

Spektrum

der Wissenschaft



Wie Sprache entsteht

Linguisten stürzen Noam Chomskys
Universalgrammatik

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

ASTRONOMIE Die chaotische Geburt des Sonnensystems

AMAZONIEN Ein Eldorado für Archäologen

KRYPTOGRAPHIE Wie sicher ist der Chip auf der Bankkarte?



Das Kombipaket im Abo: App und PDF

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





EDITORIAL CHOMSKY- DÄMMERUNG

Von Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

► Er hätte auch die SAP-Arena gefüllt. Im vergangenen Jahr hielt Noam Chomsky einen Vortrag in Heidelberg. Das Deutsch-Amerikanische Institut hatte für den berühmten Linguisten den größten Saal vor Ort, die Stadthalle, gebucht. Doch auch deren mehr als 1000 Sitzplätze waren in Rekordschnelle vergriffen; viele Interessenten kamen nicht mehr zum Zug. Die bessere Option, so der Veranstalter, wäre wohl die riesige Mehrzweckhalle im benachbarten Mannheim gewesen, wo sonst Bundesliga-Eishockey gespielt wird und internationale Rockstars gastieren.

Chomsky, der engagierte Sprachforscher vom Massachusetts Institute of Technology, ist fraglos einer der bekanntesten lebenden Wissenschaftler. Seine nimmermüde Kritik an der amerikanischen Politik und der Globalisierung macht ihn zu einem Publikumsmagneten, aber auch als Wissenschaftler ist er eine Instanz. Als ich Anfang der 1990er Jahre an der RWTH Aachen die Einführungsvorlesung in Linguistik hörte, war sein Modell einer Universalgrammatik deren Gral – und ihr Schöpfer laut dem Arts and Humanities Citation Index der am meisten zitierte Forscher der Gegenwart. Im Kern besagt seine Theorie, dass jeder Mensch schon mit der Fähigkeit geboren wird, unendlich viele grammatisch korrekte Sätze zu bilden, obwohl er selbst nur endlich viele solcher Sätze vernimmt. Ohne diese angeborene Universalgrammatik seien Kleinkinder unfähig, ihre Muttersprache zu erlernen. Und noch steiler formuliert: Die universale Grammatik bildet das biologische Fundament aller Sprachen, die je gesprochen wurden oder jemals gesprochen werden.

Über die Jahrzehnte wurde diese Theorie sowohl weiterentwickelt als auch von verschiedenen Seiten kritisiert. Jetzt aber droht ihr der Garaus durch ein neues, empirisch besser belegtes Modell, die »gebrauchsbasierte Linguistik«. In unserer Titelgeschichte ab S. 12 legen der Sprachwissenschaftler Paul Ibbotson von der Open University im englischen Milton Keynes und der Verhaltensforscher Michael Tomasello vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig die Gründe vor für den sich abzeichnenden Paradigmenwechsel bei der Frage, wie Sprache entsteht.

Freuen Sie sich auf einen regelrechten Schlagabtausch mit den Argumenten Chomskys!

Herzlich, Ihr



NEU AM KIOSK AB 17.2.!

Was wir gegen die Bedrohung unserer Privatsphäre durch digitale Medien tun können, lesen Sie im **Spektrum Spezial Physik – Mathematik – Technik 1.17.**

AUTOREN DIESER AUSGABE



ALEXANDRE DEWEZ

Der Meeresforscher ist vom reichen Leben im Gouf de Capbreton fasziniert, einer riesigen Schlucht im südfranzösischen Kontinentalschelf (S. 28).



LINDA ELKINS-TANTON

Die Geologin erforscht das Innere von jungen, erdähnlichen Planeten. Deren überraschend turbulente Entstehung beschreibt sie ab S. 44.



STÉPHEN ROSTAIN

Für den Archäologen sind die Regenwälder des Amazonasbeckens einer der letzten weißen Flecken auf der Landkarte Altamerikas. Ab S. 78 gibt er einen Überblick über die Entdeckungen in dieser Region.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

Wirbel um die Seesternlarve

Viren kommunizieren miteinander

Molekularer Superknoten

Versteinerter Schlamm auf dem Mars

Globaler Winter raffte Dinosaurier dahin

Lebende Organfabrik

Bewegung eines Lichtstrahls gefilmt

18 FORSCHUNG AKTUELL

Die Quelle der kosmischen Radioblitze

Astronomen verorten einen Strahlungsausbruch

Steuerbare Immuntherapie

Krebsbekämpfung mit Car-T-Zellen – und ohne Nebenwirkungen

Die ersten Mikroben?

Geologen verfolgen eine 3,7 Milliarden Jahre alte Spur in Westgrönland

Die Einheiz-Diät

Kalorienreduktion wandelt weiße in beige Fettzellen um, die Energie verbrennen

27 SPRINGERS EINWÜRFE

Grenzen des Wachstums

Überflussproduktion bringt in der Natur keine Vorteile

54 SCHLICHTING!

Wenn weißer Schnee in Farben funkelt

Die Transparenz von Eis hat schillernde Folgen

85 FREISTETTERS FORMELWELT

Die künstlerische Seite der Mathematik

Um neue Formeln zu entdecken, braucht man kreative Inspiration

12 LINGUISTIK EIN NEUES BILD DER SPRACHE

Im 20. Jahrhundert revolutionierte Noam Chomsky die Linguistik mit seiner Vorstellung, wie Kleinkinder ihre Muttersprache lernen. Jetzt aber erweist sich die Idee von der angeborenen Universalgrammatik als überholt.

Von Paul Ibbotson und Michael Tomasello

28 MEERESFORSCHUNG DER CANYON DER WALE

Der grandiose Gouf de Capbreton in der Südbiskaya ist ein Eldorado des Meereslebens. Schon vor 1000 Jahren jagten die Basken hier Wale.

Von Alexandre Dewez

36 SZIENTOMETRIE WIE (UN)ZUVERLÄSSIG IST DIE FORSCHUNG?

Viele wissenschaftliche Arbeiten lassen sich nicht reproduzieren. Doch muss man deshalb gleich pauschal eine Vertrauenskrise konstatieren?

Von Peter Walter

41 GESCHLECHTER GLEICHSTELLUNG IN TIERVERSUCHEN

Forscher sollten gleich viele männliche wie weibliche Versuchstiere verwenden. Das macht Ergebnisse reproduzierbarer und für Frauen relevanter.

Von Lisa Vincenz-Donnelly

44 SONNENSYSTEM AUFRUHR IN DER KINDERSTUBE

Die Vorläufer unserer Planeten waren erstaunlich heiß und entstanden binnen weniger, sehr turbulenter Jahrmillionen.

Von Linda T. Elkins-Tanton

56 TECHNIKGESCHICHTE WIE SICHER IST DIE CHIPKARTE?

Die allgegenwärtige Plastikkarte zum Bezahlen musste erst mit kryptografischen Methoden gegen kriminelle Angriffe abgesichert werden.

Von Jean-Jacques Quisquater und Jean-Louis Desvignes

66 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

EXPERIMENTIEREN MIT EINEM ALLERWELTSMETALL

Früher war Aluminium wertvoller als Gold. Wie schaffte es den Sprung zum alltäglichen Werkstoff in unserer modernen Welt?

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

72 GESELLSCHAFT REICHE WELT – ARME WELT

Serie: Die Zukunft der Menschheit (Teil 3) Im Jahr 2050 werden sich zehn Milliarden Menschen die irdischen Ressourcen teilen müssen. Während in den Industrieländern die Bevölkerung altert, verlangen in den Entwicklungsländern immer mehr Jugendliche nach Bildung und Arbeit.

Von Mara Hvistendahl

78 SÜDAMERIKA ARCHÄOLOGIE IN AMAZONIEN

40 Meter breite Wege, weitläufige Siedlungen und jahrtausendealte Hügelbeete – die Urwälder Amazoniens bergen noch manches Geheimnis.

Von Stéphen Rostain



12

TITELTHEMA
WIE SPRACHE ENTSTEHT



36

REPRODUZIERBARKEIT
FORSCHUNG IN DER
VERTRAUENSKRISE



44

ASTRONOMIE
FRÜHZEIT DES
SONNENSYSTEMS



72

GESELLSCHAFT
REICHE WELT – ARME WELT



78

SÜDAMERIKA
ARCHÄOLOGIE
IN AMAZONIEN

86 REZENSIONEN

Technoseum (Hg.):

2 Räder – 200 Jahre

Marc Chamberland:

Von Eins bis Neun

Barry Cunliffe:

10 000 Jahre

Thomas Unnerstall:

Faktencheck Energiewende

Wolfgang Korn:

Nordische Mythen

Ille Gebeshuber:

Wo die Maschinen wachsen

Ulrich Walter:

Im schwarzen Loch ist der Teufel los

93 ZEITREISE

Vom Urzeitbaum

zur Vulkanfabrik

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Offizielle Erklärung

zum Stand der

menschlichen Forschung

Anlässlich der Abschluss-

konferenz der Akademie

der Vereinten Nationen am

23.1. 2117

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

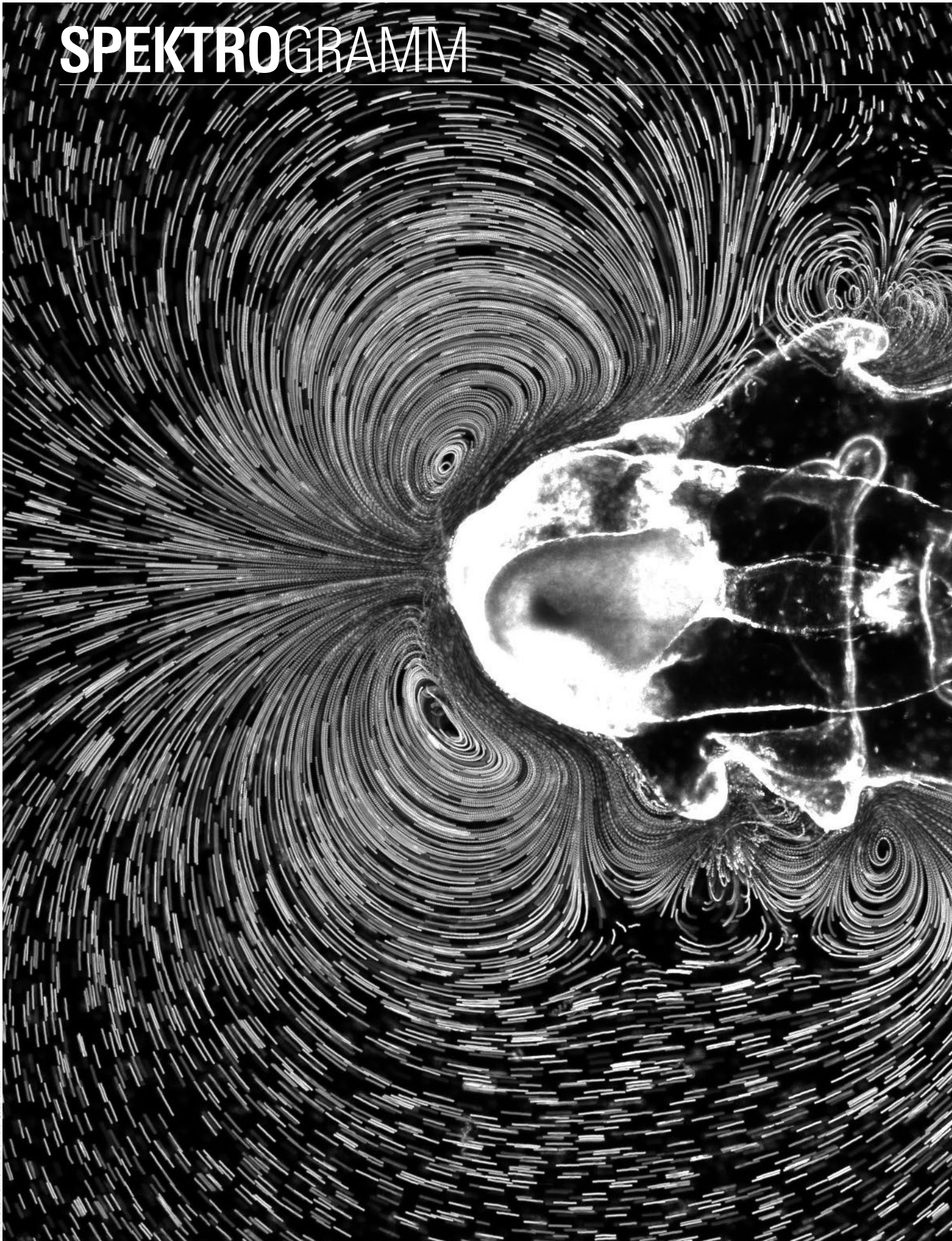
Titelbild: Getty Images / Aaron Tilley

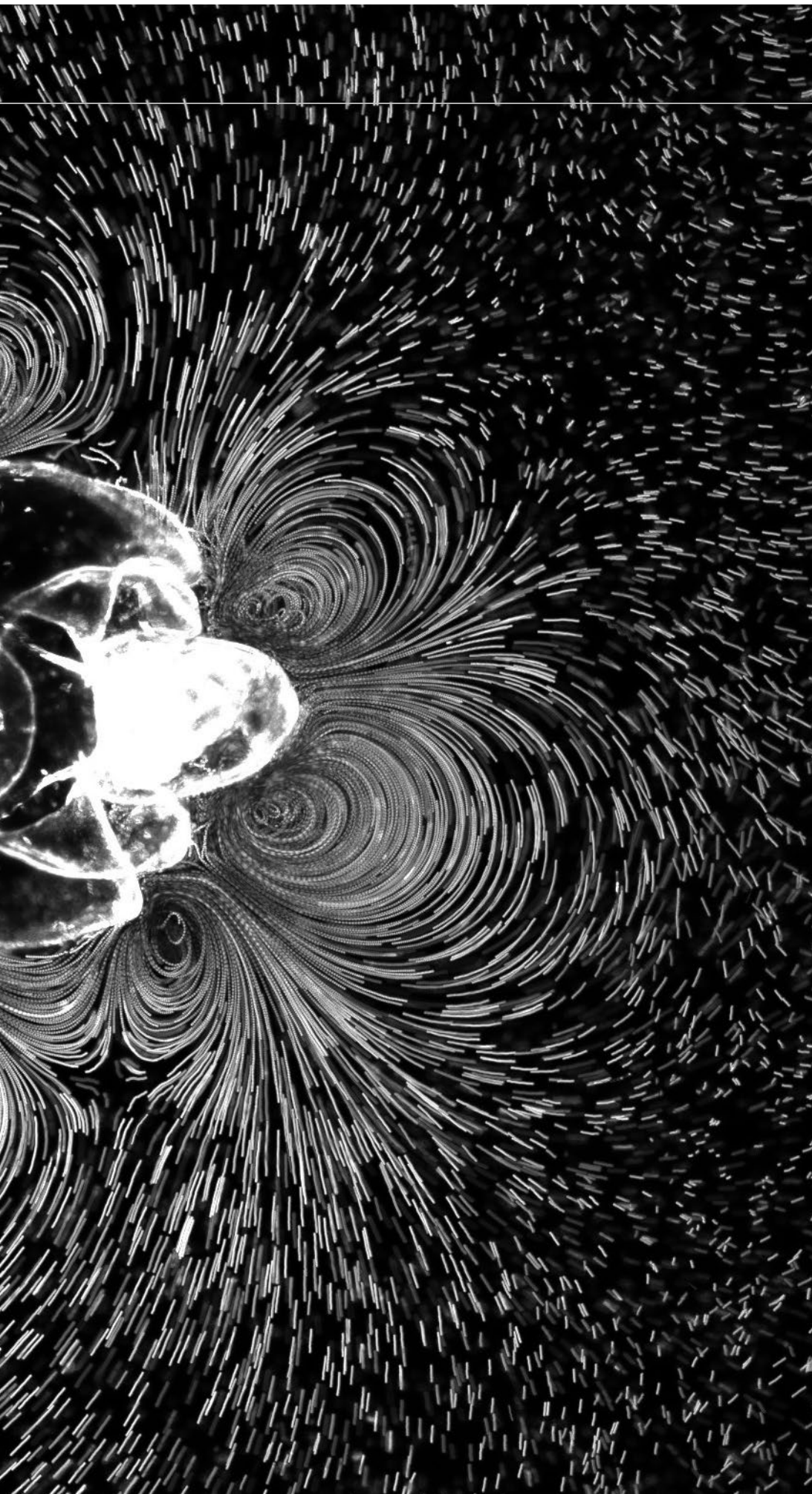


Alle Artikel auch digital
auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM





WIRBEL UM DIE SEESTERNLARVE

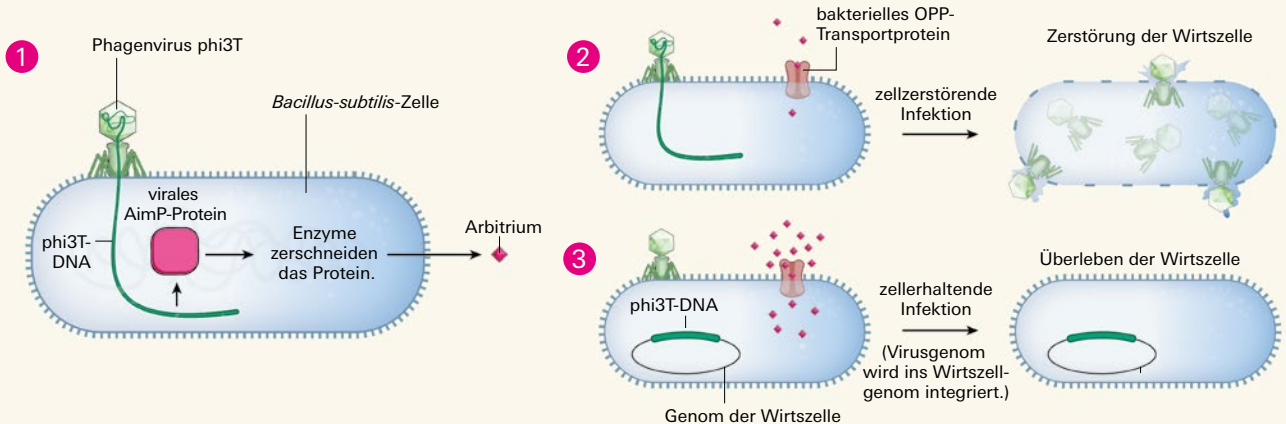
► Biophysiker um Manu Prakash von der Stanford University

haben untersucht, wie Seesternlarven fressen und sich fortbewegen. Dazu fixierten sie ein Exemplar unter dem Deckglas eines Mikroskops und reicherten das Wasser mit nur wenigen Mikrometer großen Plastik-kügelchen an. Deren Bahnen machten sie mit Langzeitbelichtungen sichtbar. Die Tiere erzeugen gegenläufige Strudel mit starker Sogwirkung, indem sie mit zahllosen härchenartigen Fortsätzen synchron schlagen. So bringen sie kleine Nahrungspartikel aus der Umgebung in die Nähe ihrer Mundöffnung (im Bild rechts). Je mehr einzelne Wirbel die Larven erzeugen, desto effizienter wird dieser Prozess. Wollen sie hingegen schnell schwimmen, müssen sie das Muster ändern – statt vieler kleiner dominieren dann wenige große Strudel.

Nature Physics 10.1038/nphys39813, 2016

PRAKASH LABORATORY / STANFORD UNIVERSITY, BIOENGINEERING

Abgestimmter Angriff



DAWIDSON, A. R. PHAGES MAKE A GROUP DECISION. IN: NATURE 10.1038/NATURE1118, 2017, FIG. 1

Das Virus phi3T infiziert ein Bakterium (1) und bringt es dazu, das Peptid Arbitrium auszuscheiden. Nehmen benachbarte Bakterien viel von dem Peptid auf, verläuft ihre Infektion eher still (3); nehmen sie wenig auf, werden sie von dem Virus zerstört (2).

MIKROBIOLOGIE VIREN KOMMUNIZIEREN MITEINANDER

► Viren verständigen sich mit ihresgleichen, indem sie ihr Infektionsverhalten mittels chemischer Signale abstimmen. Das haben Wissenschaftler um Zohar Erez vom israelischen Weizmann-Institut beobachtet. In ihren Experimenten infizierten sie Bakterien der Spezies *Bacillus subtilis* mit einem speziellen Virus, dem Phagen phi3T. Dann suchten sie nach Stoffen, mit denen sich das Virus hemmen lässt. Sie isolierten ein Molekül, das vor den Folgen der Infektion schützt – und überraschenderweise von den infektiösen Partikeln selbst stammt. Zum ersten Mal haben die Forscher damit eine chemische Kommunikation zwischen Viren nachgewiesen.

Der Nachrichtenüberträger ist ein Peptid, also ein Aminosäuregebilde, namens Arbitrium. Seine Bauanleitung ist im viralen Erbgut enthalten. Nachdem das Virus seine bakteriellen Wirte infiziert hat, stellen diese sowohl neue Viruspartikel als auch Arbitrium in großen Mengen her und sterben schließlich ab. Wenn sie sich auflösen, gelangt der Botenstoff in die Umgebung und wird von gesunden Bakterien aufgenommen. Infizieren diese Mikroben sich nun mit phi3T, vermehrt sich das Virus in ihnen nicht mehr, sondern baut stattdessen sein Erbgut in das des Wirts ein und überdauert weitgehend inaktiv als »Prophage«.

Bauanleitungen für ähnliche Peptide haben die Forscher im Erbgut von mehr als 100 weiteren Virenarten gefunden. Wahrscheinlich besitzen viele Bakterienviren die

Fähigkeit, miteinander zu kommunizieren und ihr Infektionsverhalten abzustimmen. Aus evolutionärer Perspektive betrachtet ist diese Koordination durchaus sinnvoll. Denn indem sie die Konsequenzen des Virenbefalls nach der ersten Infektionswelle abmildert, sorgt sie dafür, dass nicht alle potenziellen Wirte auf einmal hinweggerafft werden, was den Viren die Vermehrungsgrundlage entziehen würde.

Nature 10.1038/nature21049, 2017

CHEMIE MOLEKULARER SUPERKNOTEN

► Es ist der engste Knoten, den Chemiker je geknüpft haben. Seine Struktur ähnelt der eines keltischen Knotens, bei dem sich ein Endlosband über vier Schlaufen achtmal überkreuzt. Ohne Mikro-

skop kann man das komplexe Gebilde jedoch nicht sehen – denn es ist gerade einmal 20 milliardstel Meter lang und besteht aus nur 192 Atomen.

Solche Konstrukte stellen die Wissenschaftler um David Leigh von der University of Manchester her, indem sie drei Molekülstränge miteinander verflechten und ihre Enden chemisch verbinden. So entsteht ein verschlungener Nanofaden. Eisen(II)-Ionen stabilisieren seine räumliche Struktur an vier Kreuzungspunkten, indem sie den Faden an je drei Stellen fixieren. Der Faden selbst ist ein organisches Molekül aus Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff sowie Wasserstoff – und nur ein 10000stel so dick wie ein menschliches Haar.

Leigh und seine Kollegen erzeugen den molekularen Knoten in mehreren aufeinander folgenden chemischen Reaktionen. Nur bei sehr genauer Kontrolle der

PLANETOLOGIE VERSTEINERTER SCHLAMM AUF DEM MARS

► Der NASA-Rover »Curiosity« hat auf dem Mars offenbar Überreste getrockneten Schlammes ausfindig gemacht. Darauf lassen Bilder der »Mahli«-Kamera schließen, die der Rover mit sich führt. Auf den Fotos ist ein Felsen zu sehen, den ein Netzwerk feiner Linien überzieht. Vermutlich handelt sich es bei ihnen um konservierte Trockenrisse, die vor mehr als drei Milliarden Jahren entstanden, als eine dünne Schlammschicht ausdörte. Damals gab es wahrscheinlich Flüsse und Seen auf dem Roten Planeten.

Risse in trocknendem Matsch füllen sich in der Regel mit Staub oder Sand; später werden sie von anderen Sedimentschichten bedeckt, die mit ihnen gemeinsam versteinern. Doch die Erosion kann das Gestein wieder abtragen – wobei das Material, das

einst die Schlammschicht auffüllte, besonders lange widersteht. Es bilden sich erhabene Grate, wo früher Spalten waren. Wie winzige Hügelketten ragen sie aus dem Gestein hervor.

Aller Wahrscheinlichkeit nach erklärt dieser Mechanismus aber nur einen Teil der abgebildeten Strukturen. Denn Risse, wie sie auf dem Bild zu sehen sind, entstehen auch, nachdem das Erdreich erstarrt ist – nämlich infolge des Drucks darüber abgelagerter Schichten. Die chemischen Signaturen entlang der vernetzten Linien sprechen allerdings überwiegend für die Schlammschicht-Hypothese.

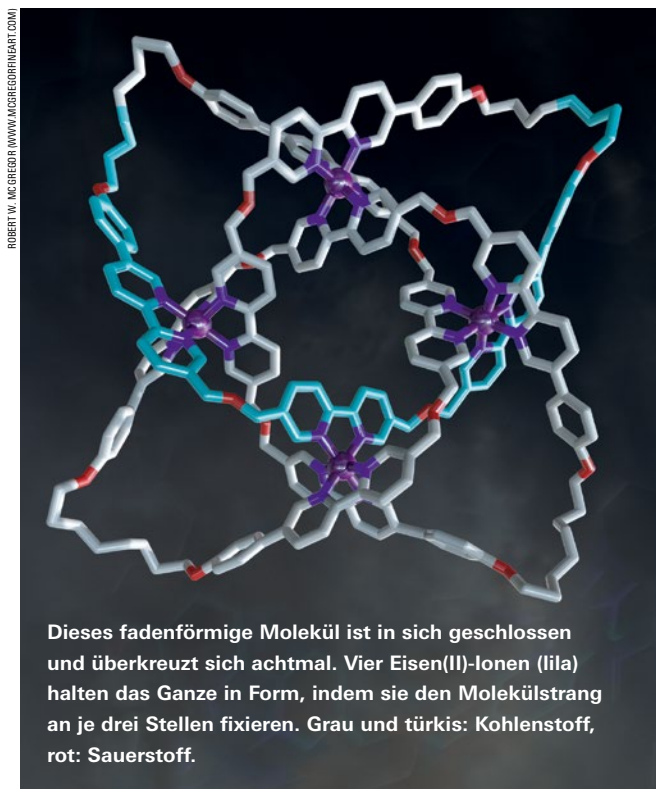
Der Rover »Curiosity« ist seit 2012 in einer als Gale-Krater bekannten Senke unterwegs. Seit 2014 rollt er die Ausläufer von Aeolis Mons empor, einem Berg in der Kratermitte. Marsmissionen haben wiederholt Hinweise darauf ergeben, dass in Senken und Tälern des Roten Planeten vor mehr als drei Milliarden Jahren Wasser stand beziehungsweise floss.

Pressemitteilung der NASA, 17. 01. 2017

Kreuz und quer überziehen kleine Grate dieses Marsgestein. Wahrscheinlich entstanden sie als Risse in trocknendem Schlamm, als es auf dem Planeten noch Gewässer gab.



NASA / JPL-CALTECH / MSSS



Reaktionsbedingungen lagern sich die einzelnen Bestandteile in der gewünschten Form zusammen. Jeder Verfahrenszyklus bringt mehrere Milliarden Miniatürknoten hervor.

Wofür sich das Molekül eventuell nutzen lässt, beginnen die Wissenschaftler erst zu untersuchen. Sie hoffen, dass ihre Technik einmal neue industrielle Fertigungsverfahren und Anwendungen ermöglichen wird.

Besonders eng geknüpfte und verflochtene Polymere könnten den Weg ebnen zu leichteren, flexibleren und dennoch stärker belastbaren Stoffen – beispielsweise in kugelsicheren Westen oder als dichte und reißfeste Gewebe für chirurgische Anwendungen.

Science 10.1126/science.aal1619, 2017

MASSENSTERBEN GLOBALER WINTER RAFFTE DINOSAURIER DAHIN

Der Einschlag des Chicxulub-Meteoriten vor 66 Millionen Jahren verursachte ein weltweites Massenaussterben. Unter anderem besiegelte er das Ende der Dinosaurier – nicht so sehr wegen seiner direkten Zerstörungswirkung, sondern mehr infolge der drastischen Klimaveränderungen, die er auslöste. Julia Brugger vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und ihre Kollegen haben nun genauer analysiert, was damals mutmaßlich geschah.

Bruggers Team stellte in Klimasimulationen nach, wie Atmosphäre, Ozeane und Meereis auf den Einschlag reagierten. Der Auf-

prall setzte demnach große Mengen schwefelhaltiger Gase frei, die in der Luft zu Sulfat-Aerosolen reagierten – Schwebeteilchen, die das Sonnenlicht abschirmten und so die Erde kühlten. Wie die Forscher herausfanden, fiel die weltweite Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche um mindestens 26 Grad Celsius. 3 bis 16 Jahre lang habe sie dann unterhalb des Gefrierpunkts gelegen und sich erst nach mehr als 30 Jahren wieder dem vorherigen Niveau angenähert.

Dass die Erde nach dem Chicxulub-Impakt auskühlte, wissen Forscher zwar schon länger. Allein die unvorstellbaren Staubmengen, die der Aufprall hochgewirbelt haben muss, dürften für einen Temperatursturz gesorgt haben. Doch dessen Ausmaß ist bisher wohl unterschätzt

worden, weil man den Einfluss der Schwefelgase, der viel gravierender war als der des Staubs, nicht genügend beachtete.

Ein weiterer bislang vernachlässigter Effekt war die drastische Durchmischung der Ozeane. Da die Temperaturen in der unteren Atmosphäre äußerst stark fielen, kühlte das Oberflächenwasser entsprechend ab, sank nach unten und verdrängte leichteres, wärmeres Tiefenwasser nach oben. Dieses war reich an Nährstoffen und begünstigte deshalb extreme Algenblüten, die ein massives Artensterben in den Ozeanen auslösten. Zeitgleich mit den landbewohnenden Dinosauriern verendeten deshalb die marinen Ammoniten.

Geophysical Research Letter 10.1002/2016GL072241, 2017

MEDIZIN LEBENDE ORGANFABRIK

Eine außergewöhnliche Organtransplantation haben Forscher um Hiromitsu Nakauchi von der Stanford University durchgeführt. Sie verpflanzten Organteile, die großteils aus Mäusezellen bestanden, aber in Ratten gewachsen waren. Damit heilten die Forscher diabetis- kranke Mäuse. So belegten sie, dass funktionstüchtige Organe oder Gewebe einer bestimmten Spezies auch in einem artfremden Organismus heranreifen können.

Nakauchi und seine Kollegen manipulierten zunächst das Erbgut von Ratten so, dass die Nager keine eigene Bauchspeicheldrüse ausbildeten. Den so veränderten Tieren spritzten sie, noch im Embryonalstadium, pluripotente Stammzellen von Mäusen, die in jeden Zelltyp des Organismus ausdifferenzieren können. Die Stammzellen sprangen quasi für die fehlenden Rattenzellen ein und brachten eine Bauchspeicheldrüse hervor, die vorrangig aus Mäusezellen bestand. Nakauchis Team entnahm den entwickelten Tieren das Drüsenorgan und isolierte daraus die Insulin herstel-

TOMOYUKI YAMAGUCHI, UNIVERSITY OF TOKYO



Ratte-Maus-Mischwesen (links) ermöglichen neue Transplantationsverfahren. Daneben: normale Ratte und Maus.

lenden Langerhans-Inseln. Diese injizierte das Team sodann in Nieren von diabetischen Mäusen, wo sich die Zellklumpen einnisteten und die Funktion einer gesunden Bauchspeicheldrüse übernahmen: Sie produzierten blutzuckersenkendes Insulin und heilten die Mäuse so vom Diabetes.

Die Mäuse nahmen die Langerhans-Inseln gut an – nach nur fünf Tagen immunhemmender Behandlung hatte ihr Organismus die Gewebeklumpen akzeptiert. Noch mehr als ein Jahr nach dem Eingriff zeigten die behandelten Tiere keine Anzeichen einer gestörten Blutzuckerregulation.

Wäre ein ähnliches Verfahren auch beim Menschen möglich, könnte es eine Revolution in der Transplantationsmedizin anstoßen. Denn Menschen sind nach einer Organverpflanzung lebenslang auf immununterdrückende Medikamente angewiesen, um eine Abstoßung des Fremdgewebes zu vermeiden. Gegenüber Körperteilen, die aus ihren eigenen Stammzellen in einem fremden Organismus herangewachsen sind, käme es vielleicht zu einer weniger intensiven Abwehrreaktion, was die Medikamente zum Teil verzichtbar machen würde. Bis dahin wäre es aber noch ein weiter Weg: Entsprechende Mensch-Tier-Mischwesen (Chimären) zu züchten, setzt neben wissenschaftlichen Fortschritten vor allem die Klärung ethischer und gesetzlicher Fragen voraus.

Nature 10.1038/nature21070, 2017

PHYSIK BEWEGUNG EINES LICHTSTRAHLS GEFILMT

► Mit einer Spezialkamera haben Forscher den »Überschallkegel« eines Laserpulses gefilmt. Damit können sie direkt sichtbar machen, wie der Lichtstrahl voranschreitet und was er in seiner Umgebung auslöst. Die Technik eröffnet neue Möglichkeiten für die biomedizinische Bildgebung, indem sie beispielsweise erlaubt, das Feuern von Nervenzellen abzubilden.

Lihong Wang von der Washington University in St. Louis (USA) und seine Kollegen entwickelten eine flächige Versuchsanordnung, die aus zwei verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften besteht. In

der Mitte befindet sich ein Kanal, bestehend aus einem Medium mit niedrigem Brechungsindex. Dieser ist auf beiden Seiten von einem Material mit höherem Brechungsindex umgeben. Die Forscher leiten Laserpulse aus sichtbarem Licht, nur sieben billionstel Sekunden lang, in den Kanal ein. Hier pflanzt sich der Puls fort, wobei sein Licht gestreut wird und zum Teil in das umgebende Medium eintritt. Weil dort der Brechungsindex höher ist und somit die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen

kleiner, entsteht ein »Überschallkegel« aus Licht, den der Laserpuls quasi hinter sich herschleppt.

Ein speziell entwickeltes System aus Spiegeln, Strahlteilern und Kameras namens LLE-CUP (lossless-encoding compressed ultrafast photography) erlaubt es den Forschern, das Geschehen mit 100 Milliarden Aufnahmen pro Sekunde zu filmen. Das System nimmt den Vorgang dabei aus je drei verschiedenen Ansichten auf. Die erste liefert ein direktes Abbild, integriert über die Belichtungszeit, und ähnelt

damit einer herkömmlichen Fotografie. Die anderen beiden liefern zeitliche Informationen über die Lichtausbreitung. Aus den drei Ansichten zusammen lässt sich die Dynamik des Vorgangs rekonstruieren, und die entstehenden Filme zeigen, wie der Laserpuls voranschreitet und dabei den »Licht-Überschallkegel« erzeugt. Dessen Lichtschweife haben einen Winkel von jeweils rund 45 Grad, was den Werten gleichkommt, die theoretisch für einen solchen Mach-Kegel ermittelt wurden.

Science Advances 3, e1601814, 2017



Ein Laserpuls durchläuft einen Kanal mit niedrigem Brechungsindex, sein Licht tritt zum Teil ins umgebende Material ein (1, lang

belichtet). Einzelne »Schnappschüsse« in zeitlich hoher Auflösung machen sichtbar, wie dabei ein Licht-Überschallkegel entsteht (2).

LIHONG WANG, J. ET AL. - SINGLE SHOT REAL-TIME VIDEO RECORDING OF A PHOTONIC MACH CONE INDUCED BY A SCATTERED LIGHT PULSE USING SCIENCE ADVANCES 3, 1601814 (2017) FIG. 4A-B. MIT FRIDL. GERA, YON. JUNYANG LIANG

LINGUISTIK EIN NEUES BILD DER SPRACHE

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts revolutionierte der amerikanische Linguist Noam Chomsky unsere Vorstellung davon, wie Kleinkinder ihre Muttersprache lernen. Doch jetzt erweisen sich seine Ideen als überholt.



Paul Ibbotson (links) hält an der Open University in England Vorlesungen über Sprachentwicklung. **Michael Tomasello** ist Kodirektor des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig.

» spektrum.de/artikel/1432738

► Verbirgt sich im menschlichen Gehirn tatsächlich eine vorprogrammierte mentale Schablone zum Erlernen von Grammatik? Mit dieser Idee prägte der amerikanische Linguist Noam Chomsky vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge fast ein halbes Jahrhundert lang die gesamte Sprachwissenschaft. Nun aber verwerfen viele Kognitionswissenschaftler und Linguisten Chomskys Theorie der Universalgrammatik, denn neue Untersuchungen der verschiedensten Sprachen sowie der Art und Weise, wie Kleinkinder in Gemeinschaft kommunizieren, schüren starke Zweifel an Chomskys Behauptungen.

Vielmehr setzt sich eine radikal neue Sichtweise durch, der zufolge das Erlernen der Muttersprache kein angeborenes Grammatikmodul voraussetzt. Offenbar nutzen Kleinkinder mehrere verschiedene Denkweisen, die gar nicht sprachspezifisch sein müssen – etwa die Fähigkeit, die Welt in Kategorien (wie Mensch oder Sache) einzuteilen oder Beziehungen zwischen Dingen zu begreifen. Hinzu kommt die einzigartige Gabe, intuitiv zu erfassen, was uns andere mitteilen möchten; erst so kann Sprache entstehen. Somit reicht Chomskys Theorie längst nicht aus, um den menschlichen Spracherwerb zu erklären.

Diese Schlussfolgerung wirkt sich nicht bloß auf die Linguistik aus, sondern auf ganz unterschiedliche Bereiche, in denen Sprache eine zentrale Rolle spielt, von der Poesie bis zur künstlichen Intelligenz. Da außerdem Menschen Sprache auf eine Weise gebrauchen, wie es kein Tier vermag, dürften wir auch die menschliche Natur ein wenig besser begreifen, wenn wir das Wesen der Sprache verstehen.

Die erste Version von Chomskys Theorie, die er Mitte des 20. Jahrhunderts formulierte, passte gut zu zwei damals aufkommenden Trends des westlichen Denkens. Zum einen behauptete Chomsky, die Alltagssprache verhalte sich wie die mathematischen Algorithmen der Informatik. Er suchte nach der grundlegenden Sprachstruktur, als wäre sie ein Computerprogramm, und formulierte eine Reihe von Verarbeitungsschritten, aus denen »wohlgeformte« Sätzen hervorgehen. Sein damals revolutionärer Ansatz besagte: Ein computerähnliches Programm kann Sätze hervorbringen, die den Menschen als grammatisch korrekt erscheinen – und dieses Programm erklärt angeblich auch, wie Menschen tatsächlich Sätze bilden. So ein Sprachmodell gefiel jenen zahlreichen Forschern, die im Computer ein Paradigma für alles und jedes sahen.

Außerdem behauptete Chomsky, seine vom Computer inspirierte Theorie sei biologisch fundiert. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde immer deutlicher, dass die menschliche Evolutionsgeschichte viele Aspekte unserer einzigartigen Psychologie erklärt; Chomskys Theorie stand damit in Einklang. Er präsentierte seine Universalgrammatik als angeborene Komponente des menschlichen Geistes – als die biologische Grundlage der mehr als 6000 Sprachen auf der Welt. Da die mächtigsten und oft zugleich schönsten wissenschaftlichen Theorien eine unter oberflächlicher Vielfalt verborgene Einheit enthüllen, verlieh dieses Versprechen Chomskys Ansatz großen Charme.

Doch unter dem Eindruck neuer Erkenntnisse stirbt die Universalgrammatik seit Jahren einen langsamen Tod. Sie

verabschiedet sich allerdings nur schleppend, denn wie der Physiker Max Planck einst bemerkte: »Eine neue wissenschaftliche Wahrheit pflügt sich nicht in der Weise durchzusetzen, dass ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, dass ihre Gegner allmählich aussterben.«

Die Anfänge von Chomskys Universalgrammatik

In den 1960er Jahren beruhten die ersten Formulierungen der Universalgrammatik auf der Struktur des »Standard-Durchschnittseuropäisch« (Standard Average European), das heißt auf den von den meisten Linguisten gesprochenen Sprachen. Deshalb operierte das Programm der Universalgrammatik mit Satzpartikeln wie Nominalphrase (»Der niedliche Hund«) oder Verbalphrase (»mag Katzen«).

Recht bald tauchten aber linguistische Befunde auf, die nicht ins hübsche Schema passten. In einigen australischen Sprachen, zum Beispiel Warlpiri, sind die grammatischen Elemente über den gesamten Satz verstreut; Nominal- und Verbalphrase liegen nicht sauber getrennt vor, und in manchen Sätzen gibt es letztere überhaupt nicht.

Diese so genannten Sonderfälle ließen sich nur schwer mit der europäisch geprägten Universalgrammatik in Einklang bringen. Andere Ausnahmen lieferte die Untersuchung von Ergativsprachen wie Baskisch oder Urdu, bei denen sich die Verwendung des Satzsubjekts stark von der in vielen europäischen Sprachen unterscheidet.

Diese Entdeckungen sowie theoretische Überlegungen veranlassten Chomsky und seine Anhänger, im Lauf der 1980er Jahre den Begriff der Universalgrammatik zu revidieren. Die neue so genannte Prinzipien-und-Parameter-Theorie postulierte nicht mehr eine einzige Universalgrammatik für alle Sprachen der Welt, sondern eine Reihe universeller Strukturprinzipien, die sich in jeder Sprache auf andere Weise manifestieren können. Als Vergleich ließe sich anführen, dass wir alle mit einem Grundbestand

an Geschmäcken (süß, sauer, bitter, salzig und umami) geboren werden, aus dem durch die Wechselwirkung mit Kultur, Geschichte und Geografie die weltweite Vielfalt der Kochkunst entsteht. Prinzipien und Parameter sind linguistische Gegenstücke zu Geschmäcken. Sie interagieren mit der jeweiligen Kultur – das Kind lernt Englisch oder Japanisch – und bringen dadurch die heutige Sprachenvielfalt hervor, definieren aber zugleich die Gesamtheit aller möglichen Sprachen.

