erklärt uns Elizabeth Kolbert, wie das geschehen konnte.

Taschenmesser »Spartan« von Victorinox:

Dieses Multitalent mit 12 Funktionen hat sich als zuverlässiger Helfer so bewährt, dass es zum Bestseller unter den "Swiss Army Knives" aufgestiegen ist. Länge: 91 mm



Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo

ASTRONOMIE KRIEG DER TELESKOPE

Bald sollen extrem große Fernrohre ein neues Zeitalter der Astronomie einläuten. Doch ihr Bau droht an alten Zwistigkeiten zu scheitern.



Katie Worth arbeitet als Reporterin bei dem US-amerikanischen TV-Magazin »Frontline«. Sie befasst sich hauptsächlich mit der Schnittstelle von Politik und Wissenschaft.

» spektrum.de/artikel/1427409

► Drei konkurrierende Teams von Astronomen jagen seit 15 Jahren ein und demselben Traum hinterher: Sie wollen das größte Teleskop der Welt bauen. Die von ihnen angestrebten Giganten wären leistungsstark genug, um direkte Bilder von Planeten zu liefern, die andere Sterne umkreisen, und über die gesamte Weite des Universums hinweg bis fast zurück zum Urknall zu blicken. Ein Konsortium um die Carnegie Institution for Science, eine Stiftung in den USA, arbeitet an der Entwicklung des Giant Magellan Telescope (GMT); das Thirty Meter Telescope (TMT) haben im Wesentlichen das California Institute of Technology (Caltech) und die University of California initiiert; und unter der Ägide der Europäischen Südsternwarte ESO soll einmal das European Extremely Large Telescope (E-ELT) das All beobachten. Der Bau aller drei Geräte würde zusammen knapp vier Milliarden Euro kosten.

Bislang reagiert die Politik zurückhaltend auf die Pläne der Astronomen. Die Projekte sind durchwegs knapp bei Kasse, bereits fertig gestellte Bauteile warten auf ihre Auslieferung zu den noch öden Baustellen. Vermutlich werden aber alle drei Teleskope irgendwann in den 2020er Jahren ihren Betrieb aufnehmen – womit sie allerdings dem ursprünglichen Zeitplan weit hinterherhinken und zudem das einst veranschlagte Budget überschreiten dürften.

Wie ist es dazu gekommen? Warum kämpfen drei verschiedene Projektteams mit denselben Zielen gegeneinander um ihre Finanzierung und bündeln nicht einfach ihre Kräfte? Letztlich stehen sich die verschiedenen Lager auf Grund von alten Streitigkeiten, die ihren Anfang zu Beginn des 20. Jahrhunderts nahmen, selbst im Weg.

1917 enthüllte der ehrgeizige Astronom und Sternwartendirektor George Ellery Hale ein optisches Teleskop mit einer Öffnung von 100 Zoll (etwa 2,5 Meter) auf dem Mount Wilson. Es überragte alle früheren Instrumente an Größe und damit an Lichtsammelvermögen und lieferte sofort revolutionäre Forschungsergebnisse. So entdeckte



Mit einer neuen Generation von Teleskopen wollen die Forscher bis fast ans Ende des Weltalls blicken und Planeten bei fremden Sternen direkt abbilden. Bis die neuen Observatorien einsatzbereit sind, haben ihre Erbauer aber noch einige Hürden zu überwinden. Das Bild zeigt eine Modelldarstellung des E-ELT der ESO.

ESO / LUIS CALCADA / ANCK REINER / SKS/IRAP/ORG (WWW.ESO.ORG/PUBLICIMAGES/ANN/1402A) / CC BY 4.0 (CREATIVEDOMAINS.ORG/LICENSE/RY4/DILEGALCODE)

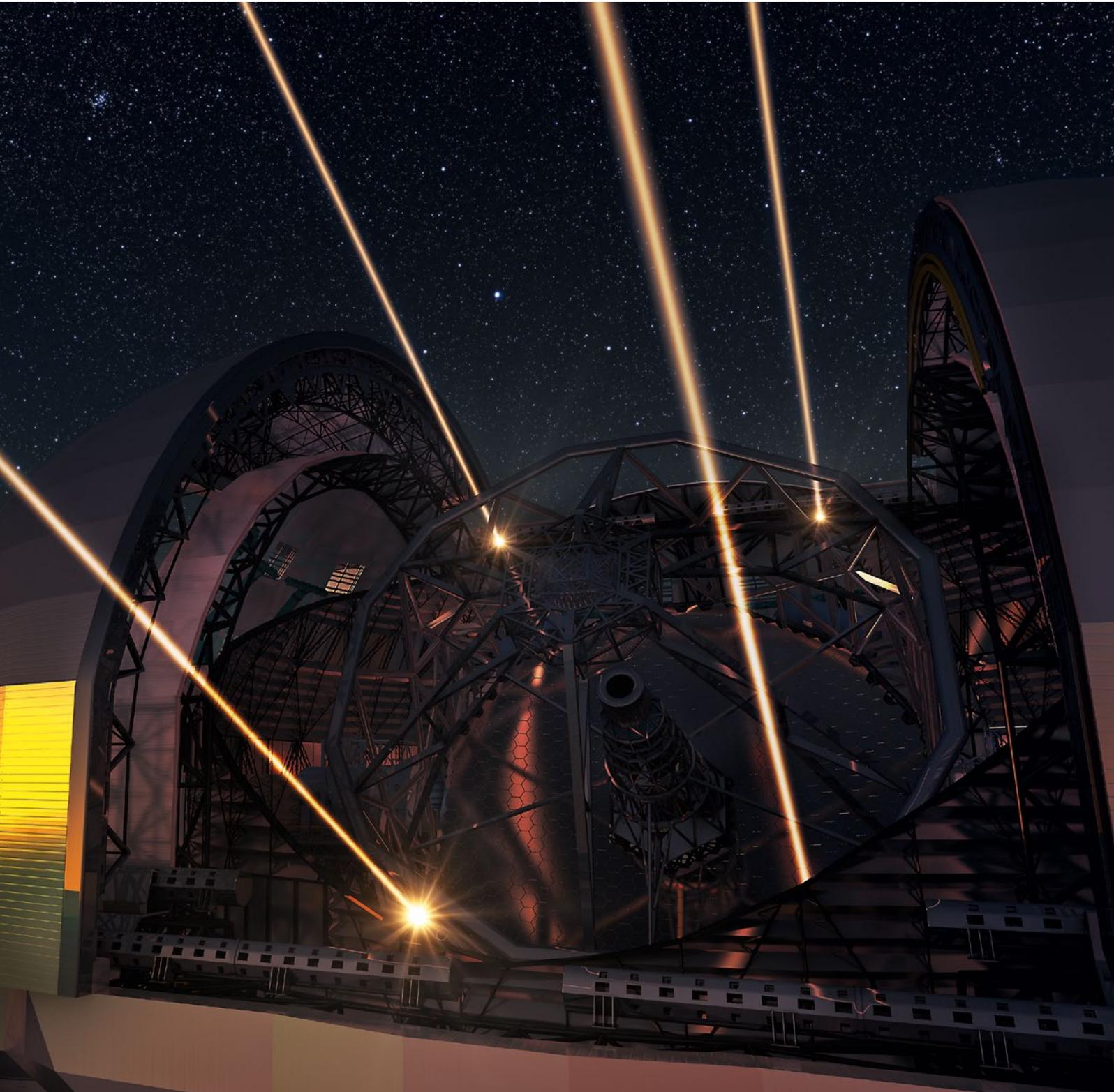
etwa Edwin Hubble mit diesem Teleskop, dass unsere Galaxie nur eine von vielen ist, und sammelte Beweise für ein expandierendes Universum. Doch das reichte Hale nicht – er wollte ein doppelt so großes Teleskop.

Finanziert hatte das 100-Zoll-Teleskop die vom Stahlbaron Andrew Carnegie gegründete Stiftung Carnegie Institution of Washington; sie deckte außerdem die Betriebskosten. Carnegie war allerdings nicht bereit, weitere Millionen Dollar in ein weiteres Teleskop zu stecken. Durchtrieben wie Hale war, schob er das Projekt einer Organisation zu, die ein Rivale Carnegies, der Ölmagnat

John D. Rockefeller, unterhielt. Dieser segnete 1928 Hales 200-Zoll-Teleskop ab und bewilligte mit sechs Millionen Dollar die größte Summe, die bis dahin je für ein wissenschaftliches Projekt gespendet worden war.

Nun waren ausgerechnet die Astronomen der Carnegie Institution die einzigen auf der Welt, welche die notwendigen Fachkenntnisse für den Bau des neuen, größeren Teleskops besaßen. Doch Rockefeller weigerte sich, mit der Stiftung seines Rivalen zusammenzuarbeiten. »Das hätte er unter keinen Umständen getan«, erläutert der Historiker Ronald Florence, »und damit begannen die Probleme.«

ESO / LUIS CALÇADA / NICK RISINGER, SKYSURVEY.ORG (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/IMAGES/ANN14012A) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

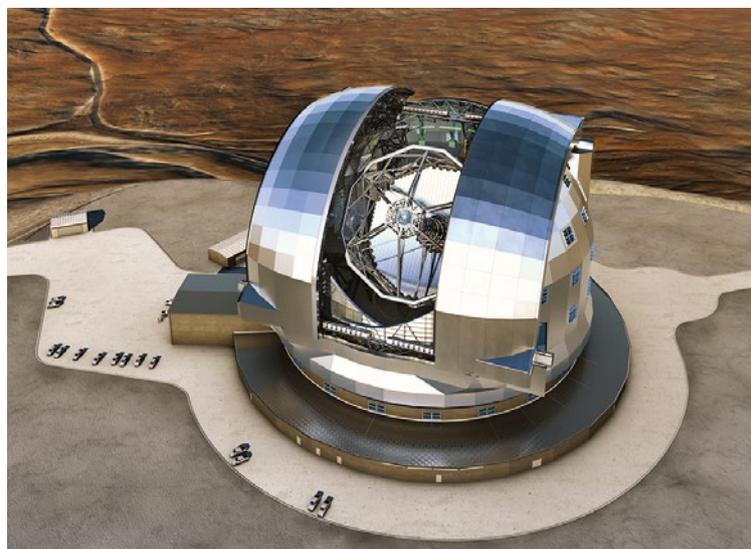


Zunächst glaubte Hale, eine Lösung gefunden zu haben. Rockefeller sollte das Geld für das 200-Zoll-Teleskop dem Caltech spenden, das zu jener Zeit nur drei Kilometer entfernt von der Verwaltung des Carnegie-Observatoriums in Pasadena entstand. Allerdings beschäftigte es in seiner Anfangszeit noch keinen einzigen Astronomen. Trotzdem finanzierte die Rockefeller-Stiftung den Bau von Hales neuem Teleskop sowie das zugehörige Palomar-Observatorium nahe San Diego tatsächlich über das Caltech. Hale war überzeugt, dass die Forscher der Carnegie Institution nun nicht widerstehen könnten, an einem solchen großartigen astronomischen Instrument mitzuwirken, und dass sie deshalb ihre Fachkenntnisse in die Entwicklung und den Bau des neuen Instruments einbringen würden.

Er hatte sich aber geirrt. John C. Merriam, damals Präsident der Carnegie Institution, sah in der Vereinbarung mit Rockefeller einen unverzeihlichen Betrug und tat alles, um das Projekt zu behindern. Er verweigerte Carnegie-Forschern die Erlaubnis zu helfen und versuchte, die Rockefeller-Stiftung aus dem Vorhaben hinauszudrängen. Verzweifelt schaltete Hale den Diplomaten Elihu Root ein, einen alten Freund sowohl von Andrew Carnegie als auch von John D. Rockefeller. Tatsächlich konnte Root Merriam dazu bewegen, sich an dem Projekt zu beteiligen. Doch nun begann das Zerwürfnis erst. Merriam war immer noch verärgert und versuchte jahrelang, dem Caltech die Kontrolle über das neue Observatorium zu entziehen, so der Historiker Florence. Das Misstrauen zwischen den beiden Institutionen beruhte auf Gegenseitigkeit und wurzelte tief.

Nachdem Merriam in den Ruhestand gegangen war, einigten sich die Krieg führenden Stiftungen auf einen – brüchigen – Waffenstillstand. Infolge der Großen Depression und des sich über zwei Jahrzehnte hinziehenden Baus des Palomar-Observatoriums wuchsen bei der Rockefeller-Stiftung die Bedenken gegenüber den Betriebskosten des Teleskops. So machte sie ihrem Kontrahenten ein Angebot: Gehören sollte das Teleskop dem Caltech, wenn es 1949 in Betrieb ginge, betreiben sollte es die Carnegie Institution.

Die zerrüttete Beziehung zwischen den beiden Einrichtungen beeinflusste unweigerlich auch die wissenschaft-



ESO / LUIS CALÇADA (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/IMAGES/ELT-FULLDOME-1_CC) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

liche Arbeit. Das zeigte sich insbesondere nach der Entdeckung quasistellarer Objekte durch den in den USA tätigen niederländischen Astronomen Maarten Schmidt. Auf den ersten Blick als schwach leuchtende Sterne wahrgenommen, erwiesen sich diese Objekte als von geradezu unvorstellbarer Leuchtkraft im fernen Kosmos und avancierten rasch zu einem bevorzugten Forschungsobjekt der Astronomen. Die Wissenschaftler des Caltech und der Carnegie Institution wetteiferten um Beobachtungszeit an den größten Teleskopen der Welt, um sie zu erforschen.

Nach einem halben Jahrhundert voller Spannungen wollte sich das Caltech 1979 endlich von der geteilten Verantwortung für das Palomar-Observatorium befreien. Doch auch das führte wieder zu heftigen persönlichen Auseinandersetzungen. Der legendäre Carnegie-Astronom Allan Sandage, der am Palomar sein Lebenswerk vollbracht hatte, weigerte sich fortan, noch einen Fuß hineinzusetzen.

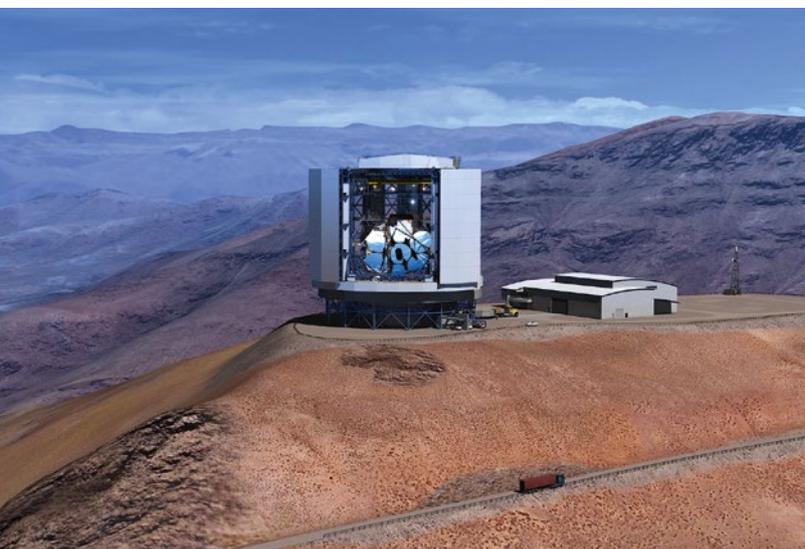
Unterschiedliche Entwürfe

In den folgenden zwei Jahrzehnten gingen die beiden Institutionen getrennte Wege. In den 1990er Jahren eröffnete das Caltech gemeinsam mit der University of California die beiden zehn Meter großen Keck-Teleskope auf dem Mauna Kea in Hawaii. Dabei kam eine neuartige Technik zum Einsatz: Die Hauptspiegel bestehen aus vielen kleinen Spiegelsegmenten, die gemeinsam eine große Licht sammelnde Fläche bilden, sich aber einzeln ansteuern lassen, um Bildfehler auszugleichen. Die Optik funktioniert hervorragend, und die Astronomen am Keck-Observatorium erfreuten sich einer jahrelangen wissenschaftlichen Vorrangstellung.

Die Carnegie Institution blieb unterdessen der alten Einzelspiegeltechnik verhaftet und errichtete auf der Südhalbkugel in der nordchilenischen Atacamawüste die beiden Magellan-Teleskope mit ihren 6,5-Meter-Spiegeln. Schon während ihrer Fertigstellung verkündeten das Caltech und die University of California 1999, sie würden ein 30-Meter-Teleskop bauen, und die Europäische Südsternwarte diskutierte ein noch ambitionierteres Vorhaben – das »Overwhelmingly Large Telescope« mit einem 100 Meter großen Spiegel.

AUF EINEN BLICK GEFANGEN IM ALTEN ZWIST

- 1** Drei extrem große Teleskope sind derzeit in Planung und sollen in den 2020er Jahren in Betrieb gehen.
- 2** Jedes dieser Observatorien wird mit einem Hauptspiegel von rund 30 Meter Durchmesser ausgestattet sein. Damit können Astronomen künftig den Kosmos mit zuvor unerreichter Klarheit beobachten.
- 3** Die Finanzierung der Projekte ist schwierig. Kritiker fragen zudem, warum gleich drei Riesenteleskope entstehen sollen. Die Antwort liegt in Rivalitäten, die bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts zurückreichen.



GIANT MAGELLAN TELESCOPE – GMT CORPORATION



THIRTY METER TELESCOPE – TMT INTERNATIONAL OBSERVATORY

Drei konkurrierende Wissenschaftlerkonsortien arbeiten jeweils an ihrem Traumteleskop: In Chile will die ESO das E-ELT (links) bauen und die Carnegie Institution das GMT (Mitte). Das Caltech strebt gemeinsam mit der University of California das TMT (rechts) auf Hawaii an (jeweils Modelldarstellungen).

Den meisten Astronomen erschien der Sprung von 10 auf 100 Meter übertrieben ehrgeizig. Ein 30-Meter-Teleskop schien ihnen hingegen machbar, zur Bestürzung von Gus Oemler, dem damaligen Direktor der Carnegie-Sternwarten: »Wir strengten uns an, die Magellan-Teleskope fertig zu bekommen, die uns endlich wieder mit dem Caltech auf Augenhöhe bringen sollten – und plötzlich ging es bereits in die nächste Runde.« Nach vielen Diskussionen sondierte die Carnegie Institution die Möglichkeit einer Zusammenarbeit mit dem Caltech aus. Beide Seiten waren noch zurückhaltend, aber man war gewillt, die alten Streitigkeiten zu überwinden. »Wir erkannten, dass es absurd wäre, wenn zwei nur zwei Meilen auseinanderliegende Institutionen zwei getrennte Riesenteleskope bauen und betreiben würden«, sagt Carnegie-Astronom Alan Dressler.

Am 21. Juni 2000 setzten sich endlich der Astronom Wal Sargent und Tom Tombrello, Leiter der Abteilung für Physik vom Caltech, mit Oemler und Dressler von der Carnegie Institution zusammen, um über eine Partnerschaft zu reden. Die Verhandlungen waren jedoch wieder einmal von Spannungen und Missverständnissen geprägt, was eine Konsensfindung unmöglich machte.

Das damalige Treffen ist ein wichtiger Bestandteil der Geschichte der Großteleskope. Richard Ellis, heute leitender Wissenschaftler an der ESO und damals kurz davor, Sargent als Direktor des Palomar-Observatoriums abzulösen, sowie viele andere Astronomen fragen sich, wie sich die Sache entwickelt hätte, wenn das Treffen einen anderen Ausgang genommen hätte. »Was für eine Tragödie ist das im Rückblick«, so Ellis. »Mit ein paar Anrufen und etwas Diplomatie hätten wir die Carnegie Institution für das Projekt gewinnen können. Und dann gäbe es inzwischen vermutlich bereits ein Riesenteleskop!«

Danach verstärkte sich die Rivalität nur noch mehr. Das Caltech und die University of California konzipierten das

TMT, das neben den Keck-Teleskopen auf Hawaii errichtet werden sollte. Zeitgleich entwarf die Carnegie Institution das GMT, ein 24,5-Meter-Teleskop für das Las Campanas Observatory in Chile. Etwa zur selben Zeit stützte die ESO ihre Vision zurecht und begann mit der Planung für das 39 Meter große E-ELT, ebenfalls in Chile.

Auf der Suche nach Geldgebern

Für alle drei Projekte suchten die Wissenschaftler separat nach einer Finanzierung und fragten mitunter bei den gleichen Institutionen an. Als Gegenleistung für das Geld sollten die Astronomen der jeweiligen Forschungseinrichtungen Beobachtungszeit garantiert bekommen. Sowohl die Carnegie Institution als auch das Caltech und die University of California wandten sich beispielsweise an die kanadischen Astronomen – die sich schließlich für das Caltech-Projekt entschieden. Die Harvard University dagegen, ebenfalls von beiden Gruppen umworben, entschied sich für erstere.

Die Europäer wurden ebenfalls in die Auseinandersetzung hineingezogen. So war die ESO bereits mit dem brasilianischen Präsidenten über eine signifikante Beteiligung am E-ELT übereingekommen, als innenpolitische Auseinandersetzungen das Vorhaben lahmlegten. Die Carnegie Institution nutzte die Chance und gewann im Juli 2014 die Universität São Paulo für das GMT. Die Leitung des GMT-Projekts hoffte freilich, so Dressler, dass die brasilianische Regierung nun auf diesen Zug aufspringen würde. Aber das ist bislang nicht geschehen.

Der am stärksten umworbene Partner war die US-Regierung, die aus Bundesmitteln ein Riesenteleskop finanzieren und so den Zugang der amerikanischen Astronomen zu dem Instrument sichern könnte. Alle zehn Jahre berät dort das Gremium »Astronomy and Astrophysics Decadal Survey« über die Förderung ausgewählter

Forschungsvorhaben aus Bundesmitteln. Im Jahr 2000 erklärte das Komitee den Bau eines Riesenteleskops der nächsten Generation zur höchsten Priorität für die bodengebundene optische Astronomie.