Spanier beispielsweise bilden vollständige Sätze, ohne ein separates Subjekt zu benötigen, etwa »Tengo zapatos« (»Ich habe Schuhe«). Das Ich, das die Schuhe besitzt, wird nicht durch ein eigenes Wort benannt, sondern durch das »o« am Ende des Verbs. Chomsky behauptete: Sobald Kindern mehrere Sätze dieses Typs begegnen, legt ihr Gehirn quasi einen Schalter um, der anzeigt, dass das Satzsubjekt nicht gebraucht wird. Danach wüssten sie, dass sie das Subjekt in allen ihren Sätzen weglassen könnten.

Der Parameter »Subjekt weglassen« bestimmt angeblich auch andere Strukturmerkmale der Sprache. Die Idee universeller Prinzipien passt zwar recht gut zu vielen europäischen Sprachen, doch für nichteuropäische erwies sich die revidierte Version von Chomskys Theorie als ungeeignet. Schließlich musste die zweite Version der Universalgrammatik ebenfalls aufgegeben werden, weil sie der faktischen Überprüfung nicht standhielt.

Obwohl Verfechter der Universalgrammatik weiter glauben, es gebe viele universelle Prinzipien und Parameter, beschrieb Chomsky zusammen mit einigen Koautoren in einem berühmten, 2002 im Wissenschaftsmagazin »Science« veröffentlichten Artikel schließlich eine Form der Universalgrammatik, die nur noch ein einziges Merkmal aufweist: die so genannte rechnerische Rekursion (computational recursion). Diese soll erklären, wie das Kombinieren einer begrenzten Anzahl von Wörtern und Regeln eine unbegrenzte Menge von Sätzen erzeugen kann. Die schier endlose Anzahl möglicher Sätze beruht demnach auf dem Einbetten einer Phrase in eine andere Phrase desselben Typs – der Rekursion. Man kann dabei Phrasen aneinanderhängen (»John hofft, dass Mary weiß, dass Peter lügt«) oder verschachteln (»Der Hund, der die Katze, die der Junge sah, jagte, bellte«). Theoretisch lässt sich das unendlich oft fortsetzen, doch in der Praxis scheitert das Satzverständnis, wenn allzu viele Phrasen aufeinandergestapelt werden. Nach Chomskys Meinung liegt das aber nicht an der Sprache an sich, sondern am begrenzten menschlichen Gedächtnis. Insbesondere behauptete er, die Gabe der Rekursion unterscheide die Sprache von allen anderen Typen des Denkens wie dem Bilden von Kategorien oder dem Wahrnehmen von Beziehungen zwischen Dingen. Er spekulierte sogar, die Rekursionsfähigkeit sei durch eine einzige genetische Mutation vor etwa 50 000 bis 100 000 Jahren entstanden.

Wiederum fanden Feldforscher Gegenbeispiele. Einige Sprachen, beispielsweise das Pirahã in Amazonien, kommen anscheinend ohne die Rekursion aus.

Wie jede linguistische Theorie versucht auch die Universalgrammatik einen Balanceakt. Sie muss einerseits einfach genug sein, um etwas zu taugen. Das heißt, die

AUF EINEN BLICK PARADIGMENWECHSEL IN DER LINGUISTIK

- 1 Der amerikanische Forscher Noam Chomsky hat viele Jahrzehnte lang die gesamte Sprachwissenschaft geprägt. Berühmt machte ihn seine Theorie der Universalgrammatik.
- 2 Chomskys Idee, das Gehirn sei mit einer mentalen Schablone für Grammatik ausgerüstet, wird jedoch zunehmend durch linguistische Feldstudien in Frage gestellt.
- 3 So postuliert die »gebrauchsbasierte Linguistik«, dass Kinder beim Spracherwerb allgemeine kognitive Fähigkeiten nutzen – und keine Universalgrammatik. Insbesondere können sie erraten, was andere Menschen ihnen mitteilen möchten.

Theorie soll Voraussagen treffen, die sie nicht selbst von vornherein enthält; sonst wäre sie nur eine lange Liste von Fakten. Sie darf aber andererseits auch nicht so simpel sein, dass sie zu wenig erklärt. Nehmen wir etwa Chomskys Vorstellung, in jeder Sprache auf der Welt hätten Sätze ein Subjekt. Das Problem ist, dass der Begriff Subjekt eher eine Familienähnlichkeit von Merkmalen beschreibt als eine klare Kategorie. Rund 30 grammatische Kennzeichen charakterisieren, was ein Subjekt ist. Auf jede einzelne Sprache trifft nur eine gewisse Teilmenge zu, und die Kennzeichenmenge in einer Sprache hat oft nichts mit der in einer anderen gemeinsam.

Chomsky versuchte zu definieren, wie sich der Baukasten der Sprache zusammensetzt – welche mentalen Mechanismen Menschen befähigen, Sätze zu bilden. Sobald Gegenbeispiele gefunden wurden, meinten Chomskys Verteidiger: Auch wenn in einer Sprache eine Komponente fehlt, etwa die Rekursion, bedeutet das noch lange nicht, dass die Komponente nicht in den Baukasten gehört. Das wäre ja so, als ob salzig nicht zu den Grundgeschmäckchen gehörte, bloß weil eine bestimmte Kultur die Speisen nicht salzt. Leider erschwert diese Argumentation den Praxistest von Chomskys Annahmen so sehr, dass sie sich kaum mehr falsifizieren lassen.

Todesglocken für die Theorie

Ein entscheidender Schwachpunkt von Chomskys Theorien betrifft den Spracherwerb: Angeblich kommen Kinder bereits mit der Fähigkeit auf die Welt, Sätze nach abstrakten grammatischen Regeln zu formen, wobei deren präzise Form übrigens je nach Theorieversion schwankt. Viele neue Untersuchungen zeigen aber, dass der Spracherwerb nicht so funktioniert. Kinder erlernen vielmehr zunächst einfachste grammatische Muster; später erraten sie Stück für Stück die dahinterliegenden Regeln.

Anfangs bilden Kleinkinder nur konkrete und simple grammatische Konstruktionen, die auf bestimmten Wortmustern beruhen: »Wo ist das X?«, »Ich will X«, »Mehr X«, »Das ist ein X«, »Ich Xe das«, »Gib X her«, »Mama Xt das«, »Xen wir«, »Wirf X«, »X ist weg«, »Mami X«, »Ich habe das geXt«, »Setz dich auf X«, »Mach X auf«, »X ist hier«, »Da ist ein X«, »X kaputt«. Später verbinden sie diese frühen Muster zu komplexeren Sätzen wie »Wo ist das X, das Mami geYt hat?«.

Viele Verfechter der Universalgrammatik akzeptieren durchaus diese Charakterisierung der frühkindlichen Grammatikentwicklung. Sie behaupten aber: Die komplexeren Konstruktionen setzen eine kognitive Fähigkeit voraus, welche die abstrakten Kategorien und Prinzipien der Universalgrammatik nutzt.

Der Universalgrammatik zufolge bildet das Kind jede Frage nach festen Regeln, die auf grammatischen Kategorien beruhen: »Was (Objekt) hast (Hilfsverb) du (Subjekt) verloren (Verb)?« Antwort: »Ich (Subjekt) habe (Hilfsverb) etwas (Objekt) verloren (Verb).« Wenn das zuträfe, müssten Kinder in einer bestimmten Entwicklungsphase bei allen Fragesätzen ähnliche Fehler machen. Das ist jedoch nicht der Fall. Kleinkinder sagen oft etwas wie

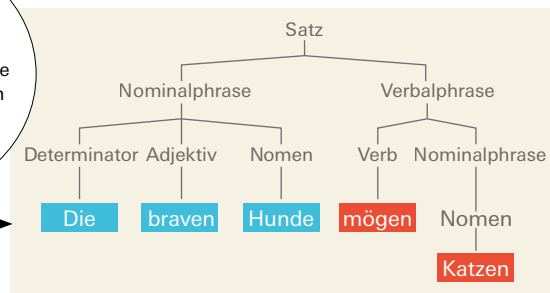
Laut Chomsky platziert ein angeborenes Satzbildungsprogramm Wörter an die grammatisch korrekten Stellen – »brav« (Adjektiv), »Hunde« (Nomen).

Zwei Sprachtheorien

Vor mehr als 50 Jahren eroberte Noam Chomsky die Linguistik im Sturm. Seine Idee war einfach: Jedes Kind verfügt von Geburt an über fundamentale Regeln zur Erzeugung grammatisch wohlgeformter Sätze. Chomsky versuchte diese Regeln und ihre Funktionsweise zu definieren. Er meinte, ohne die Universalgrammatik wären Kinder unfähig, Sprache zu erwerben. Seit einigen Jahren bekommt Chomskys Ansatz durch neue Theorien ernste Konkurrenz. Ihnen zufolge erkennen Kinder beim Spracherwerb gewisse Muster in den Sätzen, die sie hören.

Die Universalgrammatik

Gemäß Chomsky umfasst die Universalgrammatik Regeln für Phrasen (»die braven Hunde«) sowie Regeln für die Transformation der Phrasen, zum Beispiel Passivierung (»Katzen werden von braven Hunden gemocht«). In den vergangenen Jahren hat sich die Theorie weiterentwickelt, beharrt aber auf der Grundidee, dass Kinder mit der Fähigkeit geboren werden, Worte nach einem grammatischen Schema zuzuordnen.



Gebrauchsbasierte Linguistik

Ein neuer linguistischer Ansatz verwirft die Idee der Universalgrammatik und betont die kindliche Fähigkeit, intuitiv zu erkennen, was andere denken. Durch Zuhören erlernt das Kind Gebrauchsmuster, die auf unterschiedliche Sätze zutreffen. Zum Beispiel kann nach der Phrase »Der Hund möchte« das Wort »Ball« durch »Futter« ersetzt werden. Diese Theorie beschreibt recht gut, wie zwei- bis dreijährige Kinder tatsächlich sprechen lernen, indem sie Wissen über Wortbedeutung und Grammatik sammeln.



»Warum er kann nicht kommen?« – vertauschen also »er« und »kann«. Gleichzeitig formulieren sie andere Fragen völlig korrekt, zum Beispiel: »Wann kann er kommen?«

Experimentelle Studien bestätigen, dass Kinder korrekte Fragesätze meist mit bestimmten Fragewörtern und Hilfsverben bilden, die sie schon gut kennen, etwa »Was hat er?«, während sie bei weniger vertrauten Kombinationen von Fragewort und Hilfsverb weiterhin Fehler machen.

Darauf erwidern die Universalgrammatiker: Kinder besitzen von Haus aus die erforderliche Sprachkompetenz, doch andere Faktoren wie unvollkommene Reife von Gedächtnis, Aufmerksamkeit und sozialer Kompetenz beeinträchtigen die Sprachperformanz: die tatsächliche individuelle Leistungsfähigkeit. Dies verschleiert angeblich die wahre Natur der »reinen« Grammatik und erschwert deren Nachweis.

Aber vielleicht spielen ja Fertigkeiten wie Gedächtnis, Aufmerksamkeit, mentale Analogiebildung und Begreifen sozialer Situationen umgekehrt sogar die entscheidende Rolle bei der Entwicklung einer Sprache? Laut einer aktuellen Studie, an der einer von uns (Ibbotson) beteiligt war, hängt die Fähigkeit von Kindern, Vergangenheitsformen unregelmäßiger Verben zu bilden – etwa »Ich flog«, nicht »flogte« – mit der Fähigkeit zusammen, einer spontanen Versuchung zu widerstehen: jener, die erste naheliegende Antwort zu wählen, in dem Fall also »flogte«.

Ebenso wie das Baukastenargument der Universalgrammatik ist auch ihre Unterscheidung zwischen Kompetenz und Performanz kaum empirisch falsifizierbar. Diesen grundlegenden Mangel teilt Chomskys Theorie mit anderen wissenschaftlichen Paradigmen, deren empirische Basis Ansichtssache ist; man denke an die Psychologie Freuds oder die marxische Geschichtsdeutung.

Abgesehen von den empirischen Problemen der Universalgrammatik können Psycholinguisten, die mit Kindern

Der gebrauchsbasierte Ansatz unterscheidet sich grundsätzlich von der Idee der Universalgrammatik

arbeiten, nur schwer eine Theorie akzeptieren, der zufolge Kinder von Anfang an dieselben algebraischen Grammatikregeln für alle Sprachen besitzen und erst herausfinden müssen, wie eine spezielle Sprache, ob Englisch oder Suaheli, mit diesem Schema zusammenhängt. Linguisten sprechen vom Verbindungsproblem (linking problem). Einen der seltenen Versuche, dieses im Rahmen der Universalgrammatik systematisch zu lösen, unternahm der Psychologe Steven Pinker von der Harvard University in Cambridge anhand von Satzsubjekten. Pinkers Darstellung stimmte jedoch nicht mit Studien kindlicher Entwicklung überein und ließ sich auch nicht auf andere grammatische Kategorien übertragen. Das für jede Anwendung der Universalgrammatik auf den Spracherwerb zentrale Verbindungsproblem wurde nie gelöst, ja nicht einmal ernsthaft angegangen.

All das führt unweigerlich zu der Schlussfolgerung, dass die Idee einer Universalgrammatik schlicht falsch ist. Natürlich geben Wissenschaftler ihre Lieblingstheorie selbst angesichts schlagender Gegenargumente nicht gern auf, solange keine vernünftige Alternative auftaucht. Eine solche Alternative gibt es jetzt aber: die gebrauchsbasierte (usage-based) Linguistik. Die verschiedenen Fassungen dieser Theorie gehen davon aus, grammatische Strukturen seien nicht angeboren. Grammatik ist vielmehr das Ergebnis von Geschichte und Psychologie: Einerseits werden Sprachen von einer Generation zur nächsten tradiert, andererseits besitzt jede Generation soziale und kognitive Fähigkeiten, die ihr den Spracherwerb ermöglichen. Vor allem betont die neue Theorie, dass die Sprache Gehirnsysteme nutzt, die im Lauf der Evolution nicht unbedingt speziell für diesen Zweck entstanden sind. Damit unterscheidet sie sich grundlegend von Chomskys Idee, es gebe ein für die Rekursion verantwortliches Gen.

Eine Alternative zu Chomskys Bild der Sprache

Gemäß dem gebrauchsbasierten Ansatz werden Kinder nicht mit einem Spezialwerkzeug zum universellen Grammatiklernen geboren, sondern mit einer Reihe von mentalen Mehrzweckmodulen für Kategorienbildung, Deutung kommunikativer Absichten und Erfassen von Analogien. Damit bilden die Kinder aus der Sprache, die sie um sich herum hören, grammatische Kategorien und Regeln.

Zum Beispiel verstehen deutsch sprechende Kinder den Satz »Die Katze fraß den Hasen« und durch Analogie dann auch »Die Ziege kitzelte die Elfe«. Durch Verallgemeinerung gelangen sie von einem gehörten Beispiel zum nächsten. Nach ausreichend vielen Beispielen können sie sogar erraten, wer wem was in dem Satz »Der Goser mibbelte die Tamo« antat, obwohl in dem Fall die meisten Wörter keinen Sinn haben. Die Grammatik muss etwas sein, was Kinder jenseits der Wörter erkennen, weil die Sätze auf der Wortebene wenig gemeinsam haben.

Die sprachliche Bedeutung entsteht durch eine Wechselwirkung zwischen der möglichen Bedeutung der Wörter selbst und der Bedeutung der grammatischen Konstruktion, in der sie stehen. Zum Beispiel ist »niesen« laut Wörterbuch ein intransitives Verb, das nur einen einzigen Akteur hat: den, der niest. Wird es jedoch in eine ditransitive Konstruktion gezwungen, die sowohl ein direktes als auch ein indirektes Objekt haben kann, könnte ein Satz lauten: »Sie niest ihm die Serviette.« Dabei wird »niesen« als ein Akt des Übertragens konstruiert. Sie veranlasst die Serviette, zu ihm zu gelangen. Wie das Beispiel zeigt, prägt die grammatische Struktur die Bedeutung des Satzes ebenso stark wie die Wörter. Das steht in deutlichem Widerspruch zu Chomskys Idee, es gebe völlig bedeutungsfreie Ebenen der Grammatik.

Die Idee gebrauchsbasierter Mehrzweckmodule erklärt den Spracherwerb, ohne dazu zwei Hilfskonstruktionen der Universalgrammatik zu benötigen: erstens algebraische Regeln für die Kombination von Symbolen – eine so genannte Kerngrammatik, die im Gehirn fest verdrahtet ist – und zweitens ein Lexikon von Ausnahmen, das alle übrigen Eigenheiten natürlicher Sprachen umfasst.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/sprache-und-linguistik

ISTOCK / AFR

Das Problem bei diesem Ansatz ist, dass einige grammatische Konstruktionen zum Teil auf Regeln beruhen und zum Teil nicht. Im englischen umgangssprachlichen Beispiel »Him a presidential candidate?!« (sinngemäß »Das soll ein Präsidentschaftskandidat sein?!«) behält das Subjekt »him« die Form eines direkten Objekts, aber die Satzglieder stehen nicht in der richtigen Reihenfolge. Ein englischer Muttersprachler kann nach diesem Schema eine unendliche Vielfalt von Sätzen bilden: »Her go to ballet?!« oder »That guy a doctor?!«. Gehören diese Äußerungen nun zur Kerngrammatik oder in die Liste der Ausnahmen? Falls sie nicht Teil der Kerngrammatik sind, müssen sie separat gelernt werden. Doch wenn Kinder solche teils regelhaften, teils irregulären Äußerungen lernen können, warum soll das nicht auch für die übrige Sprache ebenfalls gelten? Wozu brauchen wir dann überhaupt eine Kerngrammatik?

Die Idee der Universalgrammatik widerspricht der Erfahrung, dass Kinder Sprache durch soziale Interaktion erwerben und dabei Satzkonstruktionen üben, die von Sprachgemeinschaften im Lauf der Zeit geschaffen wurden. In manchen Fällen lässt sich zeigen, wie dieses Lernen genau funktioniert. Zum Beispiel sind in den meisten Sprachen Relativkláuseln üblich; oft entstehen sie durch Verkettung separater Sätze. Wir könnten sagen: »Mein Bruder ... Er lebt in Arkansas ... Er spielt gern Klavier.« Auf Grund verschiedener kognitiver Prozesse – Schematisierung, Habituation, Dekontextualisierung und Automatisierung – entwickeln sich diese Phrasen über lange Zeiträume hinweg zu einer komplexeren Konstruktion: »Mein Bruder, der in Arkansas lebt, spielt gern Klavier.« Ähnlich kann sich ein Satz wie »Ich zog an der Tür, und sie ging zu« allmählich in »Ich zog die Tür zu« verwandeln.

Anscheinend verfügen Menschen über die spezielle Fähigkeit, Kommunikationsabsichten anderer zu entschlüsseln, das heißt, zu erkennen, was ein Sprecher sagen will. Ich kann zum Beispiel wahlweise sagen: »Sie gab/vererbte/sandte/lieh/verkaufte der Bibliothek einige Bücher«, aber nicht: »Sie verschenkte der Bibliothek einige Bücher.« Wie neue Forschungen zeigen, gibt es verschiedene Mechanismen, mit denen Kinder solche unpassenden Analogien eingrenzen. Zum Beispiel meiden sie solche, die überhaupt keinen Sinn ergeben. So würden Kinder niemals versucht sein zu sagen: »Sie aß der Bibliothek einige Bücher.« Hören sie außerdem sehr oft »Sie verschenkte einige Bücher an die Bibliothek«, dann hemmt dies den Impuls zu sagen: »Sie verschenkte der Bibliothek einige Bücher.«

Solche Eingrenzungsmechanismen reduzieren die möglichen Analogien, die ein Kind bilden könnte, während es die Kommunikationsabsichten des Gesprächspartners zu verstehen versucht. Wir alle verwenden diese Fähigkeit, Absichten zu erraten, wenn wir »Können Sie mir die Tür öffnen?« als Bitte verstehen und nicht als Frage nach unserer Fähigkeit, Türen zu öffnen.

Gebrauchsbasierte Theorien sind weit davon entfernt, ein komplettes Modell für das Funktionieren von Sprache anzubieten. Dass Kinder aus dem Hören gesprochener Phrasen sinnvolle Verallgemeinerungen herleiten, erklärt noch nicht vollständig, wie sie Sätze konstruieren. Es gibt unzählige mögliche Übertragungen, die zugleich verständlich und nicht grammatisch korrekt sind – zum Beispiel »Er verschwand den Hasen« –, doch Kinder bilden nur erstaunlich wenige davon. Anscheinend sind Heranwachsende für die Tatsache empfänglich, dass die Sprachgemeinschaft, zu der sie gehören, eine Norm befolgt und eine Idee nur so und nicht anders mitteilt. Dabei hält die Kindersprache ein delikates Gleichgewicht zwischen eigenwilliger Kreativität (»Ich gehe einkaufen«) und grammatischer Norm (»Ich ging einkaufen«). Für die Vertreter der gebrauchsbasierten Linguistik bleibt noch viel zu tun, bis sie erklären können, wie diese Kräfte im Verlauf der kindlichen Sprachentwicklung genau zusammenwirken.

Frischer Wind für Sprachforscher

Chomskys Paradigma brach radikal mit den seinerzeit herrschenden informellen Methoden der Sprachwissenschaft; es verdeutlichte den komplizierten kognitiven Aufwand, den der Spracherwerb erfordert. Aber dieselbe Theorie, die den Linguisten die Augen öffnete, blendete sie auch. Heute geben sich viele Forscher nicht mehr mit rein formalen Modellen wie der Universalgrammatik zufrieden, ganz abgesehen von deren empirischen Schwächen. Außerdem sind viele moderne Linguisten unglücklich über abstrakte Modelle, die am Schreibtisch ausgedacht werden, während unzählige linguistische Daten – oft online zugänglich – darauf warten, analysiert zu werden.

Der aktuelle Paradigmenwechsel ist gewiss nicht abgeschlossen, aber es weht ein frischer Wind durch die Linguistik. Die Universalgrammatik scheint endgültig in der Sackgasse zu stecken. An ihrer Stelle verspricht die gebrauchsbasierte Linguistik einen aussichtsreichen Zugang zu den 6000 Sprachen, die auf der Welt genutzt werden. ◀

QUELLEN

Bybee, J.: *Language, Usage and Cognition*. Cambridge University Press, Cambridge 2010

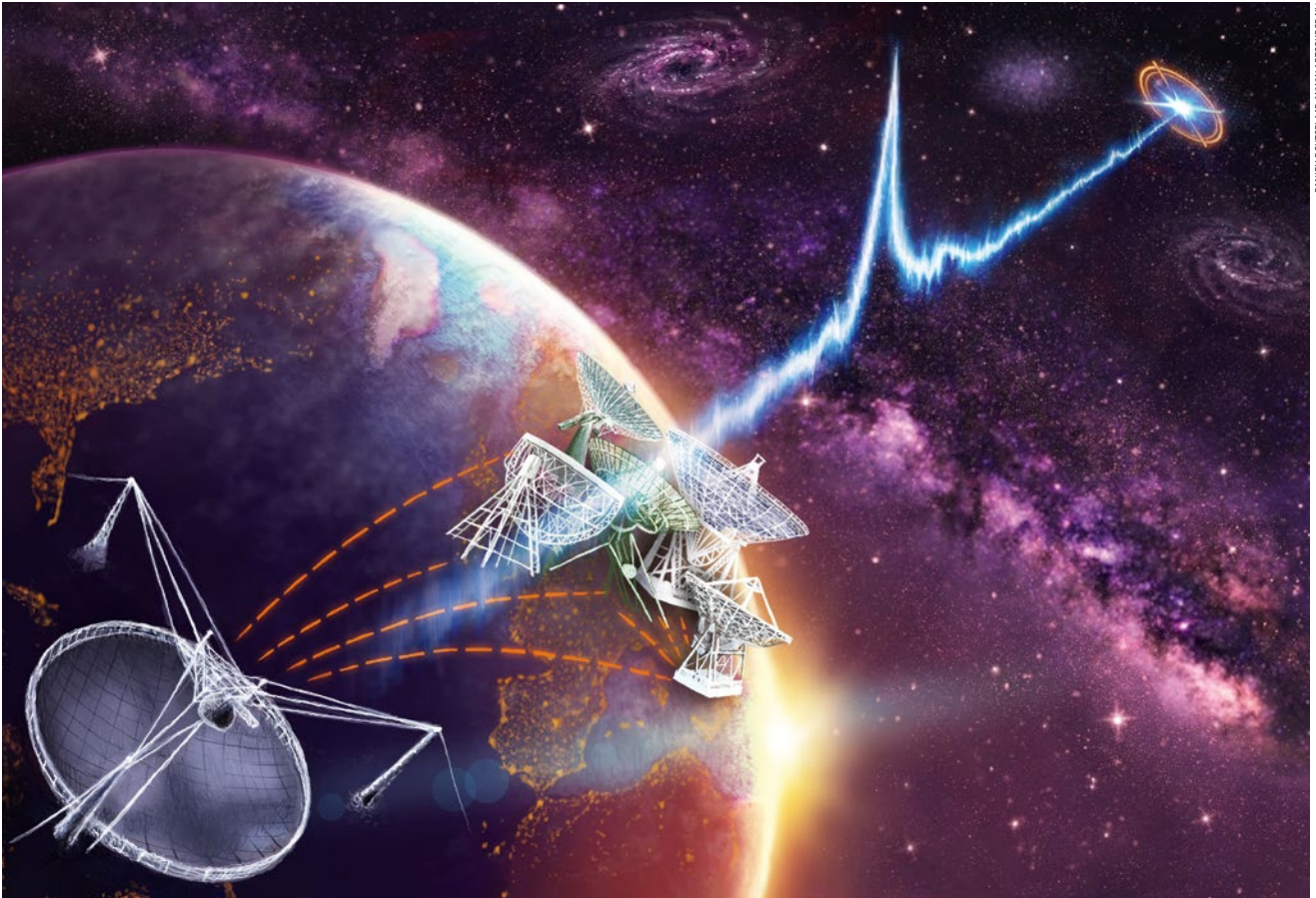
Goldberg, A.: *Constructions at Work: The Nature of Generalization in Language*. Oxford University Press, Oxford 2006

Tomasello, M.: *Constructing a Language: A Usage-Based Theory of Language Acquisition*. Harvard University Press, Cambridge 2003

LITERATURTIPP

Stix, G.: Gute Zusammenarbeit. In: *Spektrum der Wissenschaft* 5/2015, S. 52–59

Michael Tomasello's Erforschung des Denkvermögens von Kleinkindern und Schimpansen



DANIEL FOTSELAGI (WWW.ARTSOURCE.NL)

Ein Verbund mehrerer, hier künstlerisch dargestellter Teleskope ermöglichte es, die Position der Radioquelle FRB 121102 genauer einzugrenzen.

INTERFEROMETRIE DIE QUELLE DER KOSMISCHEN RADIOBLITZE

Seit zehn Jahren beobachten Astronomen energiereiche, kurzlebige Radioausbrüche. Erstmals haben sie nun die Herkunft eines solchen Blitzes bestimmt.

Es ist noch nicht lange her, da galt Radioastronomie als angestaubt: Jahrzehntlang hatten Astronomen den Himmel mit ihren Antennen durchforstet und dabei das Wasserstoffgas der Milchstraße und Pulsare kartografiert. Nach einer Blütezeit in den 1960er Jahren brachte die Radioastronomie nichts wirklich Neues zu Tage; die spannenden Entdeckungen konzentrierten sich auf andere Wellenlängenbereiche. Der Kosmos im Radiolicht schien vollständig erfasst – ein Irrtum, wie sich spätestens 2007 zeigte. Damals suchte David Narkevic, ein Student der West Virginia University in den USA, in Archivdaten des australischen Parks-Radioteleskops nach

periodischen Signalen, die von bislang unentdeckten Pulsaren stammen könnten.

In den Aufzeichnungen vom 24. Juli 2001 fand er einen merkwürdigen, weniger als fünf tausendstel Sekunden dauernden Blitz ungefähr aus der Richtung der Kleinen Magellanschen Wolke. Weder davor noch danach war an dieser Stelle ein ähnliches Signal zu sehen gewesen. Das nach Narkevics Professor Duncan Lorimer »Lorimer-Burst« genannte rätselhafte Phänomen veranlasste andere Forscher, nach ähnlichen Signalen zu suchen. Gefunden haben sie seither rund 20 solcher »Fast Radio Burst« (FRB) genannten Ausbrüche. Alle blinkten wie der Lorimer-Burst nur ein einziges Mal auf – alle, bis auf einen: FRB 121102.

Zum ersten Mal tauchte FRB 121102 am 2. November 2012 in Richtung des Sternbilds Fuhrmann auf. Auch auf ihn stießen die Wissenschaftler in Archivdaten, und zwar in jenen des damals größten Radioteleskops der Welt, des 300-Meter-Teleskops bei Arecibo auf Puerto Rico. Im März 2016 veröffentlichte schließlich ein Team um Laura Spitler vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn in der Fachzeitschrift »Nature« einen viel beachteten Artikel: Die Astronomen hatten wiederholt Blitze aus der Richtung

von FRB 121102 entdeckt. Dank dieser Eigenart, so hofften die Forscher, würden sie erstmals zwei grundlegende Fragen klären können: Woher stammen die Radioblitze? Und was löst sie aus?

Mit vernetzten Observatorien dem Wiederholungstätter auf der Spur

Doch schon ihren Ursprung herauszufinden, erwies sich als äußerst schwierig. Denn moderne Radioteleskope sind zwar sehr empfindlich, aber eher schlecht darin, die Position einer Radioquelle am Himmel zu bestimmen. Ursache ist die im Vergleich zu sichtbarem Licht große Wellenlänge. Um das Problem zu umgehen, schalten Radioastronomen bereits seit Längerem mehrere Radioteleskope zusammen. Diese Technik ist als Interferometrie bekannt. Das Auflösungsvermögen eines solchen Netzwerks ist wesentlich besser als das eines Einzelteleskops und steigt mit dem Abstand der einzelnen Teleskope voneinander.

Im Fall der Radioblitze half die Interferometrie zunächst nicht weiter. Denn man wusste im Voraus nicht, wo der nächste auftauchen würde – gefunden hatte man alle bisherigen eben nicht »live«, sondern in Archivdaten. Es wäre schon ein gewaltiger Zufall, sollte ein einzelner kurzlebiger Blitz genau an dem Ort aufleuchten, auf den etwa die Teleskope des Very Large Array (VLA) in New Mexico ausgerichtet sind. Ohne eine genaue Positionsbestimmung ist es aber unmöglich, herauszufinden, ob die Blitze etwa von besonders hellen Pulsaren aus der Milchstraße stammen oder aus fernen Galaxien. Dabei ist das entscheidend: Entstehen die FRBs in der Milchstraße, sind sie relativ energiearm. Kommen sie dagegen aus größerer Entfernung, gehören sie zu den heftigsten Explosionen, die Astronomen bisher beobachtet haben.

Dennoch waren die Forscher schon bei früheren FRBs sicher, dass sie aus dem Weltall kommen mussten und nicht etwa auf irdische Störquellen zurückzuführen waren. Das kurzwellige Radiolicht traf nämlich etwas früher auf der Erde ein als das langwellige. Dieser Dispersion genannte Effekt tritt auf, wenn Radiostrahlen Materie wie das interstellare Gas passieren.

Der Blitz könnte etwa in der Umgebung dichter Gaswolken entstanden sein, welche die Strahlung derart beeinflussen. Dann dürfte sich die Quelle in unserer Galaxis befinden. Die Radiostrahlung hat allerdings vielleicht auch einen sehr viel längeren Weg hinter sich und stammt von weit außerhalb der Milchstraße. Im intergalaktischen Raum ist das Gas zwar sehr viel verdünnter, der dadurch hervorgerufene Dispersionseffekt summiert sich aber über die lange Strecke auf.

Anhand der wiederholten Ausbrüche von FRB 121102 konnten die Astronomen diese beiden Hypothesen nun

Diese Aufnahme mit dem Gemini-Teleskop auf Hawaii zeigt die entfernte Zwerggalaxie, der sich die Radioquelle FRB 121102 zuordnen lässt. Der Ort der Radioblitze befindet sich innerhalb des roten Kreises.

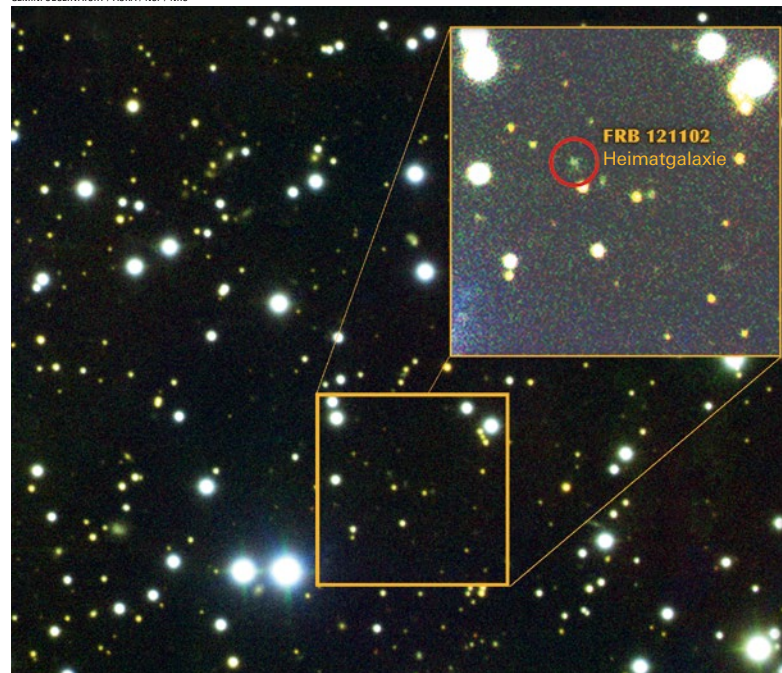
überprüfen. Gelänge es außerdem, ein optisches Gegenstück zu der Radiostrahlung zu identifizieren, ließe sich die Frage nach der Herkunft der Blitze klären.

Ein Team um Shambrata Chatterjee von der Cornell University im US-Bundesstaat New York richtete dazu die Antennen des VLA auf die Himmelskoordinaten des FRB aus. Tatsächlich registrierten die Forscher am 23. August 2016 einen weiteren Ausbruch, insgesamt flammte FRB 121102 während der VLA-Beobachtungen neunmal während eines Monats auf. Mit den Messergebnissen konnten sie seine Position auf ein Zehntel einer Bogensekunde festlegen. Außerdem entdeckten Chatterjee und seine Kollegen dort eine dauerhaft, aber schwach leuchtende Radioquelle. In optischen Aufnahmen des 10-Meter-Gemini-Teleskops auf Hawaii fand sich an der Stelle überdies eine schwache Zwerggalaxie (Bild unten).

Damit war zum ersten Mal eindeutig belegt, dass uns zumindest dieser Fast Radio Burst aus einer Entfernung von rund 2,5 Milliarden Lichtjahren erreicht – also aus dem tiefen Kosmos. Bei noch besser aufgelösten Beobachtungen mit einem noch größeren Netzwerk von Radioteleskopen, das sich über den gesamten europäischen Kontinent verteilt und zu deren größten die 100-Meter-Antenne in Effelsberg in der Eifel zählt, fanden die Astronomen sogar heraus, dass die Radioquelle (sowohl die der hellen Ausbrüche als auch die permanente, schwache Quelle) nicht im Zentrum ihrer Heimatgalaxie liegt.

Was aber löste die Blitze von FRB 121102 aus? Gewiss handelt es sich um einen enorm energiereichen Prozess. Ideen dazu haben Chatterjee und seine Kollegen zwar, doch leider passt keine davon zu den Beobachtungsdaten. Nach einem Szenario würde etwa ein massereiches Schwarzes Loch Materie aus seiner Umgebung aufsam-

GEMINI OBSERVATORY / AURA / NSF / NRC



meln, erhitzen und schließlich verschlucken. Dabei könnten wiederholte Radioblitzte entstehen. Allerdings sollten entsprechend massereiche Schwarze Löcher nur in den Zentren von Galaxien der Größe der Milchstraße vorkommen. Die Heimatgalaxie von FRB 121102 ist hingegen nur ein Zehntel so groß und ein Tausendstel so massereich. Zudem müssten die Blitze dann genau aus dem Zentrum der Galaxie stammen, was nicht der Fall ist. Die Umgebung eines Schwarzen Lochs dürfte außerdem in anderen Wellenlängenbereichen aufleuchten. Doch das lässt sich nicht beobachten.

Auch eine Alternativerklärung steht auf wackligen Füßen: Magnetare, also extrem dichte Neutronensterne, die übrig gebliebenen Kerne ausgebrannter Riesensterne. Mit ihren starken Magnetfeldern könnten sie entsprechend energiereiche Blitze erzeugen. Magnetare rotieren aber mit einer festgelegten Periode und sollten daher regelmäßige Radiopulse aussenden, als FRB 121102 es tut.

Ausgerechnet der erwischte Blitz ist überhaupt nicht typisch für solche Ausbrüche

Die erstmalige Bestimmung der Herkunft eines Fast Radio Burst von Chatterjee und seinen Kollegen ist zweifellos ein wichtiger Erfolg, doch scheint ausgerechnet FRB 121102 dafür nicht unbedingt repräsentativ zu sein: Bei keinem anderen ließen sich wiederholte Ausbrüche registrieren.

Damit ähneln FRBs den in den 1960er Jahren entdeckten Gammastrahlenausbrüchen, die ebenfalls aus fernen Galaxien kommen und bis heute noch nicht vollständig verstanden sind. Doch eines weiß man sicher: Es gibt mehrere Entstehungsmechanismen. Das kann auch auf die Radioblitzte zutreffen. Obwohl beide Phänomene ähnlich erscheinen, gibt es bislang aber keinen Hinweis auf einen Zusammenhang.

Auf die Forscher kommt eine Menge Arbeit zu. Sie müssen einerseits noch viel mehr FRBs aufspüren. Hochrechnungen zeigen, dass bis zu 10 000 von ihnen pro Tag irgendwo über uns erscheinen. Die allermeisten entgehen den Astronomen also bislang, weil heutige Radioteleskope stets nur einen winzigen Ausschnitt des Himmels im Blick haben. Neu geplante Radioantennen könnten hier Abhilfe schaffen.

Zum anderen muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Herkunft der Einzelblitze zu bestimmen – nicht nur die von Wiederholungstättern wie FRB 121102. Mit der von Chatterjee angewendeten Methode geht das nicht, und bislang fehlt den Astronomen die zündende Idee. Kurzum: Es war schon lange nicht mehr so spannend, Radioastronom zu sein! ◀

Jan Hattenbach ist Physiker sowie Astronom und arbeitet als Wissenschaftsjournalist.

QUELLE

Chatterjee, S. et al.: A Direct Localization of a Fast Radio Burst and its Host. In: Nature 541, S. 58–61, 2017

KREBSIMMUNOTHERAPIE STUEBERBARE TUMORBEBKAMPFUNG

CAR-T-Zellen können bestimmte Krebserkrankungen äußerst wirksam bekämpfen. Leider lösen sie mitunter schwere Nebenwirkungen aus. Neue Anpassungen sollen diese besser in den Griff bekommen.

▶ CAR-T-Zellen gelten als eine der meistversprechenden Therapien bei Blutkrebs. Sogar bei Krebskranken, die als unheilbar galten, führte die Behandlung mit den künstlich veränderten Immunzellen mitunter zu einem vollständigen Verschwinden der Erkrankung. Einige der ersten Studienteilnehmer sind bis heute, vier Jahre nach der Therapie, tumorfrei.

Doch die neue Methode verursacht manchmal schwere, sogar lebensbedrohliche Nebenwirkungen. Im Sommer 2016 stoppte die amerikanische Arzneimittelbehörde FDA vorübergehend eine klinische Studie, nachdem drei mit CAR-T-Zellen behandelte Leukämiepatienten plötzlich an Hirnschwellungen verstorben waren. Nur fünf Tage nach dem Vorfall erlaubte sie das Fortsetzen der Versuche, aber wenige Monate später forderte die Therapie zwei weitere Opfer. Im November 2016 wurde die Studie daher komplett eingestellt.

Behandlungen mit CAR-T-Zellen stehen auf Grund solcher tragischen Zwischenfälle vor einer ungewissen Zukunft. Ob sie je zu den Standardkrebstherapien gehören werden, hängt vor allem davon ab, ob es gelingt, die schweren Nebenwirkungen zu vermeiden. Wissenschaftler suchen deshalb nach Möglichkeiten, das Verfahren sicherer zu machen.

Um CAR-T-Zellen herzustellen, entnimmt man einem Krebspatienten T-Lymphozyten und stattet diese im Labor künstlich mit einem so genannten CAR-Rezeptor aus (chimeric antigen receptor, deutsch: chimärer Antigen-Rezeptor, siehe **Spektrum** Oktober 2016, S. 32). Dann bringt man sie in den Körper des Patienten zurück. Das CAR-Molekülkonstrukt kombiniert ein CD19 erkennendes Molekül mit einem Aktivierungsschalter für die T-Zelle. CD19 sitzt unter anderem auf leukämischen und Lymphomzellen – CAR-T-Zellen heften sich deshalb gezielt an entsprechende Krebszellen, werden sofort aktiv und attackieren diese. Außerdem beginnen sie sich rasant zu vermehren: Jede angeregte CAR-T-Zelle bildet bis zu 10 000 Tochterzellen.

Auf Grund dieser Eigenschaften vernichtet die CAR-T-Zellbehandlung in kürzester Zeit große Mengen an Tumorzellen. Das kann jedoch die körperliche Abfallbeseitigung überfordern, denn sie muss auf Hochtouren arbeiten, um die vielen Krebszelltrümmer zu entsorgen. Wenn sie es nicht schafft, kann der Stoffwechsel entgleisen. Im Extremfall kommt es dann zum Organversagen – ein als »Tumorlyse-Syndrom« bezeichneter Zustand.

Daneben verursacht die durchschlagende Wirkung der CAR-T-Zelltherapie ein weiteres Problem. Vermehren sich nämlich die veränderten T-Zellen, produzieren sie auch Zytokine. Das sind Signalmoleküle, die eine wichtige Rolle bei immunologischen Reaktionen und Entzündungsprozessen spielen. Zytokine locken zusätzliche Immunzellen herbei und regen sie ihrerseits zur Zytokinproduktion an. Diese positive Rückkopplung kann beim CAR-T-Verfahren den Körper mit Zytokinen überfluten – es kommt zu einem »Zytokinsturm«. Die Folge: Entzündungsreaktionen im gesamten Körper mit Fieber, Schwellungen bis hin zum Organversagen. Um derart gravierende Nebenwirkungen zu vermeiden, arbeiten Forscher seit einigen Jahren daran, CAR-T-Zellen so zu programmieren, dass man sie bei Bedarf außer Gefecht setzen kann.

Nach Gebrauch abgeschaltet

Zu denen, die auf dieses Ziel hinwirken, gehört das Team um Dirk Busch von der Technischen Universität in München. Es nutzt ein Molekülkonstrukt, das 2011 am Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle erzeugt wurde, um Zellen im Körper der Patienten verfolgen

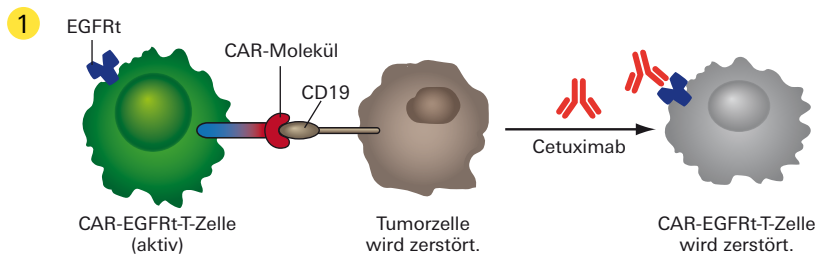
zu können. Die CAR-T-Zellen von Busch enthalten zusätzlich zum CAR-Molekül eine verkürzte Version des Wachstumsfaktor-Rezeptors EGFR, den so genannten EGFRt. Der Clou dabei: Der therapeutische Antikörper Cetuximab, den Ärzte bereits gegen Darmkrebs einsetzen, bindet sich an den EGFRt-Rezeptor – und somit auch an die CAR-EGFRt-T-Zellen – und markiert sie als Ziele für die Körperabwehr. Es kommt eine Immunreaktion in Gang, welche die veränderten Zellen ausschaltet.

Die Forscher verabreichten leukämiekranken Mäusen die CAR-EGFRt-T-Zellen ins Blut. Darauf sank wie bei menschlichen Patienten, die mit CAR-T-Zellen behandelt werden, in kurzer Zeit die Zahl der Tumorzellen. Leider aber auch die der gesunden B-Zellen, die zu den weißen Blutkörperchen gehören und ebenfalls das Antigen CD19 auf ihrer Oberfläche tragen. Drei Wochen nach dem Eingriff zeigten die behandelten Mäuse keine Anzeichen einer Leukämie mehr. Dennoch waren die CAR-T-Zellen in ihrem Körper weiterhin aktiv und fuhrten fort, sämtliche B-Zellen zu eliminieren – und damit einen wesentlichen Teil der Immunabwehr. Busch und seine Kollegen verabreichten den Nagern deshalb zweimal Cetuximab. Die erste Dosis

Die Entfesselung fesseln

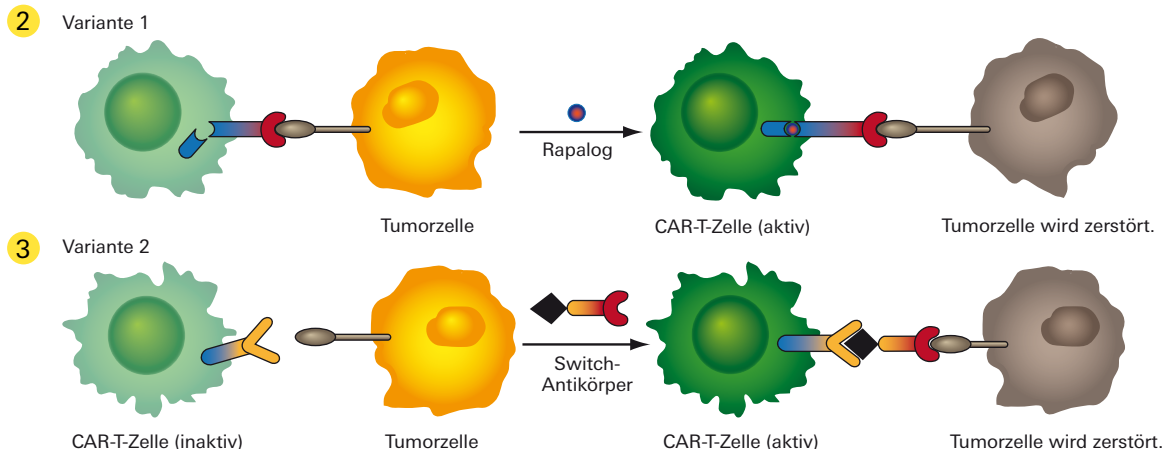
CAR-T-Zellen sind Immunzellen, die man einem Krebspatienten entnommen, außerhalb seines Körpers scharf gemacht und ihm wieder zurückinjiziert hat, damit sie seine Tumoren vernichten. Das Problem dabei: Sie entfesseln manchmal lebensbedrohliche Überreaktionen des Abwehrsystems. Neue Verfahren sollen das verhindern, indem sie die Immunreaktion abschalten, falls erforderlich.

CAR-T-Zellen mit Aus-Schalter



Forscher haben CAR-T-Zellen mit dem verkürzten Wachstumsfaktor-Rezeptor EGFRt ausgestattet. Diesen nutzen sie als Andockstelle für den therapeutischen Antikörper Cetuximab, um die Zellen notfalls zu inaktivieren (1). Andere Teams verfolgen den entgegengesetzten Ansatz: CAR-T-Zellen, die erst aktiviert werden müssen, um zu wirken. Als An-Schalter kann das Molekül Rapalog dienen (2) oder ein Antikörper namens Switch (3).

CAR-T-Zellen mit An-Schalter



schaltete bis zu 95 Prozent der CAR-EGFR-T-Zellen aus, nach der zweiten Dosis waren die veränderten Zellen praktisch vollständig verschwunden. Infolgedessen nahm die Zahl der B-Zellen im Blut der Mäuse wieder zu und hatte nach sechs Wochen ein normales Niveau erreicht. Würde nun aber auch die Krebserkrankung zurückkehren? Offenbar nicht: Selbst 40 Tage nach der Cetuximab-Gabe deutete nichts auf einen Rückfall hin.

Ein solches Verfahren könnte es in der Humanmedizin vielleicht erlauben, therapeutische CAR-T-Zellen »auszuknipsen«, sobald ihre Wirkung nicht mehr erwünscht ist. Doch ob man damit auch einen lebensbedrohlichen Zytokinsturm abwenden könnte, ist unklar. Dieser entwickelt sich nämlich äußerst schnell, innerhalb weniger Stunden nach dem Verabreichen der CAR-T-Zellen. Kann man die Zellen nicht schnell genug wieder ausschalten, bleibt die Gefahr tödlicher Komplikationen.

Und es gibt natürlich noch ein weiteres Risiko: Stoppt man die CAR-T-Zellen zu zeitig, wirkt die Therapie möglicherweise schlechter, und der Krebs kommt wieder. Bis jetzt weiß niemand, wie lange die veränderten Immunzellen im Körper der Patienten aktiv bleiben müssen, um die Krankheit dauerhaft einzudämmen. Klinische Studien haben mehrfach ergeben, dass ein verfrühter Therapieabbruch die Gefahr eines Rückfalls erhöht.

Überlegene Zwei-Schritt-Aktivierung

Aus diesem Grund entwickeln andere Forscher noch weitere Verfahren. Sie arbeiten beispielsweise an Methoden, um CAR-T-Zellen kurzfristig wieder einzuschalten. Entsprechend veränderte CAR-T-Zellen könnte man im Patienten in einen Ruhezustand versetzen und bei Bedarf »aufwecken«. An einer solchen Strategie arbeitet das Team um Wendell Lim von der University of California, San Francisco. Die Wissenschaftler haben ein CAR-Molekül mit einem An-Schalter konstruiert, das erst bei Anwesenheit eines bestimmten Moleküls (Rapalog) aktiviert wird (siehe »Die Entfesselung fesseln«, S. 21). CAR-T-Zellen mit diesem veränderten Rezeptorkomplex werden also erst dann gegen ihre Zielzellen aktiv, wenn sowohl passende Tumorzellen als auch Rapalog anwesend sind. Letzteres bleibt im Körper nicht lange stabil und wird relativ schnell abgebaut; damit hört der Angriff auf. Mehr noch: Lim und sein Team konnten die Intensität der Immunreaktion über die Rapalog-Konzentration steuern – je mehr, desto intensiver.

Mäuse, die an Leukämie erkrankt waren, profitierten von CAR-T-Zellen mit An-Schalter genauso wie von klassischen CAR-T-Zellen. Die vollständige Antitumorwirkung stellte sich jedoch erst nach vier hoch konzentrierten Rapalog-Gaben ein. Verabreichten die Forscher kein Rapalog mehr, beendeten die veränderten CAR-T-Zellen ihre Aktivität, zirkulierten aber weiterhin im Körper der Tiere.

David Rodgers vom California Institute for Biomedical Research in La Jolla und sein Team haben ein ähnlich reguliertes System entwickelt. Ihr Verfahren verwendet neben einem veränderten CAR-Molekül einen Antikörper

namens »Switch«, der die CAR-T-Zellen an die Tumorzellen koppelt. Die Immunzellen erkennen ihre Ziele erst, wenn sie sich über Switch daran gebunden haben. Der Antikörper fungiert also als Schalter in diesem System (siehe die Abbildung auf S. 21). In Versuchen an tumorkranken Mäusen bekämpften die veränderten CAR-T-Zellen den Krebs viel langsamer, wenn Switch in kleinen Dosen verabreicht wurde. Das ist durchaus vorteilhaft, denn es vermeidet die schweren Nebenwirkungen einer raschen Tumorauflösung. Die gebremste Attacke verringerte denn auch deutlich die Zytokinkonzentration im Blut der Mäuse. Als die Tiere 15 Tage nach dem Abschluss dieser mildereren Therapie Anzeichen eines Rückfalls zeigten, verabreichten die Forscher ihnen eine zehnmal so hohe Dosis des Antikörpers Switch, was die jetzt nur noch vergleichsweise wenigen Tumorzellen innerhalb von ein paar Tagen vernichtete. Die so geheilten Tiere blieben bis zum Ende des Experiments (mehr als 40 weitere Tage) ohne Anzeichen der Erkrankung.

Eine derart wohldosierte Steuerung der CAR-Aktivität könnte schwer wiegende Nebenwirkungen wie den Zytokinsturm oder das Tumorlyse-Syndrom vermeiden und gleichzeitig die Durchschlagskraft der Therapie erhalten, so die Forscher. Zudem könnte das Verfahren einen weiteren Vorteil mit sich bringen: Die veränderten CAR-T-Zellen, die nach erfolgreicher Therapie im Körper verbleiben, wandeln sich offenbar zum Teil in langlebige Immun-Gedächtniszellen um. Diese würden theoretisch noch nach Jahren wiederkehrende Tumorzellen erkennen und erneut attackieren. Besonders gut funktionierte die Umwandlung bei niedrigen Dosen des Switch-Antikörpers. Das wäre ein hilfreicher Nebeneffekt der Therapie, denn Onkologen vermuten, dass Immun-Gedächtniszellen hinter langfristigen Heilungen nach CAR-T-Zellbehandlungen stecken.

Man sollte folglich CAR-T-Zelltherapien trotz schwerer Rückschläge noch nicht abschreiben. Der amerikanische Immunologe Carl June, einer der Pioniere auf dem Gebiet, sagt voraus, dass steuerbare CAR-Moleküle wohl die nächste Entwicklungsstufe des Verfahrens einläuten werden, indem sie es Medizinern ermöglichen, die veränderten Immunzellen besser zu kontrollieren. Ob sie sich auch am Menschen bewähren, müssen klinische Studien der kommenden Jahre zeigen. ◀

Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

QUELLEN

Paskiewicz, P. J. et al.: Targeted Antibody-Mediated Depletion of Murine CD19 CAR T Cells Permanently Reverses B Cell Aplasia. In: *The Journal of Clinical Investigation* 126, S. 4262–4272, 2016

Rodgers, D. T.: Switch-Mediated Activation and Retargeting of CAR-T Cells for B-Cell Malignancies. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 113, E459–E468, 2016

Wu, C.-Y. et al.: Remote Control of Therapeutic T Cells through a Small Molecule-Gated Chimeric Receptor. In: *Science* 350, aab4077, 2015

GEOLOGIE DIE ÄLTESTEN LEBENSSPUREN

Gesteine in Grönland weisen Strukturen auf, die von urzeitlichen Bakterien stammen könnten. Damit wären Organismen auf der Erde deutlich früher entstanden als gedacht.

Entwickelte sich das Leben womöglich früher als bisher gedacht, als die Erde vielerorts noch extrem unwirtlich war? Darauf deuten die jüngsten Arbeiten von Allen Nutman von der University of Wollongong in Australien und seinen Kollegen hin. Die Paläobiologen haben auffällige Strukturen in 3,7 Milliarden Jahre altem Gestein des Isua-Grünsteingürtels im Südwesten Grönlands entdeckt. Geologen würden dort normalerweise kaum Spuren von Leben erwarten. Schließlich handelt es sich nicht um Sedimentgestein, aus dem die meisten urzeitlichen Fossilien stammen. Vielmehr haben Hitze und Druck im Erdinneren das Material des Isua-Gürtels im Lauf der Erdgeschichte stark verändert.

Nutmans Team stieß dort dennoch auf eine Rarität: In einem erst kürzlich durch Schneeschmelze frei gelegten

Areal fand es recht gut erhaltene Steine, in denen die für Sedimente typische Schichtstruktur teilweise intakt geblieben ist. Dieses winzige Fenster in die Zeit vor 3,7 Milliarden Jahren offenbart Hinweise, die auf lebensfreundliche Bedingungen auf der jungen Erde hindeuten.

So sind einige der Schichtgrenzen in den Gesteinen geriffelt. Das gilt als Indiz dafür, dass dort einst Wasser floss, das regelmäßig, etwa durch Ebbe und Flut, seine Richtung änderte. An anderer Stelle sind den Forschern die Umrisse eckiger Trümmer aufgefallen, die während eines urzeitlichen Sturms aufgehäuft worden sein dürften. Auch die chemische Zusammensetzung der Felsen deutet auf Kontakt mit Wasser hin. Vermutlich war das Meer in dieser Gegend einst flach und reich an Kohlenstoff und Mineralien. Damit ähnelte die Umgebung anderen, schon länger bekannten Biotopen aus der Vergangenheit der Erde.

Und dann sind da noch Strukturen, die wie Stromatolithen aussehen. So bezeichnen Geologen Ablagerungen, die entstehen, wenn Biofilme Sedimentpartikel binden, oder die als Relikt des Stoffwechsels von Bakterienkolonien zurückbleiben. Stromatolithen im Isua-Grünsteingürtel wären weniger überraschend, wären die Gesteine eine halbe Milliarde Jahre jünger. Fossile Stromatolithen tauchen normalerweise in Formationen auf, die zwischen 0,5 und 3,5 Milliarden Jahren alt sind, also aus jener Ära stammen, in der irdisches Leben ausschließlich aus Mikroorga-

Spektrum
der Wissenschaft

SCHREIB- WERKSTATT

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

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

Ort: Heidelberg

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

Telefon: 06221 9126-743 | service@spektrum.de
spektrum.de/schreibwerkstatt

ALLEN NUTMAN, ALLWOOD, A. C.: GEOLOGY: EVIDENCE OF LIFE IN EARTH'S OLDEST ROCKS. IN: NATURE 537, S. 500-501, 2016, FIG. 1



Ein 3,7 Milliarden Jahre altes Gestein mit Hinweisen auf Leben: Allen Nutman und seine Kollegen konnten bei der Analyse alter Gesteine kegelförmige, so genannten Stromatolithen ähnelnde Strukturen identifizieren (Umrisse durch gestrichelte schwarze Linien angedeutet). Bei diesen handelt es sich möglicherweise um Relikte bakterieller Aktivität.

nismen bestand. Noch heute bilden sich die Strukturen, etwa in seichtem Meerwasser, hydrothermalen Quellen, Binnenseen und sogar in den Seen der Antarktis.

Ein Problem ist, dass vergleichbare Formen auch ohne Mitwirkung von Organismen entstehen können. Deshalb war es bisher stets eine Herausforderung, in den ältesten geologischen Überresten nach Stromatolithen zu suchen. Je älter ein Stein ist, umso spärlicher, schlechter erhalten und schwieriger zu interpretieren sind die Spuren von Mikroorganismen. Bisher galten 3,5 Milliarden Jahre alte Stromatolithen, die meine Kollegen und ich in westaustralischen Sedimentgesteinen entdeckt haben, als ältester Hinweis auf irdisches Leben. Es schien unwahrscheinlich, dass etwas diesen Rekord brechen würde. Schließlich sind aus der Frühphase der Erdgeschichte kaum Gesteine erhalten geblieben. Und die wenigen Überbleibsel, die es gibt, haben dasselbe Problem wie die Steine von Isua: Sie wurden im Lauf der Erdgeschichte stark verändert.

Wissenschaftler haben dennoch immer wieder versucht, Lebensspuren darin nachzuweisen. So präsentierten der 2012 verstorbene Geochemiker Manfred Schidlowski vom Max-Planck-Institut für Chemie und seine Kollegen sowie Minik Rosing von der Universität Kopenhagen in der Vergangenheit Hinweise auf chemische Spuren von Mikroorganismen in Isua-Gestein. Jedoch sind die Arbeiten bis heute umstritten. Auch die Entdeckung von Nutmans Team wird zweifellos eine Kontroverse nach sich ziehen. Allerdings fußt dessen Interpretation nicht nur auf chemischen Indizien, sondern ebenso auf morphologischen und strukturellen.

Die Frage nach dem Ursprung der Spuren wird von der begrenzten Menge an Information erschwert. Den Paläobiologen stehen nur wenige Felsen an der Erdoberfläche zur Verfügung. Bloß ein Bruchteil der ursprünglichen Strukturen darin ist erhalten geblieben. Die Geolo-

gen können zwar noch deren ungefähre Form erkennen, aber viele andere Details sind verloren gegangen.

Trotz dieser Einschränkungen sind die Forscher um Nutman auf wichtige Hinweise gestoßen, wonach Mikroorganismen an der Entstehung der Sedimente beteiligt waren. So zeigen die mutmaßlichen Stromatolithen die typische hügelartige Form und feine Schichtung (siehe Abbildung links). Zudem hat sich in den Senken zwischen den Kuppeln einst offenbar Sand angesammelt. Daher dürfte es sich nicht einfach nur um Gestein handeln, das von tektonischen Kräften gefaltet wurde.

Auffällig ist auch, dass die Konzentrationen der chemischen Elemente Titan und Kalium innerhalb der Kuppeln höher sind als dazwischen. Insgesamt ist die unterschiedliche Beschaffenheit von Hügeln und Tälern ein ziemlich starkes Indiz für mikrobielle Aktivität. Vielleicht haben Mikroorganismen an diesen Stellen tatsächlich Mineralien deponiert und die Sedimentablagerung beschleunigt.

Falls es sich hier wirklich um so etwas wie die Grabstätte unserer frühesten Vorfahren handeln sollte, hätte das jedenfalls weit reichende Konsequenzen. Vor 3,7 Milliarden Jahren ging es auf der Erde noch sehr turbulent zu. Gut 800 Millionen Jahre nach Entstehung des Planeten verwüsteten regelmäßig Asteroideneinschläge die Oberfläche. Sollte Leben schon in jener Zeit Fuß gefasst haben, tritt es offenbar keineswegs so zögerlich auf und ist nicht so unwahrscheinlich wie oft gedacht. Gibt man ihm nur eine kleine Chance, wird es sie nutzen.

Damit erscheint plötzlich früheres Leben auf dem Mars plausibler. Zahlreiche Marsmissionen haben Hinweise darauf geliefert, dass sich der Rote Planet zur Entstehungszeit der Isua-Gesteine nicht allzu sehr von der Erde unterschied. An seiner Oberfläche befanden sich stehende Gewässer. Der Mars-Rover »Curiosity« fand sogar Steine, die von Wasser geformt wurden. Dessen chemische Zusammensetzung ähnelte offenbar jenem Wasser, in dem sich das Leben auf der Erde bildete. Falls tatsächlich Mikroben für die Entstehung der Isua-Strukturen verantwortlich sind, könnten Gewässer auch auf dem Mars lange genug existiert haben, um einfachen Organismen einen Lebensraum zu bieten. ◀

Abigail C. Allwood arbeitet am Jet Propulsion Laboratory des California Institute of Technology in Pasadena, Kalifornien (USA).

QUELLEN

Allwood, A. C. et al.: Stromatolite Reef from the Early Archaean Era of Australia. In: *Nature* 441, S. 714–718, 2006

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

Schidlowski, M. et al.: Carbon Isotope Geochemistry of the 3.7×10^9 -Yr-Old Isua Sediments, West Greenland. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43, S. 189–199, 1979

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 537, S. 500–501, 22. September 2016

STOFFWECHSEL DIE EINHEIZ-DIÄT

Eine deutlich reduzierte Kalorienzufuhr wandelt bei Mäusen weißes Fettgewebe in beiges um, das Energie verbrennt, statt sie zu speichern. Lassen sich auf diese Weise auch Fettleibigkeit und Diabetes bei Menschen bekämpfen?

► Körperfett im Übermaß schadet der Gesundheit: Typ-2-Diabetes, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und sogar bestimmte Krebsarten lassen sich auf Übergewicht und Fettleibigkeit (Adipositas) zurückführen. Weniger bekannt ist, dass neben dem weißen, Energie speichernden Fettgewebe eine weitere Art von Fett existiert, das eine ganz andere Aufgabe besitzt.

Lange waren die Forscher allerdings der Überzeugung gewesen, dass dieses so genannte braune Fett vor allem in neugeborenen Säugetieren vorkommt – und lediglich bei bestimmten kleineren Arten lebenslang. So erfüllt es eine wichtige Funktion im Körper von Tieren, die Winterschlaf halten: Im Gegensatz zum weißen Fett legt es keine Energievorräte an, sondern wandelt diese umgekehrt in Wärme um. Dies geschieht mit Hilfe des Entkoppler-Proteins UCP1, des Schlüsselmoleküls dieser Art von Fettzellen (fachlich: Adipozyten). Somit hilft das braune Fett dabei, die Körpertemperatur selbst unter kalten Bedingungen aufrechtzuerhalten.

Auch bei neugeborenen Menschen spielt dieses Gewebe eine wichtige Rolle, da sie ihre Temperatur noch nicht durch Muskelzittern regulieren können. Die körpereigenen Heizkraftwerke finden sich hier vorwiegend im Nacken- und Schulterbereich. Im Lauf des Heranwachsens nimmt ihr Anteil am Körpergewicht allerdings ab. Erst in den letzten Jahren haben Forscher braunes Fett auch in Erwachsenen nachgewiesen.

Wie lässt sich das braune Fettgewebe bei Erwachsenen wieder aktivieren?

Sein Energieverbrauch ist beachtlich: Wenige Gramm aktives Braunfett können innerhalb eines Jahres mehrere Kilogramm des unerwünschten weißen Fetts verbrennen. Damit bietet es sich prinzipiell als viel versprechender Ansatzpunkt zum Bekämpfen von Fettleibigkeit und Typ-2-Diabetes an. Jedoch scheinen viele Erwachsene zwar braunes Fett zu besitzen, das aber nicht mehr aktiv ist. Daher versuchen Forscher Strategien zu entwickeln, die das ändern sollen. Kälteexposition, pharmakologische Aktivierung, körperliche Betätigung sowie gewisse Nahrungsmittel haben sie bereits an Mäusen erfolgreich als mögliche Stimulatoren getestet. Die Übertragung der Resultate auf den Menschen bereitet jedoch Schwierigkeiten: Langfristige Kälteexposition lässt sich hier kaum realisieren, und pharmakologische Eingriffe sind teils mit Nebenwirkungen verbunden oder zeigen erst gar nicht die erhofften, im Tierversuch beobachteten Effekte.

Eine alternative Strategie zielt daher darauf ab, weißes Fettgewebe in so genanntes beiges Fett umzuwandeln. Diese Transformation wird als Browning (englisch für Bräunung) bezeichnet. Beige Fettzellen nehmen eine Zwischenstellung zwischen weißen und braunen ein, denn sie können – abhängig von äußeren Bedingungen – entweder Energie einlagern oder verbrauchen.

Jetzt glaubt eine Forschergruppe um Mirko Trajkovski von der Universität Genf den Schlüssel zum Umprogrammieren des weißen Fettgewebes gefunden zu haben: Die Wissenschaftler haben beobachtet, dass kalorienarme Ernährung beige Zellen im Unterhautfett von Mäusen entstehen lässt. Demnach legt also ein relatives Kaloriendefizit den Energieschalter um. Ob der Mangel durch Sport, Diät oder gesteigerten Energieverbrauch auf Grund niedriger Umgebungstemperatur entsteht, ist dabei egal.

Browning durch Hungern:

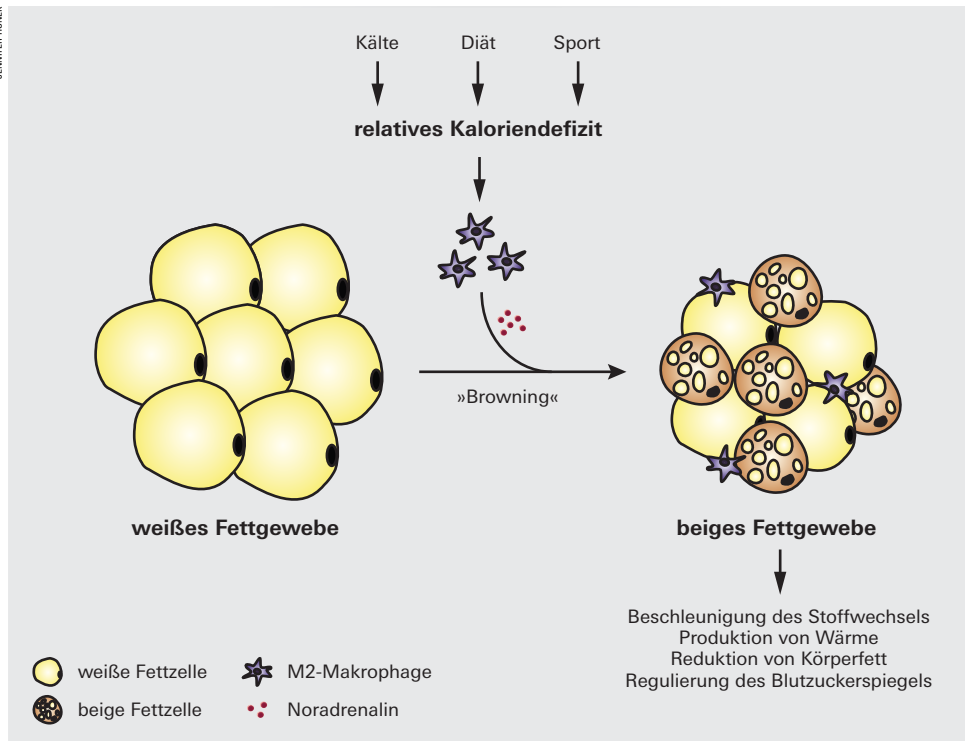
Von weiß zu beige und wieder zurück

Für ihre Experimente setzten die Forscher Labormäuse auf Diät. Vier Wochen lang erhielten die Tiere deutlich weniger Futter, was die tägliche Kalorienzufuhr um 40 Prozent verringerte. Bereits nach einer Woche begann sich das Unterhautfett der Mäuse zu wandeln. Weiße Adipozyten, die typischerweise einen einzelnen, großen Lipidtröpfchen enthalten, wichen zunehmend kleineren Zellen mit mehreren Fetttropfchen – beigen Adipozyten. Der Browning-Effekt verstärkte sich, je länger die Kalorienbeschränkung andauerte, und erreichte nach vierwöchiger Diät seinen Höhepunkt.

Die Wissenschaftler untersuchten die Genaktivität der beigen Zellen und fanden heraus, dass in ihnen tatsächlich das UCP1-Gen abgelesen wurde. Das Browning erwies sich jedoch als reversibel: Kaum erhielten die Mäuse erneut freien Zugang zum Futter, begannen die beigen Fettzellen zu verschwinden. Nach fünf Wochen unbeschränkten Fressens fanden sich wieder ausschließlich weiße Adipozyten im Unterhautfett der Tiere.

Bei näherer Betrachtung der beigen Zellen entdeckten die Forscher zudem, dass diese verstärkt Fettmoleküle abbauten sowie die Fähigkeit besaßen, Wärme zu erzeugen. Dann gingen sie noch einen Schritt weiter und setzten die Tiere einem Kälteschock aus. Selbst nach mehreren Stunden in sechs Grad Celsius kalter Umgebung waren die Diät-Mäuse in der Lage, ihre Körpertemperatur zu halten – im Unterschied zu Tieren, die in den Wochen zuvor nach Belieben essen durften. Die Kalorienrestriktion hatte also funktionsfähige beige Fettzellen entstehen lassen, die bei Kälte als körpereigene Heizung agierten. Ähnliche Beobachtungen machten die Wissenschaftler auch mit einer speziellen kohlenhydratreduzierten Diät, bei der die Mäuse insgesamt 20 Prozent weniger Energie aufnahmen.

Darüber hinaus konnten sie zeigen, dass an dem Vorgang das Immunsystem entscheidend mitwirkt: Die Kalorienrestriktion setzt eine so genannte Typ-2-Immunantwort in Gang. Diese aktiviert über Signalstoffe wie Interleukin(IL)-4, IL-5 und IL-13 Makrophagen vom Typ M2,



Gesund durch beige Fettzellen

Ein Kaloriendefizit setzt Signalwege in Gang, die durch Aktivierung von Immunzellen (M2-Makrophagen) zum Entstehen beiger Adipozyten in weißem Fettgewebe führen (Browning). Die beigen Fettzellen können Wärme produzieren und haben positive Auswirkungen auf den Stoffwechsel.

die im Unterschied zu den »Killer«-M1-Makrophagen eher auf Gewebereparatur und Wundheilung spezialisiert sind. Diese Immunzellen geben daraufhin den Botenstoff Noradrenalin ab, der die Bildung beiger Adipozyten im weißen Fettgewebe anregt. An Mäusen mit künstlich eingeschränktem Immunsystem konnten die Forscher nachweisen, dass diese Signalwege für das Browning und die Veränderungen des Stoffwechsels notwendig sind.

Die Körpertemperatur aufrechtzuerhalten, könnte wichtiger sein, als Vorräte anzulegen

Die von dem Team um Trajkovski beschriebenen Ergebnisse erscheinen zunächst widersinnig: In Zeiten von Energieknappheit bildet der Körper vermehrt Zellen, die noch mehr Energie verbrauchen! Wäre es da nicht besser, auf Sparflamme zu schalten und Vorräte anzulegen? Nicht, wenn man bedenkt, wie wichtig das Aufrechterhalten der Körpertemperatur für das Überleben vieler Lebewesen ist.

Möglicherweise können wir nun also nicht mehr einfach auf isolierenden »Winterspeck« als Rechtfertigung für angefettete Kilos verweisen. Sollten wir stattdessen hungern, um für die kalte Jahreszeit die körpereigene Heizung anzuwerfen? So ganz eindeutig kann man dies nicht beantworten, denn die vorliegende Studie lässt einige Fragen offen.

So beschreiben die Forscher lediglich Ergebnisse aus Tierversuchen; inwiefern sich die Beobachtungen auf Menschen übertragen lassen, kann die Untersuchung nicht beantworten. Zudem war der Effekt nicht von Dauer. Und selbst wenn die Diät bei Menschen dieselbe Wirkung zeigen sollte, so wäre bereits die mildere Version der

Kalorienreduktion von 20 Prozent erheblich. Für eine erwachsene Frau würde sich die Nahrungszufuhr beispielsweise von durchschnittlich 2000 auf 1600 Kilokalorien pro Tag verringern, und ein Mann müsste typischerweise täglich ungefähr 500 Kilokalorien einsparen. Das entspricht in etwa einem kleinen Mittagessen oder knapp einer Tafel Schokolade. Dies dauerhaft durchzuhalten, stellt eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar.

Ein weiterer Kritikpunkt liegt in der Wahl der Versuchstiere: Die Forscher haben sehr junge Mäuse untersucht, die ohnehin einen aktiveren Stoffwechsel besitzen. Gewichtszunahme, Fettleibigkeit und deren Folgeerkrankungen wie Typ-2-Diabetes treten jedoch gehäuft bei Personen im mittleren bis späteren Lebensabschnitt auf. Unterm Strich bleibt: Überflüssig geworden ist Winterspeck nicht unbedingt. Nur hat sich womöglich seine Farbe geändert. ◀

Jennifer Honek ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin in Solna (Schweden).

QUELLEN

Fabbiano, S. et al.: Caloric Restriction Leads to Browning of White Adipose Tissue through Type 2 Immune Signaling. In: Cell Metabolism 24, S. 434–446, 2016

Lizcano, F., Vargas, D.: Biology of Beige Adipocyte and Possible Therapy for Type 2 Diabetes and Obesity. In: International Journal of Endocrinology 2016, 9542061, 2016

Sidossis, L., Kajimura, S.: Brown and Beige Fat in Humans: Thermogenic Adipocytes that Control Energy and Glucose Homeostasis. In: Journal of Clinical Investigation 125, S. 478–486, 2015



SPRINGERS EINWÜRFE GRENZEN DES WACHSTUMS

Wie extrem ein Lebewesen bestimmte Merkmale ausprägt, hängt in vielen Fällen davon ab, was ein anderes überhaupt noch wahrnehmen kann.

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

» spektrum.de/artikel/1432751

In der Schule lernten wir das Weber-Fechner-Gesetz, benannt nach den deutschen Naturforschern Ernst Heinrich Weber (1795–1878) und Gustav Theodor Fechner (1801–1887). Es besagt, dass die physiologische Stärke einer Reizempfindung nicht proportional zur physikalischen Intensität des Reizes wächst, sondern mit dem Logarithmus, das heißt umso schwächer, je größer der Reiz schon ist. Wenn wir in einem dunklen Zimmer erst eine, dann zwei Lampen anknipsen, erleben wir eine Verdopplung der Helligkeit. Doch bei 100 Lichtquellen bewirkt eine zusätzliche Lampe keinen wahrnehmbaren Unterschied mehr. Aus dem gleichen Grund messen wir Geräuschpegel mit der logarithmischen Dezibel-Skala.

Das »psychophysische Grundgesetz« bewährt sich auch überall im Tierreich – und es macht sich sogar in der Koevolution von Arten bemerkbar, die voneinander profitieren. Zum Beispiel ernähren sich südamerikanische Blütenfledermäuse ähnlich wie unsere Bienen

Je länger der Pfauenschweif, desto attraktiver wirkt sein Träger

von pflanzlichem Nektar und sorgen für Bestäubung und damit den Fortbestand der Gewächse, indem sie an verschiedenen Blüten lecken. Aber warum bieten die Pflanzen nur verdünnten Nektar an, statt mit hochkonzentriertem Stoff den Fortpflanzungserfolg nach Möglichkeit zu maximieren?

Dass die Antwort etwas mit dem Weber-Fechner-Gesetz zu tun hat, demonstrierte nun ein Team an der Berliner Humboldt-Universität um den Verhaltensbiologen York Winter. In einem »virtuellen Evolutionsexperiment« boten sie – echten, lebenden – Blütenfledermäusen im tropischen Regenwald eine Population computergesteuerter Kunstblumen an, die unterschiedlich stark konzentrierte Zuckerlösungen produzierten. Je nach der Häufigkeit der Fledermaus-

besuche setzten sich sozusagen manche Kunstblumen evolutionär durch, und die spannende Frage war, welche Zuckerkonzentration letztlich den größten Erfolg brachte (*Science* 355, S. 75–78, 2017).

Tatsächlich trugen keineswegs die süßesten Verführerinnen der Fledermäuse den Sieg davon, sondern solche Pflanzen, die mit ihrem Zucker eher geizten. Das Gleiche galt auch für die schiere Nektarmenge: Sie pendelte sich auf einem mittleren Wert ein, statt – wie man es für einen maximalen Evolutionserfolg erwarten würde – bis an die Grenze des Pflanzenmöglichen zu wachsen.

Den Grund für dieses Maßhalten erkennen die Forscher im Weber-Fechner-Gesetz: Für die Pflanze bietet es einfach keinen Evolutionsvorteil, jenseits einer gewissen Grenze noch mehr Zucker herzustellen, da der Zuwachs – ob an Süße oder an Menge – von der Fledermaus gar nicht mehr registriert wird. Denn im virtuellen Evolutionsexperiment bestimmt nicht die (prinzipiell unerschöpfliche) Nektarkapazität der Kunstblume die Grenze zur Verschwendung, sondern die Wahrnehmungsschwelle der Fledermaus.

Dieser Befund lässt übrigens auch manche Mechanismen der sexuellen Selektion in einem anderen Licht erscheinen. Beispielsweise gilt: Je länger der Pfauenschweif, desto attraktiver wirkt sein viriler Träger auf die Weibchen. Der Wettstreit um den längsten Schweif stößt nach gängiger Auffassung nur deshalb an eine Grenze, weil der Riesenfortsatz das Männchen am Ende so schwer behindert, dass dies den Erfolg beim anderen Geschlecht aufwiegt.

Doch nach dem psychophysischen Grundgesetz dürfte das Längenlimit bereits ein gutes Stück früher erreicht sein, und zwar wegen der Wahrnehmungsschwelle der Weibchen: Je länger der Schweif schon ist, mit dem der Pfau umherstolzert, desto weniger fallen dem Objekt seiner Begierde ein paar zusätzliche Zentimeter auf. Also kann sich der Herr die Mühe sparen.

MEERESFORSCHUNG DER CANYON DER WALE

Der Gouf (»Abgrund«) de Capbreton in der südlichen Biskaya ist ein Eldorado des Lebens im Meer. Seine Ausmaße erinnern an die des Grand Canyon in den Vereinigten Staaten – nur eben unter Wasser. Schon vor mehr als 1000 Jahren jagten die Basken hier Großwale.



Alexandre Dewez ist Biologe und Präsident der Gefma (Groupe d'étude de la faune marine atlantique). Er zählt zu den Beratern von Accobams, dem Übereinkommen zum Schutz der Wale des Schwarzen Meers, des Mittelmeers und der angrenzenden atlantischen Zonen.

» spektrum.de/artikel/1432741

Den gigantischen Atlantischen Nordkaper, den die Basken Balea oder Kolpatueta nannten, gibt es in der Biskaya längst nicht mehr. Die Glattwalart hat nur an der amerikanischen Küste überlebt.



Er hieß Wal der Basken, auch großer Tyrann der Meere. Den einst in der südlichen Biskaya sehr häufigen Atlantischen Nordkaper, *Eubalaena glacialis*, erlegten baskische Fischer nachweislich schon im frühen Mittelalter. Doch seit dem 16. Jahrhundert ist er im östlichen Atlantik ausgerottet. Nur vor Amerika taucht dieser bis zu 18 Meter lange Glattwal noch regelmäßig auf.

Früher erschien die Art auf ihrer jährlichen Wanderung in großer Zahl beim Gouf von Capbreton: einem gewaltigen Meeres-Canyon, der nördlich von Biarritz dicht vor der Küste beginnt und nach Westen ziehend in die Sedimente des Rands der Kontinentalplatte schneidet. Die gaskonische Bezeichnung Gouf leitet sich vom französischen Wort »gouffre« (Abgrund, Schlund) ab. Capbreton heißt der kleine Ort, bei dem der Adour, immerhin der sechstgrößte Fluss Frankreichs, früher ins Meer mündete – dort, wo nicht weit entfernt die Meeresschlucht anfängt.

Diese geologische Formation bringt die Welt des offenen Ozeans und der Tiefsee in direkte Küstennähe. Mich und einige meiner Kollegen von der Gefma, die hier forschen, interessieren dabei besonders die größeren Tiere – vor allem die hier noch auftretenden Wale. Die Abkürzung Gefma steht für Groupe d'étude de la faune marine atlantique (Forschungsgruppe für die marine atlantische Fauna). Die Tierwelt des Canyons und seines Umfelds erweist sich als derart reich und vielgestaltig, dass die Wissenschaftler immer wieder über ihre Entdeckungen staunen. In wachsender Anzahl finden sie jetzt sogar subtropische Arten, die im Mittelmeer oder an weiter südlichen Atlantikküsten zu Hause sind. Anscheinend verschiebt sich gegenwärtig mit dem globalen Klimawandel das Milieu jenes Lebensraums langsam, aber deutlich, und mit ihm das Artenspektrum.

Eine üppige Makrofauna, also eine Menge verschiedener größerer Tiere, spricht für eine Umwelt, die alle wichtigen Glieder der biologischen Nahrungskette reichlich aufweist. Das fängt an bei den Primärproduzenten, nämlich Pflanzen oder etwa Bakterien, die als Erste in der Kette für die Biomasse sorgen, von der sich Tiere ernäh-

ren. Um das einzigartige Ökosystem im Meer vor Capbreton mit seinen komplexen Wechselbeziehungen zu verstehen, befassen sich Gefma-Wissenschaftler seit mehr als 30 Jahren auch mit den dort auftretenden großen bis riesigen Arten, die wie die Wale in der Nahrungskette weit oben stehen und oft sogar deren Endglieder bilden.

Ein Teil dieser Forschungsergebnisse beruht auf den uns gemeldeten Strandfunden, die hier leider recht zahlreich sind. Denn auf dem kurzen Abschnitt zwischen der Mündung der Garonne nördlich von Bordeaux und der spanischen Grenze strandet gut ein Drittel der Meeressäuger und -schildkröten, die an Frankreichs Küsten verenden. Allein das spricht dafür, dass die Tiere diese nahrungsreiche Region gern aufsuchen. Hinzu kommt eine Vielzahl an Beobachtungen von Fischern, die wir ebenfalls auswerten. Doch wir wollen nicht nur das Artenspektrum der Gegend erfassen, sondern zudem wissen, was den gestrandeten Tieren den Tod gebracht hat. Denn nicht wenige werden Opfer menschlichen Wirkens.