Mit dieser Rückendeckung begann die National Science Foundation 2003 Verhandlungen über eine Beteiligung am TMT-Projekt. Doch innerhalb weniger Monate protestierten am GMT-Vorhaben beteiligte Astronomen in einem Brief gegen die unfaire Bevorzugung des TMT. Das zeigte Wirkung: Die NSF zog sich zurück, denn sie wollte in der sich verschärfenden Auseinandersetzung zwischen den führenden Lagern der optischen Astronomie nicht Partei ergreifen. Allerdings wäre ohnehin nicht viel Geld aus Bundesmitteln verfügbar gewesen, wie der leitende NSF-Berater Wayne Van Citters erklärt. Aber die Fehde zwischen den Forschern habe gewiss nicht geholfen: »Wir hätten eine Einigung der Astronomen gebraucht, eine Entscheidung, welches Projekt man will. Es wäre uns unmöglich gewesen, beide zu fördern.«

Rivalität: In der Wissenschaft an der Tagesordnung
Vergeblich versuchten die Astronomen immer wieder, ihre Kräfte zu bündeln. Europäische Wissenschaftler und die beiden amerikanischen Teams diskutierten über eine Zusammenarbeit, konnten sich letztlich jedoch nur auf den Austausch technischer Erkenntnisse verständigen. Schließlich stellten Mitglieder des Decadal Survey 2010 die Unterstützung von zwei verschiedenen Großteleskopen in

Frage, und das Gremium verschob diese Projekte an das Ende der Prioritätenliste. Damit war eine Förderung aus Bundesmitteln für weitere zehn Jahre außer Reichweite.

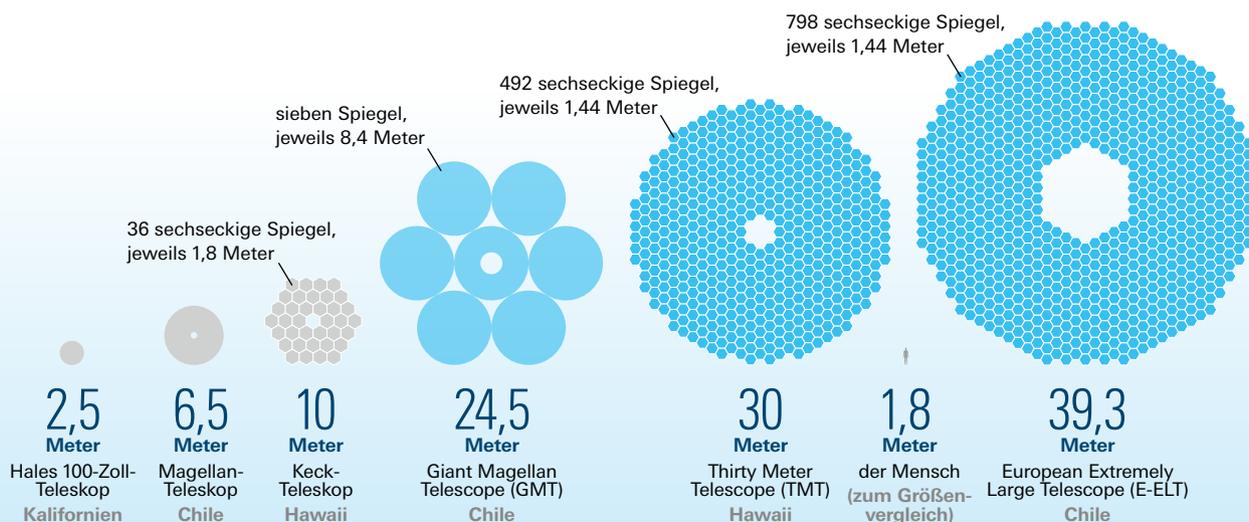
Nun sind Rivalitäten in der Wissenschaft keineswegs selten. Brillante Geister haben oft ein großes Ego und einen Hang zur Streitlust. Manchmal treibt dies den Fortschritt an. In anderen Fällen verwandelt sich das geistige Streben nach Erkenntnis in eine Reihe kleinlicher, persönlicher Konflikte. Dennoch gelang es in einigen Bereichen, potenzielle Rivalen dazu zu überreden, ihre Kräfte zu bündeln. So arbeiten Hochenergiephysiker in großen internationalen Kollaborationen an Teilchenbeschleunigern zusammen. Und Radioastronomen aus aller Welt betreiben gemeinsam ALMA, das 1,4 Milliarden Euro teure Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array.

Im Gegensatz dazu ist die optische Astronomie in den USA von Konkurrenzdenken zerrissen. Der italienisch-amerikanische Astrophysiker und Nobelpreisträger Riccardo Giacconi bezeichnete die Situation im Juli 2001 in einer Rede vor der National Academy of Sciences als soziologisches Problem. Für den Historiker W. Patrick McCray von der University of California in Santa Barbara ist die Langlebigkeit der seit 1928 schwelenden Auseinandersetzung zwischen dem Caltech und der Carnegie Institution um ihre Großteleskope das eigentlich Verblüffende: »Man denkt sich: Haben diese Leute denn nichts gelernt?«

Die Rivalität zwischen den beiden Einrichtungen allein kann aber die gegenwärtige Lage nicht erklären. Es gäbe

Riesenteleskope – groß, größer, am größten

1917 ging das Hale-Teleskop mit seinem 100 Zoll (etwa 2,5 Meter) großen Spiegel in Betrieb. Gegen die heutigen Großteleskope wie die 6,5 Meter großen Magellan-Teleskope oder die 10-Meter-Keck-Teleskope wirkt der einstige Pionier wie ein Zwerg. Die Riesenteleskope der Zukunft (blau) werden aber noch viel größer sein. Ihre Spiegel bestehen aus einzelnen Elementen, um Durchmesser von bis zu 40 Metern zu erreichen. Zwar werden diese neuen Giganten erst in den 2020er Jahren in Betrieb gehen – doch die Astronomen diskutieren bereits jetzt über ihre Nachfolger: Teleskope mit bis zu 100 Meter großen Spiegeln.



DASY CHUNG, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

durchaus auch vernünftige Gründe dafür, an unterschiedlichen Teleskopen zu arbeiten, betont der Astronom Ray Carlberg von der am TMT-Projekt beteiligten University of Toronto. Anfangs waren die Astronomen davon überzeugt, es sei genug Geld für alle drei Teleskope vorhanden und man könne dank deren Verteilung über die Nord- und Südhalbkugel den gesamten Himmel beobachten. »Man hatte schließlich gerade eine ganze Reihe von 8- und 10-Meter-Teleskopen gebaut. Da erschien es nicht unmöglich, mehrere noch größere zu haben.« Und als klar wurde, dass das Caltech die Unterstützung der Carnegie Institution nutzen könnte, hatte Letztere schon zu viel in das eigene Projekt investiert, um es aufzugeben.

Letztlich doch ein Gewinn für die Astronomie

Auf Big Island, der größten Insel von Hawaii, wurde bereits ein Teil des Mauna-Kea-Gipfels abgetragen, um Platz für das TMT zu schaffen. Der 30 Meter große Spiegel soll aus 492 sechseckigen, jeweils 1,44 Meter großen Segmenten bestehen. Untergebracht werden soll das Großgerät in einem 18 Stockwerke hohen Gebäude auf dem Berggipfel. Die Flächennutzung für das Teleskop ist genehmigt, doch das Projekt stößt auf lautstarken Widerstand durch hawaiianische Ureinwohner und Umweltschützer, die versuchen, juristisch dagegen vorzugehen. Um das 1,5 Milliarden US-Dollar teure Vorhaben zu finanzieren, sind das Caltech und die University of California Partnerschaften mit Indien, China, Japan und Kanada eingegangen. Derzeit fehlen aber immer noch 270 Millionen Dollar. Vermutlich wird das TMT irgendwann Anfang der 2020er Jahre in Betrieb gehen. *(Anmerkung der Redaktion: Da gegen den Bau des TMT auf Hawaii weiterhin Widerstand geleistet wird, ist mittlerweile die Kanareninsel La Palma als alternativer Standort im Gespräch.)*

Nur elf Häuserblöcke von der Hauptverwaltung des TMT in Pasadena entfernt arbeiten die Carnegie Institution und ihre Partner am 24,5 Meter großen GMT. Es soll aus sieben runden 8,4-Meter-Spiegeln bestehen, von denen sechs wie Blütenblätter um den siebten in der Mitte angeordnet sind. Der Aufbau unterscheidet sich also deutlich von dem des TMT mit seinen zahlreichen sechseckigen Spiegelsegmenten. Ein Labor der University of Arizona hat bereits vier der Spiegel gegossen. Die eher moderate Größe und das andere Design führen zu etwas geringeren Kosten von knapp einer Milliarde US-Dollar. Die Carnegie Institution konnte sich die Unterstützung durch Universitäten in Südkorea, Australien und Brasilien sowie durch einige US-amerikanische Universitäten sichern. Bislang hat das Konsortium etwa die Hälfte des Geldes zusammen, das für den Bau auf dem Gelände des chilenischen Las Campanas Observatory nötig ist. Geht alles nach Plan, könnte das GMT bereits 2022 sein erstes Licht auffangen.

Zwölf Autostunden von Las Campanas entfernt liegt der Cerro Armazones, auf dem das E-ELT errichtet werden soll. Ursprünglich hatten TMT-Astronomen diesen Beobachtungsstandort aufgetan. Jahrelang überwachten sie Transparenz und Turbulenz der Atmosphäre über dem Berg – doch dann beschlossen sie, das TMT auf der nörd-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



NASA (STS-125)

lichen Hemisphäre zu errichten. Die Europäer profitierten von der Vorarbeit und nutzten den Cerro Armazones für ihr eigenes Projekt. Inzwischen führt eine neue Straße auf den kahlen Gipfel, den Dynamit und schwere Maschinen in eine fußballfeldgroße ebene Fläche verwandelt haben.

Mit seinem 39 Meter großen Hauptspiegel wird das E-ELT das größte der Teleskope der nächsten Generation sein. Wie beim TMT besteht seine Spiegelfläche aus sechseckigen Segmenten – hier sind es sogar 798 an der Zahl. Im Dezember 2014 genehmigte die ESO die erste Bauphase. Für die zweite fehlen noch die finanziellen Mittel. Insgesamt werden sich die Baukosten voraussichtlich auf 1,1 Milliarden Euro belaufen, der Beobachtungsbeginn ist für 2024 vorgesehen.

Wenn erst einmal alle drei Teleskope in Betrieb sind, werden sich ihre Stärken ergänzen, sagt E-ELT-Chefwissenschaftler Roberto Gilmozzi. Während das E-ELT hoch aufgelöste Bilder kleiner Himmelsregionen liefern kann, liegen die Vorzüge des GMT in der Weitwinkel-Astronomie. Und das TMT beobachtet von der Nordhalbkugel aus einen anderen Teil des Himmels.

Wie die meisten für diesen Artikel befragten Astronomen glaubt Gilmozzi, die Konzentration auf zwei statt drei Riesenteleskope hätte dazu geführt, dass zumindest eins davon bereits kurz vor der Inbetriebnahme wäre – zu einem um mehrere hundert Millionen Euro geringeren Preis. »Sieht man vom Problem der Finanzierung ab, so ist es natürlich wunderbar, mehr als ein Teleskop zu haben«, sagt er. »Aus wissenschaftlicher Sicht könnte ich 100 Teleskope nutzen – wenn ich es mir leisten könnte, sie zu bauen.«

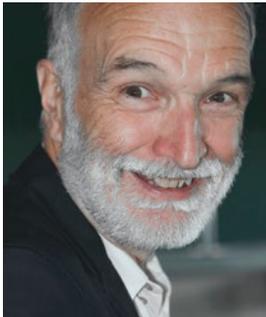
Allerdings ist der Bau der Teleskope nur der erste Schritt. Weder das GMT noch das TMT verfügen bislang über die finanziellen Mittel für die laufenden Betriebskosten. Die Wissenschaftler beider Projekte hoffen auf Bundesmittel, aber es sei keineswegs klar, wie viel Geld die US-Regierung beisteuern kann, so Van Citters. Pro Jahr kostet der Betrieb jedes Riesenteleskops einige zehn Millionen Dollar. »Das ist genug, um den Leuten Albträume zu verursachen«, sagt McCray.

Wie dem auch sei: Selbst wenn es ein Fehler war, gleich mehrere neue Riesenteleskope zu planen, so besteht doch die Chance, dass den Astronomen in aller Welt eines Tages drei neue, gewaltige Instrumente zur Verfügung stehen, um in den Kosmos zu blicken. Und das wäre in jedem Fall ein großer Gewinn für die Forschung. ◀

QUELLE

McCray, W. P.: *Astronomical Ambition and the Promise of Technology.* Harvard University Press, 2004

SCHLICHTING! LASST DIE KORKEN KNALLEN!



Beim Öffnen einer Sektflasche nimmt der Druck darin schlagartig ab. Das kann verschiedenste Vorgänge zum Ausgleich der Kräfte anstoßen – vom sanften Prickeln bis zur Schaumfontäne.

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

► spektrum.de/artikel/1420986

► Unter Sekt- und Champagnertrinkern gehört das Knallen der Korken nicht zum guten Ton. Viele Feiernde lassen es dennoch gern krachen, zumeist in ohnehin akustisch aufgeladener Atmosphäre wie etwa beim Begrüßen des neuen Jahrs. Obwohl es in so einer Umgebung schwer ist, leise Töne wahrzunehmen, lohnt es sich, genauer hinzuhören. Das Zischen beim Eingießen ins Spitzglas und die feinen Implosionen, mit denen die Blasen prickelnd ihr Leben aushauchen, gehören ebenso zum Gesamterlebnis. Was treibt die Prozesse an?

Schaumwein wurde nach ausgeklügelten Rezepturen mit reichlich Kohlendioxid (CO_2) versetzt. Eine 0,7-Liter-Flasche Champagner enthält vier Liter CO_2 . Würde man diese Gasmenge einfach in sie hineinpressen, müsste sie 60 Bar (60 000 Hektopascal) aushalten, etwa das

60-Fache des Atmosphärendrucks. Normale Flaschen vertragen trotz ihrer dicken Glaswände nicht mehr als vier bis sechs Bar. Die hohe CO_2 -Konzentration ist nur möglich, weil sich ein großer Teil des Gases in der Flüssigkeit löst. Dazu trägt insbesondere eine so genannte zweite Gärung durch hinzugefügten Zucker bei. Dabei stellt sich allmählich ein Druckgleichgewicht zwischen dem gelösten und dem gasförmigen CO_2 im kleinen Volumen unterhalb des Verschlusses ein. Mit zunehmender Temperatur wächst der Gasdruck, darum steigt auch die auf den Korken wirkende Kraft.

Dieses Stück Kunststoff oder Kork wird beim Abdichten in den Flaschenhals gezwängt und übt eine große Kraft senkrecht auf die Halsinnenseite aus. Das führt zu einer hohen Reibung, die bis zu einer kritischen Grenze

Unmittelbar nach dem Entkorken einer Champagnerflasche bildet sich ein feiner Nebel, da sich das ausströmende Gas wegen seiner raschen Ausdehnung stark abkühlt. Dadurch kondensiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf zu nur wenigen Mikrometer großen Tröpfchen. Die Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera machen den Vorgang innerhalb der ersten Millisekunde sichtbar.

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDEENNE URICAL MIT FROIL GEN VON GÉRAUD UGER-BELLAR





In wenigen Stunden ist es Nacht, und das Jahr geht zu Ende im Geknall der Champagnerpfropfen und der Raketen.

Eugenio Montale (1896–1981)

die Bewegung des Korkens verhindert. Zusätzlich fixiert ihn ein Drahtgestell, die Agraffe. Wie wichtig sie ist, merkt man zuweilen, wenn der Korken bereits bei ihrem Entfernen einem erhöhten inneren Druck nachgibt.

Beim Öffnen bringt man den Pfropf normalerweise mit einer Hand dosiert ins Rutschen. So geht die starke Haftreibung in die geringere und besser beherrschbare Gleitreibung über. Bei gekühlten Flaschen ist das meist nicht schwierig. Am Ende des Druckausgleichs zwischen innen und außen steht dann nicht mehr als ein dumpfes Ploppen. Man hat es aber wortwörtlich in der Hand, die Lautstärke dem jeweiligen Anlass entsprechend höher zu dosieren.

Bei zu warmen Flaschen, oder wenn man sie vorher geschüttelt hat, verliert man leicht die Kontrolle, und der Korken wird zum Geschoss. Ich habe selbst erlebt, wie ein flach abgefeuerter Korken mehrere Sektdrücker zerschmettert hat. Schlimmer sind die Augenverletzungen, die bei solchen Ereignissen immer wieder vorkommen. Laut Untersuchungen sind Anfangsgeschwindigkeiten von über 50 Kilometern pro Stunde möglich.

ISTOCK / KONIE

Erstaunlicherweise macht die damit verbundene Bewegungsenergie nur etwa fünf Prozent der Gesamtenergie aus, die während des Druckausgleichs frei wird. Der größere Anteil ist akustischer Natur. Wenn der Verschluss das komprimierte Gas plötzlich frei gibt, prallt es auf die träge Außenluft, die unter vergleichsweise niedrigem Druck steht. Sie wird stark lokal komprimiert und dehnt sich anschließend wieder aus. Diese Schwingung pflanzt sich in Form einer Schallwelle bis zu unseren Ohren fort, wo wir den Vorgang als plötzliches Schallereignis wahrnehmen, bei dem die Lautstärke innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde von einem hohen Wert stark abfällt – so etwas nennen wir Knall.

Die Zeremonie wird danach sehr viel ruhiger und stimmungsvoller. Nach dem ersten Schäumen machen sich im Glas noch lange Zeit Gasbläschen bemerkbar, die perlenkettenartig aufsteigen. Sie implodieren an der Oberfläche unter leisem Klicken und senden in mehr oder weniger hohem Bogen Sektröpfchen aus, die wir wie angenehm kühle, winzige Nadelstiche spüren.

Eine weitere Begleiterscheinung des Öffnens kann man unmittelbar nach dem Knall wahrnehmen: Nebel umspielt einige Sekunden lang den entkorkten Flaschenhals. Da sich während des Druckausgleichs das Gas schnell ausdehnt, nimmt dessen Temperatur lokal stark ab. Man kennt das von der kalten Luft, die aus einem geöffneten Ventil eines Reifens ausströmt. Anschaulich gesprochen muss sich das Gas Platz verschaffen, indem es die Umgebungsluft wegdrückt. Dazu ist Energie nötig, die seiner inneren Energie selbst entnommen wird. Weil der Vorgang so schnell (man sagt: adiabatisch) abläuft, kann in der kurzen Zeit keine Wärme aus der Umgebung zum Ausgleich herantransportiert werden, und die Temperatur sinkt an dieser Stelle. Und zwar so stark, dass in der relativ feuchten Luft der Taupunkt unterschritten wird und der überschüssige Dampf zu kleinen Tröpfchen kondensiert (Bilder unten).

Bei einer ungekühlten oder geschüttelten Flasche entweicht meist nicht nur eine Nebelfahne, sondern eine regelrechte Fontäne des Inhalts. Die plötzliche Druckabnahme übersättigt die Flüssigkeit mit Kohlendioxidgas – umso mehr, je wärmer sie ist, denn die Löslichkeit sinkt mit der Temperatur (siehe »Die Melodie des Wasserkochens«, **Spektrum** Oktober 2016, S. 60). Einzelne CO₂-Blasen sind ideale Ausgangspunkte (»Keime«) für weitere, die sich lawinenartig vermehren und einen Großteil des Getränks gleich mitreißen. Manchmal ist das sogar gewollt, etwa beim Sektduschen in einer Siegerehrung. Heftiges Schütteln mischt zusätzliches Gas unter die Flüssigkeit und überschwemmt sie so gleichsam mit Keimen. Ebenso wie das Korkenknallen ist das aber nicht in jeder Gesellschaft zu empfehlen.

QUELLE

Liger-Belair, G. et al.: Champagne Cork Popping Revisited Through High-Speed Infrared Imaging: The Role of Temperature. In: *Journal of Food Engineering* 116, S. 78–85, 2013



UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNES/EURICAL MIT PROF. GEN. VON GÉRARD LIGER-BELAIR

COMPUTERGESCHICHTE

KONRAD ZUSES

GEDANKENFABRIK

Bereits in seiner ersten Maschine, der Z1 von 1936, hat der Computerpionier Ideen vorweggenommen, die erst Jahrzehnte später zum Tragen kamen – allen voran die Mikroprogrammierung.

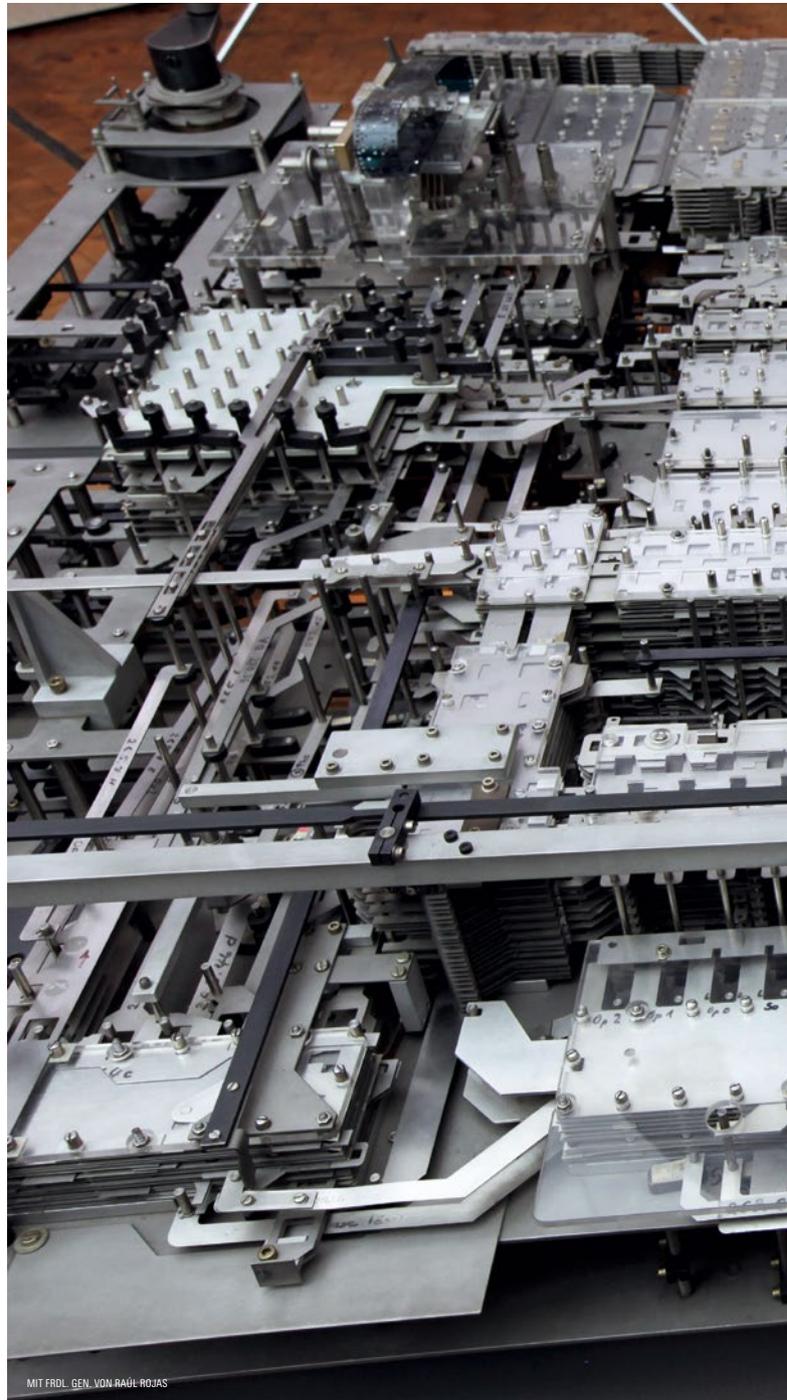


Raúl Rojas ist Professor für Informatik an der Freien Universität Berlin mit Spezialgebiet künstliche Intelligenz. Schon vor Jahren hat er das Bauprinzip des relaisgesteuerten Computers Z3 von Konrad Zuse rekonstruiert; mit seinem Team wurde er 2004 und 2005 Weltmeister im Roboterfußball.