Wie entstand die mehrere hundert Kilometer lange und mehr als 3000 Meter tiefe Meeresschlucht?

Ihren biologischen Reichtum verdankt das Meeresgebiet zweifellos dem Canyon, dessen Ausmaße an die des Grand Canyon der USA heranreichen. Mit seinen 270 Kilometer Länge und bereits dicht vor der Küste mehr als 1000 Meter Tiefe erreicht die Schlucht schnell das Niveau des Tiefseebodens der Biskaya: ihrer 4000 Meter tiefen Abyssalebene, an deren Grenze der Gouf schließlich endet. An seinen steilen Flanken münden kleinere Seitentäler ein, und vielerorts zeugen die harten Abbruchkanten und die darunterliegenden Sedimentanhäufungen an seinen Wänden von Lawinen. Nachweislich verändern sich diese Formationen auch immer wieder, beispielsweise nach schweren Stürmen.

Obwohl die historische Mündung des Adour genau zum Anfang des Gouf de Capbreton wies – im 16. Jahrhundert wurde sie künstlich verlegt –, hat dieser eher kleine Fluss, der einen Teil der Pyrenäen entwässert, die gigantische Schlucht sicherlich nicht geschaffen. Die dazu nötige Kraft und Reichweite hätte er wohl selbst im Verlauf von vielen Millionen Jahren nicht gehabt. Es müsste somit einen viel mächtigeren Vorgängerfluss gegeben haben. Jener gewaltige »Paläo-Adour« war wohl vor rund 80 Millionen Jahren am Werk, als die spanische und die französische Platte hier stark in Bewegung waren.

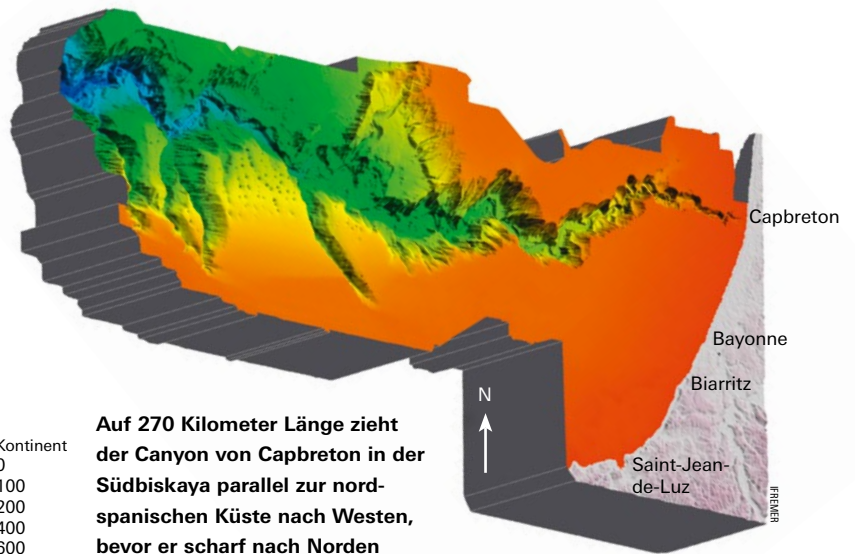
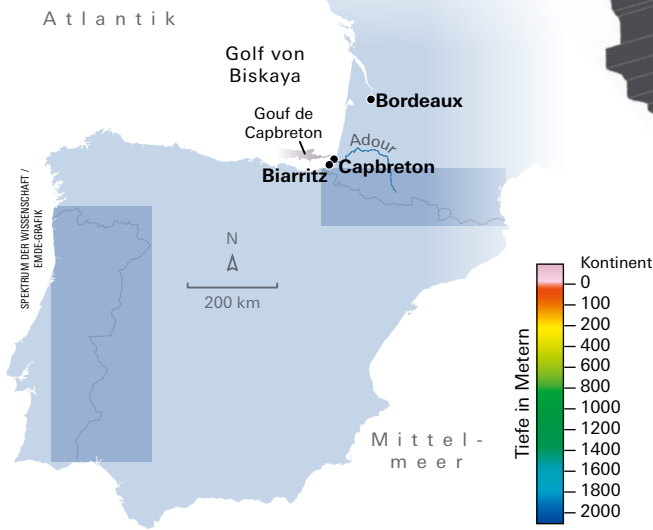
Heute beeinflusst der enorme Canyon am Meeresgrund die Dünung an der Wasseroberfläche, was die Fischer des Gebiets und auch Seeleute früh zu nutzen wussten. Denn über tiefen Gewässern ist der Seegang in der Regel schwächer als in flachen Zonen. Zugleich entstehen direkt an der südfranzösischen Küste jedoch besonders hohe Wellen, weil die Dünung dort praktisch ungehindert aus dem offenen Meer ankommt und sich mit voller Wucht am Kopf des Canyons vor dem Strand bricht.

Im Gouf de Capbreton selbst zirkulieren Strömungen, die vom Auf- und Abstieg kalter und warmer Wassermassen abhängen sowie von Wirbeln mit teils 100 Kilometer Durchmesser. Daran beteiligt sind Ausläufer des

AUF EINEN BLICK ELDORADO IN DER SÜDBISKAYA

- 1** Ganz im Süden der französischen Atlantikküste beginnt eine riesige Meeresschlucht: der Gouf de Capbreton, der sich lang und tief in den Kontinentalrand eingräbt.
- 2** Dieser Unterwasser-Canyon ermöglicht durch seine Lage und seine Strömungsverhältnisse eine hohe Bioproduktion und Artenvielfalt – deren Spektrum sich mit der Klimaerwärmung zu verschieben scheint.
- 3** Etliche Walarten finden hier Nahrung. Den einst sehr häufigen »Wal der Basken« hat man in der Biskaya jedoch schon vor Jahrhunderten ausgerottet.

Eine große Schlucht im Meer



Auf 270 Kilometer Länge zieht der Canyon von Capbreton in der Südbiskaya parallel zur nordspanischen Küste nach Westen, bevor er scharf nach Norden abbiegt und im Kontinentalhang verschwindet. Er beginnt 250 Meter vor der südfranzösischen Küste und fällt kontinuierlich ab. Dabei gräbt er sich bis zu 3000 Meter tief in den Kontinentalschelf. Stellenweise ist er 30 Kilometer breit. Oben sein Verlauf bis in 2000 Meter Tiefe.

Golfstroms und Abzweigungen von Strömungen aus dem Mittelmeer, die nährstoffreiches Wasser mit sich bringen. Bezeichnend ist für die Verhältnisse im Canyon ein starker Aufstieg (»upwelling«) von Wasser, das neben vielen Mineralstoffen ganze Wolken organischer Teilchen und abgestorbener Kleinstlebewesen enthält. Darin gedeihen die kleinen Organismen prächtig, welche die Grundlage der marinen Nahrungsketten bilden.

Kein Wunder, dass unter solch geradezu paradiesischen Bedingungen auch das makroskopische Leben blüht. Ob am Boden der Schlucht, an ihren Wänden, in den Seitentälern oder nah an der Oberfläche – überall wimmelt es von den verschiedensten Organismen. Über die Artenvielfalt an größeren Tieren kann man nur staunen: Mehr als 300 solche Spezies haben wir bisher verzeichnet. Viele davon sind Topprädatoren, stehen also an der Spitze von Nahrungsketten. Wir dokumentierten bisher allein 30 Hai- und Rochenarten, sechs Arten von Meeresschildkröten und etwa 30 verschiedene Meeressäuger.

Bis zum 16. Jahrhundert zählte dazu noch der eingangs erwähnte Atlantische Nordkaper, der Wal der Basken, den Systematiker im 19. Jahrhundert zunächst *Eubalaena biscayensis* taufte und der auf Französisch noch heute »baleine de Biscaye« oder »baleine franche de l'Atlantique Nord« heißt. Tatsächlich ließen sich diese Gruppen bildenden, sanftmütigen Kolosse schon unter mittelalterlichen Voraussetzungen recht leicht harpunieren, zumal sie ziemlich langsam schwammen. Sie stellten eine sehr wertvolle Beute dar, denn fast alles an ihnen war brauchbar – vor allem natürlich der Blubber, der Speck, der 40 Prozent vom Körper ausmachte und erlegte Tiere an der Oberfläche hielt. Ein getöteter Wal ließ sich daher gut neben dem Schiff bis zu einem der baskischen Fischerorte mitziehen. Dort pflegte man ihn mit Musikbegleitung, unter anderem von Tamburins und Flöten, zu zerlegen. Der kostbare Speck wurde zu Tran verarbeitet, auch das Fleisch und die

Knochen hat man verwertet. Und die langen, faserigen Barten ergaben Fischbein, ein gleichzeitig steifes und flexibles Material, das vor der Plastikära Korsettstäbe, Schirmstreben, Rockreifen, Federhalter, Kämmen, Peitschenstiele und vieles mehr lieferte.

Walkadaver durch Menschenschuld

Vier andere Arten von Bartenwalen leben und vermehren sich heute noch im Umfeld des Gouf de Capbreton, ebenso 16 Zahnwalarten. Zwar werden sie nicht mehr gejagt, aber abgesehen von natürlichen Gefahren müssen sie sich mit verschiedensten Einwirkungen des Menschen arrangieren. Ein Großteil der Strandungen von Walen an der südfranzösischen Atlantikküste geht hierauf zurück. Mal ist es verschluckter Plastikmüll, mal ein Zusammenstoß mit einem Schiff, mitunter auch ein Fischernetz. Manche gestrandeten Tiere litten unter starkem Parasitenbefall. Wir finden an den Stränden kolossale Arten wie den bis zu 16 Meter langen Buckelwal (*Megaptera novaeangliae*) ebenso wie kleine Spezies bis hin zu dem keine zwei Meter messenden Gewöhnlichen Schweinswal oder Kleinen Tümmler (*Phocoena phocoena*). Nicht selten stranden mehrere Tiere auf einmal, öfter sogar ganze Gruppen.

Sobald wir durch die Polizei oder Feuerwehr von einem Fund hören, machen wir uns auf den Weg dorthin. Wir bestimmen dann die Spezies, entnehmen Organe und führen möglichst auch Autopsien durch, sofern der Kadaver noch nicht zu stark verwest ist. Hierdurch möchten wir seinen letzten Gesundheitszustand und auch die Gründe für die Strandung erkennen.

Das gelingt uns allerdings nicht immer. Rätsel gaben beispielsweise im Jahr 2002 drei zusammen angetroffene jugendliche männliche Pottwale (*Physeter macrocephalus*) auf. Zwei von ihnen lebten noch. Leider war es nicht möglich, die beiden zwölf Meter langen, zwölf Tonnen schweren Kolosse, die schon teils im Sand eingegraben

waren, zurück ins Meer zu befördern, bevor ihr Gewicht sie erdrückte. Im Magen des zu Anfang toten Tiers fanden wir eine Plastikflasche und Fadenwürmer einer Art, die viele Meerestiere heimsucht. Hatten die beiden anderen Wale das kranke Tier begleitet und konnten im niedrigen Wasser nicht mehr entkommen, als es schließlich auf den Strand zutrieb? Vielleicht war es da bereits leblos. Dass der weltweit verbreitete, bis zu 17 Meter lange Pottwal, der in großer Tiefe unter anderem Riesenkalmar und andere Tintenfische jagt (siehe **Spektrum** September 2015, S. 10), auch im Gouf de Capbreton mit dessen reichem Nahrungsangebot auftritt, wundert nicht.

Kleinere Walarten stranden an diesem Küstenabschnitt recht häufig, so beispielsweise der bis zu zweieinhalb Meter lange Gemeine oder Gewöhnliche Delfin (*Delphinus delphis*). Ein Ausnahmefund war hingegen 1999 ein Blainville-Schnabelwal (*Mesoplodon densirostris*) bei Tarnos, auf

halber Strecke zwischen Biarritz und Capbreton. Dieser Zahnwal lebt eigentlich eher in tropischen und subtropischen bis warmgemäßigten Gewässern und bildet Schulen von etwa einem halben Dutzend Tieren. Er lässt sich an der typischen Weise erkennen, wie er die Schnauze zum Luftholen aus dem Wasser streckt. Sein Unterkiefer ragt im hinteren Teil vor dem Oberkiefer in einem hohen Bogen nach oben, und darauf sitzt bei den Männchen ein großer, nach außen weisender Zahn. Die Art frisst vorwiegend Kalmare, die sie bei sehr tiefen Tauchgängen erbeutet.

Ebenso bemerkenswert war die Strandung eines Gervais-Zweizahnwals (*Mesoplodon europaeus*) im November 2014 bei Ondres nahe bei Tarnos. Diese Art kommt nur im Atlantik vor, lebt in tropischen bis gemäßigt warmen Gewässern, ist jedoch eher selten und taucht an europäischen Küsten trotz ihres Namens nicht oft auf. Charakteri-

Anklänge an Mittelmeerfauna

Schon dem französischen Meeresforscher Léopold de Folin (1817–1896) war aufgefallen, wie viele Tier- und Pflanzenarten der südlichen Biskaya sonst in südlicheren, wärmeren – »meridionalen« – Gebieten von Mittelmeer und angrenzendem Atlantik leben. Dies gilt nicht nur für die Wale und andere große Arten rund um den Gouf de Capbreton, sondern auch für zahlreiche kleine Spezies von Wirbeltieren und Wirbellosen.

Die außergewöhnliche Artenvielfalt der Südbiskaya hängt mit der dortigen höchst abwechslungsreichen Landschaft im Meer und vor den Küsten zusammen. Flache und tiefe Zonen, felsige und sandige Bereiche verzahnen sich hier in einzigartiger Weise. Biologen

und Taucher erkennen die besondere Anmutung dieser Meeresregion an typischen Mittelmeerfischen wie der Goldstriemenbrasse (*Sarpa salpa*), auch Dorade genannt, oder der Brandbrasse (*Oblada melanura*).

Das Mittelmeer hat manches aus seinen Zeiten als tropisches Gewässer bewahrt. Doch die Biskaya ist weit von ihm entfernt. Trotzdem finden sich hier unter anderem alle möglichen bodenlebenden wirbellosen Tiere, die aus dem Mittelmeer bekannt sind. Ihr Vorkommen ist oft noch nicht befriedigend erklärt. Allerdings existieren tiefe Meeresströmungen aus dem Mittelmeer, die bis hierher reichen. Bemerkenswert ist etwa, dass die Gefranste Bäumchenschnecke (*Marionia blainvillea*, siehe Bild

unten) in der südlichen Biskaya siedelt. Offenbar sagen ihr die dortigen Bedingungen durchaus zu.

Viele betrachten die einzigartige meridionale, fast schon tropische Meeresfauna im Südosten der Biskaya als kostbares Naturerbe, das unbedingt bewahrt werden sollte. Unter anderem deswegen möchten die Experten verfolgen, ob und wie sich die Artenzusammensetzung derzeit verändert. Welche Veränderungen der Umwelt sind mit dem Klimawandel zu erwarten? Werden manche Spezies ihr Verbreitungsgebiet weiter nach Norden verlagern? Werden einige in größerer Zahl auftreten als bisher?

Zwar befassen sich Meeresforscher seit mehr als einem Jahrhundert mit dieser speziellen Region. Ihre Ergebnisse haben sie in vielen wissenschaftlichen Arbeiten niedergelegt, allen voran Mitarbeiter des französischen Nationalmuseums für Naturgeschichte in Biarritz. Dennoch ist unser Wissen über diese Meereswelt noch höchst lückenhaft.

Marie-Noëlle de Casamajor forscht am französischen Meeresforschungsinstitut Ifremer im Labor für Umweltressourcen von Arcachon in Anglet.

MARIE-NOËLLE DE CASAMAJOR / IFREMER



Die räuberische Gefranste Bäumchenschnecke kommt in verschiedenen Farben und Mustern daher. Die etwa fünf Zentimeter große Nacktschnecke lebt vorwiegend im westlichen Mittelmeer und im angrenzenden Atlantik.



Zwei Kurzflossen-Grindwale (*Globicephala macrorhynchus*), Verwandte der Schwertwale, verendeten 2008 bei Saint-Jean-de-Luz.



Dieser und ein weiterer Hammerhai wurden von einem Fischerboot aus Arcachon im Dezember 2015 versehentlich gefangen.

Das Weibchen, das wir untersuchen konnten, hatte kurz davor ein Kalb geboren. Es hatte eine in Plastiksäcke verwickelte Sprungfeder verschluckt und war daran vermutlich verendet. Wale halten Plastiktüten häufig für Beute. Als wir die Organe entnahmen, stießen wir auf einen etwa 40 Zentimeter langen »Tintenbeutel« am Ende des Dickdarms, der beim After endete. Solch eine Ausstülpung findet sich bei beiden Zwergpottwalarten. Ihre Bedeutung ist strittig. Es gibt Berichte, wonach diese Wale bei Gefahr einen dunklen Strahl ausstoßen. Ob es sich dabei um Kot handelt oder sogar um einen von Tintenfischen aufgenommenen Farbstoff, wissen wir noch nicht.

In den letzten 20 Jahren wurden unsere Mitarbeiter allein zu Zahnwalen, Robben, Haien und Meeresschildkröten mehr als 2000-mal geholt. So tauchten im Jahr 2006 im Hafen von Peyrehorade, an einem Zufluss des Adour, zwei junge Klappmützen oder Mützenrobben (*Cystophora*

schildkröten (*Chelonia mydas*) und Echte Karettschildkröten (*Eretmochelys imbricata*). Jungtiere von Suppenschildkröten, Echten sowie Unechten Karettschildkröten (*Caretta caretta*) und Atlantik-Bastardschildkröten (*Lepidochelys kempii*) konnte das Gefma verschiedentlich schon retten. Wir bringen die kleinen Tiere in die Station des Aquariums von La Rochelle 200 Kilometer nördlich von Bordeaux, wo sie aufgepäppelt werden, bis man sie weit vor der Küste wieder aussetzen kann.

Zu den symbolträchtigsten Schildkröten des Gouf de Capbreton zählt die Lederschildkröte, deren Panzer bis zu zweieinhalb Meter lang wird und die dann 700 Kilogramm und mehr wiegt. An sich sind die Tiere in tropischen und subtropischen Meeren zu Hause, durch die sie tausende Kilometer weit schwimmen, verirren sich im Sommer aber vereinzelt in gemäßigte Zonen, sogar bis in die Nordsee. Streng genommen gehört diese größte Schildkrötenart nicht zu den eigentlichen Meeresschildkröten. Sie ernährt sich hauptsächlich von Quallen, wie der gelblichen, blau gesäumten Lungenqualle *Rhizostoma pulmo*, die etwa 60 Zentimeter groß wird – kein Wunder, dass Lederschildkröten oft Plastiktüten verschlingen. Wir finden öfter welche im Magen sowohl von gestrandeten wie von versehentlich gefangenen Weibchen. Bei solchen Autopsien stoßen wir auch auf befruchtete Eier, die einige Monate später an einem mittelamerikanischen Strand abgelegt worden wären.

Dass Wärme liebende Meeresbewohner der verschiedensten Tiergruppen, die sonst an südlicheren Atlantikküsten oder auch im Mittelmeer zu Hause sind, immer häufiger bis in die Biskaya gelangen, beobachtet unsere Umweltwacht seit einigen Jahren. Erwähnt haben wir bereits den eigentlich tropischen Blainville-Schnabelwal, aber das betrifft auch manche Fische. Die Gemeine Goldmakrele (*Coryphaena hippurus*) etwa ist an sich eine Bewohnerin der Tropen. Die »behelmete« Art (nach griechisch »korys« für Helm) zieht zwar sehr weite Strecken, bleibt dabei jedoch normalerweise in warmen Zonen des Atlantiks, Pazifiks und Indischen Ozeans. Zumindes im Mittelmeer taucht sie allerdings regelmäßig auf. Nun erscheint dieser Fisch zunehmend im Gouf de Capbreton.



ISTOCK / PAUL WOLF

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

crinata) auf. Die beiden Jungtiere dieser eigentlich in der Arktis heimischen Art waren sehr schwach. Sie kamen zur Pflege nach Biarritz ins Aquarium des Meeresmuseums, überlebten jedoch nicht.

Unter den angelandeten Zahnwalen waren außer den oben genannten Arten auch viele Delphiniden wie der zehn Meter lange (Große) Schwertwal (*Orcinus orca*), der Große Tümmler (*Tursiops truncatus*) und der Blau-Weiße Delfin (*Stenella coeruleoalba*). An Meeresschildkröten finden wir immer wieder erwachsene Lederschildkröten (*Dermochelys coriacea*), Suppen- oder Grüne Meeres-



Ein Zwergpottwal strandete 2006 bei Hendaye.



Ein im November 2014 nahe bei Capbreton gestrandeter Gemeiner Delfin war am Kopf von schlimmen Nekrosen gezeichnet.

Ein weiteres Beispiel ist der Graue Drückerfisch (*Balistes caprisus*). Normalerweise lebt er an subtropischen Riffen. Doch in der Südbiskaya geht er öfter ins Netz. Auch Taucher bekommen ihn dort bei Schiffwracks und Höhlen zu Gesicht. Oder der Amerikanische Heringskönig (*Zenopsis conchifer*): In den 1960er Jahren war er höchstens an südeuropäischen Küsten zu beobachten; inzwischen kennt man ihn auch vom Gouf de Capbreton.

Ebenso gehört der bedrohte Große Hammerhai (*Sphyrna mokarran*) eigentlich in die Tropen und Subtropen. Seine Präsenz in der Biskaya haben Forscher schon länger vermutet. Ende 2015 gerieten dann an der südfranzösischen Atlantikküste zwei junge Tiere Fischern von Arcachon ins Netz. Ebenso ist der riesige atlantische Blaue Marlin (*Makaira nigricans*) mit seinem charakteristischen, langen, dünnen »Speer« oben vor der Schnauze in wärmeren Gewässern zu Hause. 2003 wurde ein 380 Kilogramm schweres Exemplar im offenen Meer vor Capbreton beobachtet. Nicht ganz so erstaunlich ist, dass der diskusförmige Mondfisch (*Mola mola*), der mehr als drei Meter Durchmesser erreichen kann, dort bereits gesehen wurde. Und schließlich sollte man noch den Seiwal (*Balaenoptera borealis*) erwähnen. Dieser bis zu 18 Meter messende, sehr schnelle Bartenwal verbringt den Sommer durchaus in höheren Breiten und ernährt sich außer von Krill auch von kleineren Fischen. Sein Name lehnt sich an das norwegische Wort für Lachs an, da er zusammen mit dessen Schwärmen auftaucht.

Unübersehbar: Spuren des Klimawandels

Angesichts so vieler Arten aus warmen Gegenden fragen wir uns, ob sich der Canyon vor Capbreton im Zuge der beobachteten Erwärmung der Meere allmählich in ein tropisches Gewässer verwandelt. Natürlich wäre es auch möglich, dass wir die ökologischen Verhältnisse und den Artenreichtum im und um den Gouf erst jetzt allmählich besser kennen lernen. Allerdings erscheint es offensichtlich, dass sich in der Biskaya gegenwärtig wirklich etwas verändert. Der Meeresbiologe Jean-Claude Quérou, der in La Rochelle beim französischen Meeresforschungsinstitut Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation

de la mer) arbeitete, schätzte schon vor einigen Jahren, dass die Wassertemperatur am Grund des Canyons seit den 1970er Jahren um etwa zwei Grad Celsius angestiegen ist. Frédéric Vandermeersch, der am Ifremer-Institut in Plouzané in der Bretagne arbeitet, hat mit seinen Kollegen für den Golf von Biskaya 2005 ein physikalisches Modell erstellt, das auf den dort über drei Jahrzehnte gemessenen Temperatur- und Salzverhältnissen basiert. Demnach hat in dem betreffenden Zeitraum die mittlere Temperatur an der Wasseroberfläche über dem Kontinentalschelf um eineinhalb Grad Celsius zugenommen, die über der Tiefseezone um ein Grad. Jeweils über dem Grund war das Wasser auf den ersten 50 Metern 0,8 beziehungsweise 0,6 Grad wärmer als vorher. Vermutlich ist es daher kein Trugschluss, dass im Gouf in letzter Zeit Arten – auch der Makrofauna – aus wärmeren, ja tropischen Gefilden zunehmen. Diese Entwicklung möchten wir unbedingt in Zukunft weiter verfolgen und setzen dabei wie bisher auf die Unterstützung und Expertise der Fischer. Die geheimnisvolle Welt dieses gewaltigen Meeres-Canyons haben wir noch lange nicht verstanden. ◀

QUELLEN

Brocheray, S. et al.: 2000 Years of Frequent Turbidity Activity in the Capbreton Canyon (Bay of Biscay). In: *Marine Geology* 347, S. 136–152, 2014

Cirac, P. et al.: Le canyon de Capbreton: nouvelles approches morphostructurales et morphosédimentaires. In: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 332, S. 447–455, 2001

De Casamajor, M.-N.: Baie de Biscaye, richesse méconnue et diversité. Editions Alexandre Dewez, Ascain 2004

WEBLINKS

www.youtube.com/watch?v=3aXmkGFVfQ

Überblicksvortrag von Autor Alexandre Dewez zur Fauna des Gouf de Capbreton, auf Französisch

www.swr.de/swr2/programm/sendungen/wissen/der-grand-canyon-unter-dem-meer/-/id=660374/did=13874010/nid=660374/c6oemc/index.html

SWR2 Wissen: Der »Grand Canyon« unter dem Meer. Tiefseeforschung im Golf von Biskaya. Von Harald Brandt
Sendung des SWR vom 1. 9. 2014 über den Gouf de Capbreton

SZIENTOMETRIE WIE (UN)ZUVERLÄSSIG IST DIE FORSCHUNG?

Viele wissenschaftliche Arbeiten lassen sich nicht reproduzieren. Schon ist von einer Vertrauenskrise die Rede. Doch wer mit pauschalen Urteilen um sich wirft, macht es sich zu einfach.

» [spektrum.de/artikel/1432742](https://www.spektrum.de/artikel/1432742)



Die komplexen Experimente heutiger
biomedizinischer Forschung hängen von
tausenden Variablen ab – und sind
entsprechend schwer zu wiederholen.



Peter Walter ist Präsident der American Society for Cell Biology.

Als meine Tochter heiratete, beschloss ich, ihr ein ganz besonderes Hochzeitsgeschenk zu machen: eine selbst konstruierte Uhr. Der Designer Clayton Boyer präsentiert auf seiner Website www.lisaboyer.com/Claytonsite/Claytonsite1.htm zahlreiche Anleitungen für den Bau von hölzernen Chronometern. Ausgestattet mit diesen Plänen, die in vielerlei Hinsicht dem Methodenteil eines Papers ähneln, machte ich mich sogleich ans Werk.

Zerlegt in ihre Bestandteile, erscheint eine Uhr gar nicht so kompliziert. Da ist zunächst das Räderwerk. Es überträgt die Kraft der Gewichte, die den Mechanismus antreiben. Das letzte Zahnrad wirkt auf die Hemmung ein, die ihrerseits mit dem Gangregler (oft einem Pendel) verbunden ist. Pendel und Hemmung sorgen gemeinsam dafür, dass die Mechanik periodisch angehalten wird und die Uhr somit regelmäßig geht. Schließlich existiert noch ein weiteres Räderwerk, dessen einzige Aufgabe darin besteht, die Stunden- und Minutenzeiger im richtigen Verhältnis zu bewegen. Verglichen damit ist eine lebende Zelle viel komplizierter.

In den Monaten vor der Hochzeit meiner Tochter arbeitete ich jeden Abend an meinem Geschenk. Mit Laubsäge und Feile formte ich jeden einzelnen Zahn in jedem einzelnen Rad, bis alles perfekt war – so glaubte ich zumindest. Als nur noch wenige Wochen bis zum freudigen Ereignis verblieben, setzte ich alle Teile zusammen, fügte die Gewichte und das Pendel hinzu. Es entstand ein toll aussehender Mechanismus, der ... nicht lief! Die Zahnräder bewegten sich nicht, die Hemmung tickte nicht, und das Pendel kam nach kürzester Zeit zum frustrierenden Still-

stand. Ich war daran gescheitert, Boyers genialen Apparat zu reproduzieren.

Wochenlang suchte ich nach möglichen Fehlerquellen, feilte hier und da herum und baute ein Zahnrad sogar vollkommen neu, weil das Holz sich leicht verzogen hatte. Dann endlich, es waren nur noch wenige Tage bis zur Hochzeit, begann die Uhr mit einem satten Ticktack zu laufen. Es klang wie Musik in meinen Ohren.

Was lehrt uns diese Geschichte? Dass es sehr viel schwieriger ist, Versuchsergebnisse erfolgreich zu reproduzieren, als aufzugeben und zu verkünden, dass es nicht funktioniert. Boyers Bauanleitungen sind so gut wie perfekt, doch sie ließen mir trotzdem genügend Spielraum, kleine Fehler einzufügen, die ich anschließend mühsam finden und ausmerzen musste. Das gelang mir nur mit Beharrlichkeit, Sorgfalt und vor allem mit der festen Überzeugung, dass ein Erfolg überhaupt möglich sei. Ich konnte mich dabei auf die Erfahrungen aus einigen Jahrhunderten des Uhrenbaus stützen. Dies ermöglichte es mir, den nötigen Sachverstand und das erforderliche Fingerspitzengefühl zu entwickeln. Trotz alledem kostete es mich ähnliche Mühen, eine weitere Uhr für meine andere Tochter zu basteln.

Ein heißes Eisen für die wissenschaftliche Gemeinschaft

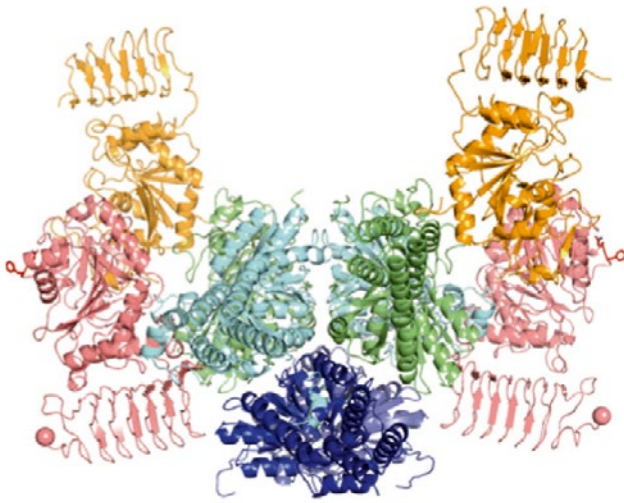
Die Reproduzierbarkeit von wissenschaftlichen Studien ist mittlerweile zu einem heiklen Thema in der Forschung geworden, das eine immense Bedeutung für die Scientific Community besitzt. Berichte darüber, dass veröffentlichte Ergebnisse häufig unzuverlässig seien, haben dem Ansehen unseres Berufs sehr geschadet. Zahlreiche einschlägige Artikel und die Publikumsreaktionen darauf machen das deutlich (siehe etwa »Jede Menge Murks«, **Spektrum** Februar 2013, S. 58).

Als Forscher müssen wir uns darüber klar werden, wie immens wichtig das Problem ist und wie wir damit umgehen sollen. Im Jahr 2014 berief die American Society for Cell Biology (Amerikanische Gesellschaft für Zellbiologie, ASCB) eine Arbeitsgruppe ein. Deren Aufgabe lautete, ein Weißbuch zu erstellen mit handfesten, konstruktiven Empfehlungen dazu, wie sich die derzeitigen Publikationsverfahren verbessern ließen. Das sollte sicherstellen, dass möglichst nur noch qualitativ hochwertige Daten an die Öffentlichkeit gelangen. Es entstand eine exzellente Sammlung von Vorschlägen (www.ascb.org/reproducibility) – in meinen Augen eine Pflichtlektüre für jeden Forscher und Verleger, deren Umsetzung ich allen Beteiligten ans Herz legen möchte.

Eigentlich ist es unstrittig, dass jedes Paper einen aussagekräftigen, vollständigen und detaillierten Methodenteil enthalten muss. Dieser soll andere dazu befähigen, die Arbeit zu reproduzieren. Trotzdem werden immer wieder Fachartikel veröffentlicht, die einen solchen Teil vermissen lassen – sogar in Journals, die sich intensiv an der Diskussion über mangelhafte Reproduzierbarkeit beteiligen. Ein neueres Beispiel aus meinem Forschungsgebiet ist die erste Publikation zur Kristallstruktur von eIF2B, einem riesigen Proteinkomplex, der in der zellulären

AUF EINEN BLICK AN DER WIEDERHOLUNG SCHEITERN

- 1 Seit einiger Zeit häufen sich Berichte darüber, dass viele Ergebnisse wissenschaftlicher Studien nicht reproduzierbar seien.
- 2 Tatsächlich tauchen in der wissenschaftlichen Publikationspraxis immer wieder Hürden auf, die experimentelle Wiederholungen behindern, mangelhafte Darstellungen der Methoden etwa.
- 3 Dennoch irrt, wer das Problem undifferenziert bewertet. Wer eine Arbeit als »nicht reproduzierbar« bezeichnet, muss darlegen, was er damit genau meint.



Im März 2016 veröffentlichten japanische Forscher die Kristallstruktur des Proteinkomplexes eIF2B, führten dabei jedoch wichtige Details ihrer experimentellen Methoden nicht auf.

Proteinsynthese eine Rolle spielt. Veröffentlicht in der Fachzeitschrift »Nature«, ist diese Studie gut geschrieben, präsentiert eine bedeutende Entdeckung und erweist sich für Fachleute als hoch spannend (www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26901872). Doch bei genauerem Hinsehen muss man feststellen, dass die experimentellen Bedingungen des Kristallwachstums fehlen und lediglich als »eingereicht« aufgeführt sind. Den Lesern wird also die wichtigste Information darüber vorenthalten, wie die Arbeit ablief; sie müssen sich damit gedulden, bis – falls überhaupt – eine Folgepublikation hierzu erscheint.

In diesem speziellen Fall konnten meine Mitarbeiter und ich die Sache unkompliziert lösen. Wir fragten direkt bei den Autoren nach und erhielten nach kurzem Hin und Her eine Vorabversion der eingereichten Arbeit mit allen fehlenden Angaben. Aber es ist mir vollkommen rätselhaft, wie in heutigen Zeiten, und mitten in der Reproduzierbarkeitsdebatte, die Gutachter dieses Fachartikels sowie die »Nature«-Redakteure befürworten konnten, eine Studie mit derart gravierenden Lücken zu veröffentlichen.

Misslungenen Wiederholungen geben Fachzeitschriften ungenügend eine Bühne

Ein wichtiger und oft übersehener Aspekt des Qualitätsproblems ist das Stigma, das nach wie vor auf negativen Ergebnissen lastet – also auf Arbeiten, die daran gescheitert sind, publizierte Ergebnisse nachzuvollziehen. Wer sie veröffentlichen will, muss immer noch zu große Hürden überwinden. Immerhin fördern einige hoch angesehene Fachmagazine und Publikationsplattformen, etwa »PLoS One« oder »F1000Research«, die Veröffentlichung negativer Ergebnisse bereits. Und das Vorhaben »Reproducibility Project: Cancer« geht das Thema gemeinsam mit dem Journal »eLife« sehr überzeugend an. Wissenschaftler haben hier viel zitierte Paper aus der Krebsforschung ausgewählt, um diese unvoreingenommen auf Reproduzierbarkeit zu testen. Sie werden sich dabei »so eng wie möglich an die Originalexperimente halten und, wenn

möglich, dieselben Materialien und Instrumente verwenden«. Wichtig: Das Protokoll verlangt, Kontakt mit den Autoren der Originalstudie aufzunehmen, um Materialien und alle verfügbaren Informationen anzufordern, welche die Qualität des Wiederholungsversuchs verbessern können.

Das Reproducibility Project: Cancer läuft vollständig transparent ab – im Gegensatz zu dem Vorhaben, das Forscher des Biotechnologieunternehmens Amgen kürzlich durchführten. Diese berichteten 2012, sie hätten von 53 bahnbrechenden Krebsstudien ganze 47 nicht reproduzieren können. Die Daten jedoch, die diesen alarmierenden Befund belegen könnten – oder auch nicht –, hielten sie unter strengem Verschluss. Bevor wir solche Horrormeldungen für bare Münze nehmen, sollten wir uns erst einmal darüber klar werden, was mit »nicht reproduzierbar« genau gemeint ist.

Die Arbeitsgruppe der ASCB, die das bereits erwähnte Weißbuch verfasste, gibt eine sehr aufschlussreiche und umfassende Definition des Begriffs Reproduzierbarkeit:

- Eine **analytische Wiederholung** ist der Test, ob man durch erneute Auswertung der Originaldaten zu den gleichen Ergebnissen kommt.
- Eine **direkte Wiederholung** ist der Versuch, mit den gleichen experimentellen Bedingungen, Materialien und Methoden zum selben Ergebnis wie das Originalexperiment zu kommen.
- Die **systematische Wiederholung** prüft, ob sich unter modifizierten experimentellen Bedingungen, beispielsweise mit einer anderen Zelllinie oder einem anderen Mäusestamm, das gleiche Ergebnis wie im Originalversuch einstellt.
- Eine **konzeptionelle Wiederholung** zielt darauf ab, die Allgemeingültigkeit eines Ergebnisses oder eines Konzepts zu demonstrieren, indem sie es an stark abweichenden experimentellen Modellen testet – etwa an völlig anderen Versuchstierarten.

Diese Differenzierung ist wichtig. Insbesondere beantworten systematische und konzeptionelle Wiederholungen nicht, ob die Originalstudie im Detail korrekt war. Vielmehr zeigen sie, inwieweit die ursprünglichen Ergebnisse verallgemeinert werden können. Ein bestimmtes Versuchsergebnis kann auf Neurone zutreffen, aber nicht auf Bindegewebszellen; es mag sich bei Mäusen einstellen, während es bei Menschen ausbleibt. Nur im allerbesten Fall, dem »heiligen Gral« der Wissenschaft, erweist sich ein Versuchsergebnis als universell gültig. Ein Beispiel hierfür ist die in jahrzehntelanger Forschung abgesicherte Erkenntnis, dass Ribosomen Proteine herstellen. Wer also behauptet, ein bestimmtes wissenschaftliches Ergebnis sei nicht reproduzierbar, muss genau definieren, was er damit meint. Andernfalls drohen gefährliche Fehlschlüsse wie jener, dass in den Vereinigten Staaten jährlich 28 Milliarden Dollar für nicht reproduzierbare vorklinische Forschung verschwendet würden.

Ich möchte es noch einmal wiederholen: Es ist viel schwieriger, Ergebnisse erfolgreich zu reproduzieren, als zu erklären, dass es nicht funktioniert. Was wäre passiert, wenn ich für den Bau meiner Uhr eine andere Holzart als

Boyer verwendet hätte? Das Material hätte spröder sein und schneller brechen können, oder es hätte sich ungleichmäßig verziehen können, sobald sich die Luftfeuchtigkeit ändert. Die Uhr hätte dann wahrscheinlich nicht funktioniert. Und wenn der bei einem biochemischen Experiment verwendete Antikörper aus einer anderen Präparation stammt und sich anders verhält als erwartet? Oder wenn eine Firma stillschweigend die Zusammensetzung eines Puffers verändert, der für das Ergebnis eines Experiments ausschlaggebend ist? Was bei den komplexen Experimenten der heutigen biomedizinischen Forschung herauskommt, hängt von buchstäblich tausenden Variablen ab. Es braucht Fingerspitzengefühl und Beharrlichkeit, um die damit verbundenen Herausforderungen zu meistern. Um dem Problem der mangelnden Reproduzierbarkeit zu begegnen, müssen wir intensiv miteinander kommunizieren und unsere Materialien offen und transpa-

Es ist wichtig, auch fehlgeschlagene Reproduktionsversuche begutachten zu lassen

rent untereinander austauschen – so formulieren es die Beteiligten des Reproducibility Project: Cancer.

Anfang 2016 posteten Amgen-Forscher einen Artikel auf der Website »F1000Research«, in dem sie erklärten, sie seien nicht in der Lage gewesen, »eine bedeutsame Rolle des Enzyms USP14 beim Abbau des Tau-Proteins oder des Proteins TDP-43 zu bestätigen«. Der Artikel stellte frühere Ergebnisse einer Forschergruppe um Dan Finley von der Harvard Medical School in Frage. Finley und sein Team hatten argumentiert, infolge einer Hemmung von USP14 würden bestimmte Proteine, die bei neurodegenerativen Krankheiten eine Rolle spielen, verstärkt abgebaut. Obwohl der ihnen widersprechende Amgen-Artikel nur ein Vorabdruck und somit noch gar nicht begutachtet war, verbreitete sich über »Nature News« sofort die Alarmanzeige »Biotech giant publishes failures to confirm high profile science« (Biotechnologie-Gigant veröffentlicht den fehlgeschlagenen Versuch, bedeutende Forschungsergebnisse zu bestätigen).

Auf den ersten Blick schienen die Arbeiten der Finley-Gruppe ein weiterer Fall von unzuverlässiger und irreführender Forschung zu sein. Allerdings waren in diesem Fall die negativen Daten der Amgen-Forscher ziemlich problematisch. Erstens benutzten sie andere Methoden der Genexpression, ohne ihre Ergebnisse diesbezüglich mit denen der Finley-Gruppe abzugleichen – ein ziemlich sträfliches Versäumnis, das zu deutlichen Abweichungen führen kann. Zweitens schaltete das Amgen-Verfahren, um das Enzym USP14 stillzulegen, höchstens 75 Prozent von dessen Aktivität aus. Ein Experiment mit einer solch bescheidenen Effizienz erlaubt keine belastbaren Schlüsse. Drittens hatten bereits mehrere andere Forschergruppen die Ergebnisse der Originalstudie bestätigt, doch deren Arbeiten wurden weder zitiert noch diskutiert.