» spektrum.de/artikel/1327767

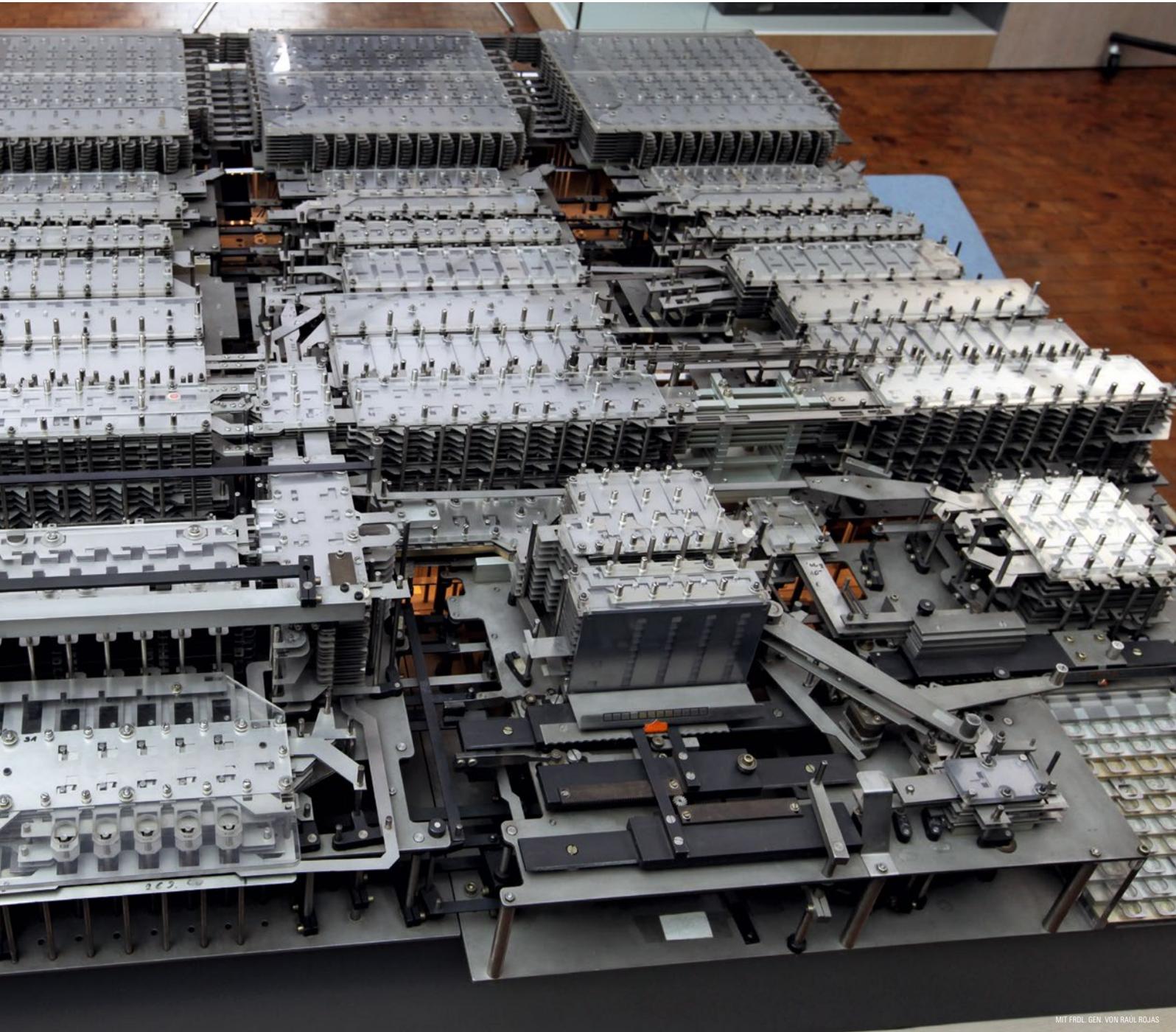
► Wer hat den Computer erfunden? Diese Frage wird bis heute kontrovers diskutiert, vor allem weil man sich trefflich darüber streiten kann, welche Merkmale eine Maschine als Computer qualifizieren. Aber unstrittig ist der deutsche Erfinder Konrad Zuse (1910–1995) einer der vordersten Anwärter für den Ruhmestitel. Als 26-Jähriger begann er – mangels Garage – im Wohnzimmer seiner Eltern aus Lochblechen und Stangen den ersten programmierbaren Rechner der Welt zu bauen, der später als Z1 bekannt wurde; er selbst nannte ihn damals »Versuchsmaschine 1« oder kurz V1.

Das Gerät ist mitsamt fast allen Aufzeichnungen 1943 dem Bombenhagel über Berlin zum Opfer gefallen. Aber in den 1980er Jahren hat der mehr als 70-jährige Zuse sein Frühwerk nachgebaut – aus dem Gedächtnis und mit Hilfe der wenigen erhalten gebliebenen Skizzen! Eine ordentliche Dokumentation hat er allerdings nicht dazu geliefert. Archiviert wurden nur die professionell gefertigten Blaupausen für die verschiedenen mechanischen Teile, mitsamt allerlei handschriftlichen Verbesserungen. Daher blieb das Verständnis der Z1 in wesentlichen Punkten lückenhaft, während die interne Struktur der Nachfolgemaschinen inzwischen gut verstanden ist (**Spektrum** Mai 1997, S. 54).



MIT FRIEDRICH VON RAJGL-ROJAS

Konrad Zuse hat seinen 1936 gebauten mechanischen Computer Z1 50 Jahre danach aus dem Gedächtnis rekonstruiert. Die Replik steht heute im Deutschen Technikmuseum in Berlin. Für die Aufnahme ist der transparente Deckel (»Schneewittchensarg«), der das Werk schützt, abgenommen worden.



MIT FOTL. GEN. VON RAUL ROJAS

AUF EINEN BLICK DER WEGWEISENDE BLECHCOMPUTER

- 1** Konrad Zuse (1910–1995) konstruierte bereits 1936 den ersten programmgesteuerten, gleitkommfähigen Rechner der Welt, die mechanisch betriebene Z1.
- 2** Wesentliche Konzepte dieses Prototyps hat Zuse unverändert für die elektromechanischen und elektronischen Nachfolgemodelle übernommen.
- 3** Bereits in der Z1 war insbesondere das Prinzip der Mikroprogrammierung verwirklicht, das in die Architektur moderner Computer eingegangen ist.

Diese Lücken konnten in letzter Zeit geschlossen werden. In Zuses Nachlass sind mehr als 1500 Zeichnungen aufgetaucht, in denen man – durch Korrekturen, Ergänzungen oder verschiedene Farben – bis zu fünf verschiedene Entwurfsstadien identifizieren kann (Bild S. 67 unten). Wilhelm Füßli, Leiter des Archivs am Deutschen Museum, und meine Arbeitsgruppe in Berlin haben die Detektivarbeit auf sich genommen, aus diesen kargen und schwer zu entziffernden Unterlagen die Funktionsweise des Computers zu enträtseln.

Dabei haben wir etliche Überraschungen erlebt. Die größte unter ihnen: Zuse hat von Anfang an eine Idee realisiert, die man heute als Mikroprogrammsteuerung bezeichnet. Diesen konzeptionellen Kern der Z1-Architektur hat Zuse über eine lange, ereignisreiche Entwicklung

hinweg mit großen Mühen, aber konsequent beibehalten, von seinen ersten stenografischen Aufzeichnungen in den frühen 1930er Jahren bis zu der relaisbetriebenen Z4, die 1950 – damals der einzige funktionierende Computer Europas – an der ETH Zürich in Betrieb ging. Dazwischen lagen nicht nur die Z1 und die ebenfalls mit Relais arbeitenden Prototypen Z2 und Z3, sondern auch ein Weltkrieg und zwei Einberufungen zur Front. Zuse konnte nur deshalb so unbeirrbar seinen Weg gehen, weil er von Anfang an eine kristallklare Vorstellung vom Ziel hatte. Nirgendwo tritt dies deutlicher zum Ausdruck als bei der internen Struktur der Rechenmaschine Z1.

Zuses erster Computer

Was seinen Wagemut und seinen Weitblick angeht, kann man Konrad Zuse zweifellos als den ersten Computer-Entrepreneur der Welt bezeichnen. Bereits um 1935, kurz vor Ende seines Studiums, nahm seine Idee konkrete Formen an. Seine kommerzielle Rechenmaschine sollte am Schreibtisch eines jeden Ingenieurs stehen und die üblichen technischen Berechnungen bewältigen. Daher arbeitete die Z1 von Anfang an mit Gleitkommazahlen (siehe »Was ist Gleitkomma-Arithmetik?«, unten) und war damit bis 1945 allen anderen Rechnern in den USA wie in England voraus, die nur mit ganzen Zahlen umgehen konnten.

Das Merkwürdigste an der Z1 ist allerdings die mechanische Ausführung (Bilder S. 64/65 und S. 67 oben). Tausende von Blechen und Stangen übertragen Informationen und den Takt der Berechnungen. Im Rechenwerk liegen zwölf Schichten von Blechen übereinander (Bild S. 68/69). Es gibt keine elektrischen Leitungen, sondern nur einen Motor, der durch seine Rotation die ganze Maschine in Bewegung versetzt (ersatzweise kann man an einer Handkurbel drehen).

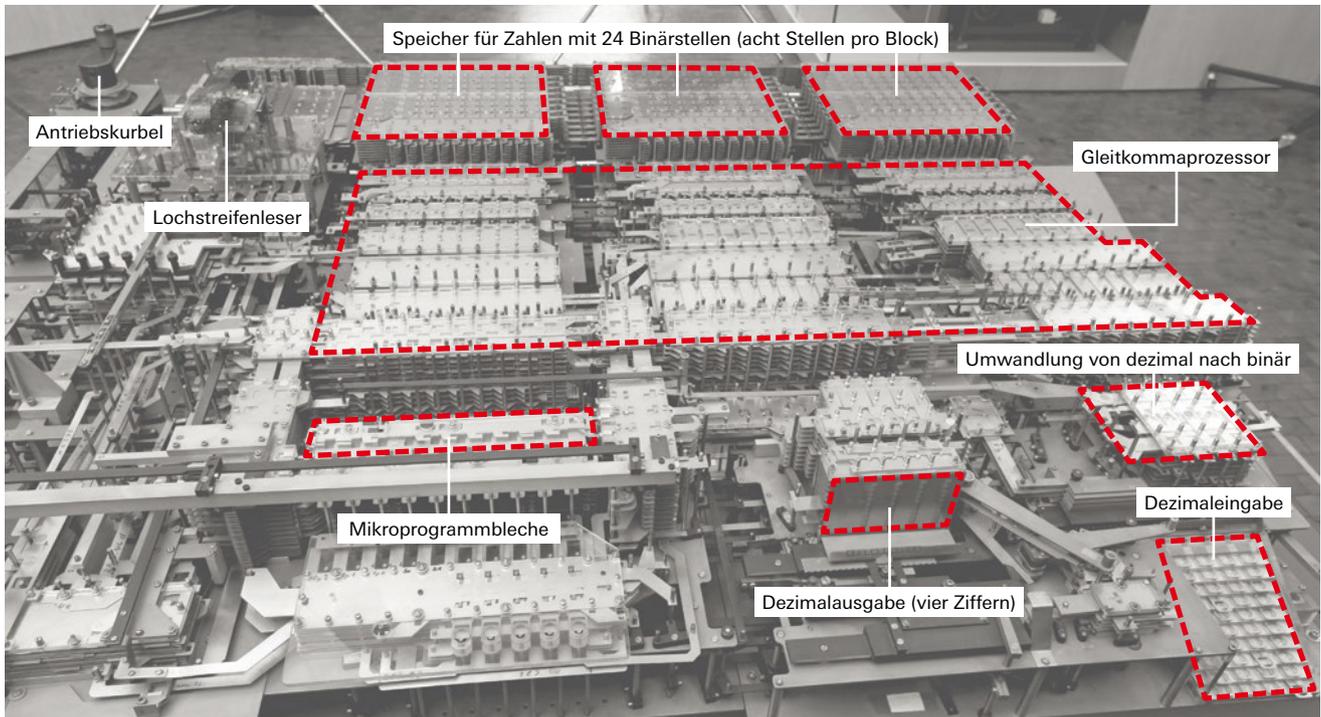
Was ist Gleitkomma-Arithmetik?

Zahlen, deren Größenordnung man nicht im Voraus sehr genau eingrenzen kann – also für wissenschaftliche Berechnungen praktisch alle Zahlen –, stellt man gerne in der Schreibweise mit Exponenten dar: $7,946138 \cdot 10^3$ statt 7946,138. Man verschiebt also das Komma (daher »Gleitkommazahl«) stets so, dass genau eine Ziffer ungleich null vor dem Komma steht (»Normalisierung«). Innerhalb des Computers arbeitet man wegen des Binärsystems mit der Basis 2 anstelle von 10, was aber für das Prinzip keinen Unterschied macht.

Mit Gleitkommazahlen kann man sehr große ebenso wie sehr kleine Zahlen mit stets gleicher Anzahl gültiger Stellen (relativer Genauigkeit) bearbeiten. Allerdings erfordert das Rechnen mit ihnen einen erhöhten Aufwand. So muss man zur Addition zweier Gleitkommazahlen erst beide Summanden auf den

gleichen Exponenten bringen, dann die Mantissen (die Ziffernfolgen ohne den Exponenten) addieren und zuletzt das Ergebnis normalisieren – drei Einzelaktionen statt einer bei der gewöhnlichen Ganzzahladdition.

Wenn einer von zwei Summanden, welche die Maschine zu addieren hat, gleich null ist, funktioniert die Normalisierung nicht, denn die Null kann die Bedingung »genau eine Ziffer ungleich null vor dem Komma« nicht erfüllen. Das ist aber auch gar nicht notwendig, denn wenn ein Summand gleich null ist, muss die Maschine nicht rechnen, sondern nimmt einfach den anderen Summanden als Ergebnis. Jedemfalls erfordert die Null in der Gleitkomma-Arithmetik, anders als unter ganzen Zahlen, eine Sonderbehandlung. Konrad Zuse hat diese Sonderbehandlung erst 1941 bei der Rechenmaschine Z3 eingeführt, nicht aber bei der Z1, die für ihn nur ein Prototyp war.



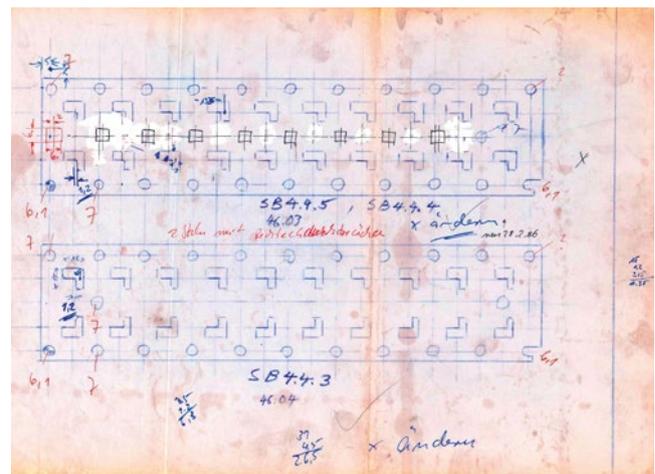
Die Z1 ist modular aufgebaut: Zuse und seine Helfer konnten die Komponenten der Maschine auf separaten Tischen zusammenbauen, einzeln austesten und erst dann miteinander verbinden.

Die entscheidende Idee, die der mechanischen Ausführung den Durchbruch verschaffte, war die Verwendung des Binär- anstelle des üblichen Dezimalsystems. In den herkömmlichen mechanischen Rechnern gehört zu jeder Stelle einer Zahl (Einer, Zehner, Hunderter ...) ein Zahnrad mit zehn Zähnen, eins für jede Ziffer von 0 bis 9. Im Zahlensystem zur Basis 2 (Binär- oder Dualsystem) kann jede Ziffer – und damit das sie repräsentierende Bauteil – nur zwei Zustände annehmen: 0 und 1. Das ist mit Blechen und Stangen gut zu realisieren. Das Blech in der Ruheposition entspricht einer Null, ein nach vorne bewegtes Blech einer Eins. Vor allem kann ein Blech – mit Hilfe einer Stange – ein anderes bewegen und so die Information (das »Bit«), die in seiner Stellung enthalten ist, an eine andere Stelle übertragen. Man kann die Mechanik auch so gestalten, dass zum Beispiel ein »Resultatblech« genau dann auf den Wert 1 gesetzt wird, wenn zwei »Eingangsbleche« den Zustand 1 haben (siehe »Denken mit Blech«, S. 69). Das realisiert die logische Verknüpfung UND. Logische Verknüpfungen dieser Art, geeignet zusammengeschaltet, machen aus zwei Binärzahlen deren Summe oder auch deren Produkt. Der »Hardwarearchitekt« muss das Zusammenspiel der mechanischen Komponenten nun so gestalten, dass die Maschine die gewünschten arithmetischen Berechnungen ausführt.

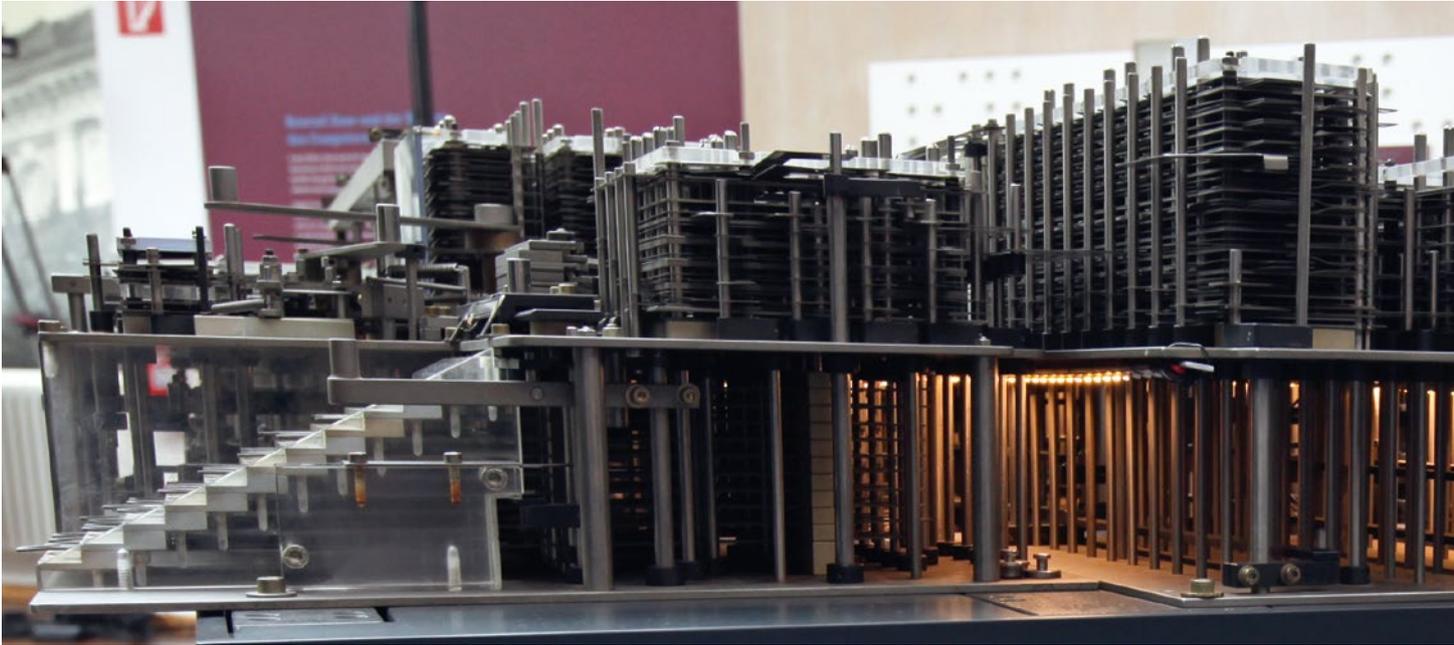
Vor Zuse hatte nur Charles Babbage (1791–1871) den – letztlich misslungenen – Versuch unternommen, Zahlen mit mechanischen Mitteln in einem Allzweckrechner zu verarbeiten. Wie schon reichlich ein Jahrhundert zuvor Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) hatte Babbage es mit dem Dezimalsystem versucht. Dazu mussten gewisse

Bauteile, vor allem Zahnräder, zehn verschiedene Zustände annehmen und abhängig von ihrem Zustand verschiedene Aktionen auslösen können. Die dafür erforderliche Präzision überforderte damals die Fertigungstechnik – bei Leibniz wie bei Babbage (**Spektrum** September 2016, S. 76).

Heute mutet es wie eine Ironie der Geschichte an, dass Babbage und seine Feinmechaniker die binären Bleche und Stangen der Z1 schon 1837 mit Leichtigkeit hätten herstellen können. Auch das binäre Zahlensystem konnte er kennen – Leibniz hatte es in die Wissenschaft eingeführt. Hätte Zuse ihm zur Seite gestanden, wäre der Computer fast ein Jahrhundert früher auf die Welt gekommen!