Das Fazit des Amgen-Artikels, »nicht reproduzierbar«, wirkt daher alles andere als überzeugend. Dies zeigt, wie wichtig es ist, auch fehlgeschlagene Reproduktionsversuche begutachten (peer-reviewen) zu lassen. Sasha Kamb, Leiter der zuständigen Abteilung bei Amgen, meint dazu: »Wir glauben, dass interessierte Wissenschaftler sich unsere Methoden und Ergebnisse ansehen und ihre eigenen Schlüsse ziehen können.« Leider haben seine Kollegen es unterlassen, Finley und sein Team zu kontaktieren, um die Diskrepanzen möglicherweise aus der Welt zu schaffen. Das Biotech-Unternehmen bestand sogar darauf, Wissenschaftsjournalisten dürften die Finley-Gruppe nicht kontaktieren, bevor der Vorabdruck erschienen sei. Zumindest ermutigt »F1000Research« die Originalautoren jetzt dazu, den Amgen-Artikel in einem offenen Prüfprozess zu kommentieren. Hoffen wir, dass dies den notwendigen Dialog fördert.

Nur nach detailliertem Überprüfen und hinreichendem Austausch kann man beurteilen, ob eine Studie tatsächlich nicht reproduzierbar ist. Dessen ungeachtet nehmen die meisten Leute, einschließlich verantwortlicher Politiker, lediglich wahr, dass die akademische Forschung in einer handfesten Reproduzierbarkeitskrise stecke. Sie hören, man könne Wissenschaftlern nicht trauen und Forschungsgelder würden verschwendet. Pauschale Behauptungen, wonach soundsoviel Prozent der wissenschaftlichen Studien nicht reproduzierbar seien, richten großen Schaden an. Sie gefährden Forschungsprojekte, finanzielle Förderungen und berufliche Laufbahnen.

Als Forscher haben wir viel Arbeit vor uns. Wir müssen Wege finden, um unsere Methoden und Materialien stetig besser zu beschreiben, zu standardisieren und zu teilen. Wir müssen offene Diskussionen fördern und eine verantwortliche, sorgfältige und gewissenhafte Publizierpraxis pflegen, die hohen Standards genügt – egal, ob Ergebnisse positiv oder negativ sind. Betroffene Forscher in die Bewertung von Arbeiten einzubeziehen, die ihre eigenen Studien widerlegen, halte ich für ganz wesentlich. Aber damit das funktionieren kann, müssen Wissenschaftler andere dabei unterstützen, ihre Studien zu reproduzieren. Das Mindeste wäre, dass Journals, die gescheiterte Reproduktionsversuche veröffentlichen, auch die Einschätzung der Originalautoren erbitten und einbinden. ◀

Dieser Text ist ursprünglich erschienen im Newsletter der ASCB (Walter, P.: On Reproducibility and Clocks. In: ASCB Newsletter 39, S. 3–6, 2016)

QUELLEN

Errington, T. M. et al.: An Open Investigation of the Reproducibility of Cancer Biology Research. In: eLife 3, 10.7554/eLife.04333, 2014

Freedman, L. P. et al.: The Economics of Reproducibility in Preclinical Research. In: PLoS Biology 13, e1002165, 2015

Kashiwagi, K. et al.: Crystal Structure of Eukaryotic Translation Initiation Factor 2B. In: Nature 531, S. 122–125, 2016

Ortuno, D. et al.: Does Inactivation of USP14 Enhance Degradation of Proteasomal Substrates that are Associated with Neurodegenerative Diseases? In: F1000Research, 10.12688/f1000research.7800.2, 2016

GESCHLECHTER GLEICHSTELLUNG IN TIERVERSUCHEN

Biomedizinische Studien sollten immer gleich viele männliche und weibliche Versuchstiere verwenden. Damit würden sie reproduzierbarer und für die Gesundheit von Männern und Frauen gleichermaßen relevant.



Lisa Vincenz-Donnelly ist promovierte Biochemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Lindau am Bodensee.

» spektrum.de/artikel/1432743

► Viele Untersuchungen zu neuen Therapien und Medikamenten verwenden nur männliche Versuchstiere, etwa um Unsicherheiten durch hormonelle Zyklus-schwankungen zu vermeiden. Das trifft etwa auf die meisten vorklinischen Studien in der Schmerzforschung zu, obwohl weibliche Mäuse Schmerz anders verarbeiten als männliche und Frauen häufiger darunter leiden als Männer. Auch Angststörungen, die ebenfalls öfter Frauen betreffen, werden vorwiegend an männlichen Ratten erforscht.

»In den Neurowissenschaften ist es üblich, dass Forschungsergebnisse, die Individuen eines Geschlechts (meist des männlichen) betreffen, auch auf das andere Geschlecht (meist das weibliche) verallgemeinert werden«, kritisiert Eric Prager, Chefredakteur des »Journal of Neuroscience Research«, in einer aktuellen Spezialausgabe, die den neurologischen Unterschieden zwischen Mann und Frau gewidmet ist. Das müsse endlich aufhören.

Das Problem betrifft aber nicht nur Neurowissenschaftler. Annaliese Beery und Irving Zucker von der University

of California in Berkeley analysierten 2011 mehr als 1000 Tierstudien, die diverse Fachjournale im Jahr 2009 veröffentlicht hatten. Sie fanden heraus, dass in acht von zehn Fachbereichen die Forscher vorwiegend männliche Tiere untersucht hatten, etwa in der Pharmakologie.

Was darunter leidet, ist vor allem die Gesundheit der Frauen. Noch weiß man wenig darüber, inwieweit und warum manche Krankheiten bei ihnen anders verlaufen als bei Männern. Acht der zehn Medikamente, die zwischen 1997 und 2001 von der US-amerikanischen Aufsichtsbehörde wegen Nebenwirkungen vom Markt genommen wurden, hatten sich als gefährlicher für weibliche als für männliche Patienten erwiesen. Das könnte unter anderem daran liegen, dass Ärzte jahrzehntelang Medikamente meist nur an Männern testeten, um Frauen – vor allem potenziell schwangere – zu schützen. Mittlerweile besteht zwar in den USA wie in Deutschland die Vorschrift, an beiden Geschlechtern klinische Untersuchungen durchzuführen. Doch für vorklinische

ISTOCK / FOTOGRAFEX



In den Mäuselabors der vorklinischen Forschung herrscht meist akuter Männerüberschuss. Nur in wenigen Fachbereichen werden Studien regelmäßig auch an Weibchen durchgeführt.

Studien galten diese Regelungen bisher nicht, obwohl Forscher auch bei Versuchstieren geschlechtsspezifische Unterschiede beobachten.

Oft erwähnen Veröffentlichungen das Geschlecht der untersuchten Tiere erst gar nicht. Zum Beispiel fehlten im Bereich der Immunologie, in der bekanntermaßen grundlegende Geschlechtsunterschiede auftreten, entsprechende Angaben in mehr als 60 Prozent der Studien, die Beery und Zucker untersuchten. Noch seltener beschrieben Forscher die genaue Herkunft der verwendeten Zelllinien



FOTOLIA / EL GAUJO

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Geschlechtsunterschiede finden Sie unter spektrum.de/t/maennlich-weiblich

und Geweben. Dabei gibt es auch auf dieser Ebene Abweichungen, die über rein hormonelle Einflüsse hinausgehen. So unterscheiden sich männliche und weibliche Zellen zum Teil in ihrer biochemischen Zusammensetzung, weil sie andere Proteine produzieren oder weil die Mengenverhältnisse differieren.

Wenn aber das Geschlecht der untersuchten Organismen nicht bekannt ist, können andere Forscher die Experimente nur schwer wiederholen. Vielleicht erweisen sich ja gerade deshalb manche vorklinische Studien als nicht reproduzierbar (siehe Artikel ab S. 36).

Die Gleichbehandlung der Geschlechter beginnt schon beim Auswählen der Versuchstiere

Neue Richtlinien sollen für Abhilfe sorgen: Seit Anfang 2017 verlangen die Herausgeber des »Journal of Neuroscience Research« von ihren Autoren, das Geschlecht ihrer Versuchstiere und Zellen zu berücksichtigen. Damit schließen sie sich der US-Behörde National Institutes of Health (NIH) an, die seit 2016 von Wissenschaftlern fordert, Geschlecht als eine biologische Variable zu behandeln. Forscher sollen genauso viele weibliche wie männliche Versuchstiere in ihre Studien miteinbeziehen – oder aber überzeugend belegen, warum dies nicht sinnvoll ist. Vor allem müssen sie in jeder Veröffentlichung das Geschlecht der untersuchten Tiere, Zelllinien oder Gewebeproben angeben.

Ein Vorreiter sind die NIH mit diesen Regelungen allerdings nicht. Bereits 2013 stellte das Irish Research Council ähnliche Richtlinien vor, und Kanada, Norwegen und Spanien führten mittlerweile vergleichbare Grundsätze ein. Auch die Europäischen Kommission verschärfte ihre Bestimmungen 2014 im Rahmen des Förderprogramms Horizont 2020. Auf die Frage an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), ob sie ähnliche Richtlinien einführen werde, erfolgte die Antwort, dass sie von For-

schern bisher »keine Bewertung von Einzelparametern tierexperimenteller Studien« fordere. Das Thema Reproduzierbarkeit in der biomedizinischen Forschung werde aber aktuell diskutiert.

Laut Vera Regitz-Zagrosek, Direktorin des Instituts für Geschlechterforschung in der Medizin der Charité, Berlin, sind jedoch klare Richtlinien in Deutschland dringend nötig. »Das Geschlecht ist dermaßen wichtig, dass man es nicht einfach als Einzelparameter betrachten kann, den man nur gelegentlich berücksichtigt«, betont sie.

Viele Forscher bevorzugen männliche Tiere, weil sie glauben, der Zyklus weiblicher Nager führe zu schwankenden Ergebnissen und müsse darum ständig kontrolliert werden – ein zeitaufwändiges Unterfangen. Doch Irving Zucker hält diese Maßnahme für oft unnötig. Er und seine Kollegen zeigten 2014, dass die meisten experimentellen Messungen bei männlichen Mäusen genauso (manchmal sogar stärker) variieren wie bei weiblichen Tieren, die sie zu willkürlichen Zeitpunkten während deren Zyklus untersuchten.

Allerdings könnte das Ungleichgewicht auch andere Gründe haben: »Forscher suchen sich zumeist das Geschlecht aus, von dem sie die deutlicheren Ergebnisse erwarten oder von dem sie denken, dass es den einfacheren Ansatz bietet«, sagt Regitz-Zagrosek. Das muss gar nicht unbedingt das männliche sein. Beispielsweise untersuchen Immunologen häufiger weibliche Tiere.

Nach Einführung der NIH-Richtlinien fürchteten einige Forscher, dass sie nun doppelt so viele Tiere bräuchten, um die Geschlechtergruppen miteinander zu vergleichen. Janine Clayton, Direktorin des NIH Office of Research on Women's Health, klärte das Missverständnis auf: »Das Geschlecht als biologische Variable zu berücksichtigen, ist nicht dasselbe, wie nach geschlechtsspezifischen Unterschieden zu suchen«, schrieb sie 2016 in einem Fachartikel. Obwohl die Suche nach Unterschieden in den letzten Jahren wichtige Erkenntnisse geliefert hätte, sei dies nicht das primäre Ziel der neuen Richtlinien. Forscher müssten nicht zwangsläufig mehr Tiere untersuchen – insgesamt aber möglichst gleich viele männliche wie weibliche.

Für Regitz-Zagrosek ist es letztlich schlicht »ein Maß für die Qualität der Wissenschaft, ob sie sowohl auf männliche als auch auf weibliche Individuen extrapoliert werden kann«. Es bleibt zu hoffen, dass dieser Qualitätsstandard möglichst bald selbstverständlich sein wird. ◀

QUELLEN

Beery, A. K., Zucker, I.: Sex Bias in Neuroscience and Biomedical Research. In: Neuroscience and Biobehavioral Reviews 35, S. 565–572, 2011

Clayton, J. A.: Studying Both Sexes: A Guiding Principle for Biomedicine. In: The FASEB Journal 30, S. 519–524, 2016

Prager, E. M.: Addressing Sex as a Biological Variable. In: Journal of Neuroscience Research 95, S. 11, 2017

Prendergast, B. J. et al.: Female Mice Liberated for Inclusion in Neuroscience and Biomedical Research. In: Neuroscience and Biobehavioral Reviews 40, S. 1–5, 2014



**WIR MACHEN
SIE STARK.**

Das
IMMUNSYSTEM
Ein innovativer Schlüssel
gegen Krebs.

Unser Immunsystem ist wohl eines der stärksten Instrumente im Kampf gegen Krebs. Genau darauf setzt ein neues und innovatives Therapieprinzip: Die Immunonkologie. Sie versetzt unser Immunsystem wieder in die Lage, die Krebszellen zu erkennen und anzugreifen.

www.immunonkologie.de



SONNENSYSTEM AUFRUHR IN DER KINDERSTUBE

Bisher haben Astronomen angenommen, unsere Planeten seien langsam und relativ geordnet entstanden. Neuen Befunden zufolge formten sich die wesentlichen Bausteine des Sonnensystems jedoch in wenigen, turbulenten Jahrtausenden.



Künstlerische Darstellung des Asteroiden Psyche, bei dem es sich um den metallischen Kern eines Planetenvorläufers handeln könnte.



Linda T. Elkins-Tanton ist Planetengeologin und beschäftigt sich vor allem mit der Entwicklung erdähnlicher Planeten. Sie ist Direktorin der School of Earth and Space Exploration an der Arizona State University und Leiterin der geplanten Mission Psyche, die 2023 eine Sonde zum gleichnamigen Asteroiden starten soll.

» spektrum.de/artikel/1432749

Ich verließ gerade einen Unterrichtsraum am Massachusetts Institute of Technology, in dem ich mit Studenten über die Entstehung von Planeten diskutiert hatte, als mich mein Kollege Ben Weiss aufhielt. Er untersucht den Magnetismus von Gesteinsbrocken aus dem All – und war sehr aufgewühlt. Weiss zerrte mich den Flur entlang in sein Büro und zeigte mir gerade erhobene Daten eines dieser Objekte, des Allende-Meteoriten. Seine neuen Informationen sollten nahezu alles verändern, was Planetengeologen bisher über unser Sonnensystem zu wissen glaubten.

Der Allende-Meteorit war 1969 über Mexiko in einer gewaltigen Feuerkugel in der Atmosphäre explodiert und in zahllosen Bruchstücke zur Erde gestürzt. Er enthält mit die älteste bekannte Materie unseres Sonnensystems. Weiss und ich trafen uns 2009. Im Herbst jenes Jahres hatten er und sein Team gezeigt, dass der Meteorit Spuren eines früheren Magnetfelds enthält. Das war überraschend, denn solche Felder konnte nach damaliger Ansicht nur ein magnetischer Dynamo aus heißem, flüssigem Metall im Inneren eines Planeten hervorbringen. So entsteht auch das irdische Magnetfeld. Doch vom Allende-Meteoriten nahmen die Forscher an, dass es sich um das Fragment eines nur leicht warmen so genannten Planetesimals handelte: eines Planetenbausteins in einer viel früheren Phase des Sonnensystems. Dieses Planetesimal, dachten die Wissenschaftler, hätte niemals heiß

genug sein können, um das in ihm enthaltene Metall zu schmelzen. Weiss fragte sich: Wie konnte es dann bloß von magnetischen Feldern durchzogen worden sein?

Meine Studenten hatten mich gerade mit Fragen zur Planetenentstehung überschüttet, und so auch herausgefordert, einen Teil der Lehrbuchweisheiten zu überdenken. Daher hatte ich bereits das Grundgerüst einer neuen Idee im Kopf, die vielleicht dabei helfen konnte, die Frage von Weiss zu beantworten. Ich ging hinüber an seine Tafel und begann, meine Gedanken zu skizzieren.

Seit Langem wissen wir, dass Planetesimale kurzlebige, instabile Aluminiumatome enthalten haben, die bei ihrem Zerfall Energie abgeben. Somit hätte das Isotop Aluminium-26, kurz ^{26}Al , die Planetesimale aufwärmen können. Ich stellte mir vor, im Ursprungskörper des Allende-Meteoriten wäre die von ^{26}Al erzeugte Hitze groß genug geworden, um das Objekt tatsächlich von innen nach außen zu schmelzen. Metalle hätten sich dabei von Silikatmineralien getrennt und im flüssigen Kern angereichert. Dieser hätte rotieren und so einen magnetischen Dynamo erzeugen können. Die Außenseite des Planetesimals wäre unterdessen vom eisigen Weltraum gekühlt und weiterhin von Gestein und Staub aus der ursprünglichen Scheibe des Sonnensystems beregnet worden.

Planetenpogo statt Bröckchenmenuett

Die Idee, dass die frühen Bausteine des Sonnensystems so viel Energie in sich trugen, entsprach nicht dem, was mir im Studium beigebracht worden war. In vielen Lehrbüchern steht immer noch, das Sonnensystem hätte sich langsam und gleichmäßig gebildet. Die Geschichte liest sich dort etwa so: Vor 4,567 Milliarden Jahren umkreisten Gas und Staub aus einer Molekülwolke in einer scheibenförmigen Ebene einen wachsenden jungen Stern. Geordnet und zivilisiert verband sich diese Materie zu vielen kleinen Steinchen, die langsam zu großen Brocken mit mehreren zehn oder gar hundert Kilometern Größe anwuchsen. Diese Planetesimale stießen zusammen und formten umfangreichere Körper – Protoplaneten, etwa so groß wie der Mars. Erst an dieser Stelle begann die Temperatur der Objekte anzusteigen. Die Protoplaneten waren nun massereich genug, um mit ihrer Anziehungskraft die unmittelbare Umgebung von umherschwirrenden Trümmern zu säubern. Einige von ihnen stießen auch zusammen. So wuchsen sie zu Planeten, in denen sich schließlich die verschiedenen Komponenten trennten und die heute vertrauten Metallkerne und Mantel aus Silikaten bildeten.

So weit die alte Vorstellung. Als Weiss und ich uns den Kopf über den Allende-Meteoriten zerbrachen, hatten bereits eine Reihe anderer Beobachtungen Hinweise auf rasante und heftige Veränderungen im frühen Sonnensystem geliefert. Inzwischen ist es an der Zeit, die zahme Entwicklung von Staub über Gesteinsbrocken, Planetesimale und Protoplaneten zu Planeten durch ein anderes Szenario zu ersetzen. So hat die Entstehung der Planetesimale nicht, wie bislang angenommen, mehrere hundert Millionen Jahre gedauert, sondern gerade einmal drei Millionen Jahre. Wenn wir die gesamte Geschichte unseres Sonnen-

AUF EINEN BLICK UNRUHIGE NACHBARSCHAFT

- 1 Bislang stellten sich Wissenschaftler die Entwicklung des Sonnensystems als ein allmähliches und stetiges Wachstum von kleinen, kalten Gesteinsbrocken zu Planeten vor.
- 2 Jüngste Untersuchungen deuten allerdings darauf hin, dass große Objekte bereits früh aus Kollisionen zwischen äußerst heißen und differenzierten Himmelskörpern hervorgegangen sind.
- 3 Um diese Hypothese zu überprüfen, schicken Forscher 2023 eine Sonde zu dem Asteroiden Psyche, der vermutlich der Kern eines solchen Planetenvorläufers ist, dessen Gesteinshülle bei Kollisionen verloren ging.

systems auf einen Tag abbilden, dann beanspruchte die Bildung der Planetesimale nur die allererste Minute. Den kleinen Bausteinen stand mehr Energie zur Verfügung – durch den radioaktiven Zerfall von Aluminium und durch Kollisionen – und deshalb mussten sie nicht erst wachsen, bevor sie eine differenzierte innere Struktur hervorbringen konnten. Relativ kleine Planetesimale beherbergten daher bereits Prozesse, die wir erst bei Planeten erwartet hatten. Ihr Inneres konnte schmelzen, sie zeigten Vulkanismus und wegen ihrer flüssigen Kerne entstanden sogar magnetische Dynamos (siehe Infografik S. 48/49).

Zudem verlief die Entwicklung nicht geradlinig von kleinen zu immer größeren Körpern. Häufig zerfielen Objekte nach Kollisionen wieder in viele Bruchstücke. Wenn in dieser frühen Phase bereits erste planetengroße Körper auftauchten, wurden sie durch Zusammenstöße oft ihrer äußeren Hüllen beraubt oder ganz zerstört. Die Fragmente trafen auf andere Körper und ließen diese anwachsen. Planeten konnten in lediglich zehn Millionen Jahren auftauchen, auseinandergerissen werden und aus den Trümmern erneut hervorgehen.

Neue Werkzeuge zur Bestimmung haben Planetenforschern dabei geholfen, dieses Bild eines umtriebigen jungen Sonnensystems zu entwerfen. Wissenschaftler haben Instrumente entwickelt, mit denen sich die Häufigkeit von Elementen in Meteoriten auf weniger als ein Millionstel genau bestimmen lässt. Da wir wissen, mit welcher Halbwertszeit radioaktive Elemente zerfallen, können wir auch datieren, wann die Himmelskörper, von denen die Bruchstücke stammen, entstanden sind und sich verändert haben. Überall auf der Welt begannen Forschungsteams damit, Meteoritensammlungen zu vermessen – darunter Alex Halliday, der jetzt an der University of Oxford tätig ist, Thorsten Kleine von der Universität Münster, Stein Jacobsen von der Harvard University, Mary Horan und Rick Calson von der Carnegie Institution of Science und Richard Walker von der University of Maryland.

Den Arbeiten dieser Wissenschaftler zufolge gab es die Planetesimale bereits in den ersten Millionen Jahren nach Beginn der Abkühlung der Staubscheibe. Viele der terrestrischen Planeten könnten sich innerhalb der ersten zehn Millionen Jahre gebildet haben, und vielleicht war sogar ein großer Teil der Erde schon nach einigen zehn Millionen Jahren in Kern und Mantel differenziert.

Untersuchungen ganz anderer Art führten zu ähnlichen Ergebnissen. Mit immer besseren Teleskopen beobachten Astronomen die Entwicklung junger Sterne in anderen Regionen der Milchstraße. Einige davon sind von Scheiben aus Gas und Staub umgeben, ähnlich dem jungen Sonnensystem, in denen Himmelskörper wachsen. Durch einen Vergleich des Alters von Sternen, die bereits von Planeten umkreist werden, und solchen, die sich noch inmitten einer Staubscheibe befinden, gelangten Forscher zu der Erkenntnis, dass derartige Scheiben im Mittel nur drei Millionen Jahre überdauern.

Den Planetesimalen bleibt also im Durchschnitt nur diese Zeitspanne für ihr Wachstum, danach steht kein



Fragment des Allende-Meteoriten (oben) und Schnitt durch sein Gestein (links). Der Meteorit zeigt Anzeichen dafür, dass solche frühen Planetenbausteine bereits Magnetfelder besaßen.

Rohmaterial mehr zur Verfügung. Materie, die sich bis dahin nicht an die Gesteinsbrocken angelagert hat, ist zwischenzeitlich entweder in den Stern gefallen oder ins umgebende Weltall entwichen. Im Vergleich zur zuvor gängigen Auffassung der Theoretiker, diese Phase der Akkretion dauere mehrere hundert Millionen Jahre, ist das eine ganz erhebliche Beschleunigung des Vorgangs.

Ein starker Hinweis auf die veränderte Zeitrechnung ist der radioaktive Zerfall, der gleichmäßig wie ein Uhrwerk ein Element in ein anderes verwandelt. Neue Instrumente boten Teams in Europa und den USA ausreichende Genauigkeit, um die Mengen dieser Stoffe in zur Erde gefallenen Meteoriten zu bestimmen und so zu ermitteln, wie lange ihre radioaktive Uhr schon tickt. Bei den meisten von ihnen handelt es sich um Bruchstücke von Asteroiden, die wiederum von Planetesimalen herrühren. Einige stammen allerdings auch vom Mond, vom Mars und von weiteren, bislang nicht identifizierten Himmelskörpern.

Ein radioaktives Isotop des Elements Hafnium bindet sich bevorzugt an Silikate, wie sie im Mantel der Erde vorhanden sind. Es zerfällt in ein Isotop des Wolframs, das sich wiederum stark an Metalle anlagert. In neun Millionen Jahren wandelt sich die Hälfte des Hafniums in Wolfram um. Dieses System liefert uns daher eine geeignete Zeitskala für die Differenzierung von Metallen und Silikaten und damit für das Hervorgehen einer Kern-Mantel-Struktur. Ein junger und heißer Metallkern löst Wolfram aus dem Mantel. Das Hafnium verbleibt in Letzterem und zerfällt weiter in Wolfram, das sich nun dort ansammelt, solange kein weiterer Kernbildungsprozess beginnt. Wis-

DIE TURBULENTE FRÜHZEIT DES SONNENSYSTEMS

Die Vorläufer unserer Planeten waren heißer und ihre Zusammenstöße heftiger, als Astronomen lange dachten. Bereits junge Himmelskörper hatten einen erstaunlich komplexen inneren Aufbau.

1 protoplanetare Scheibe

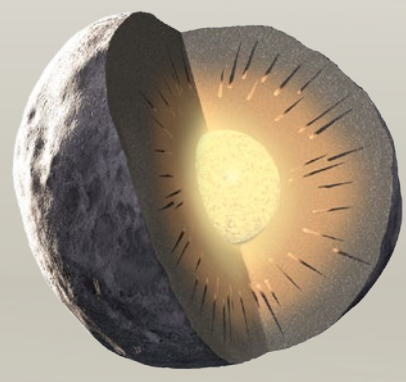
Gas und Staub sammelten sich kurz nach der Entstehung unserer Sonne in einer Scheibe um den jungen Stern.

2 Planetesimale



a) undifferenzierte Planetesimale

In den wachsenden Brocken vermengten sich Gestein und Metall. Darunter war das radioaktive Isotop Aluminium-26, dessen Zerfall Wärme erzeugte.

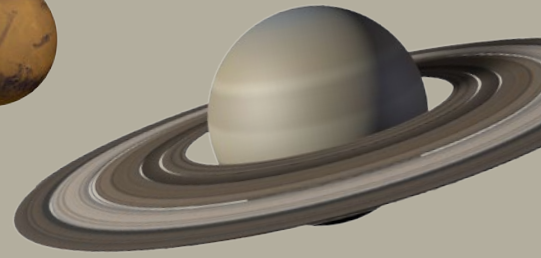
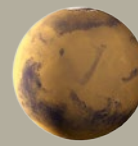


b) teilweise differenzierte Planetesimale

Bei Körpern mit mehr als etwa 20 Kilometern Durchmesser schmolz die Zerfallshitze das Metall. Es sank in den Kern und hinterließ eine Hülle aus Gestein. Manchmal waren die äußeren Schichten noch kalt und durchmischt.



5 Heute

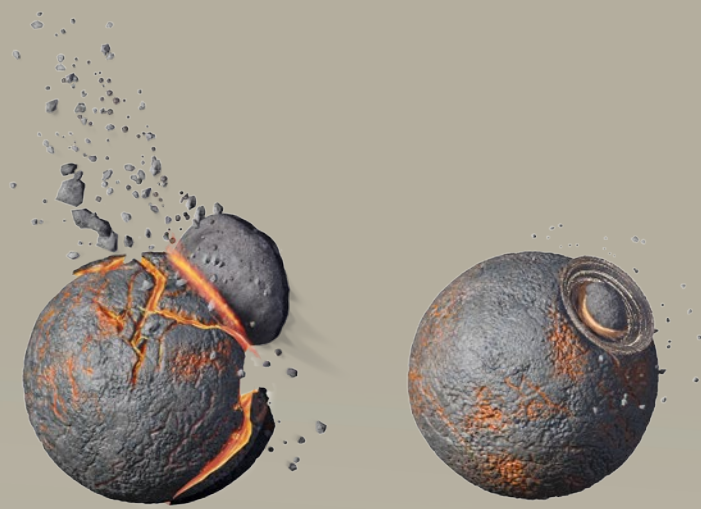
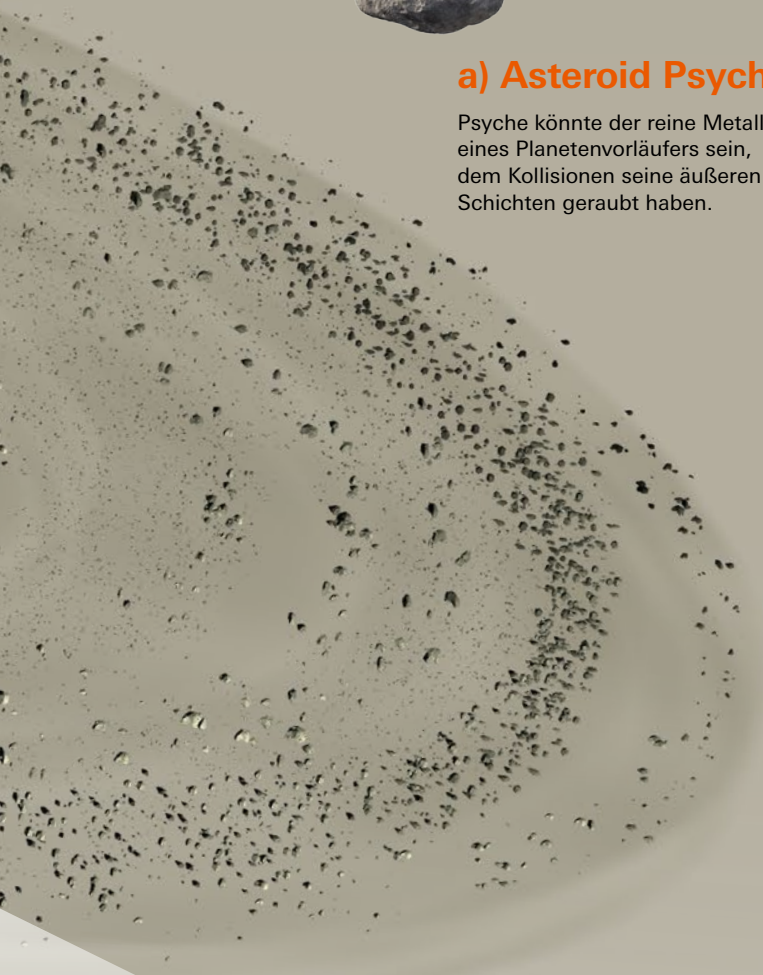


a) Asteroid Psyche

Psyche könnte der reine Metallkern eines Planetenvorläufers sein, dem Kollisionen seine äußeren Schichten geraubt haben.

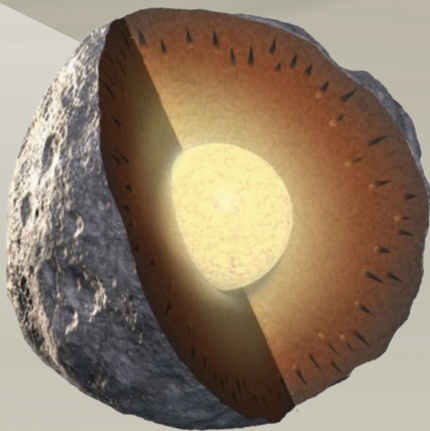
b) Planeten

Große Protoplaneten räumten ihre Umgebung frei, indem sie benachbarte Himmelskörper wegschleuderten oder einsammelten. So wurden sie zu Planeten.



4 Kollisionen

In den ersten Millionen Jahren stießen die dicht gedrängten Planetesimale und Protoplaneten häufig zusammen, zertrümmerten oder vereinten sich.



c) vollständig differenzierte Planetesimale

Viele große Objekte wurden so heiß, dass sie bis zum Rand aufschmolzen und sich alle enthaltenen Bestandteile nach ihrer Dichte trennten. Die flüssigen Metallkerne konnten bereits Magnetfelder erzeugen.

3 Protoplaneten

Die Planetesimale wuchsen zu Planetenvorläufern, die mehrere tausend Kilometer durchmessen konnten. Auf ihren Oberflächen entwickelten sich bereits planetenähnliche Strukturen, etwa Lavaseen.



NASA / JPL

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

senschaftler können also anhand der Anteile von Hafnium und Wolfram in einem Meteoriten schließen, wann sein Ursprungskörper einen Kern erhielt.

Solche Isotopenmessungen an Eisenmeteoriten – von denen viele vermutlich Bruchstücke metallischer Kerne sind – zeigen, dass sich ihre zugehörigen Planetesimale innerhalb von gerade einmal 500 000 Jahren bildeten, nachdem die ersten festen Staubpartikel in der protoplanetaren Scheibe kondensiert waren. Das entspricht weniger als zehn Sekunden im Maßstab, der die Geschichte des Sonnensystems in einem Tag zusammendrängt. Wenn Eisenmeteoriten von Planetesimalkernen stammen, dann müssen die Objekte innerhalb dieser kurzen Zeitspanne nicht nur entstanden, sondern auch geschmolzen sein, damit es zu derartigen Metallkörpern kommen konnten.

Rätselhaft rasches Wachstum vom Staubkorn zum Planetenvorläufer

Das Sonnensystem formte sich somit erheblich schneller als im LehrbuchszENARIO. Nun waren die Theoretiker am Ball: Wie können wenige Mikrometer große Staubteilchen oder selbst zentimetergroße Steinchen in Umlaufbahnen um die Sonne innerhalb von 500 000 Jahren zu Körpern zusammenklumpen, die zehn Millionen Mal größer sind?

Die Antwort darauf ist alles andere als einfach. Zunächst einmal sagt uns die Physik, dass kleine Körnchen durch elektromagnetische Kräfte verkleben können, ähnlich wie der Staub im Haushalt elektrostatisch Flocken bildet. Bei Kollisionen fließt zudem ein Teil der Bewegungsenergie ins Zusammendrücken des porösen Materials. Auch darum haften Brocken bei Stößen eher aneinander statt voneinander abzuprallen oder zu zersplittern. Doch bei ihrem weiteren Wachstum kommt es zur »Meterbarriere«: Bevor sie eine Größe von etwa einem Meter erreichen, sind sie zu umfangreich, um durch elektrostatische Kräfte zusammenzuhalten, und andererseits noch viel zu klein, um mit Hilfe der Schwerkraft aneinanderzuhaften. Selbst Einschläge mit geringer Geschwindigkeit zerstören solche Ansammlungen eher, statt sie weiter zu vergrößern. Und doch wissen wir, dass die Objekte über die Meterbarriere bis zur Größe von Planetesimalen anwachsen – unsere Erde ist ein Beweis dafür. Es müssen also noch andere Prozesse ins Spiel kommen.

Mit vielen Ideen versuchten die Forscher, das Wachstum jenseits der Meterbarriere zu erklären. Bei den meisten Hypothesen drücken verschiedene Arten von Turbulenzen die Körper zusammen. Ein Beispiel für solche Phänomene sind so genannte Kelvin-Helmholtz-Wirbel, die sich zwischen den Schichten der Scheibe entwickeln und

sehr ausgedehnte Regionen voller Materie zusammenbacken können. Ein Pionier auf dem Gebiet solcher Szenarien ist Anders Johansen, der jetzt an der Universität Lund in Schweden tätig ist. Hal Levison vom Southwest Research Institute und Johansen haben unabhängig voneinander ein neues, Geröll-Akkretion genanntes Modell entwickelt. Die Gravitation kann den Berechnungen zufolge selbst kleinste Staubteilchen und Steinchen über viele Umläufe hinweg ausreichend ablenken, damit diese zum Wachstum eines Planetesimals beitragen – und zwar schnell genug, um solche Objekte in der frühen Phase des Sonnensystems hervorzubringen.

Doch solche Prozesse des Zusammenklebens können nicht erklären, wie Planetesimale in Mantel und Kern ausdifferenzieren. Wenn sie sich aus dem Material der Scheibe bilden, in dem Metall und Gestein gut durchmischt sind, dann können nur hohe Temperaturen und ein zumindest teilweises Schmelzen dazu führen, dass das Metall ins Zentrum absinkt. Doch die Energie aus den Zusammenstößen zwischen den relativ kleinen Körpern reicht rechnerisch nicht aus, um sie zu verflüssigen. Die Forscher standen also vor der Frage, woher in der Gefriertruhe des kalten Weltalls die nötige Energie gekommen sein kann.

Hier kommt das radioaktive Aluminium ins Spiel. Vermutlich entstand das Isotop ursprünglich in den äußeren Schichten massereicher Sterne. Deren Sternwinde könnten es in das Ausgangsmaterial des Sonnensystems geblasen und dieses kurz vor dessen Entstehung mit ^{26}Al angereichert haben. Jedes Mal, wenn eines der Atome zerfällt, wird eine kleine Menge Wärme frei. Und diese Beträge könnten sich im jungen Sonnensystem zu einer bedeutenden Energiequelle aufsummiert haben. Aluminium ist unter den sechs häufigsten Elementen in Gesteinen. ^{26}Al mit einer Halbwertszeit von 700 000 Jahren hätte leicht zumindest einige Planetesimale auf ausreichende Temperaturen erhitzt.

Was hat dann aber verhindert, dass die Planetesimale vollständig schmelzen? Denn einige von ihnen besaßen, wie die neuen Untersuchungen zeigen, eine von diesen Prozessen nicht betroffene äußere Schale. Der Durchmesser spielt hier eine wichtige Rolle. Ein großer Körper kann in seinem Inneren heißer werden als ein kleiner, weil das Verhältnis seines Volumens zur Oberfläche dafür günstiger ist. Nehmen wir den Ursprungskörper des Allende-Meteoriten: Er muss groß genug gewesen sein, damit sich sein Zentrum schneller aufheizen konnte, als er die Wärme wieder nach außen abgestrahlt hat. Doch wegen der kurzen Halbwertszeit von ^{26}Al musste er außerdem rasch wachsen. Für den aus dem Allende-Meteoriten berechneten Schmelzverlauf sollte das zugehörige Planetesimal innerhalb von zwei Millionen Jahren mindestens 20 Kilometer Durchmesser erreicht haben. Das entspricht rund 40 Sekunden in unserem 24-Stunden-Maßstab. Möglicherweise wuchs es in dieser Zeit sogar auf bis zu 400 Kilometer.

Zunächst dachten Astronomen, Planetesimale wären entweder vollständig geschmolzen oder ganz im durchmischten Urzustand verblieben. Doch Weiss und ich schlugen ein Hybridmodell vor, in dem ursprüngliches Material aus der Frühzeit des Sonnensystems die äußere

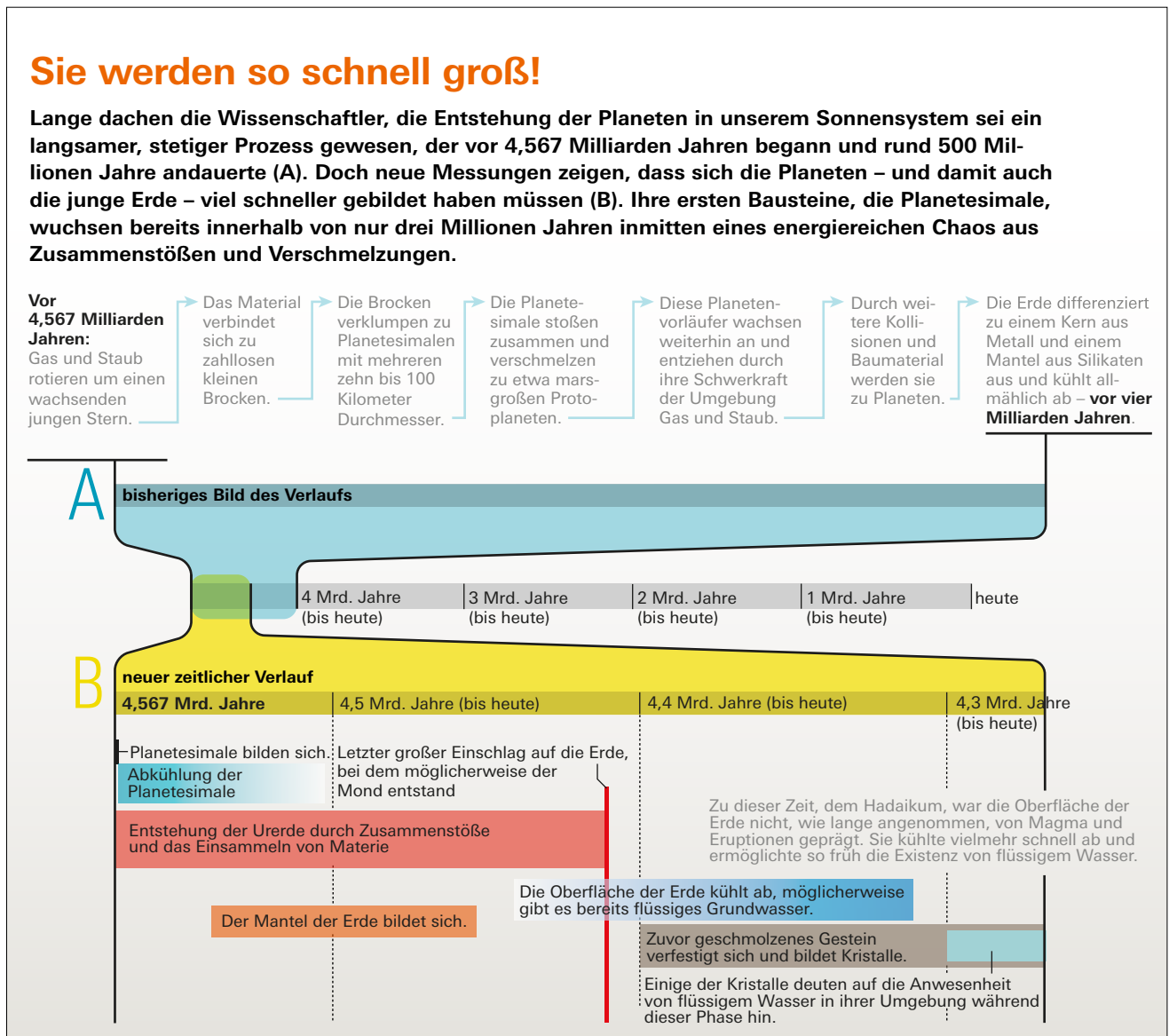
Schale eines im Inneren differenzierten Planetesimals bildet. Nur so ließ sich der Befund im Allende-Meteorit deuten: Dessen magnetisierbaren Teilchen hat sich zwar eine einheitliche Feldrichtung aufgeprägt, was auf einen heißen, geschmolzenen Kern mit einem magnetischen Dynamo deutet; der Brocken selbst besteht aber aus nicht erhitztem, unverändertem Material. Es kann also nur aus der kühlen äußeren Schale eines Planetesimals stammen. Der Ursprungskörper des Allende-Meteoriten behielt diese, weil er vom Weltraum gekühlt wurde und sich zudem weiter ursprünglicher Staub aus der kalten protoplanetaren Scheibe auf ihm ablagerte.