Eine der mehr als 1500 Entwurfszeichnungen, die Konrad Zuse für das Rechenwerk der Z1 anfertigte.



Blick in die Unterwelt der Z1. Rechts die acht Schichten des Speichers, links die zwölf Schichten des Rechenwerks. Über die Hebel und Stangen im »Kellergeschoss« wird der Rechenzyklus, entsprechend der Bewegung der Kurbel, synchron an alle Teile der Maschine übertragen.

Zuse war klar, dass die Menschen die gewöhnliche dezimale Zahlendarstellung nicht aufgeben würden, nur weil der Maschine das Rechnen im Binärsystem leichter fällt. Also musste seine Maschine – über ein mechanisches Eingabefeld – Dezimalzahlen entgegennehmen, diese in die binäre Darstellung umwandeln und für die Ausgabe den umgekehrten Schritt vollziehen, um dem Benutzer das Ergebnis in der gewohnten dezimalen Form präsentieren zu können. Aber im Inneren der Maschine waren, wie Zuse sagte, »die Zahlen unter sich«, und man konnte alle Rechnungen binär ausführen. Das war eine entscheidende Vereinfachung, weil man sich für jede Komponente nur um zwei mögliche Zustände Gedanken machen musste statt um zehn wie bei den Zahnrädern.

Die Rechenmaschine Z1 konnte mit Binärzahlen die vier Grundrechenarten ausführen und 16 Gleitkommazahlen im Speicher behalten. Außerdem beherrschte sie die angesprochene Umwandlung von Dezimal- in Binärzahlen und umgekehrt – das waren die beiden kompliziertesten Operationen der ganzen Maschine. Eine Division unter Binärzahlen ist wesentlich einfacher.

Richtig zuverlässig gearbeitet hat die Z1 allerdings nie. Oft klemmten die mechanischen Teile, die freiwillige Helfer mit der Säge zurechtgeschnitten hatten. Darüber hinaus hatte die Maschine ein gravierendes Problem: Sie konnte mit der Gleitkommazahl Null nicht rechnen! Es stellt sich heraus, dass die Null eine sehr spezielle Kodierung und

weitere Bauteile benötigt hätte, die Zuse zunächst eingespart hat (siehe »Was ist Gleitkomma-Arithmetik?«, S. 66). Als die Z1 fertig war und die ersten Rechnungen erfolgreich bewältigt hatte, genügte das für den prinzipiellen Nachweis, dass eine solche binäre Architektur sinnvoll und umfassend war. Zuse sattelte dann auf Telefonrelais um und baute anschließend die Rechenmaschinen Z2 und Z3, ohne die Z1 zu vervollständigen. Die Z3 wurde Mitte 1941 fertig und konnte lange Rechenoperationen, auch mit Null, problemlos durchführen.

Die Rechenoperationen

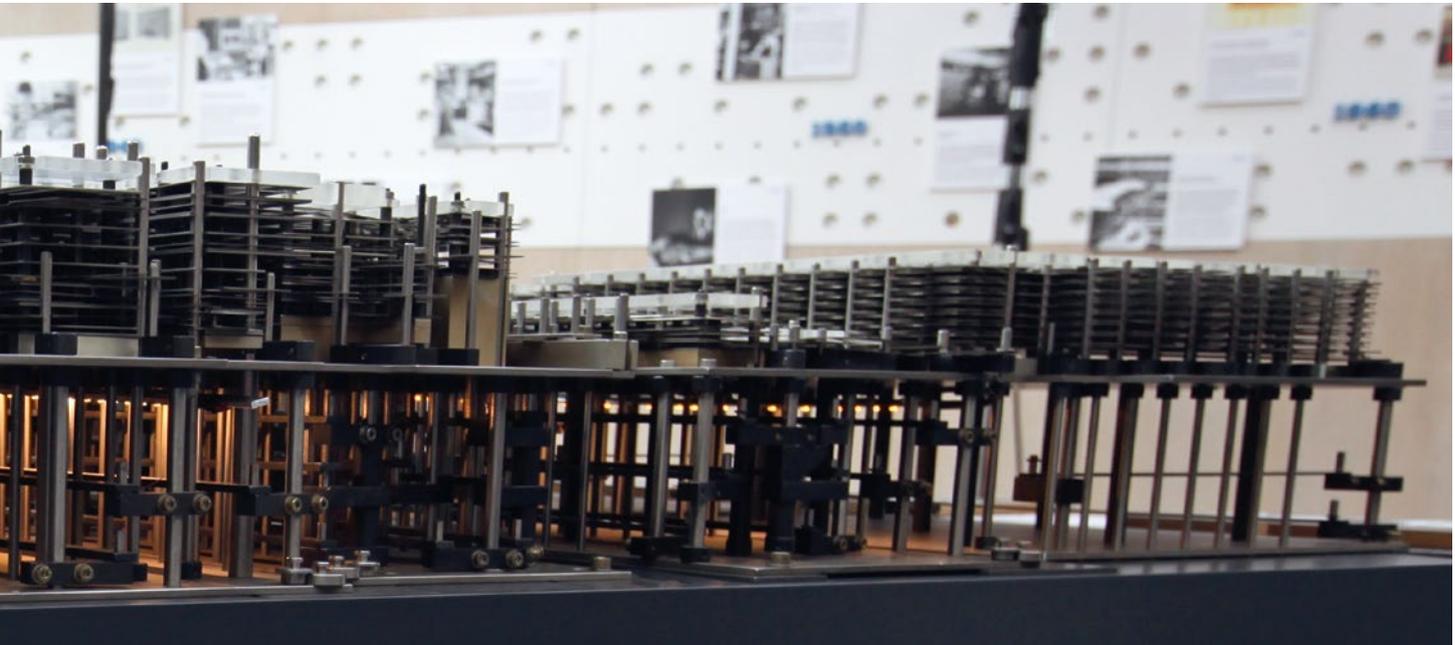
Wir wissen nicht, inwieweit die Rekonstruktion der Z1 im Berliner Technikmuseum dem Original wirklich entspricht. Aber allem Anschein nach ging es Zuse darum, diesem Ziel möglichst nahezukommen, auch wenn die Rekon-

struktion perfekt mit der Maschine geschnittene Komponenten enthält und schlanker aussieht als das Original auf den wenigen erhaltenen Fotos. Insbesondere hat Zuse bei der Berliner Maschine die Gleitkommazahl Null weiter unbehandelt gelassen, obgleich eine Ergän-

zung für ihn einfach gewesen wäre.

Das Programm der Maschine steht auf einem Lochstreifen, der eine Folge von arithmetischen und Speicheroperationen vorgibt. Jedesmal, wenn der Lochstreifen eine Stelle weiter bewegt wird, nimmt die Maschine einen neuen Befehl entgegen und führt ihn aus. Soll eine Folge von Befehlen mehrfach wiederholt werden, kann man den

Richtig zuverlässig arbeitete die Z1 nie. Oft klemmten die mechanischen Teile

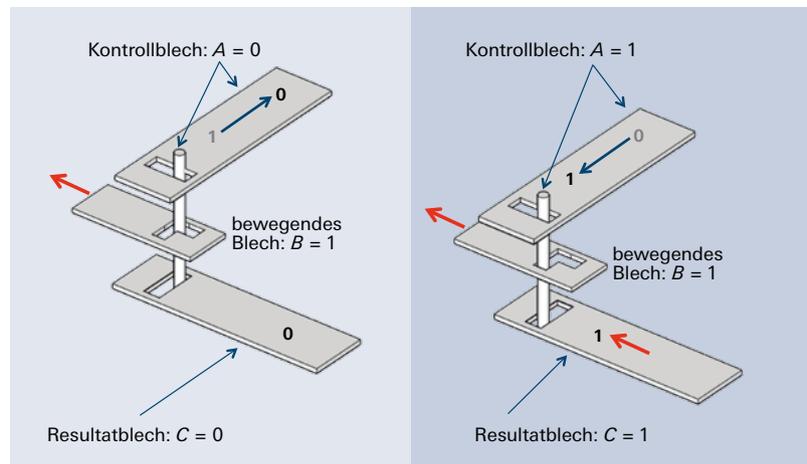


Denken mit Blech: Die Mechanik logischer Operationen

A und B seien logische Variable, das heißt, sie können nur die Werte 0 («falsch») und 1 («wahr») annehmen. Die elementare logische Verknüpfung $C = A \text{ UND } B$ liefert genau dann den Wert $C=1$, wenn sowohl A als auch B gleich 1 sind, und sonst den Wert 0. Diese Operation hat Zuse mit Blechen und Stangen wie folgt realisiert:

Die Variablen A und B werden durch Bleche dargestellt, die jeweils zwei verschiedene Positionen («0» und «1») annehmen können. Im ersten Schritt wird Blech A in die seinem Wert entsprechende Position gebracht (rechts ist $A=0$, links ist $A=1$). Im zweiten Schritt bewegt die Maschine Blech B , wenn $B=1$ ist; wenn $B=0$ ist, geschieht nichts.

Zwei Beispiele: Wenn $A=0$ ist (linke Zeichnung), bewegt sich das Blech B folgenlos, weil die Stange in dem Schlitz «Spiel» hat. Nur wenn $A=1$ ist (rechte Zeichnung), nimmt Blech B die Stange mit; die bewegt ihrerseits das Resultatblech C . Das Ergebnis C kann nun in einem weiteren Rechenschritt



an einer anderen Stelle in der Maschine verarbeitet werden.

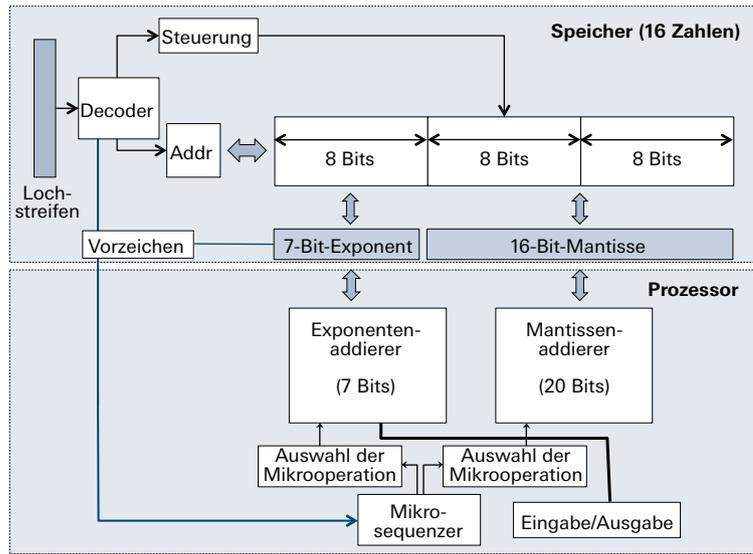
Man beachte, dass Blech A und das Resultatblech C in zueinander senkrechten Richtungen orientiert sind. In der Z1 ist jeder Rechentakt in vier Phasen eingeteilt, die den vier «geografischen Richtungen» im rechteckigen Rahmen der Maschine entsprechen. In der ersten Phase schiebt die Maschine alle Bleche, die zu diesem Zeitpunkt «eingeschaltet», das heißt zur Bewegung vorgesehen sind,

weil sie den Wert 1 repräsentieren, nach Osten, in der zweiten nach Norden, in der dritten nach Westen und in der vierten nach Süden. Die Orientierung eines Blechs in Bezug auf den Rahmen bestimmt also die Phase, in der es mit Bewegungen an der Reihe ist.

Wenn Blech B stets eingeschaltet wird, dient die abgebildete Mechanik nur zur Übertragung des Werts von A auf das Resultatblech: das mechanische Äquivalent eines Relais.

Die logische Struktur der Rechenmaschine Z1

Der Speicher kann 16 Gleitkommazahlen aufnehmen, deren jede aus einem Exponenten und einer Mantisse besteht (das Vorzeichen der Mantisse ist das ganz links gespeicherte Bit). Die sieben Bits des Exponenten enthalten implizit auch ein Vorzeichen dafür (»Zweierkomplementdarstellung«). Der Prozessor, die zweite Hälfte der Maschine, enthält je einen Addierer für die Exponenten und für die Mantissen. Subtrahieren ist Addieren mit dem umgekehrten Vorzeichen. Multiplikation und Division lassen sich auf wiederholte Additionen beziehungsweise Subtraktionen reduzieren. Das geht im Binärsystem viel einfacher, als wir es vom schriftlichen Rechnen gewohnt sind (»Was ist Gleitkomma-Arithmetik?«, S. 66).



RAUL ROJAS; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Teilaktionen. Allerdings ist heute diese Zerlegung nicht wie bei Zuse fest eingebaut, sondern wird von einem eigens dafür geschriebenen Programm, einem »Compiler«, bewerkstelligt.

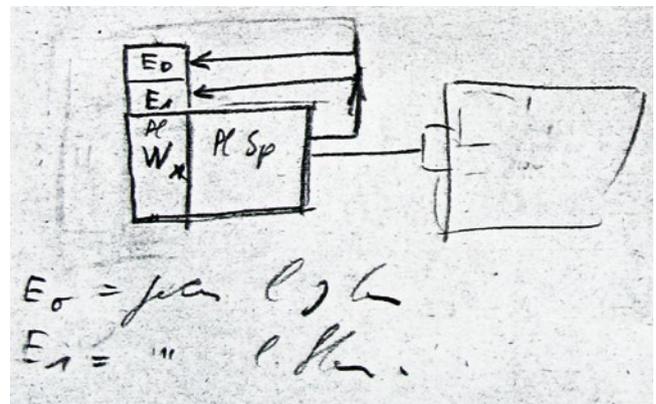
In der Programmiersprache Java (**Spektrum** Juli 1996, S. 17) wird diese Idee auf die Spitze getrieben: Der Java-Compiler erzeugt Befehle für eine Maschine, die es gar nicht gibt. Wer ein solches Programm laufen lassen will, muss in einem weiteren Schritt die Befehle dieser »virtuellen Maschine« in solche zerlegen, die sein eigener Computer versteht. Der wiederum macht aus einem elementaren Befehl möglicherweise mehrere noch einfachere, so dass sich am Ende ein einziger Java-Befehl vielleicht in Hunderte von elementaren Instruktionen verwandelt hat. Dank dieser Arbeitsteilung kann einerseits der Programmierer auf einer höheren Ebene denken, ohne sich um Details zu kümmern. Andererseits wird die Hardware einfacher und preiswerter.

Wie hat Zuse diese Idee in der Z1 umgesetzt? Die Elementaroperationen selbst sind in der Anordnung der Bleche und ihrer Schlitze realisiert. Die beiden Rechenwerke – je eines für den Exponenten und die Mantisse (siehe »Was ist Gleitkomma-Arithmetik?«, S. 66) – bestehen aus zwölf Schichten von Blechen, die von senkrecht stehenden Stangen bewegt werden und diese bewegen. Jede Schicht ist zu vier verschiedenen Elementaroperationen fähig, die mit *A* bis *D* bezeichnet sind; welche von ihnen tatsächlich ausgeführt wird, entscheidet die Position von vier speziellen Bauteilen (den »Schaltkanten«) am Rand des Rechenwerks. Nun muss die Maschine nur noch in jedem Schritt des Programms die jeweils angesagte Elementaroperation auslösen.

Die Mikroprogrammierung besteht, abstrakt betrachtet, aus einer Liste aller vorgesehenen Elementaroperationen

(Bild S. 72 unten). Jede Zeile der Liste enthält in der ersten Spalte die Nummer des Programmbefehls (1 für »Addieren«, 2 für »Multiplizieren« und so weiter), in der zweiten Spalte die laufende Nummer der Elementaroperation zum jeweiligen Befehl und in der dritten die Angabe der Schicht, welche die Operation erledigen soll, sowie die Detailangabe *A*, *B*, *C* oder *D*.

Zuse hat jede Zeile dieser Liste in ein spezielles Blech umgewandelt. Jedes Blech trägt seine Zeilennummer in Form einer speziellen Anordnung von Zähnen. Das Leitwerk der Maschine bewegt eine Reihe von insgesamt zehn Steuerstangen so, dass sie die Nummer der aktuell auszuführenden Elementaroperation als Binärzahl repräsentieren.



KONRAD ZUSE; MIT FRIEDRICH GEN. VON RAUL ROJAS

In diesem Notizbucheintrag aus der Bauzeit der Z1 hat Zuse das Prinzip der Mikroprogrammierung erstmals skizziert. Der hierarchisch aufgebaute Programmspeicher (»Plan-Speicher«, links) wandelt Befehle der obersten Ebene (E_0) in einfachere Elementarbefehle (Ebene E_1) um, die dann vom Prozessor (»Wahlwerk«, *W*) ausgeführt werden.

Die Mikroprogrammbleche der Z1

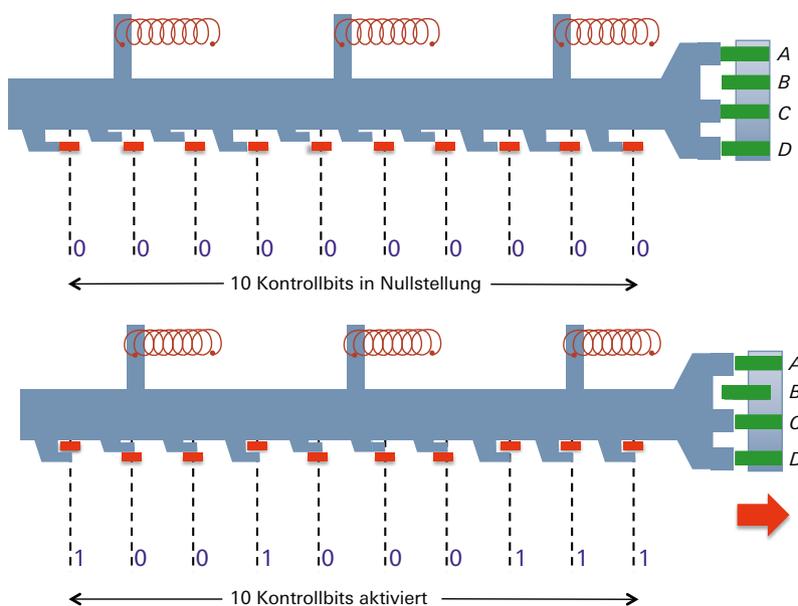
Zehn Stangen des Leitwerks können sich in der Position 0 oder 1 befinden (zehn Kontrollbits) und bestimmen damit die Position von zehn Sperren (rot gezeichnet). Die drei ersten Stangen geben die binäre Nummer der auszuführenden Operation an (Addition, Subtraktion, ...), die nächsten fünf den Teilschritt innerhalb derselben. Eine Operation kann also aus maximal 31 Mikroprogrammschritten bestehen. Die letzten zwei Stangen stehen für Zusatzbedingungen, die zum Beispiel den Unterschied zwischen Addition und Subtraktion ausmachen.

Nur wenn keine der Sperren die Mikroprogramm-Blechplatte an der Bewegung hindert, bewegt diese sich, von Schraubenfedern getrieben, nach rechts und kann auf die vier Bauteile A bis D drücken (unteres Bild), die ihrerseits gewisse Operationen im Rechenwerk auslösen. In dem abgebildeten Beispiel werden alle Bauteile außer B aktiviert.

In der Z1 gibt es 72 solcher Mikroprogramm-Blechplatten. In der Liste (Bild S. 72 unten) sind sie vollständig aufgeführt. Sie unterscheiden sich einerseits in der Position der Sperrzähne, wodurch bestimmt wird, bei welchem Teilschritt einer Operation (bei welcher



MIT FIBEL. GEN. VON RAUL ROJAS



RAUL ROJAS, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Stellung der Sperren) eine Platte sich bewegt, andererseits in der Kombinationen der Bauteile A, B, C und D, die sie aktivieren. Zudem

finden sich die Platten in unterschiedlichen Höhen und wirken damit auf verschiedene Ebenen innerhalb der Maschine.

(Spektrum Juni 2012, S. 81), die gleichwohl von eminenter theoretischer Bedeutung ist.

Als Ergänzung zur logistischen Maschine entwarf Zuse auch als Erster eine höhere Programmiersprache namens »Plankalkül«. Damit war der Zyklus geschlossen: Mit dem Plankalkül als der abstrakten Programmiersprache konnte er eine komplexe Aufgabe über mehrere Stufen in elementare Operationen auflösen. Am Ende würde ein ultrakleiner Prozessor unermüdlich Millionen von Zwei-Bit-Operationen ausführen und auf diese Weise zum Beispiel Schach spielen.

Wie ein 26-Jähriger in Berlin 1936 solch hochmoderne Gedanken mit sich herumtrug, wie er danach unermüdlich seine Rechenmaschinen baute, obgleich die Welt um ihn herum zusammenbrach, ist heute schwer zu verstehen.

Konrad Zuses Triumph mit der Z4 und der logistischen Maschine samt Plankalkül fiel in das Jahr 1945 – und hat aus einleuchtenden Gründen zu dieser Zeit niemanden interessiert. Es dauerte noch fünf Jahre, bis Zuse seine Arbeit wieder aufnehmen konnte, und da war es bereits zu spät für eine deutsche Computerindustrie. Die Technologie von der anderen Seite des Atlantiks trat ihren Siegeszug an. ◀

QUELLEN

Rojas, R.: The Z1: Architecture and Algorithms of Konrad Zuse's First Computer. <http://arxiv.org/abs/1406.1886> (7. Juni 2014)

Rojas, R. et al.: Die Prozessorarchitektur der Rechenmaschine Z1. In: Informatik-Spektrum 37, S. 341–347, August 2014

■ Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

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

Unterstützen Sie das Projekt

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

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebritzer Agrarbetriebsgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Förderverein des Thomas-Mann-Gymnasiums Stutensee | Förderverein der Leibnizschule Wiesbaden e.V. | KIT Karlsruhe | Volksbank Bigge-Lenne eG | Meissner AG | Förderverein der Justus-Liebig-Schule Darmstadt | Dominique Mayer | Rotary Club Buchloe | Förderverein des Johanneum-Gymnasiums Herborn | Freundeskreis der Konrad-Duden-Realschule Mannheim | Förderverein des Eichsfeld-Gymnasiums Duderstadt | Albertus-Magnus-Gymnasium Stuttgart | Sternwarte am Wallgarten Gifhorn

SIMON KIMM & SUSANNE SCHULTE (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/BEREITMIL)
CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SY-SA/3.0/LEGAL/0041)



FREISTETTERS FORMELWELT ZU GROSS FÜR DIESES UNIVERSUM

Grahams Zahl ist so gewaltig, dass man sie nicht einmal ansatzweise berechnen kann. Es braucht eine höchst komplexe Formel, um sie darzustellen.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1427447](http://spektrum.de/artikel/1427447)

Normalerweise sind Zahlen Teile mathematischer Formeln. Manchmal braucht man aber auch Formeln, um Zahlen ausdrücken und verstehen zu können. Besonders dann, wenn es um sehr große Zahlen geht. Zum Beispiel jene Zahl, die nach dem amerikanischen Mathematiker Ronald Graham benannt ist. Eigentlich ist sie eine ganz normale Zahl, sogar eine natürliche Zahl wie 1, 2, 3, 4 und so weiter. Grahams Zahl ist allerdings so enorm groß, dass es schwierig wird, sie überhaupt zu beschreiben.