Wir waren keineswegs die Ersten, die über eine solche partielle Differenzierung von Planetesimalen nachdachten. Der Geologe John Wood hatte bereits 1958 für seine Doktorarbeit eine solche Struktur gezeichnet. Doch niemand hatte jemals den geradezu ketzerischen Gedanken ausgesprochen, das Musterexemplar für ursprüngliche, nicht geschmolzene Meteoriten – Allende – wäre auf

diesem Weg entstanden. Oder dass dieser Prozess sogar häufig und prägend für den Beginn unseres Sonnensystems gewesen war.

Doch genau das scheint der Fall zu sein. Untersuchungen anderer Forscher zeigen, dass vier weitere Meteoriten von Körpern mit einem magnetischen Dynamo stammen. Und alternative Ursachen für die Magnetisierung konnten inzwischen ausgeschlossen werden. Es waren weder von der Sonne erzeugte Felder noch die Staubscheibe selbst und auch nicht kurzzeitige Phänomene während eines Einschlags. Wenn das frühe Sonnensystem tatsächlich von Hunderten oder gar Tausenden differenzierter Planetesimale bevölkert war, die herumswirrten, sich aufheizten und magnetische Dynamos produzierten wie Miniaturausgaben der Erde, dann enthielt es in dieser Phase ungeheuer viel Wärmeenergie.

Die traditionelle Annahme eines linearen Wachstums der Planeten von klein zu groß geriet auch durch weitere Überlegungen in Bedrängnis. Um numerische Simulati-



onen zu vereinfachen, hatte man hierbei jahrelang vorausgesetzt, bei jeder Kollision von Planetesimalen würde sich die gesamte Materie zu einem neuen Objekt vereinen. Doch neue Modellierungsansätze und Einsichten von Erik Asphaug von der Arizona State University zeichnen ein anderes Bild. Manche Kollisionen sind in der Tat konstruktiv und erzeugen größere Körper. Doch viele Geschosse schlagen kleinere Brocken heraus, fliegen weiter und setzen ihr Zerstörungswerk an anderer Stelle fort.

Erst nach etwa zehn Millionen Jahren bildeten sich wirklich stattliche Objekte – und sie blieben groß. Denn als zusammenstoßende Planetesimale schließlich Protoplaneten formten, nahm mit deren Masse auch ihre Schwerkraft zu. Die Gravitation war nun stark genug, um jedes Objekt, das sich einem Protoplaneten zu sehr näherte, entweder anzuziehen oder weit aus seiner bisherigen Bahn herauszuschleudern. Die wachsenden Planeten reinigten so die Umgebung ihrer Umlaufbahnen – was übrigens eines ihrer charakteristischen Kriterien ist. Für kleinere Körper gab es immer weniger Bereiche mit stabilen, von den wachsenden Planeten nicht gestörten Bahnen. Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter ist heute eine der letzten sicheren Zonen für solche Objekte.

Aufbruch zu Asteroid Psyche, einer Welt aus Metall

Weiss, Asphaug und ich würden gern herausfinden, wie sich die Zusammensetzung und der Aufbau unseres eigenen Planeten aus dieser energiereichen, häufig chaotischen Umgebung entwickelt haben. Leider ist es anders als im bekannten Roman von Jules Verne unmöglich, zum Kern der Erde zu reisen und ihn direkt zu untersuchen.

Doch vielleicht kann ein bestimmter Asteroid, ein Überbleibsel eines ausdifferenzierten Planetenvorläufers, als Ersatz dafür dienen. Vor vier Jahren begann ich gemeinsam mit Kollegen eine Raumfahrtmission zu entwerfen, um das möglich zu machen. Wir versammelten uns am Jet Propulsion Laboratory der US-Raumfahrtbehörde NASA in einem Zimmer, das Kreativität geradezu herausfordert. Es ist mit Regalen voller Materialien zum Basteln ausgestattet, von Pappe, Rädern und Draht über Papier und Stifte bis zu Legosteinen und Schaumstoff. Ein guter Raum also, um über etwas völlig Neues nachzudenken. Wir planten einen Ort anzufliegen, mit dessen Untersuchung wir unsere Hypothesen bestätigen oder verwerfen könnten. Das beste Ziel dafür war, so entschieden wir, eine vollständig aus Metall bestehende Welt: der Asteroid Psyche.

Dieser Himmelskörper ist einzigartig, jedenfalls in dem Bereich unseres Sonnensystems, der in vernünftiger Zeit erreichbar ist. Psyche ist mit 200 Kilometern Durchmesser einer der größten Asteroiden zwischen Mars und Jupiter. Alle vorliegenden physikalischen Messungen – insbesondere Radaruntersuchungen mit Radioteleskopen – zeigen, dass Psyche nahezu vollständig aus Eisen und Nickel besteht. Psyche scheint der nackte Kern eines Planetesimals zu sein, ein Überbleibsel all der zerstörerischen Kollisionen im frühen Sonnensystem. Wie kleine Kompassnadeln könnten uns in ihrer Ausrichtung eingefrorene Bereiche eventuell Auskunft darüber geben, ob der zuge-

hörige Himmelskörper einen magnetischen Dynamo besaß. Vielleicht gibt es auch noch Überreste seiner Schale aus Gestein, die uns Informationen über den inneren Mantel von Planetenvorläufern liefern.

Jeder in unserem Team brachte besondere Fähigkeiten ein: Weiss ist Spezialist für die Messung von Magnetfeldern in Meteoriten, William F. Bottke für Himmelsmechanik, Asphaug für die Auswirkungen von Kollisionen, Bruce Bills für die Berechnung der Gravitationsfelder. Daniel Wenkert ist Experte für Datenverarbeitung und den Betrieb von Raumfahrzeugen, und Damon Landau für die Berechnung möglicher Flugbahnen. John Brophy organisierte unsere Beratungen. Ich selbst brachte meine Kenntnisse über die Planetenentstehung ein und wie sich Materie vermischt, verflüssigt, trennt und verfestigt.

Der Raum kochte förmlich vor Energie. Die Begeisterung für eine beispiellose Entdeckungsmission hatte uns schnell zusammengeschweißt. Noch nie hat die Menschheit einen rein metallischen Himmelskörper besucht, und wir haben nur vage Vorstellungen davon, wie es dort aussieht. Energiereiche Einschläge auf der Oberfläche aus nacktem Metall könnten beispielsweise scharfkantige Klippen produziert haben.

Heute, Jahre später, ist aus dem Spiel mit Schaumstoff und Legosteinen ein straff organisiertes Programm mit etwa 75 Beteiligten geworden. Wir haben ein kleines Raumfahrzeug vorgeschlagen, das sich mit Hilfe von Solarzellen und eines Ionenantriebs fortbewegt. Es soll neben zwei Kameras ein Gerät zum Nachweis von Magnetfeldern tragen, außerdem ein Gammastrahlenspektrometer zum Identifizieren chemischer Elemente. Als unser Vorschlag 2015 eine Vorauswahl der NASA im Rahmen des so genannten Discovery-Programms überstand, das die Entwicklung wissenschaftlich ertragreicher und zugleich kostengünstiger Missionen zum Ziel hat, arbeiteten wir das Konzept weiter aus. Im Januar 2017 entschied sich die NASA unter den fünf Finalisten für eine Asteroidenmission eines anderen Teams sowie für unsere Mission Psyche – die Raumsonde wird starten!

Wenn alles weiter verläuft wie geplant, sollte es 2023 so weit sein. Nach sieben weiteren Jahren Flugzeit werden wir diesen seltsamen und beispiellosen Überrest der Frühzeit unseres Sonnensystems erreichen und hoffentlich weitere Antworten auf die Frage finden, was während der turbulenten Phase vorgegangen ist. ◀

QUELLEN

Asphaug, E., Reufer, A.: Mercury and Other Iron-Rich Planetary Bodies as Relics of Inefficient Accretion. In: *Nature Geoscience* 7, S. 564–568, 2014

Bottke, W. F. et al.: Iron Meteorites as Remnants of Planetesimals Formed in the Terrestrial Planet Region. In: *Nature* 439, S. 821–824, 2006

Elkins-Tanton, L. T. et al.: Journey to a Metal World: Concept for a Discovery Mission to Psyche. In: *45th Lunar and Planetary Science Conference*, 2014

Weiss, B. P. et al.: Paleomagnetic Records of Meteorites and Early Planetesimal Differentiation. In: *Space Science Reviews* 152, S. 341–390, 2010



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



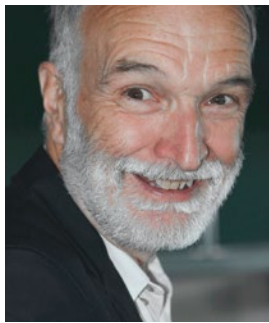
Forschung voll abgedreht

Als DVD



oder auch auf www.max-wissen.de/videos

SCHLICHTING! WENN WEISSER SCHNEE IN FARBEN FUNKELT



Einzelne Eiskristalle sind durchsichtig. Gerade diese Eigenschaft lässt Schnee weiß erscheinen – und unter den richtigen Bedingungen sogar bunt glitzern.

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/1432752

► Wer an einem kalten, sonnigen Tag durch eine Schneelandschaft spaziert, vor dem blitzen bei jedem Schritt blendend weiße oder sogar farbige Lichtpunkte auf. Das Funkeln erinnert an geschliffene Glasstücke oder Diamanten. Der Vergleich von Schnee und Glas ist dabei zutreffender, als man zunächst denken könnte. Schnee besteht aus Eiskristallen, und eine Eisscholle zeigt zahlreiche Ähnlichkeiten mit einer Glasplatte. Beide sind transparent, das Licht geht also ohne merkbare Absorption hindurch. Und in beiden Fällen wird ein geringer Teil des Lichts an den Grenzflächen zur Luft reflektiert. Zertrümmert man eine Glasplatte in feines Granulat, geht diese Transparenz verloren, und es erscheint weiß – ganz so wie Eis, das als Schnee auftritt.

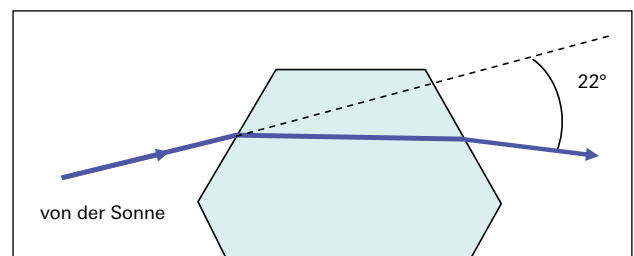
Blickt man durch eine einzelne, glatte Eisscholle, so erkennt man die Gegenstände dahinter bis auf eine leichte Verschiebung infolge der Brechungen noch recht gut. Legt man jedoch kleine Scheiben unterschiedlich orientiert übereinander, so werden sie allmählich undurchsichtig. Es stellt sich eine immer einheitlichere Mischfarbe ein, denn man sieht eine Überlagerung des Lichts von verschiedenen Stellen und Gegenständen.

Auf ähnliche Weise verlieren die Eiskristalle der Schneeflocken ihre Transparenz. Bereits eine nur wenige Zentimeter dicke Schneeschicht verdeckt den Boden und erstrahlt bei Sonnenschein blendend weiß. Bei einer solchen Gemengelage wie den unordentlich übereinander ruhenden Eiskristallen differenziert man nicht mehr nach Reflexion und Brechung, sondern bezeichnet die Wechselwirkungen als Streuung. Im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts sind die winzigen Eiskristalle immer noch groß. Deswegen streuen sie es vorwiegend nach vorne, und es gibt keine Interferenzeffekte wie bei den dünnen Schichten von Seifenblasen oder Insektenflügeln

(siehe »Himmliche Sphären«, **Spektrum** Juni 2016, S. 44 und »Lebendige Juwelen«, **Spektrum** Mai 2016, S. 42). Der Winkel, unter dem das Licht durch die Streuprozesse abgelenkt wird, ist klein, und darum sind viele einzelne Kristalle nötig, damit es seine Richtung merklich ändern und wieder aus der Schneeschicht heraustreten kann. Nur weil Eis weitgehend transparent ist und die Eiskristalle äußerst wenig Licht absorbieren, passiert dies auch tatsächlich – und die Schneedecke nimmt ihre vertraute, intensiv weiße Färbung an.

Lediglich dickere Schnee- und Eiskörper schimmern leicht bläulich, wie man es von Gletscherspalten oder Eisbergen kennt. Im Bereich der Wellenlängen des roten Lichts scheint eine etwas stärkere Absorption aufzutreten. Diese Färbung darf jedoch nicht verwechselt werden mit dem Blaustich von Schneefeldern in beschatteten Bereichen. Hier wird das weiße Sonnenlicht ausgeblendet und vor allem das blaue Himmelslicht reflektiert.

Um die eingangs erwähnten hellen und farbigen Lichtblitze erleben zu können, müssen besondere Ver-



Hexagonale Eiskristalle wirken wie 60-Grad-Prismen und brechen das Licht von der Sonne beim Ein- und Austritt. Die Intensität ist beim kleinstmöglichen Austrittswinkel von 22 Grad am größten.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Die bunten Lichtblitze frischer Kristalle lassen sich nur mit fotografischen Tricks festhalten, etwa einer kurzen Belichtungszeit und Defokussierung. Damit erscheint der Schnee zugleich dunkel und unscharf.

hältnisse vorliegen. Günstig sind tiefe Temperaturen und frisch gefallener Schnee. Dann ruhen die Kristalle noch locker und unversehrt obenauf. Besonders geeignet sind hexagonale Exemplare, die zuweilen bereits in der Atmosphäre durch farbige Reflexe zum Beispiel in Form von Nebensonnen in Erscheinung treten. Wegen ihrer Form verhalten sie sich wie 60-Grad-Prismen: Das Licht wird an einer der Oberflächen in den Kristall hinein- und an der gegenüberliegenden wieder herausgebrochen, bei einem Brechungsindex von 1,31 in einem Winkelbereich von etwa 22 bis 46 Grad zwischen Sonne und Betrachter (siehe Abbildung links).

Der kleinste Winkel, unter dem das weiße Sonnenlicht den Kristall verlässt, liegt zwischen 21,7 Grad (rot, 656 Nanometer Wellenlänge) und 22,5 Grad (violett, 400 Nanometer). In die Nähe dieses Minimums fällt auch die größte Intensität: Zählt man alle Strahlen, die aus dem Eisplättchen in all seinen möglichen Orientierungen heraustreten, findet man die meisten davon um etwa 22 Grad abgelenkt. Darum kommt ein Lichtblitz vorwiegend aus dieser Richtung. Es hängt also von der Beobachtungsposition ab, ob man ihn zu sehen bekommt und welche Farbe er hat. Die hexagonalen Prismen sind nur ein Beispiel für den Effekt; anders geformte Kristalle können das Sonnenlicht auf ähnliche Weise ablenken und in einzelne Spektralfarben aufspalten.

Obwohl die Lichtblitze dem Auge grell erscheinen, ist es schwierig, sie fotografisch festzuhalten. Wenn man auf die Schneefläche fokussiert und die Belichtungszeit der Kamera auf automatisch einstellt, sind die Blitze oft völlig überbelichtet, überstrahlen ihre Umgebung und

verlieren ihre Farbe. Außerdem fallen sie auf dem Foto kaum noch auf, da bereits die Schneefläche hellweiß leuchtet. Reduziert man die Belichtungszeit, sieht man zwar sehr schön die farbigen Reflexe, aber die Schneefläche wird unterbelichtet und erscheint unwirklich dunkel. In dieser Situation hilft eine leichte Defokussierung. Die winzig kleinen Farbpunkte werden

dadurch auf eine größere Fläche

abgebildet und besser wahrnehmbar. Leider wird so die übrige Schneefläche ebenfalls unscharf (Foto oben).

Unter bestimmten Bedingungen entstehen auf älteren Schneeoberflächen durch Schmelzvorgänge am Tag und erneutes Gefrieren in der kalten Nacht frische Eiskristalle, die bei Sonnenschein Lichtblitze aussenden können. Allerdings werden sie vorwiegend durch Reflexionen des Sonnenlichts an günstig liegenden Facetten hervorgebracht und erscheinen daher überwiegend weiß. Zu Lichtdurchgängen durch die Kristalle mit Farbaufspaltungen infolge von Brechung kommt es auf dieser relativ glatten Fläche dann eher selten.

Eine Kruste nach mehrfachem oberflächlichem Tauen und Gefrieren führt wiederum zu einem anderen, kollektiven Lichtphänomen. Diese nur wenig strukturierten, großen Kristallflächen wirken wie dicht aneinanderliegende Minispiegel, die das Licht der tief stehenden Wintersonne ähnlich reflektieren wie das leicht wellige Wasser des Meeres oder eines Sees. Es entsteht eine zur Sonne hinlaufende, funkelnde Lichtbahn, die auch als »Schwert der Sonne« bekannt ist. Verändert man quer dazu seine Stellung, so bewegt sie sich mit, indem die bisherigen Reflexe verlöschen und neue aufblitzen – ein eindrucksvolles Schauspiel.

Ein jedes Stückgen Eis, ein jeder kleiner Hügel Schien recht ein klarer Sonnen-Spiegel

Barthold Heinrich Brockes (1680–1747)

TECHNIKGESCHICHTE WIE SICHER IST DIE CHIPKARTE?

Die heute allgegenwärtige Plastikkarte zum Bezahlen wurde schon früh Ziel krimineller Angriffe. Kryptografische Methoden erlauben heute eine weit gehende Absicherung.



Jean-Jacques Quisquater (links) ist emeritierter Professor für Kryptologie an der Université catholique de Louvain in Belgien. **Jean-Louis Desvignes** ist General und Präsident der Association des réservistes de chiffre et de la sécurité de l'information (ARCSI).

► [spektrum.de/artikel/1432750](https://www.spektrum.de/artikel/1432750)





Seit seiner Einführung vor vier Jahren hat sich der kontaktlose Zahlungsverkehr zunehmend verbreitet. Allein mit Visa-Kreditkarten liefen zwischen Mai 2015 und Mai 2016 in Europa drei Milliarden Zahlungen auf diese Weise ab, fast dreimal so viele wie in den zwölf Monaten davor. Im Einzelhandel wird mittlerweile bereits eine von fünf Transaktionen kontaktlos abgewickelt, während es 2013 nur eine von 60 war.

Das Verfahren genießt großes Vertrauen, ist aber vor Angriffen keineswegs sicher. Einige Vorsichtsmaßnahmen wie eine Obergrenze für den Zahlungsbetrag und die Anzahl der Zahlungen pro Tag verhindern das Schlimmste; doch nichts hindert einen Hacker daran, Ihre Bankdaten zu erkunden, indem er ein Lesegerät nahe an der Tasche entlangführt, in der Sie Ihre Karte aufbewahren. Die winzige Antenne, die mit dem Chip verbunden ist, kommuniziert über Radiowellen mit dem Sender in jedem Lesegerät, das weniger als ungefähr zehn Zentimeter entfernt ist. Im Inneren der Karte gibt es keine Sicherheitsmaßnahmen, um derartige Angriffe zu blockieren.

Das kontaktlose Zahlen ist nur die letzte Wendung in der langen Entwicklungsgeschichte der Chipkarten, in der wir beide sowohl Zeugen als auch Beteiligte waren: der eine (Jean-Jacques Quisquater) auf der technologischen Seite, der andere (Jean-Louis Desvignes) als Hüter der Vertraulichkeit, sowohl im militärischen als auch im Regierungsbereich. Hier zeigt sich vor allem, dass sich die Geschichte wiederholt: Auf das blinde Vertrauen in die technische Überlegenheit des neuen Geräts folgt unweigerlich der Katzenjammer.

In ihrer Frühzeit in den 1980er Jahren galt die Chipkarte als unangreifbar und genoss absolutes Vertrauen – so sehr, dass man dem Publikum eine Menge Geld auf einem Silbertablett anbot. Anlässlich einer großen Ausstellung in Brüssel um das Jahr 1985 herum erwog ein Direktor von Philips, einige zehntausend Chipkarten an die Besucher zu verteilen mit dem Versprechen, dem ersten, der die vierstellige Geheimzahl seiner Karte finde, eine Million Dollar auszuzahlen. Da die Chance, die richtige Zahl durch Zufall zu erraten, 1 zu 10 000 beträgt, wäre dieses Ereignis praktisch mit Sicherheit eingetreten, aus rein statistischen Gründen. Mit der Qualität der Karte hätte das nichts zu tun gehabt. Das trug einer von uns (Quisquater) dem Direktor vor – und der glaubte es nicht!

Er ließ erst von seinem Vorhaben ab, als ich ihm zeigte, dass man tatsächlich den Code der Karte knacken kann. Das gelingt mit einem Verfahren, das wir zusammen mit Louis Guillou, einem der Pioniere auf dem Gebiet der Chipkartensicherheit, gefunden hatten. Man stecke die Karte in ein geeignet präpariertes Lesegerät (Bild S. 63), gebe probeweise eine erste Ziffer ein, wenn der Chip die PIN anfordert, messe mit einem Oszilloskop die Zeit, die der Chip zur Verarbeitung dieser Information benötigt – und unterbreche genau im richtigen Moment die Stromzufuhr, bevor der Chip seinen Fehlversuchszähler um eins hochsetzt. Damals brauchte der Chip nämlich für die korrekte Ziffer weniger Rechenzeit als für eine falsche.

AUF EINEN BLICK KRYPTOGRAPHIE IN DER HOSENTASCHE

- 1 Bei ihrer Einführung in den 1980er Jahren galt die Chipkarte als unknackbar. Sogar das französische Verteidigungsministerium setzte sie zu Verschlüsselungszwecken ein.
- 2 Bald stellte sich heraus, dass sie sehr schlecht gegen kriminelle Angriffe geschützt war.
- 3 Heute erreicht der Chip hohe Sicherheit dadurch, dass er selbst mit seinen beschränkten Möglichkeiten kryptografische Berechnungen durchführt.

Hatte man so durch Probieren die erste Ziffer gefunden, bestimmte man die folgenden Ziffern nacheinander auf dieselbe Weise. Die Büchse der Pandora war geöffnet.

Erst durch die Einführung der Kryptografie wurde die Chipkarte zu einem Gegenstand des Vertrauens – und trieb ihrerseits die Entwicklung der Kryptografie voran.

Von Natur aus unangreifbar

Bei ihrer Einführung schien die Chipkarte quasi von Natur aus gegen kriminelle Ausforschung und Betrug immun zu sein, insbesondere im Zahlungsverkehr, für den sie entwickelt worden war. Tatsächlich bietet ein elektronischer Schaltkreis für den gewöhnlichen Sterblichen eine weit höhere Hürde als der bis dahin verwendete Magnetstreifen, den man mit einem handelsüblichen Gerät lesen und überschreiben konnte. Von einem weiter gehenden Schutz mittels Kryptografie war in den ersten Entwicklungen und Patenten auf diesem Gebiet keine Rede. Auch der vielseitige französische Erfinder Roland Moreno (1945–2012), der einen Mikroprozessor zunächst auf eine Art Siegelring (»bague à puce«) montierte, bevor er 1974 die Karte mit Speicherchip erfand, war sich zwar des Sicherheitsproblems bewusst, kam aber nicht auf die Idee, zu dessen Lösung die Kryptografie einzusetzen (siehe »Die Erfindung der Chipkarte«, rechts).

Heute ist die quasi natürliche und bevorzugte Anwendung der Chipkarte der Zahlungsverkehr. Das ist darauf zurückzuführen, dass vor allem den europäischen Banken der Magnetstreifen oder gar das archaische »Ritschratschgerät«, mit dem der Händler die erhabenen eingepprägten Daten von der Kreditkarte auf den Beleg übertrug, nicht hinreichend sicher erschienen. Die erste industrielle Massenproduktion fand jedoch für eine unerwartete Anwendung statt: die Telefonkarte. Dieser schlichte Speicher für Gebühreneinheiten löste für Millionen von Benutzern das notorische Kleingeldproblem in der Telefonzelle (als es noch welche gab).

Eine weitere Anwendung diente einer kleineren, aber einflussreichen Bevölkerungsgruppe: das Bezahlfernsehen. Sie veranlasste mich (Desvignes) dazu, die Sicherheit

dieser Technologie ins Visier zu nehmen und der Regierung als dringliches Problem vor Augen zu führen. Ich war damals Direktor des Service central de la sécurité des systèmes d'information (SCSSI, heute Agence nationale de la SSI, ANSSI), einer Behörde ähnlich dem deutschen Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI).

Im Jahr 1996 wurde der britische Fernsehsender BSkyB in großem Stil Opfer eines Hackerangriffs. Eine irische Firma verkaufte in aller Öffentlichkeit gefälschte Karten, die zu einem Schleuderpreis Zugang zu Bezahlprogrammen verschafften. Gegen jede Maßnahme, mit der BSkyB der Piraterie Einhalt zu gebieten versuchte, fanden die Piraten alsbald neue Umgehungsmethoden. Die mangelnde Beachtung des Sicherheitsproblems hatte der Entwicklung einer mafiösen Industrie Raum gegeben.

Mit diesem abschreckenden Beispiel konnte ich das (französische) Gesundheitsministerium davon überzeugen, dass man die damals einzuführende Gesundheitskarte (Carte vitale) und die zugehörige Ausweiskarte für die Beschäftigten im Gesundheitswesen (Carte de Professionnel de Santé, CPS) mit einer ausreichenden Absicherung versehen müsste. Nicht auszudenken, was geschehen wäre, wenn man fälschbare und einfach zu duplizierende Karten dieser Art für jedermann eingeführt hätte.

Die Verwendung von Chipkarten im Alltag war nicht mein einziges Arbeitsgebiet. Zehn Jahre zuvor war ich als Chiffrieroffizier im Generalstab der Armee für den Umgang mit den geheimen Codes zur Verschlüsselung (den »Schlüsseln«) der Chiffriermaschinen verantwortlich; und dieser war sehr verbesserungsbedürftig. Ein Bekanntwerden der Verschlüsselungstechnik selbst – nicht unbedingt des häufig wechselnden Schlüssels – wäre für die militärische Geheimhaltung fatal gewesen.

Das zeigt ein historisches Beispiel. Hans-Thilo Schmidt (1883–1943), Mitarbeiter in der Chiffrierstelle des deutschen Reichswehrministeriums, hatte im Oktober 1931 Gebrauchsanleitungen und weitere Unterlagen über die Chiffriermaschine Enigma an den französischen Geheimdienst verkauft. Viele Jahre später half dieses Material zunächst den polnischen Kryptanalysten um Marian Rejewski und dann den Briten um Alan Turing, die aktuellen Enigma-Nachrichten zu knacken, obgleich diese längst andere Schlüssel verwendeten (**Spektrum** Juni 1999, S. 26).

Bis in die 1990er Jahre hatten sich die von den Regierungen betriebenen geheimen Nachrichtennetze, ebenso wie jenes der NATO, nur wenig weiterentwickelt. Sie arbeiteten immer noch mit »symmetrischen Schlüsseln«: Ein und dieselbe Zeichenfolge diente sowohl zum Ver- als auch zum Entschlüsseln. Zum Zeitpunkt des Schlüsselwechsels (typischerweise täglich) mussten daher die Operateure an allen Maschinen des Netzes den jeweils aktuellen Schlüssel einstellen; insbesondere mussten sie physisch Zugang zu ihm haben. Das war eine äußerst empfindliche Schwachstelle im System: Wenn nur ein einziger Operateur den Tagesschlüssel an den gegnerischen Geheimdienst verriet, lagen alle Nachrichten dieses Tages offen vor dessen Augen.

Natürlich hatte man Maßnahmen ergriffen, um einen solchen Verrat zu erschweren – oder zumindest zu verhinder-

dern, dass die Schlüssel für mehrere Tage im Voraus unbemerkt abgekupfert wurden: Abreißblöcke, die das nächste Blatt erst sichtbar werden lassen, wenn alle vorherigen entfernt sind; Felder zum Freirubbeln; Behälter für Lochstreifen mit mechanischen Sperren, so dass man einen einmal gelesenen Lochstreifen nicht wieder zurückspulen kann; gepanzerte Datenspeicher mit – sehr teuren – exotischen Schnittstellen, aus denen ein Laie nichts herausholen kann.

Ich selbst griff zur Risikominderung zu einer paradox erscheinenden Maßnahme: Ich verlängerte die Gültigkeitsdauer einiger Schlüssel von einem Tag auf eine Woche.

Damit wäre zwar der Schaden pro abhandenkommenen Schlüssel vervielfacht worden. Zugleich verminderte sich jedoch die Anzahl der Schlüssel, die zu jedem Zeitpunkt an den Maschinen vorlagen und damit der Verratsgefahr ausgesetzt waren. Der teuerste und riskanteste Teil der Schlüsselverteilung war nämlich der einmal im Monat stattfindende gesicherte Transport der Schlüssel von der Zentrale zu den Chiffrierstellen. Da konnte es durchaus der Sicherheit dienen, wenn die zu transportierende Menge zurückging.

Die ersten Chipkarten der 1980er Jahre, insbesondere die Karte CP8 von Bull, versuchte ich zunächst als preis-

Die Erfindung der Chipkarte

Eigentlich geht die Geschichte der heute allgegenwärtigen Plastikkarte auf das Jahr 1958 zurück. Damals erfand Jack Kilby von Texas Instruments den ersten integrierten Schaltkreis; dieser bestand aus mehreren Transistoren auf einem Siliziumträger. Das wiederum führte dann zur Produktion von Chips wie Intel 4004 (1969) und 8008 (1972), die bereits vollständige Miniaturcomputer darstellten.

Wegen der handlichen Größe kam man bald auf die Idee, die kleinen Geräte als tragbare Zahlungsmittel zu nutzen. In den 1960er Jahren beschrieb der Sciencefiction-Autor René Barjavel (1911–1985) in seinem Roman »La nuit des temps« den Zahlungsverkehr mit Hilfe eines Siegelrings. Zwischen 1968 und 1972 wurden in Japan, Deutschland, Großbritannien und den USA mehrere Patente für eine Plastikkarte mit elektronischem Speicher eingereicht.

Als Erfinder der Chipkarte mit Speicher gilt allgemein der Franzose Roland Moreno: Er meldete

1974 unter Mitwirkung von Jean Moulin das entsprechende Patent an. Der Vater der »intelligenten« Chipkarte ist allerdings der französische Ingenieur Michel Ugon (Bild rechts). Die Karte, die er 1977 als Mitarbeiter des Computerherstellers Bull erfand, enthält nicht nur einen Speicher, sondern auch einen Mikroprozessor, kann also selbst Berechnungen anstellen – unentbehrlich für Sicherheit durch Kryptografie. Ugon war auch derjenige, der sich in Frankreich jahrelang am intensivsten mit der Absicherung der Chipkarte beschäftigte.

In den Jahren 1977 und 1978 meldete Ugon die beiden maßgeblichen Patente für die erste Karte mit Mikroprozessor an. Das erste kommerzielle Produkt, das er im März 1979 auf den Markt brachte (Bild links unten), hatte noch zwei Chips, einen zum Speichern und einen zum Rechnen. Der Nachfolger vom Oktober 1981, die Karte CP8 von Bull (Bild unten), vereinigte beide Funktionen in einem Chip



MICHEL UGON / JEAN-JACQUES OUSQUATER

Michel Ugon, geboren 1940, hat ungefähr 30 Patente eingereicht, darunter das für die Karte mit Mikroprozessor, das für deren Verwendung im Zahlungsverkehr den Weg bereite.

und bot verbesserte Sicherheit. Erste Anwender waren die Telefongesellschaft und Banken.

Allerdings war die kryptografische Sicherheit dieser frühen Karten – entgegen der damaligen Überzeugung – eher bescheiden, mit einer bemerkenswerten Ausnahme: Eine Arbeitsgruppe bei IBM unter der Leitung von Carl Meyer modifizierte bereits in den 1970er Jahren den Kryptalgorithmus Lucifer so, dass er auf Chipkarten an Geldautomaten eingesetzt werden konnte. Die Technologie der Karten war jedoch noch nicht hinreichend fortgeschritten, und der Kooperationspartner, die Lloyds Bank in London, zeigte sich nicht überzeugt, so dass IBM das Projekt nicht weiterverfolgte. Aus dem Verfahren Lucifer ging später der allgemein gebräuchliche Data Encryption Standard (DES) hervor.



JEAN-JACQUES OUSQUATER UND JEAN-LOUIS DESVIGNES



PAPARDELLE (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:CP8_SMART_CARD_-_RECTO.PNG) / CC-BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/LEGALCODE)

werten gesicherten Speicher für geheime Schlüssel zu nutzen. So funktionierte etwa das verschlüsselnde Telefon DCS500 des Herstellers Sagem (mittlerweile in der Firma SAFRAN aufgegangen), das bei der Regierung und den Streitkräften in Gebrauch war (Bild rechts).

Erst seit dem Ende der 1990er Jahre verwendet das Militär Chipkarten mit einem so genannten Sicherheitszertifikat im Rahmen einer »Infrastruktur zur Schlüsselvergabe«, die ihrerseits mit asymmetrischen kryptologischen Systemen arbeitet. Der übliche Name für diese Techniken ist »Kryptografie mit veröffentlichtem Schlüssel« (public-key cryptography). Genauer gesagt, gibt es zwei Schlüssel, einen öffentlichen zum Chiffrieren und einen geheimen zum Entschlüsseln. Die Idee stammt schon aus den 1970er Jahren, wurde aber erst im Zusammenhang mit dem Internet in großem Maßstab realisiert.

Bei asymmetrischen Verfahren braucht zwar der Absender der Nachricht keinen geheim zu haltenden Schlüssel mehr, der Empfänger jedoch nach wie vor. Wenn die Chipkarte dieses Geheimnis enthalten soll, muss sie gegen Angriffe speziell gesichert sein: Ein Bösewicht, dem die Karte in die Hände fällt, darf nicht in der Lage sein, den Speicherinhalt auszulesen. Das gilt fern von allen militärischen Zwecken bereits für ganz gewöhnliche Anwendungen. Welchen Schutz bietet die Geheimzahl zur Chipkarte, wenn ein Krimineller sie mit geeignetem Gerät aus der Karte ermitteln kann?

Die saubere Lösung des Problems besteht darin, die geheime Information überhaupt nicht auf der Karte zu speichern. Wenn also der Kunde die Karte in den Geldautomaten steckt und die PIN eingibt, vergleicht die Karte nicht etwa die eingetippten Ziffern mit einer eingespeicherten Geheimzahl; vielmehr stellt sie mit ihnen kompli-

Ein Chip bewahrt am besten sein Geheimnis, indem er es gar nicht erst enthält

zierte Rechenoperationen an, an deren Ende das Ergebnis »richtig« oder »falsch« steht.

Eine Verschärfung dieses Konzepts ist das »zero knowledge protocol«. Der Kunde muss nicht einmal dem Geldautomaten oder der daran hängenden Datenleitung zur Bank trauen, wo ja die Daten aus der Karte plus die eingetippte PIN für späteren Missbrauch mitgeschrieben werden könnten. Vielmehr stellt der »Prüfer« – zum Beispiel der Geldautomat – dem »Beweiser« – zum Beispiel der Chipkarte und ihrem Besitzer – gewisse Fragen, die nur der Inhaber des Geheimnisses richtig beantworten kann. Gleichzeitig übermitteln diese Antworten jedoch keine Kenntnis (zero knowledge) über das Geheimnis (**Spektrum** April 2016, S. 15).



Das DCS500 von Sagem war das erste Telefon mit verschlüsselter Gesprächsübertragung, das seinen Schlüssel von einer Chipkarte bezog. Es wurde ab den 1990er Jahren von hohen staatlichen und militärischen Stellen in Frankreich verwendet.

Solche Verfahren werden als »starke Kryptografie« klassifiziert. Damit eine Chipkarte in diesem Kontext ihre Rolle übernehmen kann, muss sie über gewisse Rechenfähigkeiten verfügen. Diese Idee sprach sich zwischen 1980 und 1984 rasch herum, insbesondere bei dem Computerhersteller Bull, im gemeinsamen Forschungszentrum von Rundfunk und Post Frankreichs (CCETT), die damals beide noch in staatlicher Hand waren, und im Forschungslabor von Philips in Brüssel. Bei Bull war der maßgebliche Forscher der oben genannte Michel Ugon, im CCETT Louis Guillou, der als Erfinder eines Verschlüsselungsalgorithmus für Videodaten (GOC für »générateur d'octets chiffrants«) bekannt geworden ist, und bei Philips ich (Quisquater).

Im Jahr 1976 hatte ich nahezu druckfrisch den bahnbrechenden Artikel »New directions in cryptography« in die Hände bekommen, in dem Whitfield Diffie und Martin Hellman von der Stanford University das Konzept der asymmetrischen Verschlüsselung präsentierten (siehe Hellmans Artikel in **Spektrum** Oktober 1979, S. 92) und dabei auch zeigten, dass es über das Faktorisierungsproblem großer Zahlen realisierbar ist. Diffie und Hellman wurden fast 40 Jahre danach, 2015, für ihre Errungenschaft mit dem renommierten Turing Award ausgezeichnet. Fasziniert von der Idee bat ich meinen Chef um die Erlaubnis, mich in die Kryptomathematik stürzen zu dürfen. Er stimmte zu, und wir begannen in einer siebenköpfigen Arbeitsgruppe, das Gebiet zu erkunden – noch bevor Ronald Rivest, Adi Shamir und Leonard Adleman das erste ausgearbeitete System mit veröffentlichtem Schlüssel publizierten. Heute ist das nach ihren Initialen benannte System RSA allenthalben in Gebrauch.

Wetlauf zum Algorithmus

Im Dezember 1979 bat uns Philips France, uns an einer Ausschreibung der Groupe d'intérêt économique (GIE) Carte à mémoire zu beteiligen. Die Direction générale des télécommunications (DGT), eine Abteilung des Postministeriums und Vorläufer von France Télécom, sowie etliche Banken hatten sich zu diesem Zweckverband zusammengesetzt, um die Brauchbarkeit der Chipkarte im täglichen Leben zu erkunden. Zwei Konkurrenten, Schlumberger und Bull, stellten sich der Herausforderung, und Philips France wollte ebenfalls sein Glück versuchen. Die dort zuständige Gruppe hielt es für notwendig, in die Chipkarte Kryptografie einzubauen, zumindest zum Zweck der Au-

thentifizierung, also um sicherzustellen, dass die Karte in den Händen ihres legitimen Besitzers ist. Deshalb wandte sie sich an uns. Im Jahr 1981 führte die GIE Carte à mémoire drei Feldversuche durch, mit Bull in Blois, Schlumberger in Caen und Philips in Lyon. An jedem Standort waren einige hundert Terminals und einige zehntausend Chipkarten im Einsatz.

Nur das Experiment in Blois überzeugte die GIE Carte à mémoire, und in der Folge wurde die Chipkarte von Bull weiterentwickelt. Alle Chipkarten waren jedoch von einer sauberen Absicherung noch weit entfernt – aus einem

einfachen Grund: Die Sicherheitsprotokolle waren zwar korrekt auf dem Chip einprogrammiert, aber die kryptografischen Algorithmen, vor allem diejenigen mit veröffentlichtem Schlüssel, hätten die Rechenleistung der Karte weit überfordert. Andererseits kamen von der SCSSI äußerst strenge Forderungen. Es sollte nicht möglich sein, irgendwelche Daten zu entwenden, die von der starken Kryptografie verwendet wurden. Also durfte die Chipkarte keine geheimen Schlüssel gespeichert haben und Sicherheitszertifikate erst ausstellen, wenn diese Forderungen erfüllt waren. Die Algorithmen mussten also so stark sein,

CORSAIR, die erste Chipkarte für RSA

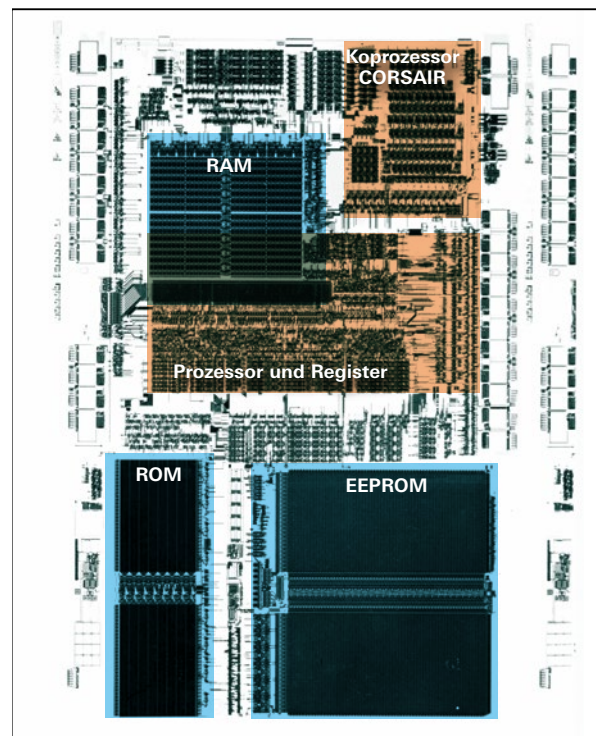
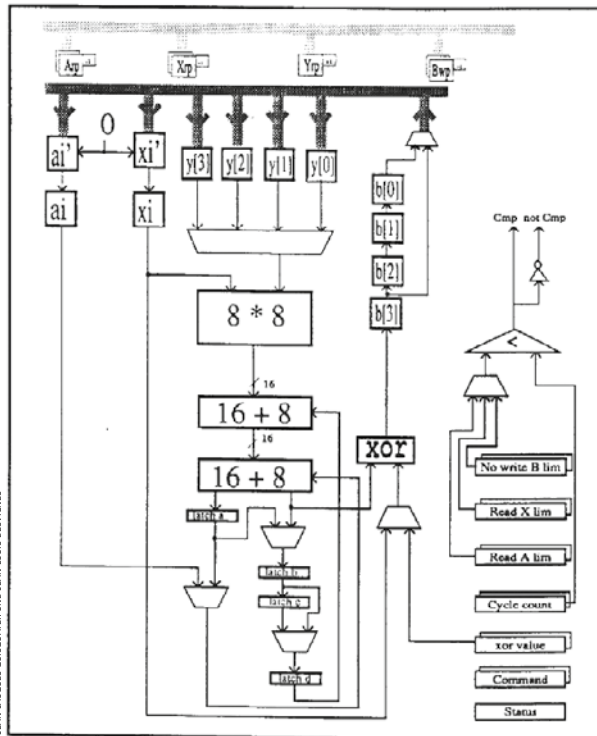
Die Chipkarte CORSAIR (rechts unten) enthielt neben einem Prozessor und verschiedenen Speichern (ROM, RAM, EEPROM) einen Koprozessor für die schnelle Multiplikation großer Zahlen – eine Operation, die bei der Ausführung des RSA-Algorithmus sehr häufig anfällt. Das Flussdiagramm für den Koprozessor (links unten) enthält an zentraler Stelle einen Multiplizierer für achtstellige Binärzahlen (Bytes). Das Ergebnis der Multiplikation ist 16-stellig; es geht der

Reihe nach in zwei Addierer ein, die jeweils eine achtstellige Zahl hinzufügen können. Die übrigen Bauteile stellen Parameterwerte und die Adressen der zu bearbeitenden Daten bereit.

Es handelt sich um den kleinsten jemals erdachten Koprozessor. In einem Rechentakt vollführt er die Operation $xy + a + b$, wobei jedes Element eine achtstellige Binärzahl ist. Wundersamerweise füllen die Ergebnisse dieser Operation den ganzen Zahlenbereich

aller 16-stelligen Binärzahlen aus, ohne je darüber hinauszugehen. Stellt man sich an der Stelle jedes Bytes eine Dezimalzahl zwischen 0 und 9 vor, so wäre die größte Zahl, die man solcherart erhalten kann, $9 \cdot 9 + 9 + 9 = 99$. Allgemein ergibt sich eine zweistellige Zahl ohne Übertrag nach links.

Jede Multiplikation großer natürlicher Zahlen sowie deren Division mit Rest lässt sich auf einfache Weise in eine Folge dieser Elementaroperationen zerlegen.



dass aus dem verschlüsselten Output der Karte der Schlüssel praktisch nicht zu rekonstruieren war.

Anfänglich enthielt die Karte zwei Chips, einen mit dem Prozessor und einen mit dem Speicher, was zunächst mehr Platz für die Algorithmen bedeutete. Nur stellte sich bald heraus, dass man die – gut sichtbaren – Verbindungsleitungen zwischen den beiden Chips anzapfen und durch Messen der elektrischen Ströme den Datenaustausch zwischen Prozessor und Speicher ausspionieren konnte. Ein einziger Chip für beide Funktionen löste dieses Problem, nicht aber das der Kapazität.

Entsprechend arbeiteten die ersten kryptografischen Algorithmen für die Chipkarte stets mit symmetrischen Schlüsseln. Für ihre Hauptverwendung – Abrechnung beim Bezahlfernsehen – reichten die Geschwindigkeit, der verfügbare Speicherplatz und die damals verwendeten 8-Bit-Prozessoren aus. Der komplette Algorithmus passte auf 200 bis 300 Bytes im Arbeitsspeicher, was zweifellos eine hervorragende Leistung war. Andererseits schränkte die Tatsache, dass diese Algorithmen nicht publiziert wurden, ihre Verwendung ein und behinderte ihre Verbreitung außerhalb Frankreichs.

Der Durchbruch fand 1984 in Paris bei Eurocrypt statt, der ersten internationalen öffentlichen Tagung über Kryptografie. Louis Guillou stellte dort seine Chipkarte vor. Auf die Frage, warum er nicht den DES (Data Encryption Standard) verwende, den 1976 zum Standard erklärten Algorithmus mit geheimen Schlüsseln der Länge 56 Bit, antwortete er: »Das ist unmöglich, weil der ROM [Festwertspeicher] viel zu klein ist.« Daraufhin schlug ich meiner Arbeitsgruppe vor, dem Problem abzuweichen. Es traf sich günstig, dass wir zur selben Zeit an einem Projekt namens TRASEC in Belgien arbeiteten. Dabei ging es um

Eine Beschleunigung um den Faktor 250 000 in zehn Jahren

einen sicheren Datenaustausch zwischen Banken; die Schlüssel dafür sollten auf Chipkarten gespeichert sein, die ihrerseits durch eine PIN geschützt waren. Allerdings lief der Algorithmus DES mit diesem Schlüssel auf nicht gesicherten Computern. Die Integration des Algorithmus in die Karte erlaubte es, die dadurch entstehende Sicherheitslücke zu schließen. Einige Monate lang formulierten wir den DES um, indem wir den Code für die Permutationen, die einen wesentlichen Teil des Algorithmus ausmachen, so umsortierten, dass er mehrfach verwendet wurde. So sparten wir Byte um Byte vom Programmtext ein, bis wir ihn auf 668 Bytes zusammengekürzt hatten. Hinterher stellte sich heraus, dass uns jedes Byte ungefähr einen Arbeitstag einer Person gekostet hatte.

Ein schöner Erfolg; aber das Maß aller Dinge war schon damals das RSA-Verfahren. Könnte man es in den Chip integrieren, so würden die digitale Signatur, ein Schlüsselaustauschprotokoll und vieles andere möglich. Paul Barrett, heute Chef der Computersicherheitsfirma Pass-

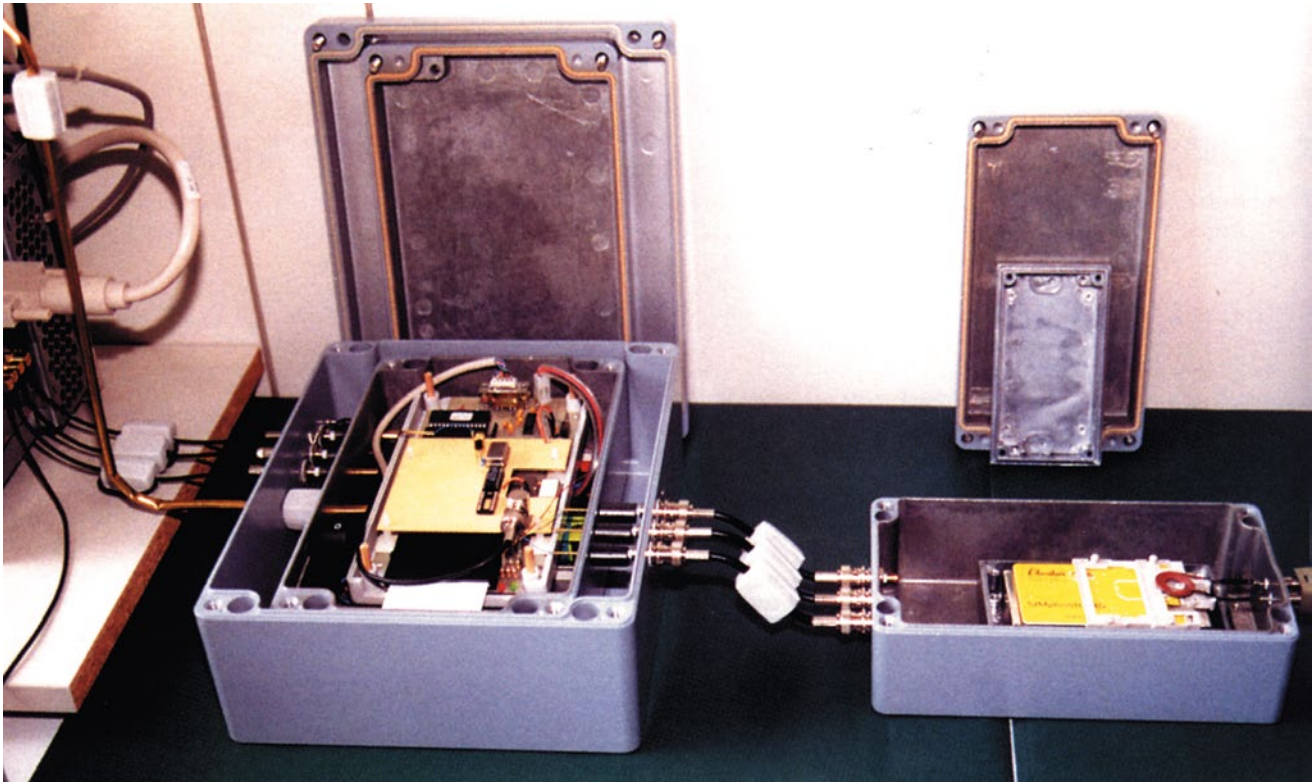
faces, hatte 1986 an der University of Oxford eine neue Realisierung des RSA-Konzepts erfunden, die besonders für die Echtzeitverarbeitung von Signalen geeignet war. Diesen Algorithmus nahmen wir zur Grundlage unserer eigenen Arbeit. Nachdem wir einige Tests mit einer Chipkarte durchgeführt hatten, konnten wir einen RSA-Algorithmus mit einer Schlüssellänge von 512 Bits in etwa 100 Sekunden ausführen. Mit einigen zusätzlichen Tricks – Speicherung der Vielfachen des öffentlichen Schlüssels, Verwendung des Chinesischen Restsatzes zum Lösen von Gleichungen in der Restklassenarithmetik – drückten wir die Zeit für eine digitale Signatur auf unter 20 Sekunden. Das war ein beachtliches Resultat, aber für den praktischen Gebrauch immer noch zu langsam und zu ressourcenintensiv.

Der RSA-Algorithmus in einem Chip

Im Jahr 1989 schlug uns Henri Molko von Philips France und Philips Deutschland ein kühnes Projekt vor: zu einem 80C51-Chip einen Koprozessor zu entwickeln, der den RSA-Algorithmus ausführt. (Der 80C51 war ein Mikrocontroller, das heißt Prozessor plus einige andere Bauteile auf einem Chip, aus der Familie MCS-51 von Intel, die in den 1980er Jahren sehr populär war und von der gewisse Abkömmlinge bis heute produziert werden.) Und zwar sollte der Chip eine RSA-Signatur mit mindestens 512 Bits Schlüssellänge in weniger als einer Sekunde ausrechnen – wir schafften es am Ende in 0,2 Sekunden. Ohne finanzielle Mittel stürzten wir uns in das Projekt, das den Namen CORSAIR (»Coprozessor RSA in a Rush«) bekam. Innerhalb von fünf Wochen entwarfen wir, ausgehend von einem neuen Algorithmus, den ich (Quisquater) kurze Zeit zuvor entwickelt hatte, mehrere Versionen des Koprozessors. Damit erreichten wir bereits eine Beschleunigung um den Faktor 500. Ein erster Prototyp auf Siziliumbasis wurde Anfang 1990 hergestellt. Alles funktionierte bis auf das Schreiben in den löschbaren Speicher (EEPROM) der Karte; dieser Speichertyp war zwar für gewisse Zwecke optimal, aber nicht gerade für unser Projekt (siehe »CORSAIR, die erste Chipkarte für RSA«, S. 61).

So entstand das, was als der »Algorithmus von Quisquater« in die Literatur eingegangen ist. Er unterschied sich von anderen durch die Tatsache, dass der Koprozessor unabhängig von der Länge des Schlüssels funktionierte und dass er für alle vorgelegten Daten dieselbe Zeit brauchte. Innerhalb des Programmablaufs gab es nämlich keine bedingte Verzweigung. Damit waren Angriffe durch Messen der Rechenzeit (Bild rechts oben) von vornherein zum Scheitern verurteilt.

Um die Koprozessoren der zweiten Generation brach ein Wettlauf zwischen den Herstellern Fortress, Siemens, Infineon und Philips aus. Um die Nase wieder vorn zu haben, startete Philips 1995 ein neues Projekt namens FAME. Darin gelang es uns, die Leistung von CORSAIR nochmals um das 500-Fache zu steigern. Das Geheimnis? Allgemeine Verbesserung der Rechenleistung entsprechend dem Mooreschen Gesetz, 16-fache Taktrate, ein Multiplikator für 32 statt 8 Bit lange Zahlen, eine Datenleitung (ein »Bus«) mit größerer Kapazität, ein sehr großer



Mit Hilfe eines einfachen, mit einem Computer verbundenen Geräts misst man leicht die Rechenzeit oder den Stromverbrauch einer Chipkarte – Informationen, mit denen sich der geheime Schlüssel der Karte erkunden lässt.

Arbeitsspeicher und eine nochmals verbesserte Programmierung. Dieser Koprozessor ist in weiter optimierter Form noch heute in Gebrauch. Insgesamt hatten wir damit in zehn Jahren eine Beschleunigung um den Faktor 250 000 erreicht.

Um dieselbe Zeit, als Anwendungen der Chipkarte in großem Stil entwickelt wurden, erwachte in einigen Ländern das Bedürfnis, informatische Systeme nach ihrer Sicherheit in Klassen einzuteilen und für gewisse kritische Anwendungen ein bestimmtes Niveau vorzuschreiben. Den Anfang machten 1983 die Amerikaner mit ihren »Trusted Computer System Evaluation Criteria« (TCSEC), nach der Farbe der Erstveröffentlichung allgemein als »Orange Book« bezeichnet. Diese Kriterien sollten auch gleich für die Systeme der NATO gelten. Das Orange Book erwies sich bald als effiziente Waffe im Konkurrenzkampf um die Etablierung amerikanischer Produkte. Einige europäische Länder reagierten, indem sie Bücher eigener Farbe herausbrachten: grün für die Deutschen, gelb für die Briten – und blau-weiß-rot für die Franzosen. Schließlich nahm sich die Europäische Kommission der Sache an und veröffentlichte 1991 die »Information Technology Security Evaluation Criteria« (ITSEC), auf dessen Grundlage die europäischen Länder ihr Zertifizierungsverfahren einführten. Im Gegensatz zum Orange Book, in dem es im Wesentlichen auf das Vorhandensein von Sicherheitsmechanismen ankam, bewertete ITSEC deren Sachdienlichkeit und Effizienz.

In einem längeren Prozess rauften sich Computersicherheitsexperten beiderseits des Atlantiks zusammen und einigten sich auf gemeinsame Kriterien (»Common Criteria for Information Technology Security Evaluation«, kurz CC). Bei deren Formulierung spielte Frankreich, dem der Vorsitz der zugehörigen Arbeitsgruppe zugefallen war, eine wichtige Rolle. Am 1. Dezember 1999 erklärte die internationale Normungsorganisation ISO diese Kriterien zum Standard.

Während die Vereinigten Staaten und Großbritannien sich auf die Zertifizierung verschiedener Nutzersysteme und Sicherheitsmaßnahmen wie Firewalls konzentrierten, baute Frankreich seine Stärken auf dem Gebiet der Chipkarte aus und erreichte sogar eine Art Monopolstellung. Renommiertere koreanische, japanische und selbst amerikanische Firmen wie Motorola vertrauten französischen Spezialisten die Bewertung ihrer Produkte an. Diese große Kompetenz war einer kleinen Gruppe von Forschern bei France Télécom zu verdanken, die in Grenoble und Caen ansässig waren. In Zusammenarbeit mit der SCSSI gelang es einer Gruppe von etwa zehn Leuten, Prüfverfahren sowohl für das Material als auch für die Software zu entwickeln und die Fehlersuche zu automatisieren.

Die Affäre Humpich

Lange Zeit galt die solcherart ausgestattete Chipkarte als das sicherste Zahlungsmittel, bei einer veröffentlichten Betrugsrate von 0,03 Prozent. Der Erfolg ließ jedoch die Anstrengungen zur Aufrechterhaltung der Sicherheit



Inzwischen ermöglichen auch viele Smartphones das kontaktlose schnelle Bezahlen. Das kann die Sicherheit im Vergleich zu Chipkarten erhöhen oder aber Kriminellen neue Gelegenheiten eröffnen – je nachdem, wie jeweils die Verschlüsselung umgesetzt ist.

erlahmen. So wurde die Länge der Schlüssel nicht vergrößert, obgleich die Experten sie schon lange als zu gering einstufen.

Der allgemeine Optimismus erlitt einen herben Dämpfer, als es 1997 dem Ingenieur und Chip-Autodidakten Serge Humpich gelang, die RSA-Signatur auf der Karte zu knacken. Die Signatur war damals statisch und im Chip gespeichert. Vor allem war der für alle damaligen Bankkarten (Carte bleue) verwendete RSA-Schlüssel seit Jahren nur 320 Bit lang und damit der inzwischen gewaltig angestiegenen Rechenleistung nicht mehr unbedingt gewachsen. In der Tat gelang es Humpich, den veröffentlichten Teil des asymmetrischen Schlüssels (den »Modul«) in seine zwei großen Primfaktoren zu zerlegen und damit an den geheimen Teil zu kommen – was immer noch sehr viel Rechenzeit erforderte, aber inzwischen immerhin machbar war.

Humpich versuchte zunächst über einen Anwalt, sein Wissen dem Bankenconsortium GIE zu verkaufen. Da die Zuständigen dort nicht darauf eingingen, weil sie ihn für einen Aufschneider hielten, fertigte er mit Hilfe seiner Erkenntnisse eine gefälschte Karte an und kaufte mit ihr am Automaten mehrere Fahrscheinhefte für die Pariser Metro. Daraufhin verhandelte die GIE immer noch nicht mit ihm, aber er wurde wegen dieser Aktion im Jahr 2000 zu einer Bewährungsstrafe von zehn Monaten verurteilt. Der Prozess erregte einiges Aufsehen, denn dabei stellte sich heraus, dass Humpich mit seiner Kenntnis des geheimen Schlüssels beliebig viele falsche Bankkarten hätte herstellen können, ohne dazu nochmals auf echte Karten zurückgreifen zu müssen.

Anscheinend ist Humpich ein, wenn auch spektakulärer, Ausnahmefall geblieben. Die meisten Straftaten mit Chipkarten verdanken ihren Erfolg nicht technischer Raffinesse, sondern der Naivität ihrer Opfer und den Manipulationskünsten der Betrüger.

Allerdings hat sich neuerdings ein anderes Einfallstor für kriminelle Aktionen aufgetan: die kontaktlose Kommu-

nikation. In der Tat können auf diese Weise unbemerkt höchst sensible Informationen von der Karte abgegriffen werden. Die französische Datenschutzbehörde CNIL (Commission nationale de l'informatique et des libertés) hat daraufhin die Banken verpflichtet, diese Funktion auf Verlangen des Kunden zu deaktivieren oder ihm eine metallische Hülle zur Verfügung zu stellen, die als faradayscher Käfig alle elektromagnetischen Signale unterdrückt.

Inzwischen zeichnet sich eine wesentlich beunruhigendere Entwicklung ab. Mit oder ohne Kontakt ist die Chipkarte immerhin noch ein Instrument der Sicherheit. Aber auch dieses könnte infolge neuer Angebote verschwinden. Wenn das Smartphone eine SIM-Karte mit erweiterten Fähigkeiten verwenden würde oder selbst Funktionen wie das kontaktlose Bezahlen übernehme, dann gäbe es keine Trennung mehr zwischen dem Kommunikationsmittel und dem Mittel zur Identifikation und Authentifikation, dem Chip – ein gefundenes Fressen für Kriminelle. Mehr noch: Großkonzerne wie Google, Apple, Facebook und Amazon könnten sich eines der wenigen Gebiete aneignen, die noch nicht von den Amerikanern beherrscht werden. ◀

QUELLEN

Bouzeffrane, S., Paradinas, P.: Les cartes à puce. Hermes Science Publications, Paris 2013

Rankl, W., Effing, W.: Handbuch der Chipkarten. Hanser, München, 5. Auflage 2008

Tavernier, C.: Les cartes à puce. Théorie et mise en œuvre. Dunod, Paris, 2. Auflage 2011

LITERATURTIPPS

Beth, T.: Sichere offene Datennetze. In: Spektrum der Wissenschaft 5/1995, S. 46–55
Über Sicherheit mit Hilfe asymmetrischer Verschlüsselungsverfahren

Dewdney, A. K.: Der Data Encryption Standard (DES). In: Spektrum der Wissenschaft 1/1989, S. 6–9
Das klassische symmetrische Verschlüsselungsverfahren

Spektrum gibt es auch digital.



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

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!
 service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
 www.spektrum.de/digitalabo



CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN EXPERIMENTIEREN MIT EINEM ALLERWELTSMETALL

Weil Aluminium äußerst reaktionsfreudig ist, wurde es erst ziemlich spät entdeckt und ließ sich zunächst nur schwer herstellen, so dass es kostbarer war als Gold. Wie schaffte es den Sprung zum alltäglichen Werkstoff in unserer modernen Welt?



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.

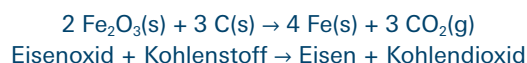
► spektrum.de/artikel/1432754

► Schon vor 7000 Jahren gelang es unseren Vorfahren, Kupfer aus entsprechenden Erzen zu gewinnen. Auch die Eisenverhüttung beherrschte der Mensch sehr früh bereits: Die ältesten in Europa gefundenen eisernen Gebrauchsgegenstände stammen aus dem 9. bis 10. Jahrhundert v. Chr. Aluminium dagegen ist ein Metall der Neuzeit. Als sein Entdecker gilt üblicherweise Friedrich Wöhler (1800–1882), der das Element im Jahr 1827 erstmals rein darstellte. Der deutsche Chemiker stützte sich allerdings auf umfangreiche Vorarbeiten von Hans Christian Ørsted (1777–1851), einem dänischen Chemiker und Physiker, der die Elektrizitätslehre und Elektrotechnik mitbegründete.

Warum dauerte es beim Aluminium so lange, bis es sich in reiner Form gewinnen ließ? Metalle sind unterschiedlich reaktiv. Die edelsten wie Gold oder Platin zeigen nur eine geringe Neigung, Verbindungen einzugehen. Deshalb kommen sie hauptsächlich gediegen, das heißt als Reinstoffe, in der Natur vor. Kupfer zählt zwar auch zu den Edelmetallen, ist aber schon wesentlich reaktionsfreudiger. Noch weitaus begieriger, sich mit anderen Stoffen zu verbinden, sind unedle Metalle wie Eisen oder gar Natrium. Deshalb treten sie in der Natur gewöhnlich nicht im elementaren Zustand auf. Um sie aus ihren Verbindungen zu gewinnen, muss man chemische Verfahren anwenden.

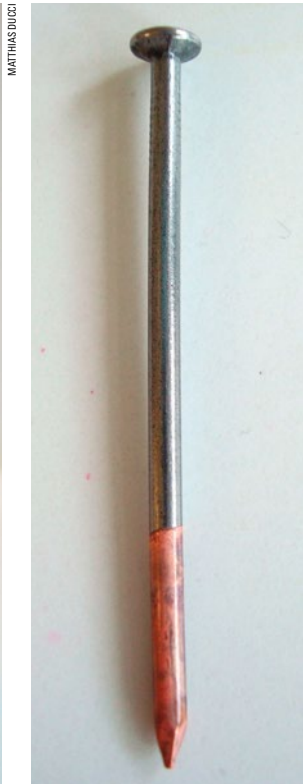
Beim Eisen dient Kohlenstoff in Form von Kohle dazu, den oxidischen Erzen den Sauerstoff zu entziehen, so dass das reine Metall zurückbleibt. Bei dieser Umsetzung

handelt es sich um eine so genannte Redoxreaktion, in deren Verlauf der Kohlenstoff als Reduktionsmittel wirkt, das Elektronen an die Eisen-Ionen im Erz abgibt. Er übernimmt dabei den Sauerstoff und wandelt sich in Kohlendioxid um. Die summarische Gleichung für den Vorgang lautet (die Symbole (s) und (g) stehen für fest beziehungsweise gasförmig):

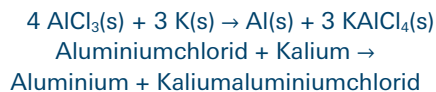


Schon Anfang des 19. Jahrhunderts vermutete man, dass auch die so genannte Tonerde ein Metalloxid sei. Den Sauerstoff daraus zu entfernen, erwies sich jedoch als schwierig. Kohlenstoff taugte dazu nicht; es war ein zu schwaches Reduktionsmittel. Daraufhin entwarf Ørsted den Plan, das Oxid zunächst in ein Chlorid zu überführen. Hierzu mischte er die Tonerde mit Kienruß, der damals als schwarze Druckfarbe diente, und leitete Chlorgas über das erhitzte Gemisch. Ursprünglich wollte er dem so erzeugten Chlorid dann mit Wasserstoff das Chlor entziehen.

Doch das gelang ebenso wenig wie die Reduktion der Tonerde mit Kohlenstoff. Ein noch stärkeres Reduktionsmittel musste her! Als solches probierte Ørsted schließlich Kaliumamalgam, eine Kalium-Quecksilber-Verbindung. Das Ergebnis war ein Metallklumpen, der in Farbe und Glanz dem Zinn ähnelte. Heute nimmt man allgemein an, dass es sich um stark verunreinigtes Aluminium handelte, das sich gemäß der folgenden Gleichung bildete:



Taucht man einen Eisennagel in Kupfersulfat-Lösung, überzieht er sich mit einer Kupferschicht (links). Bei Aluminiumfolie geschieht das nicht. Erst nach Zusatz von Kochsalz kommt es zu einer heftigen Reaktion. Dabei scheidet sich Kupfer auf dem Aluminium ab, während zugleich ein Gas entweicht (rechts).



Ørsted verzichtete auf weitere Untersuchungen und berichtete Wöhler von seinen Arbeiten. Dieser wiederholte die Experimente und bekam dabei »große Lust zur weiteren Verfolgung derselben«, wie er in einem Brief an seinen wissenschaftlichen Ziehvater, den schwedischen Chemiker Jöns Jakob Berzelius (1779–1848), bekannte. Seine Bemühungen zahlten sich aus: Im Oktober 1827 erhielt er erstmals reines Aluminium in Form eines grauen Pulvers.

Weil Wöhler statt des Amalgams pures, hochreaktives Kalium als Reduktionsmittel einsetzte, war seine Methode zum Gewinnen des Metalls jedoch äußerst kostspielig und eignete sich daher nicht für die technische Nutzung. Zudem war sie sehr unausgereift. So gelang es Wöhler erst 1845, stecknadelkopfgroße Aluminiumkörner herzustellen. Mit ihnen konnte er die Dichte bestimmen, die sich mit 2,67 Gramm pro Kubikzentimeter als extrem niedrig erwies. Zum Vergleich: Eisen hat eine Dichte von 7,87 Gramm pro Kubikzentimeter, ein fast dreimal so hoher Wert. Aluminium ist also ein sehr leichtes Metall.

Teurer als Gold

Einen anderen Weg zur Aluminiumherstellung beschritt der französische Chemiker Henri Étienne Sainte-Claire Deville (1818–1881). Er versuchte, das Metall durch Elektrolyse des geschmolzenen Chlorids zu gewinnen, das heißt

mit elektrischem Strom Aluminiumchlorid in Aluminium und Chlor zu zerlegen. Da er in Napoleon III. einen bedeutenden Förderer auf seiner Seite hatte, standen ihm fast unbegrenzte Mittel zur Verfügung. Der französische Kaiser wollte nämlich seine Armee mit Ausrüstungsgegenständen aus leichtem Aluminium ausstatten. Doch auch Deville hatte nicht den gewünschten Erfolg. Die Herstellung des Leichtmetalls erwies sich als derart aufwändig, dass es damals teurer war als Gold. Deshalb diente es sogar als Werkstoff in der Schmuckindustrie. Napoleon III. ließ bei

Napoleon III. bewirtete die ranghöchsten Gästen mit Aluminiumgeschirr, alle anderen mussten sich mit Silber oder Gold begnügen

Banketten nur den ranghöchsten Gästen die Gerichte auf Aluminiumgeschirr servieren, alle anderen mussten sich mit Tellern aus Silber und Gold begnügen.

Die Präsentation von Aluminiumbarren auf der Pariser Weltausstellung von 1855 galt als Sensation. Dennoch überwog angesichts der Schwierigkeiten bei der Herstellung des Metalls die Skepsis. So ist in zeitgenössischen Lehrbüchern über Aluminium zu lesen, dass die bekannten Gewinnungsmethoden doch wohl mehr von wissenschaft-

lichem als von technischem Interesse seien. Auch gebe es für das Metall kaum sinnvolle Verwendungsmöglichkeiten.

Den Durchbruch bei der Aluminiumherstellung ermöglichte erst die Erfindung der Dynamomaschine durch Werner von Siemens (1816–1892) im Jahre 1866, mit der sich der für eine Elektrolyse benötigte Gleichstrom kostengünstig erzeugen ließ. Noch fehlte aber ein geeigneter Elektrolyt. Aluminiumoxid ist zwar sehr rein aus dem Erz Bauxit gewinnbar, hat mit 2045 Grad Celsius aber einen viel zu hohen Schmelzpunkt. Die Lösung fanden der Amerikaner Charles Martin Hall (1863–1914) und der Franzose Paul Louis Toussaint Héroult (1863–1914) unabhängig voneinander: Sie lösten Aluminiumoxid in einer Schmelze aus Kryolith (Na_3AlF_6). Deren Temperatur liegt bei 950 bis 970 Grad Celsius und damit in einem wirtschaftlich und technisch vertretbaren Bereich. Der Hall-Héroult-Prozess wird – mit einigen technischen Neuerungen – heute noch industriell angewandt.

Auch bei den Verwendungsmöglichkeiten erwies sich die anfängliche Skepsis als komplett falsch. Inzwischen ist Aluminium eines der wichtigsten Nichteisenmetalle, das große Bedeutung im Flugzeug-, Schiff- und Automobilbau hat. Aber auch im Alltag begegnet es uns überall, man denke nur an Alufolien oder Grillschalen. Manche von Ihnen besitzen vielleicht ein Fahrrad aus dem Leichtmetall, und ältere erinnern sich eventuell noch an »Henkelmänner« oder Kochtöpfe aus Aluminium.

Warum rostet Aluminium nicht?

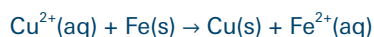
Die große Beständigkeit von Aluminium scheint zunächst im Widerspruch damit zu stehen, dass es sich um ein sehr unedles und damit reaktionsfreudiges Element handelt. Es ist sogar wesentlich unedler als Eisen. Aber warum rostet es dann nicht? Gegenstände aus Aluminium haben in der Regel einen metallischen Glanz, dem weder Luft noch Wasser, Hitze oder Kälte etwas anhaben können. Dem Grund dafür wollen wir mit einigen sehr einfachen, aber reizvollen Experimenten nachspüren.

Für den ersten Versuch benötigen Sie ein Schnapsglas, einen Eisennagel, Aluminiumfolie und Kupfersulfat-pentahydrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), das in Experimentierkästen wie dem

C3000 von Kosmos enthalten ist. In dem Glas lösen Sie 2,5 Gramm der Kupferverbindung in 10 Milliliter Wasser und tauchen dann den Eisennagel für rund eine Minute in die Flüssigkeit. Wenn Sie ihn wieder herausnehmen, hat sich eine Schicht aus rotbraunem Kupfer darauf abgeschieden.

Wie lässt sich das erklären? Die Flüssigkeit enthält zweifach positiv geladene Kupfer-Ionen (Cu^{2+}), während der Nagel aus neutralen Eisen-Atomen (Fe) besteht. Treffen beide aufeinander, so gehen jeweils zwei Elektronen von einem Eisen-Atom auf ein Kupfer-Ion über. Dieses wird dadurch zu einem elektrisch neutralen Teilchen, das Eisen-Atom dagegen zu einem zweifach positiv geladenen Ion.

Demzufolge scheidet sich sukzessive Kupfer am Eisennagel ab, während Eisen in Form von Fe^{2+} -Ionen in Lösung geht. Die zugehörige Reaktionsgleichung lautet (das Symbol (aq) steht für wässrige Lösung):



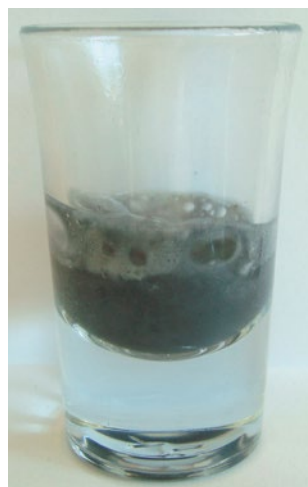
Kupfer-Ion + Eisen-Atom → Kupfer-Atom + Eisen-Ion

Der umgekehrte Vorgang ist nicht möglich: Wenn Sie einen Kupfernagel in eine Eisensalz-Lösung tauchen, geschieht nichts. Demnach ist Kupfer edler als Eisen.

Durch solche und andere Versuche sowie Berechnungen haben Chemiker sämtliche Metalle nach dem Grad ihres edlen oder unedlen Charakters in eine Reihenfolge gebracht. Hier ein kleiner Ausschnitt aus dieser so genannten Fällungsreihe, dargestellt für Metalle des alltäglichen Gebrauchs:

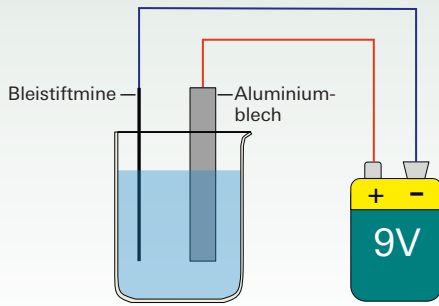
Magnesium – Aluminium – Zink – Eisen – Blei – Kupfer – Gold
unedel ←————→ edel

Beim Eintauchen von Aluminium in eine Kupfersulfat-Lösung müsste sich gemäß dieser Reihe ebenfalls Kupfer darauf abscheiden. Da das Leichtmetall noch unedler als Eisen ist, sollte die Reaktion sogar schneller und heftiger ablaufen als mit dem Eisennagel. Dies wollen wir im nächsten Experiment überprüfen. Rollen Sie dazu ein Stück Aluminiumfolie zusammen und tauchen es in die Kupfersulfat-Lösung. Entgegen der theoretischen Vorher-



Ein Kügelchen aus Aluminiumfolie wird von Zitronensäure-Lösung (links) und Batteriesäure (Mitte) nicht angegriffen. Dagegen reagiert es heftig unter Gasentwicklung mit Salzsäure (rechts).

Passivierung von Aluminium



Mit dieser Anordnung lässt sich das Eloxalverfahren nachvollziehen, bei dem die Beständigkeit von Aluminium elektrolytisch erhöht wird.

sage geschieht jedoch nichts: Die Aluminiumfolie bleibt silbrig glänzend, und so lange Sie auch warten, es scheidet sich nicht die kleinste Spur von Kupfer darauf ab.

Wie kommt es zu dieser verblüffenden Beständigkeit? Stimmt vielleicht die Einordnung von Aluminium in die Fällungsreihe nicht? Unter bestimmten Bedingungen verhält sich das Metall jedoch sehr wohl so unedel, wie seine Stellung in dieser Reihe erwarten lässt. Welche das sind, verrät ein Blick auf die Gebrauchsinformationen von Alufolie. Dort heißt es, dass der Kontakt mit salzhaltigen Lebensmitteln zu vermeiden sei. Im nächsten Experiment machen wir deshalb das genaue Gegenteil: Nach dem Eintauchen der zusammengerollten Folie in die Kupfersulfat-Lösung, fügen wir einen Teelöffel Kochsalz (Natrium-

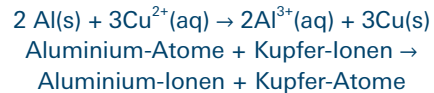
Selbst Batteriesäure, also ziemlich konzentrierte Schwefelsäure, vermag Alufolie nichts anzuhaben

chlorid, NaCl) hinzu und rühren um. Siehe da: Binnen Kurzem beginnt sich Kupfer abzuscheiden. Außerdem steigen wie aus einem Sektglas sprudelnd Gasbläschen auf.

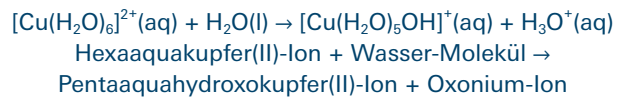
Damit haben wir einen Hinweis auf den Grund für die überraschende Beständigkeit von Aluminium. Es bildet nämlich an der Luft mit Sauerstoff einen hauchdünnen, aber sehr kompakten Schutzfilm aus Aluminiumoxid (Al_2O_3). Dieser ist nur etwa 25 Atomlagen dick, was ungefähr 0,01 Mikrometern entspricht, und bleibt deshalb für das Auge unsichtbar. Wie ungeheuer schnell er entsteht, zeigt sich eindrucksvoll, wenn man Aluminiumblech schmirgelt und dann sofort in die Kupfersulfat-Lösung taucht. Auch in diesem Fall scheidet sich kein Kupfer ab: Die schützende Oxidschicht hat sich sofort neu gebildet.

Die Chlorid-Ionen (Cl^-) im Kochsalz greifen diese Schicht jedoch an. Sie verbinden sich mit ihr zu wasserlöslichen

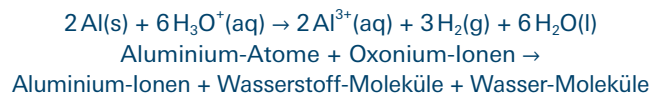
Produkten wie dem Tetrachloroaluminat-Komplex AlCl_4^- und bauen sie dadurch ab. Das nun ungeschützte Aluminium reagiert entsprechend seiner Stellung in der Fällungsreihe mit den Kupfer-Ionen gemäß der Gleichung:



Die Gasentwicklung zeigt, dass aber noch eine andere Reaktion stattfinden muss. Um welche könnte es sich handeln? Wenn Sie ein Indikatorpapier in die Lösung tauchen, werden Sie feststellen, dass diese sauer ist. Das liegt daran, dass Kupfer-Ionen Wassermoleküle so stark an sich binden, dass teilweise H^+ -Ionen abgespalten und Oxonium-Ionen gebildet werden (das Symbol (l) steht für flüssig):



Diese reagieren dann mit dem ungeschützten Aluminium unter Bildung von Wasserstoff. Die entsprechende Reaktionsgleichung lautet:



Dass es sich bei dem entstehenden Gas um Wasserstoff handelt, kann man im Prinzip nachweisen, indem man es auffängt und mit der Knallgasprobe auf seine Brennbarkeit testet. Da dieser Versuch sehr gefährlich ist, warnen wir jedoch dringend davor, ihn selbst zu Hause durchzuführen.

Unedel und doch gegen Säuren beständig

Alufolie sollte den Gebrauchsinformationen zufolge auch nicht mit stark sauren Lebensmitteln in Kontakt kommen. Greifen Säuren die schützende Oxidschicht also ebenfalls an? Das wollen wir im nächsten Experiment prüfen. Geben Sie dazu etwas Wasser in ein Schnapsglas, fügen einen Teelöffel Zitronensäure hinzu und warten, bis diese sich aufgelöst hat. Dann werfen Sie ein Kügelchen aus Aluminiumfolie hinein. Das Ergebnis dürfte Sie angesichts der obigen Warnung enttäuschen: Nichts passiert. Dasselbe gilt, wenn Sie statt Zitronensäure Tafelessig oder Essigessenz verwenden. Selbst Batteriesäure, also ziemlich konzentrierte Schwefelsäure, vermag dem Aluminiumkügelchen nichts anzuhaben. Oxonium-Ionen können die Oxidschicht also nicht auflösen.

Ahnen Sie, mit welcher Säure dem Aluminiumkügelchen beizukommen ist? Richtig: Salzsäure, die neben den für den sauren Charakter verantwortlichen Oxonium-Ionen (H_3O^+) auch Chlorid-Ionen (Cl^-) enthält. Wenn Sie das Aluminiumkügelchen zum Beispiel in 24-prozentige Salzsäure aus dem Baumarkt werfen, beginnen sich nach etwa zwei Minuten Gasbläschen zu bilden – so lange dauert es,

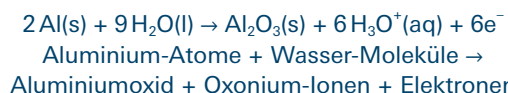


Tropft man eine kochsalzhaltige Kupfersulfat-Lösung auf gewöhnliches Aluminiumblech (links), scheidet sich sofort unter Wasserstoffentwicklung Kupfer ab. Nach der elektrolytischen Passivierung findet dagegen keine Reaktion statt (rechts), weil eine künstlich verdickte Oxidschicht das Metall bedeckt und es auf diese Weise schützt.

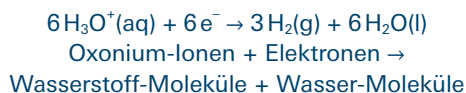
bis die schützende Oxidschicht erste Löcher bekommen hat. Schließlich kommt es gemäß der obigen Gleichung zu einer heftigen Wasserstoffentwicklung, und das Aluminium löst sich komplett auf.

Das Eloxal-Verfahren – künstliche Verdickung der Schutzschicht

Angesichts der Empfindlichkeit der schützenden Oxidschicht gegenüber Chlorid-Ionen verwundert es zunächst, dass Aluminium auch in Bereichen eingesetzt wird, in denen sich der Kontakt mit korrosiv wirkenden Medien nicht verhindern lässt – etwa bei Schiffsrümpfen (salzhaltiges Meerwasser) und Fahrrädern oder Automobilen (Streusalz). Der Grund ist, dass sich mit dem so genannten Eloxal-Verfahren, abgekürzt für elektrolytische Oxidation von Aluminium, die Beständigkeit des Metalls deutlich erhöhen lässt. Dazu wird das vorbehandelte Aluminiumwerkstück in eine saure Lösung getaucht und an einen Stromkreis angeschlossen, in dem es als Anode (Pluspol) dient. Dabei läuft an seiner Oberfläche der folgende Prozess ab:



Die Elektronen fließen zum Minuspol und entladen dort Oxonium-Ionen, so dass sich Wasserstoff bildet:



Mit diesem Verfahren lässt sich die Oxidschicht um mehr als das 1000-Fache verdicken: auf 5 bis 25 Mikrometer. Das Metall darunter ist dadurch wesentlich besser geschützt.

Auch das Eloxal-Verfahren können Sie mit einfachen Mitteln nachstellen. Dazu benötigen Sie ein dünnes Aluminiumblech, ein Schnapsglas, eine 0,5 Millimeter dicke Bleistiftmine, vier Krokodilklemmen, zwei Kabel, eine 9-Volt-Blockbatterie und Batteriesäure, also 38-prozentige Schwefelsäure, die im Handel für Autozubehör erhältlich

ist. Tragen Sie wie auch bei den anderen Versuchen unbedingt Schutzkittel, -brille und -handschuhe!