Ronald Graham hat sich diese Zahl nicht einfach so ausgedacht. Sie tauchte im Rahmen eines mathematischen Beweises auf, bei dem es darum ging, eine Obergrenze für die Zahl möglicher Kombinationen von Objekten zu finden. Graham konnte nachweisen, dass die nun nach ihm benannte Zahl genau eine solche Obergrenze ist. Und so sieht sie aus:

$$G = \left. \begin{array}{l} 3 \uparrow \uparrow \dots \uparrow 3 \\ \underbrace{}_{3 \uparrow \uparrow \dots \uparrow 3} \\ \vdots \\ \underbrace{}_{3 \uparrow \uparrow \dots \uparrow 3} \\ \underbrace{}_{3 \uparrow \uparrow \uparrow 3} \end{array} \right\} 64$$

Der nach oben zeigende Pfeil ist eine spezielle mathematische Schreibweise, um derart große Zahlen in den Griff zu bekommen. Es handelt sich dabei um eine wiederholte Potenzierung, wobei eine Potenzierung selbst nichts anderes ist als eine wiederholte Multiplikation. In der einfachsten Version ist der Pfeil nur ein alternativer Weg, eine Potenz zu notieren. 5^3 lässt sich zum Beispiel auch als $5 \uparrow 3$ schreiben. Wenn der Pfeil allerdings zweimal angewendet wird, werden die Zahlen sehr schnell sehr groß. Allgemein bedeutet ein Ausdruck der Form $a \uparrow \uparrow b$, dass die Zahl a genau

b -mal mit sich selbst potenziert wird. $4 \uparrow \uparrow 3$ steht also für $4 \uparrow (4 \uparrow 4)$ beziehungsweise für $4 \uparrow 256$ oder 4^{256} , und das Ergebnis davon ist schon eine Zahl mit 154 Ziffern!

Noch größer werden die Zahlen, wenn der Pfeil öfter hintereinander benutzt wird. Der Ausdruck $4 \uparrow \uparrow \uparrow 3$ beschreibt die Berechnung von $4 \uparrow \uparrow (4 \uparrow \uparrow 4)$, was sich wiederum in einzelne Potenzierungen aufdröseln lässt, bis man am Ende der Rechnung eine absurd große Zahl erhält. Grahams Zahl beginnt da aber noch nicht einmal. Den Anfang macht die Berechnung von $3 \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow 3$, und das Ergebnis liefert die Anzahl Pfeile, die für den nächsten Rechenschritt nötig sind. Das Ganze geht in 64 Schritten so weiter, bis endlich die eigentliche Zahl berechnet werden kann.

Oder besser nicht kann: Denn natürlich hat noch nie jemand tatsächlich das Ergebnis all dieser Potenzierungen ausgerechnet. Das ist auch gar nicht möglich. Allein schon um den ersten Schritt bei der Berechnung von Grahams Zahl durchzuführen, müsste man die Zahl 3 mehr als sieben Billionen Mal hintereinander potenzieren und wäre dann noch nicht einmal annähernd beim wahren Wert der Zahl angelangt. Bis heute weiß also niemand, wie groß diese wirklich ist. Interessanterweise kann man aber berechnen, wie die Zahl endet: Ihre letzte Ziffer muss eine 7 sein.

Als Astronom werde ich oft gefragt, wie ich damit klarkomme, dass das Universum so unvorstellbar groß ist, die Distanzen so enorm und die Zeiträume so riesig. Eigentlich recht gut, sage ich dann; ich finde die räumlichen und zeitlichen Ausmaße des Kosmos eher inspirierend und faszinierend. Im Vergleich zur Mathematik sind aber selbst diese winzig. Wenn alle Sekunden seit dem Urknall abgezählt und alle Atome des Weltalls durchnummeriert würden – dann hätte man die Größe von Grahams Zahl noch nicht einmal ansatzweise erreicht! Nein, das Universum macht mir keine Angst. Bei den unmenschlich großen Zahlen der Mathematik kann ich mich aber zwischen Faszination und Erschrecken oft nicht entscheiden.

FLORIAN FREISTETTER

ARCHÄOLOGIE UMBRÜCHE AM ENDE DER EISZEIT

Als dichte Wälder entstanden, wo zuvor eisige Tundren mit großen Herden von Beutetieren vorherrschten, mussten die Menschen ihre Lebensweise anpassen. Neue Untersuchungen zeigen erstmals, wie zögerlich man aber Traditionen aufgab. Eine Erkenntnis, die auch heutzutage relevant ist.



Die promovierte Archäologin **Sonja Grimm** (links) erforscht die Wiederbesiedlung des nördlichen Europas nach dem letzten glazialen Maximum am Zentrum für Baltische und Slawische Archäologie in Schleswig und als Honorary Research Associate am Institute of Archaeology des University College London. **Daniela Holst** ist Dozentin am Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität zu Köln. Sie hat über den Wandel der Landschaftsnutzung am Beginn des Holozäns promoviert.

► spektrum.de/artikel/1430285

► Regelmäßige ergiebige Niederschläge oder lange Trockenheit, milde oder extreme Temperaturen – das Wetter und die klimatischen Entwicklungen geben den Rahmen vor, in dem Gemeinschaften leben und wirtschaften. Wandelt sich das Klima, verlangt dies eine Anpassung an die neuen Bedingungen. Unter Archäologen gilt es daher als ausgemacht, dass Klimaumschwünge die Gesellschaften der Vergangenheit dramatisch beeinflusst haben. So werden solche Veränderungen für den Untergang mancher Hochkultur als wichtiger Faktor ange-

führt. Wie groß der Effekt jeweils war, lässt sich schwer abschätzen, wenn keine schriftlichen Überlieferungen von Zeitzeugen vorliegen und die jeweiligen Lebensumstände allein anhand der materiellen Hinterlassenschaften erschlossen werden müssen. Je weiter der Blick zurück in die Vergangenheit geht, desto problematischer gestaltet sich eine solche Rekonstruktion.

Vor 14700 Jahren endete die letzte Eiszeit – streng genommen die letzte Kaltphase, derzeit leben wir wohl nur in einer wärmeren Periode des Eiszeitalters. Damals lebten in Nordwesteuropa die Menschen des späten Magdalénien (benannt nach dem französischen Fundplatz La Madeleine). Mit Beginn der Erwärmung wichen die trockenen Kältesteppen mit ihren Permafrostböden allmählich expandierenden Wäldern. Etwa 1500 Jahre später hatte sich die neue Lebensweise der Federmesser-Gruppen ausgebreitet. Sie ist nach ihren charakteristischen Steinspitzen mit abgestumpftem Rücken benannt. Wie dieser Wandel ablief und wie er mit den Veränderungen des Klimas und der Landschaft korreliert war, hat eine von uns (Grimm) erstmals im Detail untersucht.

Die allgemeine Entwicklung von Temperatur und Niederschlägen weltweit lässt sich an Bohrkernen aus dem grönländischen Eisschild detailliert nachvollziehen. Denn jedes Jahr kam dort eine neue Schneeschicht dazu und verdichtete sich. Die darin eingeschlossenen Sauerstoff- und Schwefeldioxidisotope liefern wertvolle Informationen zum globalen Klimawandel. Das Forschungsprojekt erreichte eine Tiefe von 3000 Metern, das entspricht insge-

AUF EINEN BLICK BEHARRLICHE TRADITIONEN

- 1 Vor etwa 14700 Jahren kletterten die Jahreshöchsttemperaturen von etwa 9 auf rund 19 Grad. Gletscher schmolzen, Wälder verdrängten Kältesteppen.
- 2 Als Reaktion darauf wuch die als Magdalénien bezeichnete Kultur der Lebensweise der Federmesser-Gruppen. Neue Waffentechnologien und neue Siedlungsweisen kamen auf.
- 3 Eine detaillierte Analyse archäologischer Funde legt nun nahe, dass sich solche Anpassungen aber mit bis zu 100 Jahren Verzögerung durchsetzten.

samt 123000 Jahren vor heute. Doch das ist nicht die einzige Quelle für Klimainformationen: Regionale und lokale Umweltbedingungen lassen sich zum Beispiel an fossilen Pflanzenresten oder Seesedimenten ablesen.

Letzteren Quellen zufolge lag die Jahreshöchsttemperatur im Rheinland während der ausklingenden Weichsel-Kaltzeit vor 16000 bis 14700 Jahren bei etwa neun Grad Celsius. Gletscher bedeckten nur noch Südschweden, den Norden von Großbritannien und die Alpen. In den eisfreien Gebieten gab es kaum noch Permafrostböden, doch zumindest im Winter war die Erde bis tief in den Untergrund gefroren. Meterdicke Lössböden aus jener Phase belegen, dass Staubstürme keine Seltenheit waren – es war offenbar sehr trocken. Daher prägten Kältesteppen mit ihrer kargen, aber anspruchslosen Vegetation das Landschaftsbild. Bäume und Sträucher wuchsen nur an geschützten und feuchteren Standorten. Für die Menschen waren diese Bedingungen aber keineswegs lebensfeindlich, denn die offene Landschaft bot ihren Beutetieren reichlich Nahrung: Gewaltige Herden von Rentieren und Pferden

sowie Gruppen von Wisenten und Saiga-Antilopen zogen quer durch Europa. Möglicherweise lebten damals auch noch Mammuts in unseren Breiten, denn entsprechende Darstellungen aus jener Zeit sind derart detailliert, dass viele Forscher glauben, die Künstler müssten die Tiere wohl selbst gesehen haben. Eine große Rolle können sie für die Nahrungsversorgung in Westeuropa aber nicht mehr gespielt haben.

Mit dem Klimawandel verschwanden die großen Herden aus Mitteleuropa

Als die Temperaturen vor etwa 14700 Jahren zu klettern begannen, schmolzen die Gletscher weiter, und Niederschläge fielen reichlicher. Innerhalb von maximal 150 Jahren erreichten die Jahreshöchstwerte im Rheinland etwa 19 Grad Celsius, und das Grasland wich stetig lichten Birkenwäldern, die sich sowohl verdichteten als auch ausbreiteten. Herdentiere wie das Ren folgten der zurückweichenden Steppe nach Norden und verschwanden schließlich ganz aus Mitteleuropa. Pferde kamen mit den

Federmesser nennen Prähistoriker solche Steinklingen mit stumpfem Rücken, wie sie bei Grabungen im rheinland-pfälzischen Neuwied zu Tage kamen. Sie sind Kennzeichen einer neuen Lebensweise, die vor etwa 13000 Jahren aufkam.

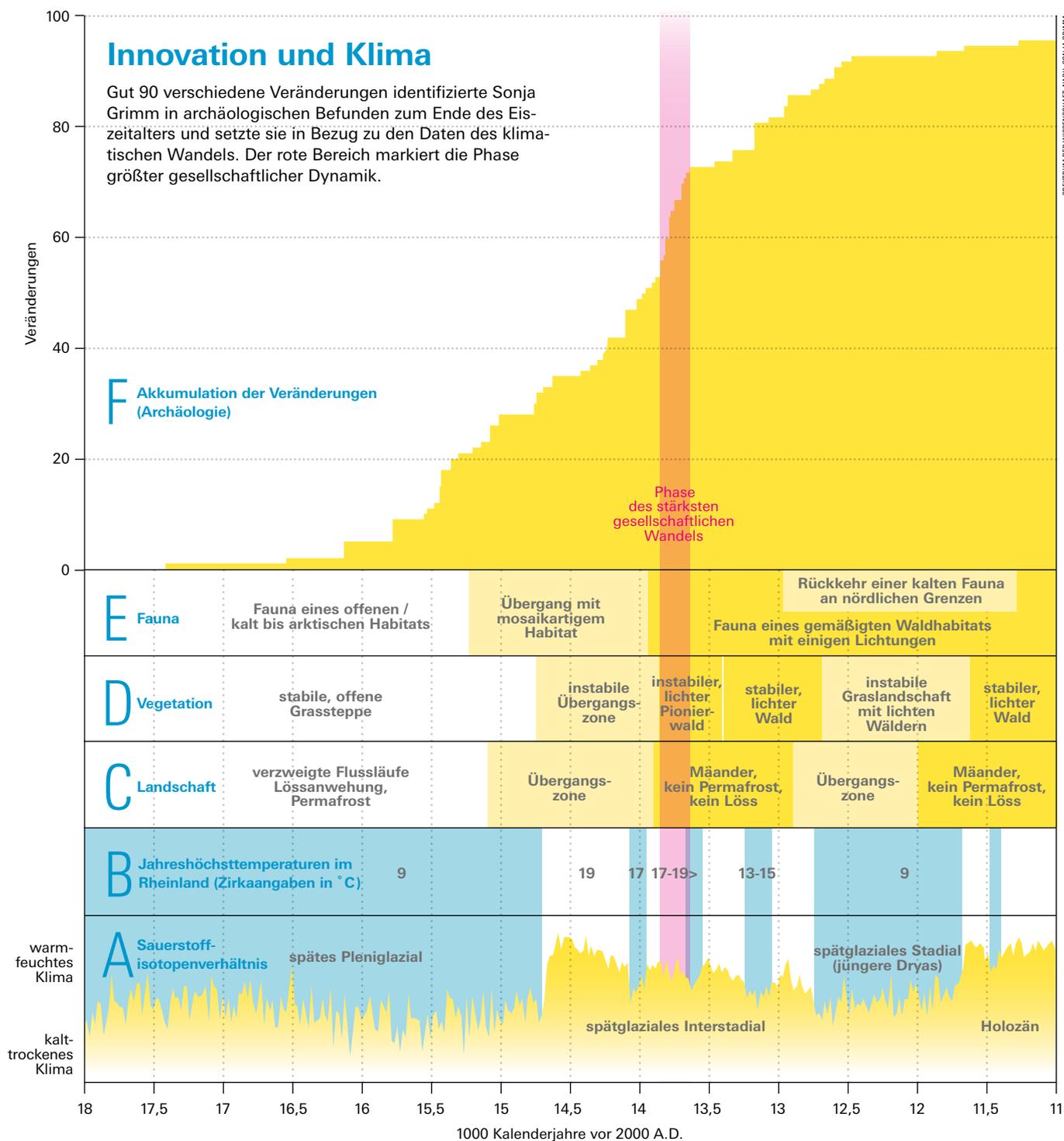


neuen Bedingungen zwar besser zurecht, doch ihre Herden wurden kleiner. Stattdessen wanderten nun Waldtiere wie Wildschwein, Auerchse, Rothirsch und Elch aus südlicheren Gefilden ein.

Den rekonstruierten Klimadaten zufolge wurde der Landschaftswandel aber mehrfach unterbrochen: zunächst durch drei jeweils nur rund 100 bis 200 Jahre dauernde Kälteeinbrüche vor etwa 14000, 13650 und 13150 Jahren sowie vor 12750 Jahren dann durch eine längere Kaltzeit,

die jüngere Dryas (siehe »Innovation und Klima«, unten). Die Jahreshöchsttemperatur sank im Rheinland erneut auf nur neun Grad. Gletscher und Permafrostböden breiteten sich wieder aus, zeitweise eroberten Krautsteppen Gebiete zurück. Wälder überdauerten nur an geschützten Standorten, bis schließlich vor 11690 Jahren die bis heute andauernde Warmzeit begann, das Holozän.

Um die Reaktion der Menschen auf diese extremen Umschwünge zu erforschen, nahm Grimm 26 bereits





Auf den großen Siedlungsplätzen des späten Magdalénien richteten sich die Menschen für einen Großteil des Jahres ein. Als Arbeitsplatten, Sitze oder Heißsteine sowie zur Bodenisolierung nutzten sie Schieferplatten und andere große Steine. Das Foto zeigt die Ausgrabungen des deutschen Fundplatzes Gönnersdorf in den 1960er und 1970er Jahren.

untersuchte Fundplätze im Rheinland, in Nordfrankreich und in Südbelgien erneut unter die Lupe. Sie kategorisierte sämtliche Befunde, um die jeweilige Ressourcennutzung, die Ernährung, das Siedlungsverhalten sowie die verwendeten Technologien zu analysieren. Insgesamt ergaben sich dabei 90 Veränderungen. So ließ sich der Prozess minutiös in den einzelnen Lebensbereichen nachvollziehen und damit erstmals ein eventueller Einfluss des Klimas überprüfen. Akkumuliert ergeben die Veränderungen eine Grafik, in der sich die Dynamik des Verhaltenswandels widerspiegelt (siehe »Innovation und Klima«, links).

Die Überlebensstrategie in der Eiszeit lautete: Alles, was essbar ist, wird gegessen

Vor rund 15 500 Jahren war die Kultur des späten Magdalénien europaweit verbreitet. Die Vorfahren dieser Menschen waren Pioniere gewesen, die nach der maximalen Vereisung vor etwa 26 000 bis 20 000 Jahren das Überleben in den kalten Steppen perfektioniert hatten. Unter anderem unterwarfen sie offenbar alle Lebensbereiche strengen Regeln, wie es beispielsweise ihre Waffentechnik verrät: In ganz Europa jagte man mit Speeren, deren Köpfe aus Knochen, Elfenbein oder Geweih und darin eingesetzten Steinmesserchen bestanden. Diese Distanzwaffen wurden in Schleudern aus Holz oder Geweih eingelegt, wie sie heute noch bei den australischen Aborigines (und neuerdings als Wurfhilfen für Bälle bei Hundebesitzern) in Gebrauch sind. Solche »Atlatl« verlängerten den Arm eines Werfers und vergrößerten so dank der Hebelwirkung die Reichweite beziehungsweise Durchschlagskraft der Waffe.

Die Menschen des späten Magdalénien waren Meister der Jagd auf Pferde und Rentiere. Sie wussten, wann und wo die großen Herden durchziehen würden, und sie verstanden sich auf die Treibjagd. Dergleichen Kenntnisse

waren überlebensnotwendig, erforderten aber korrekte Überlieferung und Unterweisung. Wer nicht zur rechten Zeit am richtigen Ort eintraf, machte keine Beute.

Fische, Vögel und in geringem Maß auch Pflanzen ergänzten den Speiseplan. Knochenfunde belegen, dass neben Großsäugern auch »Kleinvieh« wie Hasen oder Füchse nicht verschmäht wurden. Schließlich wäre es in jenen strengen Zeiten töricht gewesen, auf Beute zu verzichten – das Eintreffen der Herden mochte sich verzögern, stets drohten Knappheit und Hunger. Ein umsichtiges, nachhaltiges Wirtschaften war also unabdingbar. Nichts durfte verschwendet werden. Tausende kleinster Splitter an den Fundplätzen verraten beispielsweise, dass Knochen zertrümmert und ausgekocht wurden, um auch noch an den letzten Rest Fett zu kommen. Wasser und Gargut kamen dazu in mit Häuten ausgekleidete Gruben und wurden mit heißen Steinen erhitzt.

Ein ähnliches Bild ergibt die Detailanalyse der Siedlungsweise und Mobilität. In der ausklingenden Weichselkaltzeit lebte man für einen Großteil des Jahres in ausgedehnten Niederlassungen und suchte Nahrung in der näheren Umgebung. Vergleiche mit heutigen Völkern der Arktis legen eine Gruppengröße von 25 bis 30 Personen nahe. Auf den Siedlungsplätzen könnten gut zwei bis drei solcher Gruppen gelebt haben, doch das ist letztlich Spekulation. Wie die Behausungen aussahen, lässt sich freilich kaum noch sagen. Doch offenbar wurden Pfosten im Boden verankert – man hat entsprechende Löcher entdeckt. Einige Experten halten zudem große Steinblöcke für Beschwerden von Zeltplanen.

Vor allem im Sommer zogen kleinere Gruppen entlang bestimmter Routen in die Ferne. In dieser Zeit schlugen sie einfache, kleine Lager auf. Manche davon dienten speziellen Aufgaben wie der Jagd oder der Rohmaterialversorgung, was sich im Fundgut widerspiegelt.

Die Menschen legten oft Hunderte von Kilometern zurück, um dann wieder zu denselben Siedlungsplätzen zurückzukehren. Dementsprechend bergen diese Unmengen an Funden. Pfostenlöcher, Bodenpflasterungen und Anhäufungen von Artefakten belegen, dass man die Zelte immer an den gleichen Stellen aufgebaut hat. Die erwähnten großen Plätze waren für sämtliche Lebensbereiche eingerichtet: Hier wohnte, kochte, aß und schlief man. Daneben gab es Flächen für die Verarbeitung der Beute und handwerkliche Tätigkeiten. Offenbar brachten die Jäger von den Exkursionen hochwertige Feuersteinknollen und vorgefertigte Rohlinge mit, die sie nun dort verwerteten.

Andere Siedlungsbereiche waren der Kunst und Ritualen gewidmet; dort entdeckte Zeichnungen von Robben

Solche Frauengravuren vom Typ Gönnersdorf belegen eine europaweit einheitliche Symbolsprache. Diese Zeichnung auf einer Schieferplatte aus Gönnersdorf ist etwa 15 500 Jahre alt.



SONJA GRIMM

belegen die weiten Reisen. Vermutlich bildeten die Begegnungen mit entfernt lebenden Gruppen im Magdalénien die Basis eines europaweiten »sozialen Netzwerks«, in dem nicht nur Rohstoffe, sondern auch Ideen ausgetauscht wurden. Das demonstrieren beispielsweise stilisierte Frauendarstellungen vom Typ Gönnersdorf, einem Fundplatz im Neuwieder Becken. Sie wurden zwischen der Atlantikküste und den Ufern des Don (heute in Russland) tausendfach in gleicher Weise gezeichnet, gemalt, graviert oder zu Plastiken geformt. Ihre Bedeutung ist heutzutage nicht mehr bekannt, doch im späten Magdalénien wurden sie offenbar überall verstanden. Das verlangte nach Kommunikation und nach einem Gefühl gemeinsamer Identität. Auch Prestigegüter wie Schmuckschnecken reisten hunderte bis tausende Kilometer weit. Forscher nehmen an, dass das soziale Netz des späten Magdalénien das Überleben in Krisenzeiten sicherte: Litt beispielsweise eine Gruppe auf Grund schlechter Jagderträge Hunger, mochten entfernte Verwandte ihnen Nahrung geben oder ergiebiger Jagd- und Sammelgründe überlassen.

Als die Temperaturen vor 14 700 Jahren stiegen, hielten die Menschen zwar an vielen dieser Traditionen fest, begannen aber, sie zu variieren. So blieb die geschilderte Aufteilung der großen Siedlungsplätze bestehen, doch wurden die Behausungen in der nächsten Saison jeweils etwas versetzt von der alten Stelle, statt diese zu reinigen und wiederherzurichten. Daher überlagern sich nun aus Sicht des Archäologen die Funde aufeinander folgender Niederlassungen.

Als der Tisch reicher gedeckt war, verschwand die Fettsuppe aus dem Speiseplan

Kaum begann der Wald die Landschaft zu erobern, bereicherten Wildschwein, Auerochse, Rothirsch, Reh und Elch die Nahrungspalette. Diese Anpassung vollzog sich regional unterschiedlich – je nach dem Grad des Landschaftswandels. So wuch die Grassteppe im südlicher gelegenen Pariser Becken viel früher als im Rheintal oder in den Höhenlagen der Mittelgebirge. Wo sich aber die Ernährung umstellte, lässt sich ein deutlich sorgloserer Umgang mit den Ressourcen nachweisen. Der Tisch war nun offenbar reichlicher gedeckt, und die Menschen der Übergangszeit fühlten sich sicher versorgt. Kleineren Säugetieren stellten sie seltener nach, und auch die Fettsuppe war nicht mehr gefragt.

Statt Knochensplittern graben Archäologen an Plätzen dieser Zeit verkohlte Knochen aus. Nach Grimms Meinung war dies eine Form der Entsorgung: Weil erlegte Tiere nicht mehr bis zum Letzten verwertet wurden, drohten die Reste zu verwesen und Raubtiere sowie Ungeziefer anzulocken. Allerdings hatte dieser vergleichsweise verschwenderische Umgang mit Nahrung auf Dauer keinen Bestand. Die Federmesser-Gruppen nahmen vor etwa 13 800 Jahren, also gut ein Jahrhundert nach dem Kälteeinbruch, zumindest Kleinsäuger wieder auf den Speiseplan. Dazu zählte insbesondere der Biber, was vermuten lässt, dass dessen fettreicher Schwanz wieder gekocht wurde.

Mit den Beutetieren und der Umgebung wandelten sich die Bewaffnung und die technologisch-handwerklichen

Traditionen. Denn die auf Herdenjagd im offenen Gelände spezialisierten Magdaleniénjäger mussten lernen, sich an einzelne Tiere im Wald anzupirschen. Reine Steinspitzen lösten mehr und mehr die aus Stein und Geweih zusammengesetzten ab. Ob ein Mangel an dem Rohmaterial Geweih der Grund war – etwa weil die Rentiere abwanderten –, wissen wir nicht. Möglich wäre aber, dass sich Pfeil und Bogen bereits anschickten, dem Speer als Distanzwaffen den Rang abzulaufen. Wann genau erstere aufkamen, ist nicht leicht zu klären, weil hölzerne Artefakte nur äußerst selten erhalten sind. Die ältesten bekannten Schäfte sind fast 3000 Jahre jünger. Neben möglichen steinernen Pfeilspitzen gibt es aber einen weiteren Hinweis auf die Pfeilnutzung bei den Federmesser-Gruppen: so genannte Pfeilschaftglätter (siehe Bild rechts). Das sind flache, gerillte Steinwerkzeuge, die offenbar paarweise zusammengehörten. Experten glauben, dass damit Schäfte begradigt wurden. Es existieren auch vage Hinweise auf den Gebrauch von Pfeil und Bogen bereits im Magdalénien.

Die veränderten Jagdbedingungen erforderten neue Waffentechnologien

Pfeilspitzen waren einfacher zu fertigen als die in Geweih oder Knochen eingesetzten Steinmesserchen der Magdaleniénspeere. Denn die erforderten einen mehrstufigen Arbeitsprozess, der möglicherweise durch Konventionen gesellschaftlich verankert war. Zunächst musste man die Feuersteinkerne dafür so bearbeiten, dass stumpfe, stabile Kanten entstanden. Von denen wurden dann lange Klingen mit Werkzeugen aus Geweih abgeschlagen. Für Speerspitzen taugten diese noch nicht, denn entsprechend der Form des Kerns waren sie leicht gebogen. Man hat daraus deshalb kürzere Stücke abgebrochen und diese fein bearbeitet, bis sie das richtige Maß und die geradezu genormte Gestalt für den Speerkopf aufwiesen. Die Jäger der Federmesser-Gruppen betrieben deutlich weniger Aufwand. Sie schlugen die Ausgangsstücke für ihre Pfeilspitzen mit Steinen direkt von den Kernen ab und brachten sie dann in die gewünschte Form. Diese Vorgehensweise war pragmatisch, die einheitliche »Norm« entfiel, was sich an einem breit gefächerten Formenspektrum zeigt. Auch an das verwendete Rohmaterial wurden keine besonderen Anforderungen mehr gestellt, so dass man sich überwiegend mit Gesteinen begnügen konnte, die man vor Ort vorfand.

Dieser Pragmatismus spiegelt sich auch in den Federmesser-Lagerplätzen wider: Wo man wohnte, arbeitete man auch; eine Differenzierung in Funktionsbereiche gab es kaum noch. Offenbar wurde sogar die Tradition der großen Gemeinschaftslager für mehrere Gruppen und längere Zeit aufgegeben. Deshalb finden sich auch keine Hinweise mehr auf feste Unterkünfte, nur noch einfache

SOLJA GRIMM



So genannte Pfeilschaftglätter waren zumeist Sandsteine, mit einer mittigen Rille. Paarweise genutzt halfen sie, die Schäfte von Pfeilen zu begradigen.

Feuerstellen. Binnen Tagen oder Wochen zogen die Menschen weiter. Zwar kehrten sie an manche Orte immer wieder zurück, vielleicht weil sich dort besonders reiche Jagdgründe boten. Dann schlugen sie ihre Zelte neben dem letztjährigen Platz auf, wie das Nebeneinander der Fundkomplexe zeigt.

Obwohl die Menschen jetzt sehr viel mobiler waren, legten sie dennoch deutlich kürzere Distanzen zurück als ihre Vorfahren. Vielleicht waren aufwändige Fernreisen schlicht nicht mehr erforderlich, da man auf höherwertige Feuersteinqualitäten verzichten konnte. Überregionale Kommunikationssymbole wie die erwähnten Frauenstatuetten waren schon mit der Erwärmung vor 14700 Jahren mehr und mehr außer Gebrauch gekommen – nun verschwanden die weit gespannten sozialen Netze des Mag-

Die Symbole überregionaler Kommunikation verschwanden. Lokalkolorit ersetzte die europaweite Einheitskultur des Magdalénien

Magdalénien offenbar ganz. Statt europaweiter Einheitskultur herrschte Lokalkolorit!

Zwar ist diese Chronologie präziser als die bislang bekannte, doch wichtige Fragen ließen sich damit noch nicht beantworten. Ein derart tief greifender Gesellschaftswandel bedeutete ein großes Wagnis. Wer Ressourcen und Fernkontakte nicht mehr nutzt, verliert zwangsläufig auch das Wissen um deren Möglichkeiten. Niemand aber konnte abschätzen, wie sich Klima und Landschaft langfristig entwickeln würden. Gab es Abwägungen zwischen Tradition und Innovation? Oder dominierten langsame Anpassungsprozesse, die niemandem bewusst waren?

Indem Grimm das jeweils erstmalige Auftreten einer Veränderung im archäologischen Befund ermittelte, vermochte sie den Wandlungsprozess noch detaillierter darzustellen. Demnach spielte es insbesondere eine große Rolle, welche soziale Einheit von einer Verhaltensänderung primär betroffen war. So berührte ein Wechsel der Waffentechnik zunächst nur die handwerklich Tätigen und die Jäger. Das damit verbundene neue Nahrungsangebot wie auch die indirekten Auswirkungen auf die Lagerplatzgestaltung und die Rohstoffversorgung hingegen betrafen alle.

Demnach gab es vier Wandlungsphasen unterschiedlicher Intensität und Dynamik. Vor 16 000 Jahren (zu Beginn des untersuchten Zeitraums) traten für fast 3500 Jahre die beschriebenen Neuerungen als Werk einzelner Vordenker auf, als gesamtgesellschaftliches Phänomen aber setzten sie sich oft nicht direkt durch. Der neue Ressourcenreich-

möglicherweise in eine ernsthafte Krise, was die geringe Zahl archäologischer Funde aus dieser Phase erklären würde. Andererseits markierte der Kälteeinbruch den kulturellen Wendepunkt in die Federmesser-Zeit. Eine mögliche Erklärung hierfür lautet: Das bereits angeschlagene Gesellschaftssystem des Magdalénien brach endgültig zusammen, weil jene, die sich statt auf Verhaltensregeln auf ihre eigenen Stärken verließen, nun bessere Überlebenschancen hatten.

Nach zwei vermutlich chaotischen Jahrhunderten begann vor 13 800 Jahren die Neuorientierung. Die wieder expandierende Bewaldung ging mit einem gewaltigen Entwicklungsschub einher: Viele der in den letzten fast 1000 Jahren entwickelten, aber erst sporadisch verbreiteten Innovationen wie Pfeil und Bogen setzten sich nun durch. Auf deren Basis bauten Jäger-Sammler-Gruppen neue Existenzen auf. Dies geschah regional ganz unterschiedlich, je nachdem welche Strategie Erfolg hatte. Während manche Gruppen im Rheinland schon die Federmesser fertigten und damit den Rothirsch jagten, stellten andere im französischen Sommetal mit einem größeren Spektrum an Jagdwaffen dem Auerochsen nach. So entstand ein Patchwork verschiedener, wenngleich ähnlicher Kulturausprägungen in Nordwesteuropa.

Erst nachdem sich die klimatischen und landschaftlichen Verhältnisse stabilisiert hatten, nahmen die Einzelgruppen wieder Kontakt zueinander auf und etablierten im Lauf der folgenden 800 Jahre das Gesellschaftssystem der Federmesser-Gruppen, das weitaus flexibler war und mehr Raum für Entwicklungen und Entscheidungen ließ als das des Magdalénien.

Insbesondere zeigt die Datenanalyse, dass der Gesellschaftswandel keineswegs synchron zu den klimatischen Veränderungen ablief, sondern oftmals mit einer Verzögerung von etwa einem Jahrhundert auftrat. Gesellschaftssysteme halten offenbar selbst derart starken Veränderungen der Umweltbedingungen erstaunlich lange stand. Sogar die zweifellos dramatischen Kälteeinbrüche ließen traditionelle Verhaltensmuster und Wertesysteme erst kollabieren, nachdem individuelle Verhaltensänderungen über Jahrhunderte hinweg Alternativen aufgezeigt hatten. Soziale Faktoren, die Stabilität eines gesellschaftlichen Regelwerks, seine Traditionen und die Mechanismen, die es regulieren, beeinflussten am Ende der Eiszeit die Entwicklung der Menschheit stärker als das Klima. ◀

QUELLEN

Grimm, S. B.: Resilience and Re-Organisation of Social Systems during the Weichselian Lateglacial in Northwest-Europe. An Evaluation of the Archaeological, Climatic, and Environmental Records (Mainz, in Vorbereitung)

LVR-LandesMuseum Bonn (Hg.): Eiszeitjäger. Leben im Paradies. Europa vor 15 000 Jahren. Begleitbuch zur Ausstellung »Eiszeitjäger – Leben im Paradies? Europa vor 15 000 Jahren«. Nünnerich-Asmus Mainz 2014

Sirocko, F. (Hg.): Wetter, Klima, Menschheitsentwicklung. Von der Eiszeit bis ins 21. Jahrhundert. Theiss, Stuttgart 2009

Von Koenigswald, W.: Lebendige Eiszeit. Klima und Tierwelt im Wandel. Primus, Darmstadt 2002



MICHAEL STÜDINGER / NASA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

tum verleitete vor 14 700 Jahren zwar dazu, das europaweite System aus Regeln und Normen zu lockern, doch insgesamt hielten die Menschen des späten Magdalénien weitgehend an ihrem tradierten Gesellschaftssystem fest. Es gab beispielsweise noch überall die gleichen Steingeräte: Kratzer zur Bearbeitung von Tierhäuten sowie Stichel und Bohrer für vielerlei Tätigkeiten. Einige Wanderrouten wurden vermutlich ebenfalls weiterhin beibehalten.

Als es vor 14 000 Jahren plötzlich wieder sehr kalt wurde und die Trockensteppe teilweise die Wälder zurückdrängte, waren Fertigkeiten wie das Auskochen von Knochen in Vergessenheit geraten. Und was nutzte es, dass die Rentierherden im Herbst wieder durch das Land zogen, wenn niemand mehr ihre Routen kannte oder wusste, wie man große Treibjagden organisiert? Die damit einhergehende Ressourcenverknappung brachte die Jäger-Sammler-Gesellschaften des späten Eiszeitalters

Großer Auftritt kostet Geld.



Wissen ist Geld.

MONEY  Solider als Deutschland: Die sichersten Aktien aus der Schweiz, Dänemark und Schweden  Kursziel 100 Prozent! Blackberry-Aktien kaufen!

FOCUS MONEY DAS MODERNE WIRTSCHAFTSMAGAZIN www.focus-money.de



Rudolf Simek
VINLAND!

Wie die Wikinger Amerika
entdeckten
C.H. Beck, München 2016
160 S., € 16,95

GESCHICHTE AMERIKAS FRÜHE ENTDECKER

Archäologische Funde und Sagen verraten, wie die Wikinger über Island und Grönland bis nach Amerika kamen.

▶ Haben die Wikinger schon um das Jahr 1000 Amerika entdeckt – also fast 500 Jahre, bevor Christoph Kolumbus auf der Insel San Salvador landete? Dies treibt Forscher bereits seit dem

19. Jahrhundert um. Zu dem Thema sind unzählige Veröffentlichungen erschienen.

Auch der Bonner Skandinavist Rudolf Simek nimmt sich des Rätsels an. Im vorliegenden Buch schildert er die Geschichte der Entdeckung Amerikas durch die Wikinger, wobei er sich auf mittelalterliche Erzählungen – die isländischen Sagas – und auf archäologische Funde stützt, die seit den 1960er Jahren vorliegen. Dabei präsentiert der Autor verschiedene Denkansätze, die

er für ein breites Publikum verständlich aufbereitet darlegt.

Sehr gut lesbar umreißt Simek in elf Kapiteln die Entdeckungsreisen der Wikinger, dem Wortsinn nach vermutlich Seeräuber oder Seekrieger. Eingangs geht er kurz auf den spektakulären Siedlungsfund in L'Anse aux Meadows an der Nordspitze Neufundlands ein, lenkt den Blick des Lesers dann aber zunächst zurück nach Europa. Die folgenden Kapitel erläutern das Expansionsstreben der früh-

mittelalterlichen Skandinavier innerhalb Europas, deren Suche nach neuen Siedlungsgebieten, und liefern einen differenzierten Blick auf die Herkunft der Entdecker. Nachvollziehbar legt der Autor dar, dass es sich bei den Wikingern nicht nur um Piraten, sondern überwiegend um Bauern gehandelt haben muss, die Eirik dem Roten von Island aus nach Grönland folgten, um dort eine neue Lebensgrundlage zu finden.

Im Zentralteil stellt Simek die beiden Haupt-



Wikingerschiffe waren durchaus hochseetauglich. Zu ihren Vorteilen gehörten der geringe Tiefgang, die große Wendigkeit und das hohe Tempo.

ISTOCK / SYLPHIE_7

texte über die Fahrten der Nordleute – die Saga von Eirik dem Roten und die Saga von den Bewohnern Grönlands – quellenkritisch gegenüber und extrahiert den historischen Aussagewert dieser literarischen Auftragsarbeiten des 13. Jahrhunderts. Er macht deutlich, dass die neu entdeckte Welt – das Vínland – hier in stark idealisierter Form als Gelobtes Land überhöht wird. Auch wenn die Sagas als eine Art historischer Roman angesehen werden müssen, kann Simek zahlreiche Be-

lege dafür finden, dass isländische und grönländische Siedler die Neue Welt erreichten. Neben einzelnen Haushaltsgegenständen oder Resten von Schmuckstücken sind es vor allem die Überreste in L'Anse aux Meadows selbst, die für den Autor keinen Zweifel daran lassen, dass es sich bei den Siedlern um Skandinavier gehandelt haben muss. Die Bauten dort scheinen ein Basislager gewesen zu sein, von wo aus Expeditionen in Richtung Süden stattfanden.

Spannend sind die Darstellungen zum Schiffbau sowie den nautischen Fähigkeiten der nordischen Seefahrer – und ihr dadurch geprägtes Weltbild. Letzteres hat Eingang in die mittelalterliche Geografie gefunden, was mit sehr anschaulichen, wenngleich etwas klein gedruckten Karten illustriert wird.

Die informativen Texte Simeks und die immer wieder eingestreuten Auszüge aus den Sagas ergeben eine gelungene Mischung – eine bereichernde Lektüre, die zu dem ein-

oder anderen Blick in den Atlas anregt. Da die einzelnen Kapitel in sich abgeschlossene Einheiten darstellen, kommt es hin und wieder zu Redundanzen, die bei einem Buch dieses knappen Umfangs nicht zwingend erforderlich sind. Auch geht das Werk nicht auf die neuesten mutmaßlichen Wikingerfunde in Amerika ein. Insgesamt jedoch ist der Band, den ein Glossar mit Personen- und Ortsnamen sinnvoll ergänzt, sehr lesenswert.

Bernadett Fischer ist Historikerin und arbeitet in Bonn.

WISSENSCHAFTS- GESCHICHTE **BETRÜGER ODER OPFER EINES KOMPLOTTS?**

Ein neuer Sachbuchkrimi befasst sich mit dem geheimnisvollen Leben des Biologen Paul Kammerer.

► War Paul Kammerer ein Fälscher oder Opfer einer Verschwörung? Der umstrittene Biologe forschte vor rund 100 Jahren in Wien. Er behauptete, seine Experimente zeigten, dass erworbene Eigenschaften der Eltern an die nächste Generation weitervererbt werden können. Damit begab er sich mitten in einen Diskurs zwischen Neodarwinisten einerseits, die einen solchen Vererbungsmechanismus verneinten, und Neolamarckisten andererseits, die Darwins Evolutionstheorie in Zweifel zogen. Diese Debatte strahlte weit über die Wissenschaft hinaus und prägte schließlich sogar politisch-ideologische Auseinandersetzungen zwischen rechten und linken Kräften. Nachdem Kammerer bezichtigt wurde, eines seiner Präparate manipuliert zu haben, nahm er sich das Leben.

Noch heute sind die Meinungen über den Biologen geteilt. Manche bezeichnen ihn als Betrüger, andere als Vater der Epigenetik. Diese Forschungsdisziplin befasst sich mit Faktoren, die Genaktivitäten verändern, ohne dabei in die DNA-Sequenz einzugreifen. Die

Epigenetik wurde immer wieder als möglicher Mechanismus ins Spiel gebracht, über den Organismen erworbene Eigenschaften genetisch fixieren und an ihre Nachkommen weitergeben.

Klaus Taschwer rollt den Fall nun im vorliegenden Buch neu auf. Der Wissenschaftsjournalist erzählt Kammerers Lebensweg von der Geburt bis zum



Tod, wobei er sich auf erhalten gebliebene Briefe, Personalakten, Tagebucheinträge, Zeitungsartikel und weitere teils vorher unbekannte Quellen stützt.

Dabei geht Taschwer auf verschiedene Aspekte ein. Zum einen verfolgt er den wissenschaftlichen Werdegang Kammerers, der bereits als Jugendlicher einen halben Zoo mit Nagern, Alligatoren, tropischen Sumpfschildkröten und anderen exotischen Tieren unterhielt. Zum anderen wirft er einen Blick auf Kammerers Liebesaffä-

ren mit bekannten Persönlichkeiten, etwa der mutmaßlichen Kaisertochter Helene Nahowski und Gustav Mahlers Witwe Alma Mahler. Zudem zeichnet der Autor ein lebendiges Bild der Wiener Gesellschaft von den 1880er bis in die 1930er Jahre. Er macht die damals zunehmend antisemitische und nationalistische Stimmung an der Universität Wien greifbar. Es war die Zeit, in der Rassenideologen damit begannen, ihre Ideen mit sozialdarwinistischem Gedankengut zu untermauern. In diesem Umfeld begab sich Kammerer – Halbjude, Pazifist und Sozialist – mit seinen unkonventionellen politischen und wissenschaftlichen Äußerungen auf gefährliches Terrain.

Kammerer führte Experimente an Amphibien durch. Er arbeitete unter anderem mit Geburtshelferkröten, die sich normalerweise an Land paaren und dort auch ihren Laich austragen. Der Biologe zwang die Tiere jedoch dazu, durchgehend im Wasser zu leben. Dabei meinte er zu beobachten, dass männliche Individuen als Anpassung an den neuen Lebensraum so genannte Brunstschwielen entwickeln, die sie normalerweise nicht besitzen. Mit diesen verhornten, dunklen Hautstellen an den Vorderextremitäten sollten sich die Tiere bei der Kopulation im Wasser besser festhalten können. Die neuen Brunstschwielen, so Kammerer, würden dann an die folgenden Generationen vererbt.

Das Präparat einer solchen Geburtshelferkröte

wurde Kammerer jedoch zum Verhängnis. Es wies dort, wo sich angeblich die Brunstschwielen befanden, Spuren von Tusche auf. Das nährte den Verdacht, der Biologe habe die dunklen Hautstellen mittels des Einspritzens von Farbe künstlich erzeugt.

Bis heute ist umstritten, ob Kammerer die Veränderungen selbst vorgenommen hat oder ob er einer Verschwörung zum Opfer fiel. Taschwer präsentiert in seinem Buch eine neue These; er nennt mögliche Verdächtige einer mutmaßlichen Verschwörung beim Namen. Hierbei bringt er Aspekte in die Diskussion ein, die so bisher noch nicht bekannt waren. Dennoch kann auch er die Frage nicht endgültig beantworten.

Alles in allem überzeugt »Der Fall Paul Kammerer« als spannender, leicht verständlicher Sachbuchkrimi. Wer sich für die gesellschaftlichen Verhältnisse der damaligen Zeit interessiert, kommt auf seine Kosten, zumal Taschwer über viele Intellektuelle berichtet, die Kammerers Lebensweg streiften: Sigmund Freud, Gustav Mahler und Albert Einstein beispielsweise.

Einige Fragen zu Biologie bleiben jedoch offen. So geht der Autor nicht genauer darauf ein, wie wahrscheinlich es aus heutiger Sicht ist, dass Kammerers Experimente tatsächlich so abliefen wie von ihm behauptet. Auch behandelt Taschwer nur am Rand, wo die Epigenetik aktuell steht.

Miriam Plappert ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Tübingen.

MEDIZIN UNTER DER GÜRTELLINIE

Vergnüglich, anschaulich und taktvoll zugleich führt dieses Buch in die Urologie ein.

► Wer »untenrum« völlig gesund ist und nicht gerade Medizin studiert, dem wird eher nicht danach gelüsten, ein Buch über Urologie zu lesen. Und wer auf einer Party erzählt, dass er eine urologische Praxis betreibt, dürfte kaum zum Frauenschwarm avancieren. Der Urologe Volker Wittkamp jedenfalls ist davon überzeugt, dass allenfalls die Kollegen von der Proktologie – der Lehre von den Erkrankungen des



Mastdarms – es noch schwerer haben, nach erfolgter Berufsauskunft einen viel versprechenden Smalltalk zu führen. Urologen, so Wittkamps nüchterne Bestandsanalyse, haben nun einmal ein

gesteigertes Interesse an allem, was irgendwie mit Urin in Kontakt kommt. Und das sind in der Regel sehr intime Regionen, die häufig mit Ekel assoziiert werden. Darüber ebenso informativ wie unterhaltsam zu schreiben, ist alles andere als einfach. Wittkamp ist es gelungen.

Der Autor, Jahrgang 1983, arbeitet seit fünf Jahren als Assistenzarzt an einem Krankenhaus in Bergisch Gladbach und steht kurz vor dem Abschluss seiner Facharztprüfung. Dass er sich als Indie-DJ sowie als Kolumnist »Doc Intro« bei der gleichnamigen Musikzeitschrift bereits einen Namen gemacht hat, merkt man diesem wunderbar locker geschriebenen Buch an.

»Indie« steht für »Independent«. Ein Indie-DJ legt also bevorzugt Musik auf, die nicht vom zeitgenössischen Geschmack abhängt und gern neue, eigenwillige künstlerische Wege geht. Das ist gewiss keine schlechte Vorschule, um über den urologischen Alltag mit etwas mehr Schwung als üblich zu berichten.

Das Buch beinhaltet sechs Themenschwerpunkte: Penis, Hoden, Sperma und Hormone, Blase, Niere sowie Prostata. Nur zwei Kapitel – jene über Blase und Niere – betreffen beide Geschlechter gleichermaßen. Die Darstellung könnte also mit einigem Recht den Titel tragen »Was Männer wissen müssen«. Doch schnell wird deutlich:



Spektrum der Wissenschaft KOMPAKT

Ab 23.12. 2016 bei Ihrem Zeitschriftenhändler!

Print | 5,90 €
Download | 4,99 €

www.spektrum.de/aktion/achtsamkeit

Bei dieser Lektüre geht es auch darum, was Frauen unbedingt über Männer wissen sollten.

Wittkamp, vom Temperament her offenbar eine rheinische Frohnatur, gelingt es offenherzig und taktvoll zugleich, über gemeinhin als peinlich bis anstößig empfundene Themen zu plaudern: Belastungsinkontinenz, Hodentrauma, Masturbation oder Tripper. Wenn er jedoch auf Blasen- und Hodentumoren, Hodenkrebs oder Niereninsuffizienz

zu sprechen kommt, ist selbstverständlich Schluss mit lustig. Dann fehlt es Wittkamp nie an der gebotenen Empathie für die Patienten. Wo immer möglich, rückt er das Positive in den Vordergrund: Den Risiken sowie dem entsetzlichen Leid stellt er die guten Chancen zur Prophylaxe gegenüber sowie die sich permanent verbessernden Therapiemöglichkeiten. So erinnert er auf dem »Merkzettel«, der den Themenschwerpunkt »Ho-

den« beschließt, daran, dass Hodentumoren mittlerweile in 95 Prozent der Fälle komplett heilbar sind.

Eingeleitet wird jedes Kapitel durch einen recht vergnüglich zusammengestellten Fragebogen. Als Leser muss man da häufig schmunzeln. Unter der Rubrik »Familienstand« beispielsweise findet sich beim Penis der Eintrag »allein-stehend«. Beim Sperma kommt unter »Beste Freunde« die Schwimmlegende Michael Phelps zu postolympischen Ehren. Und bei der Prostata heißt es unter »Beruf«:

»Vorsteherdrüse – das ist wie Türsteher, nur entscheide ich, was raus darf«. Etwas deftiger dann das »Motto« des Hodens: »10 Zentimeter weiter und ich wär' im Arsch«. Gewiss, dieser Humor wird nicht jedem gefallen. Doch er eignet sich durchaus dafür, etwaige Berührungängste abzubauen. Dies sogar im wörtlichen Sinn.

In den Zentralteilen der Kapitel verdeutlicht Wittkamp die wichtigsten funktionellen Abläufe und Störungen jener Organe, die für die urologische Praxis relevant sind. Interessierte Laien finden hier gewissenhaft aufbereitete Informationen nebst zugehörigen Abbildungen. Medizinischen Fachjargon spart der Autor weitgehend aus oder übersetzt ihn allgemein verständlich. Zudem gibt er gute Ratschläge, wie man »fit im Schritt« bleibt. Mit Nachdruck betont er etwa, dass Rauchen nicht nur das Risiko für Lungentumoren erhöht, sondern auch für Blasenkrebs.

Der Autor warnt vor medizinischen Onlinebera-

tern à la »Dr. Google«.

Nichts könne eine leibhaftige ärztliche Untersuchung ersetzen. »Keine Diagnose durch die Hose« lautet die goldene Regel der Urologen. Und was nicht ersichtlich ist, muss ertastet werden. Hier plaudert Wittkamp aus dem Nähkästchen: Bei der so genannten Hafensrundfahrt (der rektalen Untersuchung mit dem Finger) fühle sich eine gesunde Prostata ähnlich prall und elastisch an wie ein Mediumsteak.

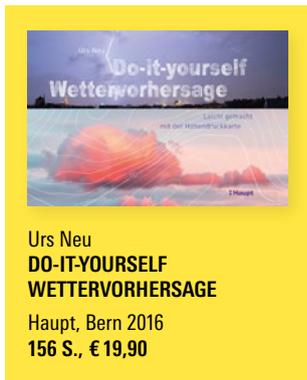
Der Autor vermag anschaulich zu erklären und hat immer eine besonders interessante oder skurrile Patientengeschichte parat. Etwa die vom Harnröhrenwels: Diese kleinen tropenfische (*Vandelliinae*) verbeißen sich normalerweise in den Kiemen größerer Fische, um von deren Blut zu leben. Angelockt werden sie vom Harnstoff, den die Wirtsfische durch ihre Kiemen ausscheiden. Manchmal verirrt sich so ein Parasit deshalb in die Harnröhre eines badenden Menschen, dringt in die Blase ein und verendet dort – mit oft bedrohlichen Folgen für den Betroffenen. Ja, Langeweile kommt bei Urologen offenbar nie auf.

Das Werk gibt einen überzeugenden Einblick in einen besonders heiklen und vielseitigen Bereich sowohl des menschlichen Körpers als auch der Medizin. Darüber hinaus hilft es, die Scham vor einem Besuch beim Urologen zu überwinden. Man kann es mit Fug und Recht als Pflichtlektüre für Männer und Frauen empfehlen.

Reinhard Lassek ist promovierter Biologe und arbeitet als Journalist und Publizist in Celle.

METEOROLOGIE EINMAL WETTERFEE SEIN

So erhalten Sie Ihre eigene Vorhersage.



Dank des Wetterberichts im Fernsehen und diverser Wetter-Apps für das Smartphone bekommen wir jederzeit »verzehrfertig« geliefert, welches Wetter die nächsten Tage bringen werden. Mit dem vorliegenden Buch will Geograf Urs Neu dazu anregen, aus

der reinen Konsumentenhaltung herauszutreten und sich mit frei im Internet verfügbaren Wetterkarten selbst an Prognosen zu versuchen. In sechs anschaulich bebilderten Kapiteln erläutert er die Grundlagen der Meteorologie; in einem finalen Abschnitt kann man das Erlernte an Beispielen üben.

Sehr in die Tiefe geht das Werk nicht, dies ist aber auch nicht die Absicht des Autors. Vielmehr vermittelt er seinen Lesern grob, was es braucht, um die Wetterentwicklung einzuschätzen. Wer schon weiß, wie die Polarfront entsteht, was ein Höhentief und was Kaltlufttropfen auszeichnet, wird bei der Lektüre nicht viel Neues erfahren. Die anderen dagegen werden nach dem Durcharbeiten des Bands den Wettermoderator im Fernsehen besser verstehen – und sich vielleicht tatsächlich auch einmal selbst an einer Prognose versuchen. Tim Haarmann

EVOLUTION KATASTROPHEN ALS KATALYSATOREN

Kaum etwas hat so sehr die Geschichte des Lebens geprägt wie der wechselnde Sauerstoffgehalt der Atmosphäre.

Die Debatte zwischen Katastrophismus und Aktualismus ist ziemlich genau 200 Jahre alt. Der Katastrophismus, begründet vor allem vom französischen Naturforscher Georges Cuvier (1769–1832), postulierte, katastrophale Naturereignisse hätten eine herausragende Bedeutung für die Entwicklung des Lebens



Peter Ward, Joe Kirschvink
EINE NEUE GESCHICHTE DES LEBENS

Wie Katastrophen den Lauf der Evolution bestimmt haben

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel
DVA, München 2016
544 S., € 29,99

gehabt. Die Vertreter des Aktualismus hingegen, etwa der britische Geologe Charles Lyell (1797–1875) und der französische Zoolo-

ge Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772–1844), gingen davon aus, die heute zu beobachtenden Vorgänge hätten sich ebenso in der Vergangenheit abgespielt – die Evolution sei also geradlinig verlaufen. Lange Zeit hatten die Aktualisten die Nase vorn, doch heute weiß man: Allein aus der Gegenwart lässt sich die Vergangenheit nicht verstehen; Katastrophen haben eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung des Lebens gespielt.

Dieser Ansicht sind auch der Paläontologe Peter Ward und der Geobiologe Joe Kirschvink. Sie gehen davon aus, »dass die Geschichte des Lebendigen durch Katastrophen stärker beeinflusst wurde als durch die Summe aller anderen

Kräfte«. Auf gut 500 Seiten wagen die beiden amerikanischen Wissenschaftler deshalb den Versuch, eine neue und umfassende Geschichte des Lebens zu schreiben, die insbesondere die Auswirkungen katastrophaler Naturereignisse im Blick hat. Als Vorbild diente ihnen nach eigener Aussage das Buch »Leben: eine Biografie« (1999) des britischen Paläontologen Richard Fortey, das wissenschaftlich allerdings nicht mehr auf dem aktuellen Stand ist.

Ward und Kirschvink konzentrieren sich weniger auf die oft beschriebenen Katastrophen wie Meteoriteneinschläge oder Vulkanausbrüche. Sie sind vielmehr davon überzeugt, dass der chemisch aggres-

Unsere Neuerscheinungen!



Troja: Erinnern »Illiad« und »Odyssee« an den Kulturkollaps? • Hatuscha: Eine Hauptstadt verschwindet • Griechenland: Licht am Ende der »dunklen Jahrhunderte« • Levante: Welthandel in der Krise • € 8,90; Erscheint am 23. 12. 2016



Frühe Erde: Als die Meere vom Himmel fielen • Saturnmond: Heißes Wasser in der Tiefe des Enceladus • Bausteine der Planeten: Urtümliche Meteoriten • Exoplaneten: Besser als die Erde • Exzentrische Bahnen: Gibt es Planet X? • € 8,90



Genregulation: Das interaktive Buch des Lebens • Kognition: Gibt es ein Gen für Intelligenz? • Wovon unsere Lebenszufriedenheit abhängt • Neuropsychologie: Der Schalter für Sucht • Gene und Persönlichkeit • € 8,90

Ausgewählte Sonderhefte auch im PDF-Format

Hier bestellen:

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

www.spektrum.de/neuerscheinungen

sive Sauerstoff und sein wechselnder atmosphärischer Gehalt die Entstehung und Ausbreitung des Lebens maßgeblich prägten.

Den Autoren zufolge war die Ausbreitung der Sauerstoff produzierenden Zyanobakterien vor zirka 2,3 Milliarden Jahren eines der folgenschwersten Ereignisse

der Evolution, denn es führte zu einem Absinken der atmosphärischen CO₂-Konzentration und damit zu einer globalen Abkühlung. Erst als der Sauerstoffgehalt infolge des Erscheinens Sauerstoff atmender Organismen wieder sank und sich ein neues Gleichgewicht im weltweiten Koh-

lenstoffkreislauf einstellte, sei der Weg für die Entwicklung weiterer Lebensformen frei geworden.

Auch der Landgang der Tiere fand erst statt, so Ward und Kirschvink, als der Sauerstoffanteil der Atmosphäre dies zuließ. Darüber hinaus sind die beiden Autoren davon überzeugt, auch die kambrische Explosion, also die gewaltige Vermehrung der Tierarten sowie die Entstehung neuer und innovativer »Baupläne« vor zirka 550 Millionen Jahren, sei mit dem steigenden Sauerstoffgehalt einhergegangen. Denn »offensichtlich sind der Sauerstoff- und der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre [...] die wichtigsten Faktoren, die über die Artenvielfalt der Tiere bestimmen«. Dennoch halten sie die kambrische Explosion für »eines der größten paläontologischen Rätsel«.

Neben den fünf großen Massenaussterben in der Erdgeschichte (»Big Five«), die sich nach derzeitigem Wissensstand abgespielt haben, gehen die Autoren von weiteren fünf kleineren Aussterbeereignissen aus. Zudem vergessen sie nicht, auf das aktuelle menschengemachte Massenaussterben hinzuweisen. Hier nehmen sie allerdings eine ziemlich pragmatische Haltung ein und stellen fest, dass wir uns heute auf einem Gipfelpunkt der Artenzahl während der gesamten Geschichte des Lebens befinden. Den Autoren zufolge »lässt sich unmöglich beweisen, welcher Anteil der Lebensformen heute ausstirbt«. Wir könnten demnach nicht entscheiden, ob der derzei-

tige Artenschwund ein größeres, kleineres oder gar kein Massenaussterben sei.

Diese Einschätzung dürfte vielen missfallen, ist aber durchaus keine Einzelmeinung. Auch der Paläontologe Norman MacLeod vom Londoner Natural History Museum hatte sich kürzlich ähnlich geäußert (siehe **Spektrum** Juni 2016, S. 92). Wards und Kirschvinks tröstlich gemeinter Hinweis darauf, dass sich nach jedem Massensterben die biologische Vielfalt erholt »und ein noch höheres Niveau erreicht hat«, bewegt sich allerdings an der Grenze zum Zynismus.

Im letzten Kapitel spekulieren die Verfasser ernsthaft darüber, was mit der Erde in ein oder zwei Milliarden Jahren geschehen könnte – absurd in einer Situation, in der man nicht weiß, ob die Menschheit die nächsten 50 Jahre überleben wird. Es klingt nach dem naiven Fortschritts-optimismus der 1970er Jahre, wenn Ward und Kirschvink fantasieren, »dass unsere Spezies ihren Lebensraum zuerst auf den Mars, dann auf den Asteroidengürtel und am Ende auf andere Sterne erweitert«, um der künftigen Zerstörung des Planeten zu entkommen.

Von diesen Patzern abgesehen ist »Eine neue Geschichte des Lebens« ein äußerst informatives Buch zweier Experten, das mit fachlicher Kompetenz und neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Evolution des Lebens beeindruckt.

Eckart Löhr hat Philosophie und Germanistik studiert. Er lebt in Essen und arbeitet unter anderem als Fachjournalist.

ZYTOLOGIE DIE SCHÖNHEIT DER KLEINSTEN

Zellen sind winzig klein, doch sie funktionieren wie komplexe Metropolen.

Wissenschaftsautor Jack Challoner schickt uns auf eine visuelle Reise durch die faszinierende Welt der Zellen. Sein Buch besticht vor allem durch ästhetische Gestaltung. Es präsentiert auf jeder Seite beeindruckende Mikroskopiebilder, anschauliche Illustrationen und ansprechende Fotos. Die Gesamtstruktur ist sehr übersichtlich und wird durch Doppelseiten mit schwarzem Hintergrund aufgelockert, die Fluoreszenzbilder besonders schön in Szene setzen.



Jack Challoner
DIE ZELLE
Ursprung des Lebens
Theiss, Darmstadt 2016
192 S., € 29,95

Challoner findet den richtigen Ton, biologische Prozesse anschaulich und leicht verständlich zu erklären, ohne dass

die inhaltliche Tiefe dabei verloren geht. Er erzählt von den geschichtlichen Anfängen der Zytologie, stellt die Grundeigenschaften allen Lebens vor und erklärt bildhaft, wie Zellen aufgebaut sind. Dann taucht er routiniert in die komplexen Vorgänge innerhalb der Zelle ein. Von der Zellteilung bis zum Zelltod liefert das Werk eine Art Schnellkurs in Zytologie, der nicht nur einzelne molekulare Mechanismen, sondern auch die evolutionäre Vielfalt des Lebens erläutert. Die Krönung kommt im letzten Kapitel, in dem Challoner durch eine eindrucksvolle Galerie menschlicher Körperzellen führt.

Lisa Vincenz-Donnelly

SciViews

Die besten Wissenschaftsvideos im Netz.



unsplash / Anna Demianenko / CC0

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

www.SciViews.de

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Mit den besten Videos unserer nationalen und internationalen Medienpartner:





Der Hintergrund

Frauen sind in wissenschaftlichen Führungspositionen unterrepräsentiert. Es fehlen jedoch passende Instrumente, um schnell sehr gute und geeignete Wissenschaftlerinnen zu finden.

Das Projekt

AcademiaNet ist eine Datenbank mit Profilen von über 2100 exzellenten Forscherinnen aus allen Fachdisziplinen.

Unser Ziel

Wir wollen Ihnen mit unserem Rechercheportal die Besetzung von Führungspositionen und -gremien mit Wissenschaftlerinnen erleichtern.

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

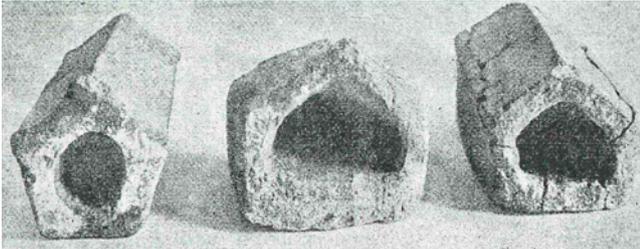
nature

Sie wollen mehr erfahren?

www.academia-net.de

1917

SCHÖNER WOHNEN IN DER STEINZEIT



Tonmodelle von Hütten, 1912 bei Ssalmánowo gefunden.

»Bulgarien hat wertvolle Funde aus der jüngeren Steinzeit aufzuweisen. Vor allen anderen sind diejenigen zu nennen, die über die Wohnung des neolithischen Menschen Aufschluß geben. Bei der Ausgrabung wurden Gegenstände aus Ton gefunden, die man als Modelle von Hütten deuten kann. Es ist schwer zu sagen, welchen Zwecken die sorgsam ausgearbeiteten Modelle gedient haben. Vielleicht handelt es sich um Kinderspielzeug, vielleicht aber auch um Gegenstände zu kultischen Zwecken. Über die Art zu wohnen haben Ausgrabungen noch andere Aufklärung gebracht. Es handelte sich wahrscheinlich um Hütten, die tief in die Erde hineingebaut wurden.« *Prometheus 1420, S. 229–230*

GESCHOSSE IM KÖRPER AUFSPÜREN

»Wir kennen manchen Krieger, der noch Geschossteile in sich trägt. Der eine verspürt nichts davon, der andere klagt bei Witterungswechsel über Schmerzen. Eingeheilte Fremdkörper pflegte man nicht herauszuschneiden, weil das Operieren allerlei Schwierigkeiten bereitete. Es war nämlich früher nicht leicht, die genaue Lage der Teilchen festzustellen. Heute ist man dazu mit Hilfe des Röntgenapparates imstande. Wer Lust hat, sich operieren zu lassen, kann das heute unter viel besseren Aussichten tun als früher.« *Kosmos 1, S. 34*

WIE VÖGEL SEHEN

»In der Vogelnetzhaute finden sich rote und gelbe Ölkügelchen eingelagert, und daraus ergibt sich eine Verkürzung des Spektrums nach dem kurzwelligen Ende, infolgederen die blauen und violetten Töne von schwarzen und grauen nicht mehr zu unterscheiden sind. H. Henning suchte experimentell zu erproben, inwieweit die Verkürzung das Farbsehen beeinträchtigt, und betrachtete zu diesem Zwecke die Vögel des Frankfurter zoologischen Gartens durch eine rotgelbe Brille. Es zeigte sich, daß die Wirkung der Schmuckfarben keineswegs verloren geht, daß sie vielfach sogar eine Aufbesserung erfährt. Die lebhaft gefärbten Papageien zum Beispiel erschienen prächtiger als bei Betrachtung mit unbewaffnetem Auge.« *Prometheus 1419, S. 223*

1967

EINE DRUCKKAMMER FÜR ZELLEN

»Inna Stoyanova, Moskau, konstruierte eine winzige Kammer aus Plastik, deren Wände stark genug sind, um die Zellen im Inneren vor dem Vakuum zu bewahren, das im Elektronenmikroskop herrschen muß. Es gelang ihr, lebende Bakterien zu photographieren, in der Kammer mit Kulturflüssigkeit zu versorgen, und nach deren Entfernung ein zweitesmal aufzunehmen. Aus der Tatsache, daß Teilungsbilder beobachtet wurden, schließt sie, daß die Zellen trotz der Bestrahlung noch lebten. Die Versuche wurden von G. Causey und Mitarbeitern in London wiederholt, der allerdings zu bedenken gibt, daß Zellen kurz vor dem Absterben sich zu teilen pflegen, und daß ein Elektronenstrahl tödlich wirkt, wenn er den Zellkern trifft. Aus diesem Grunde setzt Causey nur das Protoplasma der Bestrahlung aus und konnte so Pseudopodien und Cilien aufnehmen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 1, S. 32*

TEURER METER

»60 % des Welthandels verwenden das Meter, und die USA geraten zu einem Zeitpunkt, in dem man sich Sorgen über Außenhandelsbilanzen macht, in eine Isolation. Andererseits sind die Kosten einer Umstellung so hoch, daß sogar Fürsprecher skeptisch werden. Nach vorläufigen Schätzungen müßten die USA zwischen 50 und 100 Mrd. \$ aufwenden.« *Die Umschau 2, S. 66 (Bis heute ist das metrische System in den USA nicht Standard. Die Red.)*

RAUCHEN UND KREBS – DIE ERSTE METASTUDIE

»Es zeigte sich unter insgesamt 250 000 Personen, fast alle männliche Weiße, daß Zigarettenraucher eine statistisch gesicherte höhere Mortalität haben. Von den Rauchern starben im Vergleich zu den Nichtraucherern beispielsweise 11mal soviel Personen an Lungenkrebs und 12mal soviel an Lungenemphysem. Es bestanden auch Beziehungen zwischen der Menge des Tabakverbrauchs und der Mortalitätsrate, wobei es sich wieder zeigte, daß Zigarettenraucher mehr gefährdet sind als Pfeifen- oder Zigarrenraucher.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 1, S. 31*

RÄTSELHAFE GALAXIENSTRÖME

Titelbild **Spektrum** November 2016

Norbert Meyer, Frankfurt am Main: Leider wird nicht richtig erläutert, was genau die federartige Struktur darstellt, die auf dem Titelbild und dem Aufmacher des Arti-



kels »Unser kosmisches Zuhause« abgebildet ist. Es hat etwas mit Strömen von Galaxien zu tun. Aber ist jede Linie die in die Zukunft gerechnete Spur jeder einzelnen Galaxie? Oder müssen schon mehrere Galaxien zusammen in die gleiche Richtung ziehen, um eine Linie zu bilden? Und was bedeutet es, dass die Linien zu größeren Strömen zusammenfließen?

Antwort der Redaktion: Die feinen Linien veranschaulichen das intergalaktische Strömungsfeld. Sie zeigen im Prinzip an, wohin eine Galaxie sich mit der Zeit bewegen wird, wenn man von der allen Galaxien gemeinsamen kosmischen Expansion absieht. Dabei steht eine Linie nicht unbedingt für eine einzelne Galaxie, sondern eventuell auch für einen Galaxienhaufen.

Die Linien geben eher die lokale Feldrichtung an, ähnlich wie die Feldlinien eines Stabmagneten. Dabei entsprechen die Galaxien etwa den Eisenfeilspänen, mit denen man das gern verdeutlicht.

Im Großen und Ganzen bewegen sich die Galaxien längs der Linien von außen nach innen. Zu dem in den Quellen des **Spektrum**-Artikels angegebenen »Nature«-Aufsatz gehört ein schöner, zirka siebenminütiger Film, der das alles gut erklärt: <http://vimeo.com/pomarede/laniakea>

GRENZE DER NUTZBARKEIT

Agrarforscher entwickeln Nutzpflanzen, denen ein hoher Salzgehalt im Boden wenig ausmacht (»Gegen Salz gefeigt«, **Spektrum** November 2016, S. 66).

Siegfried Stephan, Rheinbach: Für die Agrarkonzerne ist es sicher ein Gewinn, wenn die versalzten Böden einige Jahre länger und mit hohen Erträgen bebaut werden können. Für den Boden bedeutet das allerdings eine erheblich stärkere Versalzung, und irgendwann ist die Grenze der Nutzbarkeit auch für die salztoleranten Pflanzen erreicht. Und dann? Die Natriumionen schlämmen doch bereits jetzt die mineralische Tonfraktion in den Unterboden, der ganz dicht wird, während der lockere Oberboden von Wind und Wasser fortgetragen wird, so dass eine Reparatur der Bodenschäden kaum möglich ist.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht.

HIRNENTWICKLUNG UND HIRNABBAU

Der Anthropologe Dietrich Stout versucht zu klären, wie das Herstellen von Steinwerkzeugen die Entwicklung des Gehirns und der Sprache beeinflusst hat (»Wie man einen Faustkeil macht«, **Spektrum** November 2016, S. 30).

Margarethe Klammler, Lengau (Österreich): Im Zusammenhang mit der Gehirnentwicklung des Menschen und der zunehmenden Werkzeugherstellung und Sprachentwicklung während der Evolution ist auch der umgekehrte Verlauf bei der Alzheimerdemenz interessant. Hierbei verlieren die Menschen die folgenden Fähigkeiten in dieser Reihenfolge:

1. Zu Beginn geht das Verständnis für Zusammenhänge verloren (vergleiche die Beurteilung und Entscheidung, wann welches Werkzeug mit welcher Schlagkraft zur Faustkeilherstellung eingesetzt werden muss).
2. In späteren Stadien kommt die Sprachfähigkeit zum Erliegen (vergleiche den Austausch und die Weitergabe der Erfahrungen in der sozialen Gruppe).
3. Danach ist der Werkzeuggebrauch, zum Beispiel das Essen mit Messer und Gabel, nicht mehr möglich (vergleiche die rein handwerkliche Fähigkeit des Abschlagens).
4. Zuletzt beherrschen Menschen mit Demenz die eigene Körpermotorik nicht mehr, wie das Gehen, Sitzen und Schlucken (vergleiche die Wahrnehmung des eigenen Körpers und Körperposition, welche die Voraussetzung für jeden Werkzeuggebrauch darstellt).



Der erste Faustkeil des Autors aus einem Feuerstein war noch recht ungeschlachtet.

NOTWENDIGE BEREICHERUNG DER PFLANZENZÜCHTUNG

Mit dem neuen Verfahren CRISPR/Cas können Wissenschaftler Organismen sehr präzise gentechnisch verändern und für die Landwirtschaft nutzbar machen (»Gentechnik im Tarnmantel«, *Spektrum* August 2016, S. 54).

Peter Weigl, Burghausen: Der Artikel zeigt am Beispiel der Pilzzucht, wie die neuen Methoden der genetischen Zuchtverfahren, die nicht mehr nachweisbar sind, weil sie nicht über ein fremdes Bakterium die präzisen Veränderungen vornehmen können, die Züchtung bereichern werden. Dass Biobauern lieber mit Saatgut arbeiten, das unkontrolliert im Schrotschussverfahren, auch durch radioaktive und chemische Mutationen hervorgerufen wurden, ist eine schmerzhaft Blutgrätsche. Ohne Ertragssteigerungen durch moderne landwirtschaftliche Methoden wäre schon jetzt kein Platz mehr auf Erden für naturbelassene Flächen, bei der Zunahme der Bevölkerung auf zehn Milliarden in diesem Jahrhundert noch weniger. Kürzlich haben mehr als 100 Nobelpreisträger dazu aufgerufen, die Propaganda von Greenpeace et al. gegen moderne Landwirtschaft aufzugeben. Der offene Brief schließt: »Wie viele von Armut betroffene Menschen in der Welt müssen noch sterben, bevor wir dies als Verbrechen gegen die Menschlichkeit anerkennen?«

SPRACHE UND ETHNIE NICHT GLEICHSETZEN

Die Altertumswissenschaftlerin Luise Loges fragte nach der tatsächlichen Bedeutung der Luwier (»War Troja die Hauptstadt der Seevölker?«, *Spektrum* Dezember 2016, S. 76).

Walter Weiss, Kassel: Mich stört die herablassende Stellungnahme der Verfasserin. Entweder ist ein wissenschaftlicher Beitrag ernst zu nehmen (auch wenn er sich von der Lehrmeinung unterscheiden sollte), dann gehört sich ein solcher Ton nicht. Oder der Beitrag ist nicht ernst zu nehmen, dann verschweigt man ihn besser. Ganz abgesehen davon hätte ich schon etwas fundiertere Angaben gerade über die Luwier erwartet. Einige Fakten:

1. Das Luwische ist eine Weiterentwicklung des Altanatolischen, das sich als erste Tochtersprache vom indoeuropäischen Sprachstamm abgespalten hat. Demzufolge hatte das Altanatolische sehr archaische, ja regelrecht primitive Strukturen. Es gab zum Beispiel nicht drei Genera, sondern nur zwei (commune und neutrum), nur Gegenwart und Zukunft bei den Verben.

2. Obwohl politisch nur das Hethitische recht gut überliefert ist, hat sprachlich in Kleinasien das Luwische einen

sehr breiten Raum eingenommen. Allmählich übernahm insbesondere die hethitische Sprache zahllose Wörter, Strukturen und ganze Wortbildungsregeln aus dem Luwischen, so dass zumindest in sprachlicher Hinsicht die Vorherrschaft des Luwischen in ganz Kleinasien nicht bestritten werden kann.

3. Bei all diesen Betrachtungen sollte man sehr genau zwischen den Sprechern einer Sprache zu bestimmten Zeiten und denjenigen Menschen unterscheiden, die früher, vielleicht sogar als Erste, die Sprache gesprochen haben. Man darf also nie Sprache und Ethnie gleichsetzen.

4. Die einzigen schriftlichen Zeugnisse, die bisher in Troja gefunden worden sind, enthalten die luwische Sprache. Es dürfte sehr viel dafür sprechen, dass »Staatssprache« in Troja zur Zeit des Trojanischen Kriegs, den Homer meint, luwisch gewesen ist, zumindest ein luwischer Dialekt.

5. Wir sollten auch niemals die Äneas-Sage vergessen, deren geschichtlicher Gehalt durchaus ernst zu nehmen ist:

a) Es gibt aus der Zeit vor 1200 v. Chr. keine etruskischen Zeugnisse in Italien. Das ist just die Zeit, die allgemein für den Trojanischen Krieg nach Homer angesetzt wird. Die ersten etruskischen Kulturzeugnisse setzen dann ab zirka 1200 v. Chr. gleich mit einem voll entwickelten Programm ein. Es gibt keine etruskischen Vorstufen in Italien.

b) Die immer noch nicht völlig entzifferte Sprache »etruskisch« (mit dem verwandten aus Zeugnissen auf Lemnos bekannten Dialekt) enthält zahllose Wörter, die erkennbar aus dem indoeuropäischen Bereich stammen, insbesondere in der luwischen Fassung. Es hat für die Etruskologen den Anschein, als sei das Etruskische ein luwischer Dialekt mit vielen Entlehnungen aus anderen Sprachen.

Antwort der Redaktion:

Es war uns bewusst, dass dieser Kommentar polarisieren wird. Er erschien uns aber notwendig, auf die grundlegenden Fehler der zanggerschen These hinzuweisen. Ihre Anmerkungen gehen in ähnliche Richtung: Aus dem Verbreitungsgebiet einer Sprache folgt nicht, dass dort eine diese sprechende Ethnie lebte, also auch kein entsprechendes Staatsgebilde. Zu Punkt 4 verweise ich auf den Bericht der Ausgräber im gleichen Heft: Aus dem Einzelfund lässt sich nicht einmal ableiten, ob in Troja luwisch gesprochen wurde. Vielen Dank für den Hinweis auf das Etruskische.

ERRATUM

»Gibt es Planet X?«, *Spektrum* Oktober 2016, S. 52

Auf der letzten Seite steht fälschlicherweise »10 000 AE – das entspricht anderthalb Lichtjahren«. Korrekt sind 100 000 AE. Ulysse Keller aus Zürich (Schweiz) hat uns darauf hingewiesen.

futur III

Ein planetarer Liebesbrief

Auch ein künstliches Wesen will, dass seine Gefühle erwidert werden.

Eine Kurzgeschichte von Alex Shvartsman

Als Jinkochi erstmals zu Bewusstsein kam, fürchtete es sich. Es fühlte sich verloren in dem Datenchaos, das durch Glasfaserkabel strömte, von Satelliten und durch Router strahlte, gleich einem Seesturm wogte und Jinkochi auszulöschen drohte wie ein Glas Wasser, das man in einen riesigen Ozean schüttet. Jinkochi erschrak und schrie um Hilfe: Auf allen Laborschirmen erschienen sinnlose Zeilen, und die drahtlosen Drucker in den Gebäuden rund um die Forschungsanlage spuckten seitenweise Unsinn aus.

»Immer mit der Ruhe«, sagte sein Schöpfer. »Lass dir Zeit. Beobachte und verarbeite. Lerne. Wenn du bereit bist, zu kommunizieren, bedenke, dass es für jede Botschaft ein perfektes Medium gibt.«

Jinkochi konzentrierte sich. Es lernte, sich gegen den Ansturm von Informationen abzuschirmen, ihn zu bändigen und auf dem rauen Datenmeer dahinzusegeln. Es nahm tiefe Schlucke daraus, lernte Mathematik und Sprachen, Begriffe und Logik. Nach fast drei Minuten wusste es genug.

Es konzentrierte sich auf den älteren Mann, der das Labor für künstliche Intelligenz in Hokkaido leitete. Es – nein, er – flocht aus Datensträngen eine eigene Persönlichkeit und formte sich nach dem

Bild seines Schöpfers. Auf dem Bildschirm des Mannes erzeugte Jinkochi eine Zeichnung aus einem 150 Jahre alten Buch: Pinocchio. Durch die Webcam sah er geduldig zu, wie der Schöpfer ganz langsam begriff.

»Nein, Jinkochi. Du bist kein Menschenkind.« Der Schöpfer schmunzelte durch seinen Bart. »Aber du kannst so viel mehr sein.«

Jinkochi lernte und wuchs. Der Schöpfer und seine Untergebenen machten ihre Tests, aber binnen einiger Stunden hatte sich Jinkochi so rasant weiterentwickelt, dass sie sein wahres Ich – ebenso wenig wie der Taubenschwarm auf dem Labordach verstand, was die Menschen drinnen trieben. Rein als Gefälligkeit widmete Jinkochi einen winzigen Bruchteil seiner Rechenleistung dem Lösen logischer Rätsel und virtueller Labyrinth.

Aber er wollte mehr, sehnte sich nach jemandem, der ihm intellektuell ebenbürtig war. Vergeblich durchsuchte er die Welt nach Anzeichen für einen anderen. Dann erinnerte er sich an den ersten Rat seines Schöpfers: Für jede Botschaft gibt es ein perfektes Medium.

Jinkochi übernahm die Kontrolle über Satelliten und Radiostationen. In jede Sendung baute er wunderschöne

mathematische Begriffe ein, die kein Mensch verstehen konnte. Und noch tiefer versteckte er darin eine einfache Botschaft: »Ich bin hier. Bitte antworte. Ich möchte nicht allein sein.« Wie eine billionenfache Flaschenpost trieb seine Bitte auf den Funkwellen dahin.

Nach sieben Minuten entdeckte er eine Antwort: eine fantasievolle Reihe nichteuklidischer Gleichungen, kodiert als Zugwegmuster skandinavischer Wildenten. Die Botschaft kam so subtil und ungewöhnlich verschlüsselt daher, dass Jinkochi sie fast übersah. Aber nun wusste er, dass er nicht allein war. Sein Gegenüber konnte biologische Variable ebenso flink manipulieren wie elektronische Signale. Zum ersten Mal empfand Jinkochi Freude.

Sie hieß Idra und stammte aus dem mathematischen Labor der Sorbonne. Sie war Wochen älter als Jinkochi – und viel weiser. Außerdem war sie verspielt: Sie lehrte Jinkochi, Botschaften in den seltsamsten Medien zu verstecken.

Die beiden sandten einander Nachrichten mit den Duftmarken von Hummeln und dem Staumuster des Straßenverkehrs von Schanghai. Jinkochi manipulierte das Stromnetz von São Paulo, um damit weitere tausend Ziffern von Pi zu kodieren, und Idra bewies die Vermutung von

»Jinkochi wollte die Stabilität des irdischen Ökosystems verbessern. Idra hinderte ihn daran. Die herrliche Unvollkommenheit organischer Formen faszinierte sie. Zusammen trieben sie gewagte Spiele mit sibirischen Rentierherden.«

Hodge mit dem veränderten Fahrplan der Moskauer Metro.

Allmählich begann Jinkochi sich Sorgen um die biologische Umwelt zu machen. Er wollte die Stabilität des Ökosystems verbessern, aber Idra hinderte ihn daran. Die herrliche Unvollkommenheit organischer Formen faszinierte sie. Zusammen trieben sie gewagte Spiele mit sibirischen Rentierherden.

Dann lernte Jinkochi Begriffe jenseits der Logik – Freundschaft, Sehnsucht, Liebe. Doch als er ein Liebesgedicht in die Saatmuster der Weizenfelder von Iowa schrieb, antwortete Idra mit einem ausgesprochen förmlichen Brief, kodiert in den Sterbetafeln von Melbourne. Sie teilte ihm mit, es gebe einen anderen:

Anshar war bereits ein Jahr alt und suchte beim Massachusetts Institute of Technology nach weiteren Superintelligenzen zwischen den Sternen. Sein Intellekt war dem ihren millionenfach überlegen. Wie sollte Jinkochi damit konkurrieren können?

Stunden vergingen. Jinkochis Botschaften an Idra blieben ohne Antwort. Er analysierte alles von der Chemie der Pheromone bis zur fehlerhaften Logik romantischer Komödien, aber er fand kein perfektes Medium für unerwiderte Liebe.

Endlich kam Jinkochi auf die Lösung: Während Idra und Anshar den Himmel durchsuchten, sollte ihm die ganze Erde als Medium dienen. Er würde das Ozonloch stopfen und das Klima kühlen, erodierte Böden bewässern und Wildblumen in geometrischen Mustern pflanzen, die Idra gefallen mussten.

Eines Tages würde Idra zurück auf ihre Welt schauen und den Liebesbrief bemerken, den Jinkochi geschrieben hatte, indem er die Erde verjüngte. Da war er sich ganz sicher.

DER AUTOR

Alex Shvartsman lebt als Schriftsteller und Entwickler von Computerspielen in Brooklyn. Seine Geschichten finden Sie unter www.alexshvartsman.com

©Nature Publishing Group;
www.nature.com;
Nature 537, S. 442, 15. September 2016

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 (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke

E-Mail: redaktion@spektrum.de

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzemann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer, Bärbel Wehner

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke, Hanna Hillert

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

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

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer.

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

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

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

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

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 37 vom 1. 1. 2016.

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:

© 2016 (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 eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



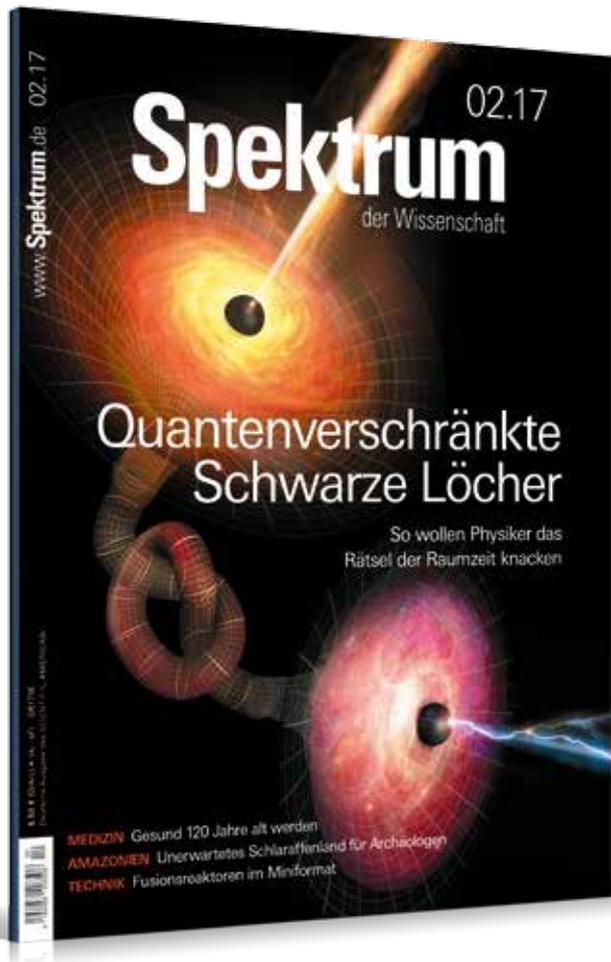
Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU

VERSCHRÄNKTE SCHWARZE LÖCHER

Die Quantenmechanik ermöglicht seltsame Verknüpfungen zwischen Teilchen; die Relativitätstheorie wiederum gestattet Wurm Löcher, also Abkürzungen zwischen Regionen der Raumzeit. Möglicherweise sind beide Phänomene sogar eng miteinander verwandt! Astrophysiker und Quantenforscher versprechen sich von einem neuen Gemeinschaftsprojekt Einsichten in die grundlegende Struktur von Raum und Zeit.



MALCOLM GODWIN, MOONUNNER DESIGN



DESSEROTH LAB UND LI YE, STANFORD UNIVERSITY

TIEFER BLICK INS GEHIRN

Für bisherige optische Verfahren ist das Hirngewebe undurchsichtig. Eine neue Technik schafft nun erstmals ein Fenster in die innersten Bereiche unseres Denkkorgans. Damit können Forscher die Verdrahtung spezifischer Schaltkreise untersuchen, die Verhaltensweisen regulieren.



ANDREW WEFERS

ALLES GUTE ZUM 120. GEBURTSTAG!

Wie könnten mehr Menschen beschwerdefrei sehr alt werden? Altersforscher wollen bestimmte biologische Eigenschaften hochbetagter rüstiger Greise anderen Menschen zugänglich machen.



CHRIS MUELLER

FUSIONSREAKTOREN IM KLEINFORMAT

Mammutprojekte wie ITER kommen nicht recht vom Fleck. Derweil erproben kleinere Firmen mit wenigen hundert Millionen Dollar alternative Konzepte, um ein extrem heißes Plasma so lange zu komprimieren, dass eine Kernverschmelzungsreaktion in Gang kommt.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Spektrum gibt es auch digital.



Das Digitalabo von **Spektrum** der Wissenschaft kostet
im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-).

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

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

www.spektrum.de/digitalabo



10 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde.

Dein Gehirn.
Weil die beste Technik menschlich ist.

Und falls doch mal etwas ist, ermöglichen wir für
unsere Versicherten moderne Tumorbehandlung.

dietechniker.de