Die Batteriesäure müssen Sie zunächst mit Wasser im Verhältnis 1:1 verdünnen. Füllen Sie dazu zehn Milliliter Wasser in das Glas und geben anschließend in zwei Portionen à fünf Milliliter insgesamt zehn Milliliter Batteriesäure hinzu. Vorsicht! Diese Reihenfolge ist strikt zu beachten, damit keine Säure verspritzt. Der unter Chemikern gebräuchliche Merksatz dafür lautet: Erst das Wasser, dann die Säure, sonst geschieht das Ungeheure!

Tauchen Sie nun das Blech sowie die Bleistiftmine etwa zwei bis drei Zentimeter tief in die Säure und verbinden Sie beides über Krokodilklemmen und Kabel so mit der 9-Volt-Batterie, dass das Aluminiumblech als Plus- und die Bleistiftmine als Minuspol geschaltet ist (siehe Zeichnung auf S. 69). Es empfiehlt sich, die beiden Elektroden mit einem Stativ zu fixieren, damit sie sich nicht berühren, was zu einem Kurzschluss führen würde. Nun lassen Sie 15 Minuten lang Strom fließen. Während an der Bleistiftmine Gasbläschen aufsteigen, ist am Aluminiumblech optisch keine Veränderung festzustellen. Nachdem Sie es aus der Säure genommen, mit Wasser abgespült und mit einem Tuch abgetrocknet haben, erscheint es allenfalls ein wenig matter als zuvor.

Mit einem weiteren Experiment lässt sich zeigen, dass das Aluminiumblech in dem eingetauchten Bereich tatsächlich korrosionsbeständiger geworden ist. Lösen Sie dazu ein Gramm Kupfersulfat-pentahydrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$) sowie 0,1 Gramm Kochsalz in fünf Milliliter Wasser. Geben Sie je einen Tropfen dieser Lösung auf den eloxierten und den unbehandelten Teil des Aluminiumblechs. Während bei ersterem nichts geschieht, scheidet sich auf letzterem nach wenigen Sekunden unter Gasentwicklung metallisches Kupfer ab. ◀

QUELLEN

Ducci, M. et al.: Aluminium in die Spannungsreihe der Metalle. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie 66, S. 39–42, 2001

Marschall, M.: Aluminium – Metall der Moderne. Oekom, München 2008

Haupt, P. et al.: Farbig Eloxieren. In: Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht 52, S. 357–363, 1999



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

GESELLSCHAFT REICHE WELT – ARME WELT

SERIE: DIE ZUKUNFT DER MENSCHHEIT Im Jahr 2050 werden sich fast zehn Milliarden Menschen die Ressourcen der Erde teilen müssen. Dabei stagniert und altert die Bevölkerung in den wohlhabenden Industrienationen, während in den Entwicklungsländern immer mehr Jugendliche nach Bildung und Arbeit verlangen.



Mara Hvistendahl schreibt regelmäßig für das Wissenschaftsmagazin »Science« und ist Autorin des Buchs »Das Verschwinden der Frauen: Selektive Geburtenkontrolle und die Folgen«, dtv, München 2013.

» spektrum.de/artikel/1432744

▶ Lena und Saheed werden einander wahrscheinlich nie begegnen. Lena lebt 2050 in Leipzig, einer beschaulichen und malerischen Stadt, unter qualifizierten Berufstätigen mittleren Alters. Die 51-jährige Pharmazeutin wird erst in gut 20 Jahren das Rentenalter erreichen. Lena und ihr Ehemann müssen ihr einziges Kind nicht mehr unterstützen: Die Tochter hat kürzlich ein Studium abgeschlossen. Dagegen bereitet ihnen die Aussicht Sorge, dass ihre eigenen hochbetagten Eltern Pflegefälle werden könnten, wobei diese derzeit aber bei recht guter Gesundheit sind.

Saheed ist mit 22 noch ledig und arbeitslos. Er haust mit drei Geschwistern in einem heruntergekommenen Slum am Rand von Lagos, der größten Stadt Nigerias. Hier herrschen ganz andere Probleme: Scharen junger Leute drängen auf den Arbeitsmarkt; Wohnraum und sauberes Wasser sind Mangelware.

Lena fürchtet sich vor chronischen Altersleiden, Saheed wird eher an Malaria erkranken. Deutschland hat Mühe, seine Renten-, Gesundheits- und Versorgungssysteme an eine schrumpfende und alternde Bevölkerung anzupassen. Nigeria kommt kaum damit nach, Straßen, Schulen und medizinische Einrichtungen für seine aus allen Nähten platzenden Städte zu bauen.

Obwohl Lena und Saheed in grundverschiedenen Welten leben, verkörpert das fiktive Duo in vieler Hinsicht die Zukunft. Im Lauf der nächsten Jahrzehnte wird sich die ungleiche Verteilung der Bevölkerung in nie gekannter Weise zuspitzen. Das zwingt Regierungen und internationale Organisationen, neue Wege zum Schutz von Gesund-

SERIE

Die Zukunft der Menschheit

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

In den Riesenstädten der Schwellenländer – hier São Paulo (Brasilien) – existieren krasse Armut und verschwenderischer Reichtum Tür an Tür.



In mehreren afrikanischen Ländern wird die Bevölkerung in den kommenden Jahrzehnten so rasch zunehmen, dass die Versorgung mit Nahrungsmitteln problematisch werden kann. Wenn eine politische Krise hinzukommt, wie gegenwärtig in Südsudan, droht eine regelrechte Hungersnot.



BETTY IMAGES / FAIRFAX MEDIA / THE SYDNEY MORNING HERALD / EDWINA PICKLES

heit und Wohlbefinden aller Menschen zu beschreiben. Heute getroffene Maßnahmen entscheiden darüber, in welcher Welt Lena und Saheed leben werden.

Vor rund 50 Jahren fixierte sich die öffentliche Aufmerksamkeit auf einen einzigen Globaltrend: schiere Größe. 1968 warnte der US-Biologe Paul R. Ehrlich in seinem Bestseller »The Population Bomb«, rapides Bevölkerungswachstum werde die Nahrungsproduktion überflügeln und hunderte Millionen Hungertote zur Folge haben. Ehrlichs Katastrophenszenario bewahrheitete sich bislang nicht. Die Modernisierung der Landwirtschaft verbesserte bald die Nahrungssicherheit, und in vielen Teilen der Welt sorgten wirtschaftliche Entwicklung sowie Zugang zu Bildung und Familienplanung für fallende Geburtenraten. Das jährliche Bevölkerungswachstum hatte 1970 begonnen, wieder unter den in den 1960er Jahren erreichten Rekordwert von zwei Prozent zu sinken.

Die Bevölkerung explodiert – und gleichzeitig schrumpft sie

Doch der Zuwachs gleicht einem fahrenden Zug – selbst wenn er bremst, behält er enormen Schwung. Obwohl die globale Wachstumsrate weiter abnimmt, wird sich die Weltbevölkerung in den kommenden Jahrzehnten stark vermehren und nach Schätzungen der Vereinten Nationen bis 2050 auf 9,7 Milliarden anschwellen. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Zug ganz zum Stillstand kommt – dass die Weltbevölkerung sich vor 2100 stabilisiert oder gar abzunehmen beginnt –, beträgt laut UNO bloß 23 Prozent.

Doch wenn wir nur auf das große Bild starren, entgegen uns wichtige Nuancen. Die Hälfte des Bevölkerungswachstums bis 2050 wird auf neun Länder entfallen, von denen fünf in Afrika liegen. In den Industrienationen sinken unterdessen die Geburtenraten, und die Lebenserwartung steigt. Weltweit wird sich nach UNO-Schätzungen die Anzahl der über 60-Jährigen bis 2050 mehr als verdoppeln, die der über 80-Jährigen sogar verdreifachen.

Viele dieser Menschen werden in Europa leben, wo ein Drittel der Bevölkerung dann über 60 Jahre alt sein wird. Jack A. Goldstone, Politologe an der George Mason University in Fairfax (US-Bundesstaat Virginia) und Direktor des Institute for Public Policy an der Hong Kong University of Science and Technology, nennt diesen Umbruch »die neue Bevölkerungsbombe«.

Deutschland und Nigeria stehen für entgegengesetzte Extreme der globalen Dynamik: einerseits ein reiches, aber schnell alterndes Land mit schrumpfenden Städten und anschwellenden Rentenkosten, andererseits eine jugendliche Nation, in der Kinderreichtum und überfüllte Städte die durch Klimawandel und Infektionskrankheiten ohnehin bestehenden Probleme weiter verschärfen. Insbesondere im Fall Nigerias bezweifelt Hans Groth, Leiter des World Demographic and Ageing Forum in St. Gallen (Schweiz), »dass wir Menschen darauf vorbereitet sind, derart große Veränderungen zu bewältigen oder hinzunehmen«.

Bis 2050 wird Nigeria nach UNO-Schätzungen seine Einwohnerzahl verdoppeln, die USA überholen und mit 398,5 Millionen Menschen das bevölkerungsreichste Land hinter China und Indien sein. Während Saheed heranwächst, muss er erleben, wie Nigerias ohnedies magere Ressourcen immer weniger ausreichen. »Stellen Sie sich das vor«, betont John Bongaarts, Vizepräsident des Population Council in New York: »Jedes Menschenwerk im Land muss verdoppelt werden. Jede Schule, jede Klinik, jede Brücke.«

2015 revidierte die United Nations Population Division ihre Prognosen für das Bevölkerungswachstum in Afrika nach oben (siehe »Afrikas bedrohliche Bevölkerungsexplosion« von Robert Engelman, **Spektrum** Juni 2016, S. 66). Einerseits steckt dahinter sogar eine positive Nachricht: Dank der Fortschritte im Gesundheitswesen gab es weniger Kindersterblichkeit und Aidsopfer, und südlich der Sahara war die Lebenserwartung gestiegen. Doch andererseits hatte die Fruchtbarkeit nicht so rasch abgenom-

men wie erhofft. Die totale Fertilitätsrate – die durchschnittliche Anzahl der Kinder, die eine Frau im Lauf ihres Lebens zur Welt bringt – stagniert in Afrika bei 4,7, und in Nigeria beträgt sie sogar 5,7. Theoretisch könnte das Land von einem so genannten demografischen Übergang profitieren, bei dem die Fertilität sinkt und die zahlreichen arbeitsfähigen Erwachsenen die wenigen Alten und Kinder versorgen.

Ein Land, das erfolgreich einen demografischen Übergang vollzieht, indem es sowohl Geburtenrate als auch Sterblichkeit senkt und die Bildung fördert, kann eine demografische Dividende einstreichen, die es auf eine höhere Entwicklungsstufe katapultiert. Doch in Nigeria und anderen Ländern südlich der Sahara ist die Fruchtbarkeit kaum gesunken und stagniert auf hohem Niveau.

Die Demografen nennen dafür mehrere Gründe, vom anhaltenden Einfluss der Stammeskultur bis zum längeren Zeitfenster, in dem Frauen gebärfähig bleiben. Wie der Demograf Akinrinola Bankole vom Guttmacher Institute in New York erklärt, gilt eine große Kinderzahl noch immer als Alterssicherung – wobei die Menschen allerdings kaum an die Kosten der Kinderaufzucht denken.

Die Schmerzen des Wachstums

Hartnäckig hohe Fertilitätsraten verschärfen die Probleme, die Nigeria bereits hat: Armut, Hunger, ansteckende Krankheiten und Folgen des Klimawandels. Nach Auskunft des Population Reference Bureau in Washington leiden südlich der Sahara fast 240 Millionen Menschen – jeder Vierte – an Nahrungsmangel, und 30 Millionen Kinder sind derzeit unterernährt. Während Saheed und seine Geschwister heranwachsen, kommen in der Region hunderte Millionen Menschen hinzu, die nach Nahrung verlangen.

Außerdem verteilt sich das Bevölkerungswachstum in Ländern wie Nigeria nicht gleichmäßig. Die Geburtenrate ist derzeit im Norden viel höher, wo Ressourcen besonders rar sind. Daher strömen von dort immer mehr Menschen

2050 wird sich ein großer Teil der Weltbevölkerung in Slums mit schlechter Gesundheitsversorgung und Kanalisation ansammeln

nach Lagos, dem bedrängten Wohnort von Saheeds Familie. Diese Wanderung ist Teil eines globalen Trends: Urbanisierung und Bevölkerungswachstum werden die Städte der Welt bis 2050 um mehr als 2,5 Milliarden Menschen aufblähen. Rund 90 Prozent dieses Wandels werden in Asien und Afrika stattfinden.

Urbanisierung geht oft mit besserer Bildung, sinkender Geburtenrate und stabilem Wirtschaftswachstum einher. Gut geplante Städte reduzieren die Landnutzung und steigern die Energieeffizienz. Wie der norwegische Politologe Henrik Urdal vom Osloer Institut für Friedensforschung

AUF EINEN BLICK ZWEI DEMOGRAFISCHE ÜBERGÄNGE

- 1 Die Weltbevölkerung wächst langsamer – aber sie wächst. Dabei verteilt sich die Zunahme höchst ungleich auf verschiedene Regionen der Erde.
- 2 Weil in hochindustrialisierten Ländern die Geburtenrate sinkt und das Durchschnittsalter steigt, wird in einem Staat wie Deutschland die wirtschaftliche Dynamik abnehmen.
- 3 In den Entwicklungsländern drängen wachsende Scharen junger Menschen in die Städte. Dieser demografische Übergang gefährdet die politische Stabilität und droht die soziale Infrastruktur zu überfordern.

gezeigt hat, senkt die Urbanisierung tendenziell sogar das Risiko von Konflikten.

Doch da Länder wie Nigeria bei einem viel zu niedrigen Stand wirtschaftlicher Entwicklung verstädtern, wird sich 2050 ein großer Teil der Weltbevölkerung in Slums mit völlig unzureichender Gesundheitsversorgung und Kanalisation zusammenballen. Damit steigt für Saheed das Risiko, eine der ansteckenden Krankheiten einzufangen, die in von Zuwanderern überfüllten Gebieten grassieren. Vermutlich hat die Urbanisierung wesentlich zur raschen Ausbreitung von Aids in Afrika beigetragen. Um 2050 könnten die Slums von Lagos gefährliche Brutstätten für Tuberkulose und Malaria sein.

Während Nigerias Wirtschaft wächst, nehmen Autoverkehr und Stromverbrauch zu, und die Luftverschmutzung wird zum zusätzlichen Gesundheitsrisiko. Das explosive Wachstum asiatischer Megastädte gibt davon einen Vorgeschmack. Wie Daten eines unter anderem von der Weltgesundheitsorganisation WHO betriebenen Projekts namens Global Burden of Disease, Injuries, and Risk Factors Study besagen, verursachte die Luftverschmutzung 2010 allein in China 1,2 Millionen Tote und 25 Millionen verlorene Lebensjahre.

Paradoxerweise könnte eine Senkung der Geburtenrate für Nigeria einen höchst unerwünschten Nebeneffekt haben. Dabei nimmt zunächst der Anteil junger Männer an der Gesamtbevölkerung zu. Wenn die Wirtschaft nicht genügend Arbeitsplätze anzubieten vermag, so Bongaarts, »produziert das junge Arbeitslose, die unglücklich sind. Sie lassen sich beliebig ausbeuten und neigen zu Straftaten.« Nach Meinung mancher Politologen hat dieser Jugendüberschuss (englisch: youth bulge) die Unruhen des so genannten Arabischen Frühlings in Nordafrika und dem Nahen Osten mitverursacht.

Um dem zu entgehen, müssen Länder wie Nigeria gleichzeitig Bildung, Beschäftigung und Zugang zu Familienplanung fördern – eine Mammutaufgabe, die allerdings

nicht unlösbar ist. Vor 40 Jahren sah kaum jemand die rapide abnehmende Fruchtbarkeit in Bangladesch, Indonesien und dem Iran voraus. Falls Saheed Arbeit findet und heiratet, entschließt er sich vielleicht, weniger Kinder zu haben als traditionell üblich, damit er es sich leisten kann, sie zur Schule zu schicken. Auf diese Weise hat Nigeria die Chance, eine Belastung in einen Vorteil zu verwandeln und eine demografische Dividende zu genießen. Solche Verän-

So wie dem allmählich alternden Deutschland wird es mit der Zeit ganz Europa, Asien und Lateinamerika ergehen

derungen der Bevölkerung haben entscheidend zum wirtschaftlichen Aufstieg von Ländern wie Brasilien, China und Südkorea beigetragen.

In Deutschland geht eine ganz andere Verschiebung vor sich. Als Lena 1999 geboren wurde, war Deutschland das Zuggpferd für Europas Wirtschaftswachstum, und Arbeitskräfte gab es mehr als genug. Doch den Prognosen zufolge wird die Einwohnerzahl bis 2050 von 82 Millionen auf weniger als 75 Millionen fallen. Fast 40 Prozent der Gesamtbevölkerung werden dann mehr als 60 Jahre alt sein, während die Menschen im Alter zwischen 15 und 59, aus denen sich im Wesentlichen der Anteil der Erwerbstätigen rekrutiert, nur 48 Prozent ausmachen werden – 19 Prozent weniger als heute. Manche Regionen bieten schon jetzt einen Vorgeschmack dessen, was dem ganzen Land blüht. 2015 verkündete der 70-jährige Bürgermeister der niedersächsischen Ortschaft Ottenstein, er werde an Paare mit kleinen Kindern Land verschenken, damit die Dorfschule nicht schließen müsse.

Demografischer Wandel in einem alten Land

So wie Deutschland wird es mit der Zeit ganz Europa, Asien und Lateinamerika ergehen. Nach UNO-Prognosen werden elf Länder, darunter etwa Japan und die Ukraine, bis 2050 mindestens 15 Prozent ihrer Bevölkerung einbüßen. Durch den Mangel an jungen Arbeitskräften und Steuerzahlern droht eine dauerhafte Wirtschaftsfllaute.

Kann der Zustrom von Migranten das Problem lösen? Laut UNO wird Deutschland bis 2050 zu den Ländern gehören, welche die meisten Flüchtlinge aufnehmen. Wenn die Bevölkerung im Afrika südlich der Sahara weiter zunimmt und sofern junge Männer wie Saheed in der Heimat keine Arbeit finden, dürften die Flüchtlingszahlen künftig noch steigen – und Deutschlands Zukunft würde von Nigerias Entwicklung abhängen.

Manche argumentieren, der Zustrom junger Menschen wirke der Überalterung entgegen. Dagegen wendet Goldstone ein: »Um die schrumpfenden Jugendkohorten in demografisch stagnierenden Staaten wie Deutschland und den Niederlanden zu kompensieren, wären einige zehn

Millionen Migranten nötig« – und noch viele mehr, um den Bevölkerungsdruck in Afrika zu mildern.

Selbst bei fortgesetzter Einwanderung wird also Leipzigs Bevölkerung abnehmen. Die Stadt wird versuchen, ihre Versorgungssysteme der sinkenden Nutzung anzupassen – vielleicht durch steigende Gebühren, mit denen Berufstätige wie Lena belastet werden. Die schrumpfende Stadt ist ein teures Pflaster.

Deutschland wird zudem bis 2050 neue medizinische Probleme bekommen, denn bessere Gesundheit und Langlebigkeit verschieben das Krankheitsprofil. Zum Beispiel sind Lenas Eltern über 80 Jahre alt. Sie zählen damit zu den Hochbetagten, die 2050 an die 15 Prozent der Bevölkerung ausmachen dürften. Wahrscheinlich werden sie nicht mehr wie frühere Generationen vorwiegend an Krebs oder Herzschlag sterben. Dafür steigt das Risiko für Demenz. »Früher starben die Menschen, bevor sie Alzheimer bekamen – jetzt nicht mehr«, sagt Axel Börsch-Supan, Leiter des Mannheimer Forschungsinstituts Ökonomie und Demographischer Wandel sowie Koordinator des Survey of Health, Ageing and Retirement in Europe, einer Langzeitstudie, die 45 000 über 50 Jahre alte Europäer erfasst.

Die gute Nachricht: In Westeuropa leben die Menschen nicht bloß länger; sie bleiben auch viel länger gesund und arbeitsfähig. In den letzten zwei Jahrzehnten stieg in Deutschland die Lebenserwartung bei Geburt um fast fünf Jahre – auf knapp über 80. In ganz Europa verbessern sich die Gesundheitsdaten, betont Börsch-Supan: »Die Langlebigkeit nimmt linear zu, ohne Anzeichen einer Abflachung der Kurve.« In den USA hingegen, so Börsch-Supan, droht man über der Diskussion zur langsameren Alterungsrate einen enttäuschenden Trend der Lebenserwartung zu übersehen, die sich bei einigen amerikanischen Bevölkerungsgruppen sogar verschlechtert. Muss Europa neu



In Deutschland verschiebt sich das Verhältnis zwischen Jung und Alt. Im Jahr 2050 werden fast 40 Prozent der Bevölkerung älter als 60 Jahre sein, gut 14 Prozent sogar älter als 80.



Der Jugendüberschuss in den Entwicklungsländern wird von manchen Soziologen für den Ausbruch spontaner Revolten verantwortlich gemacht. Andererseits ist eine große Anzahl arbeitsfähiger Jugendlicher ein positiver Wirtschaftsfaktor – sie müssen jedoch Arbeit finden.

definieren, was Altern heißt? Der Demograf Sergei Scherbov vom Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse in Laxenburg (Österreich) schlägt vor, die Einwohner eines Landes nur in den letzten 15 Jahren ihres Lebens als »alt« zu bezeichnen, gemessen an der Lebenserwartung bei Geburt. Dieses Maß spiegelt Fähigkeit und Gesundheit besser wider als die UNO-Definition, der zufolge das Alter mit 60 beginnt, meint Scherbov: »In den 1950er Jahren war der älteste Mensch auf dem Gipfel des Mount Everest 39 Jahre alt. Kürzlich hat ein 80-jähriger Japaner dasselbe geschafft.«

Tatsächlich überarbeiten viele Länder Europas ihr Rentensystem. In Deutschland wird das Pensionsalter, das derzeit 65 plus fünf Monate beträgt, sukzessive auf 67 anno 2029 steigen. Doch um Lenas mehr als 80 Jahre alte Eltern nachhaltig zu versorgen, muss das Rentenalter letztlich an die Lebenserwartung geknüpft werden, wie in Norwegen und Schweden bereits geschehen. Diese Anpassung ist unpopulär. »In Europa gehen die Menschen gern früh in Rente«, sagt Börsch-Supan, »doch das ist auf Dauer nicht tragbar.«

Die schwere Last der Demografie auf viele Schultern verteilen

Die Schicksale von Saheed und Lena hängen in hohem Maß davon ab, was heute geschieht. Durch geschickte Zukunftsplanung könnten sowohl Nigeria als auch Deutschland den bevorstehenden demografischen Wandel bewältigen. Goldstone vergleicht die Demografie mit der Schwerkraft: Man muss sie berücksichtigen und sich entsprechend verhalten. »Wenn man die Gravitation richtig nutzt, kann man Fluggeräte bauen«, sagt er. »Ebenso kann es politische Stabilität und prosperierende Wirt-

schaft geben, während die Bevölkerung wächst oder schrumpft. Aber man muss klug investieren, gut wirtschaften, produktive Arbeitskräfte ausbilden und den Unterstützungsbedarf unterschiedlicher Altersgruppen einplanen, der sich mit der Zeit verändert.«

Nigeria und Deutschland bilden die Enden eines globalen Kontinuums. Zwischen diesen Extremen liegen viele andere Nationen, zum Beispiel die USA, deren Bevölkerung zugleich altern und wachsen wird.

Um die globale Stabilität aufrechtzuerhalten, müssen bevölkerungsreiche Schwellenländer wie Brasilien, China, Indien und Mexiko in die demografische Planung einbezogen werden. Institutionen wie G7 – die Gruppe der bedeutendsten Industrienationen – und Nato müssen sich an die veränderte Weltlage anpassen und dafür sorgen, dass nicht nur die Industrieländer Geld für Gesundheitsversorgung, Rohstoffe und Infrastruktur bekommen. Sonst explodiert in der reichen Welt die neue Bevölkerungsbombe, während die arme Welt vom Jugendüberschuss zerrissen wird. ◀

QUELLEN

Bongaarts, J., Casterline, J.: Fertility Transition: Is Sub-Saharan Africa Different? In: *Population and Development Review* 38, Supplement, S. 153–168, 2013

Goldstone, J. A.: The New Population Bomb. In: *Foreign Affairs* 89, Januar/Februar 2010
www.foreignaffairs.com/articles/2010-01-01/new-population-bomb

Sanderson, W. C., Scherbov, S.: Remeasuring Ageing. In: *Science* 329, S. 1287–1288, 2010

United Nations Population Division: World Population Prospects: The 2015 Revision: Key Findings and Advance Tables, 2015 https://esa.un.org/unpd/wpp/Publication/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf

SÜDAMERIKA ARCHÄOLOGIE IN AMAZONIEN

40 Meter breite Wege, weitläufige Siedlungen und jahrtausendealte Hügelbeete – die Urwälder Amazoniens bergen noch manches Geheimnis.

► spektrum.de/artikel/1432745

Indiokinder betrachten fasziniert einige Tonscherben, die Archäologen im Umfeld ihres Dorfs am Lauf des Mittelamazonas ausgegraben haben.





Stéphen Rostain ist Forschungsdirektor am französischen CNRS (Nationales Zentrum für wissenschaftliche Forschung). Er arbeitet im Forschungsverbund Archéologie des Amériques, einem Projekt des CNRS und der Université Paris I.

Abgelenkt vom Ausbruch des Vulkans Tungurahua hätten wir die Bodenverfärbung beinahe übersehen. Wir waren 2013 in Ecuador unterwegs, um am Fuß der Anden systematisch nach genau solchen Hinweisen auf eine Besiedlung in präkolumbischer Zeit zu suchen, das heißt im Altamerika vor Ankunft der Europäer. Einen Monat später kehrten wir zurück, ausgerüstet für eine archäologische Grabung. Außer einer mit Steinen gepflasterten Feuerstelle legten wir vor allem kleine, dunkle Flecken frei, die eine ovale Fläche begrenzten. Einst steckten dort die Pfosten eines Holzhauses – die Verfärbung der Erde entstand bei deren Verwitterung. Zu unserer Freude war einer von ihnen bis in das Grundwasser getrieben worden, und das sauerstoffarme Milieu hatte seinen Verfall aufgehalten. Die Radiokohlenstoffdatierung ergab, dass wir auf die Spuren des mit 3000 Jahren bislang ältesten Gebäudes im Regenwald Amazoniens gestoßen waren.

Dieses enorm große Gebiet genoss bei Archäologen jahrzehntelang keinen sonderlich guten Ruf: 1854 befand der brasilianische Historiker Francisco Adolfo Varnhagen für die indigenen Völker seines Landes, sie seien bis zur Ankunft der Portugiesen ohne Geschichte gewesen, also ohne eine durch kulturelle Entwicklungen strukturierte Vergangenheit. Die unfruchtbaren Niederungen hätten einen Wandel und das Aufkommen von Zivilisation unterbunden, formulierte noch 1971 die vor einigen Jahren verstorbene US-amerikanische Archäologin Betty Meggers. Demnach mussten alle kulturellen Neuerungen ihren Ursprung im Andenraum gehabt haben. So galt es als

ausgemacht, dass vor der Ankunft der Europäer allenfalls kleine Gruppen von Jägern und Sammlern diese Regenwälder durchstreiften. Ein Denkfehler, wie sich inzwischen abzeichnet, denn gerade diesen widrigen Umständen begegneten Bauern mit innovativen Ideen, die Amazonien nachhaltig prägten.

Bis in die 1990er Jahre aber gingen Altamerikanisten davon aus, die Lebensweise der Indios unserer Tage entspräche im Grundsatz jener ihrer präkolumbischen Vorfahren. Zu den Ersten, die daran zweifelten, gehörte der US-amerikanische Archäologe Donald Lathrap (1927–1990), der in den 1960er Jahren am Fuß der peruanischen Anden gegraben hatte. Er konnte keine Hinweise für einen Kulturfluss in das Becken finden, was Meggers These widerlegte. Ab den 1980er Jahren nahmen weitere amerikanische Forscher wie Anna Roosevelt, Clark Erickson und Michael Heckenberger die Spur auf sowie der Brasilianer Eduardo Neves und der Autor dieses Beitrags.

Amazonien – Land der unbegrenzten ökologischen Möglichkeiten

Wer auch immer rund um den Amazonas archäologische Feldforschung betreibt, muss sich der Komplexität dieser Umwelt bewusst werden. Jede Pflanze und jedes Tier besetzt dort eine ökologische Nische in einem höchst fragilen Gefüge. Das Resultat ist eine geradezu unglaubliche Biodiversität: Amazonien beherbergt 15 Prozent aller weltweit identifizierten Pflanzen- und Tierarten, darunter beispielsweise mehr als 16 000 bislang botanisch bestimmte Baumarten. Zum Vergleich: In deutschen Wäldern gedeihen laut der Bundeswaldinventur von 2011/2012 insgesamt 51 Baumarten und Baumartengruppen.

Allerdings erstreckt sich Amazonien auch über rund sieben Millionen Quadratkilometer, ist also etwa so groß wie das Mittelmeer oder die USA. Der Amazonas entsteht in Peru aus dem Zusammenfluss von Marañón und Ucayali. Von der Quelle des Letzteren erreicht sein Hauptstrang eine Länge von gut 6400 Kilometern und ist so mit dem Nil vergleichbar. Hinzu kommen etwa 10 000 Nebenflüsse. An seiner Mündung ist der Amazonas 300 Kilometer breit und führt 18 Prozent des weltweit ins Meer fließenden Süßwassers. Noch 800 Kilometer stromaufwärts sind die Gezeiten spürbar, und jahreszeitlich bedingte Hochwasser können weite Gebiete überfluten.

Dementsprechend ist Amazonien alles andere als homogen. Vielmehr bilden zahlreiche Flusseinzugsgebiete jeweils eine Welt für sich – in biologischer, aber auch in kultureller Hinsicht. Forscher unterscheiden beispielsweise 300 indigene Sprachen und etwa 60 Sprachfamilien. In präkolumbischer Zeit dürften es noch mehr als doppelt so viele gewesen sein. Da mutmaßlich 70 bis 90 Prozent der Einheimischen im 16. Jahrhundert den von Europäern eingeschleppten Krankheiten zum Opfer fielen, schätzen Experten die ursprüngliche Bevölkerung auf fünf bis sieben Millionen Menschen. In einigen von Bauern besiedelten Bereichen lebten sie sicher dichter als in den von Jäger-und-Sammler-Gruppen durchstreiften Wäldern.

Eine Notiz von 1542 bestärkt diese Annahme: »Wir steuerten auf die Inseln zu, die wir für unbewohnt hielten,

AUF EINEN BLICK HÜGELARCHIPEL IM GRÜNEN MEER

- 1** Das Amazonasgebiet galt lange als nahezu unbewohnbarer Urwald, der niemals Hochkulturen hervorgebracht hat.
- 2** Eine genauere Betrachtung offenbart ein Mosaik kleinräumiger Landschaften mit hoher Artenvielfalt. Archäologen erklären diese Diversität jetzt auch durch den Einfluss präkolumbischer Kulturen.
- 3** Sichtbare Überreste sind unzählige Hügel, auf denen einst Ackerbau betrieben wurde oder Häuser standen. Vermutlich überdauerten diese Erhebungen die Jahrhunderte dank der Besiedlung durch Insekten.

aber als wir diese erreichten, waren die Einwohner, die sich unserem Blick boten, so zahlreich, dass unsere Augen tränten.« Sie stammt von der Expedition Francisco de Orellanas, der dem Amazonas seinen Namen gab, weil ihn die kriegerischen Indianerfrauen an den antiken Mythos der Amazonen erinnerten.

Der Archäologe Heckenberger von der University of Florida rekonstruierte eine Siedlung, wie sie die Spanier am Oberxingu in Brasilien vielleicht gesehen hatten: Sie bestand aus Holzhäusern für jeweils eine Familie, wie das erwähnte 3000 Jahre alte Exemplar. Diverse Dörfer waren untereinander durch ein Netz von Wegen verbunden, die Felder säumten.

In Zusammenarbeit mit Geologen und Botanikern erkannten die Archäologen vor einigen Jahren, dass die Indios ihren jeweiligen Lebensraum veränderten, wodurch verschiedene Kulturlandschaften entstanden. So bauten sie mehr als 83 Pflanzenarten an, darunter Ananas, Maniok, Peperoni, Süßkartoffel, Tabak und sogar Kakao. Letzterer gilt eigentlich als Züchtungserfolg der Bauern Altmexikos, doch die Archäobotanikerin Sonia Zarrillo von der University of Calgary hat dies kürzlich widerlegt: In Steinschalen und Tonkrügen der ecuadorianischen Fundstätte Santa Ana (La Florida) wies sie Spuren von Kakao nach. Diese sind 5300 Jahre alt, 1500 Jahre älter als die ersten Nachweise aus Mittelamerika.

Anbau von Mais und Maniok

Heutzutage gehört Maniok zu den Grundnahrungsmitteln in Südamerika und auch in anderen Erdteilen. Vor der Ankunft der Europäer wurde die stärkehaltige Knolle zwar wohl nur vereinzelt kultiviert, doch auch das ist beachtenswert, denn sie enthält Blausäure. Das Gift zu entfernen, erfordert diverse Arbeitsgänge wie Schälen, Reiben, Pressen, Schleudern und Garen, wofür die Bauern spezielle Geräte aus Stein, Ton und Flechtwerk entwickelten. Niemand vermag zu sagen, was die Bauern dazu veranlasst hat, sich ein solches Verfahren überhaupt auszudenken. Denn man verfügte ja bereits über Mais als Haupt-



NIGEL SMITH



NIGEL SMITH

Stolz präsentieren diese Kinder Pflanzen, die bereits ihre Vorfahren kultivierten: links eine Kakaoschote (*Theobroma cacao*), rechts eine Passionsfrucht (*Passiflora edulis*).

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FRAUKE FOCKE

nahrungsmittel. Diese Getreideart erbringt große Ernten und ist zudem sehr nahrhaft. Sie wurde in großem Stil im Regenwald angebaut, was Experten als ein weiteres Indiz für eine dichte Besiedlung in präkolumbischer Zeit ansehen.

Mit dem Aufkommen der Landwirtschaft ging in der Menschheitsgeschichte auch bald das Töpfern einher, da sich in irdenen Gefäßen Nahrungsmittel kochen und aufbewahren lassen. Lange galt die um 3500 v. Chr. bewohnte Siedlung Valdivia an der Pazifikküste Südamerikas als Ursprungsort der südamerikanischen Keramik. Inzwischen belegen Funde aber, dass bereits 5600 v. Chr. in der atlantischen Stätte Pedra Pintada Töpfe gefertigt wurden. Fischer übernahmen die Technologie, und sie breitete sich von der Küste über den gesamten Kontinent aus.

Viele weitere Innovationen wurden im Regenwald ersonnen, manche überdauerten die Jahrhunderte. Überall im Amazonasgebiet flochten die Menschen Korbwaren aus Schilf, zum Beispiel um den giftigen Saft des Manioks auszupressen, Fische zu erbeuten und Lasten zu transportieren. Aus Pflanzenfasern webte man die Hamac genannte Hängematte, die Abstand zu den diversen Bodenbewohnern des Urwalds schuf. Sie fand bei den Europäern Anklang und wurde zur Standardschlafstatt der Seeleute. Für die Jagd in der dichten Bodenvegetation wurde das Blasrohr erfunden, das mit lähmendem Gift getränkte kleine Pfeile nahezu geräuschlos schießt. Um Fische zu fangen, bauten die Indios kleine Dämme mit Engstellen und Fischreusen. Sie züchteten aber auch welche in Becken.

Spuren früher Besiedlung

Die präkolumbischen Bewohner des Amazonasgebiets hinterließen Baustrukturen im Regenwald und in den Savannen. Zumeist waren es Erdwerke zum Schutz der Siedlungen und Felder gegen Überschwemmungen. Auch Verteidigungsanlagen, Entwässerungskanäle, Staudämme und »Straßen« haben Archäologen entdeckt.

1



STEPHEN ROSTAIN

Auf Hunderten kleiner Hügel (Pfeile) im Tal des Upano in Ecuador lagen die Wohnstätten ganzer Sippen, durch ein Wegenetz miteinander verbunden. Ein Ausbruch des Vulkans Sangay hat diese Kultur vernichtet.

7



HEIKO PRÜMERS

Als die Einwohner von Llanos de Monjos die Überschwemmungssavanne besiedelten, errichteten sie ihre Dörfer auf kleinen Hügeln, die die Zeit überdauerten (hier: der Hügel des Dorfes Loma Salvatierra in Bolivien).



POUR LA SCIENCE



PROJET AMAZONIE CENTRALE

Der außergewöhnlich fruchtbare Boden im Amazonasgebiet, die »terra preta«, entstand infolge dichter Besiedlung über Jahrhunderte (hier bei Hatahara, nicht weit von Manaus).

6

Am Niederamazonas wurden Muscheln zum Schutz gegen Hochwasser zu großen Hügeln aufgeschichtet.

BETTY MEIGERS



3

STEPHEN RUSTMAN



In Mooregebieten wie etwa an der Küste von Französisch-Guyana ermöglichten Felder auf kleinen Hügeln den Maisanbau.

ANNA C. ROOSEVELT, UIC

4



Auf dieser Aufschüttung (Pfeil) auf der Insel Marajó lag einst ein Dorf der Marajóara-Kultur, die große anthropomorphe Graburnen schuf.

5

Welchen Zweck die Megalithen im brasilianischen Bundesstaat Amapá erfüllten, ist noch unbekannt. Viele Forscher deuten sie als Überreste einer Nekropole, andere als Kultplatz für Himmelsbeobachtungen.



STEPHEN RUSTMAN



Ausgrabungen beweisen, dass Amazonien in präkolumbischer Zeit nicht nur Heimat von Nomaden war. So stoßen Archäologen immer wieder auf Bestattungen (oben). Außerdem entstanden im Siedlungsumfeld dicke Schichten fruchtbarer »terra preta« (unten). Diese enthalten auch Scherben wie hier am Fundplatz Hatahara, der ungefähr in das Jahr 1000 datiert.

Nicht nur technologisch waren die Bewohner Amazoniens in vielem Vorreiter. Im Andenvorland untersuchen Forscher am Fundplatz Santa Ana (La Florida) Darstellungen von offenbar mythischen Wesen, die einige Jahrhunderte älter sind als die frühesten Beispiele in den Anden selbst. Eine solche Verbreitung von Ideen legt nahe, dass die Indios der Regenwälder keineswegs vom Rest der Welt isoliert waren. Das lässt auf Fernverbindungen schließen. Sicher haben die Bewohner Amazoniens schon damals Flüsse befahren, doch sie bezwangen auch den Dschungel. Europäische Entdecker stießen im Landesinnern von Französisch-Guyana auf so breite Wege, dass laut ihren Aufzeichnungen »vier Pferde nebeneinander traben konnten«. Michael Heckenberger wies in den vergangenen Jahren ein regelrechtes Netz solcher Verbindungen zwischen großen Dörfern am Oberlauf des Xingu nach; einige waren 40 Meter breit! Im Andenvorland gibt es überdies uralte Hohlwege, die mehrere archäologische Stätten miteinander verknüpfen. Und bis in die jüngste Zeit benutzten die Indios »culuncos« genannte tiefe Gräben, die von den Gebirgsketten hinunterführen.

In der Tat haben die Menschen nach heutigem Wissen ganz Amazonien verändert. Nomadische Gruppen von Jägern und Sammlern trugen ebenso zum heutigen Land-

schaftsbild bei wie in Dörfern lebende Bauern und die Einwohner fast schon urbaner Großsiedlungen. Ein Ergebnis ist die »terra preta«, eine fruchtbare schwarze Erde inmitten karger Urwaldböden. Sie entstand über einen sehr langen Zeitraum aus Speiseresten, Holzkohle und anderem von Menschen hinterlassenen organischen Material. Die »terra preta« bedeckt drei Prozent der Fläche des Amazonasbeckens, vorwiegend am Hauptstrom und an seinen großen Nebenflüssen.

Warum überdauerten die künstlichen Hügel?

Die präkolumbischen Bewohner haben nicht nur die Qualität des Erdbodens verändert und die Zusammensetzung der Pflanzenwelt durch Züchtung beeinflusst. Sie schufen auch vielfältige Bodenstrukturen, darunter Siedlungshügel, Höhenwege, Kultplätze und Ackerhügel. Gemeinsam mit Kollegen aus Frankreich, England, Deutschland und Panama habe ich solche erhöhten Felder in den Küstensavannen Französisch-Guyanas systematisch untersucht. Ihr Zweck ist offensichtlich: Die Gebiete werden regelmäßig von Hochwassern überschwemmt. Um ihre Anbauflächen zu schützen, legten die präkolumbischen Bauern sie oft bis zu fünf Meter hoch. Es gab bis zu 140 Meter lange und einige Meter breite Wälle ebenso wie quadratische Terrassen und kleine, gerade einmal 1,5 Meter durchmessende Hügel. Radiokohlenstoffdatierungen lassen vermuten, dass diese Form des Feldbaus im 10. Jahrhundert v. Chr. aufkam und damit der Barbakoebra-Kultur zuzurechnen ist, die in einem Küstenstreifen von Ostsurinam bis Westfranzösisch-Guyana zu finden war.

Was überrascht, ist, dass diese höhergelegten Flächen noch heute die Topografie prägen. Wir vermuten, dass die Natur selbst nachgeholfen hat: Als die Felder verödeten, legten Insekten wie Blattschneiderameisen und Termiten auf den geschützten Flächen Nester an. Sie brachten organisches Material auf die Hügel, um die Brut oder symbiotische Pilze zu ernähren, und glichen auf diese Weise Erosionsverluste teilweise aus. Die tief reichenden Bauten der Tiere wie auch die Gänge der vermehrt angezogenen Würmer erhöhten überdies die Porosität der Hügel, so dass sie Wasser gut aufnehmen. Regengüsse und Überschwemmungen können daher weniger Boden mitreißen. Die Wurzeln der ungestört wuchernden Pflanzen wirkten ebenfalls festigend. Diesem grandiosen selbst organisierten Prozess ist es zu verdanken, dass die landwirtschaftlichen Hügel bis in unsere Zeit überdauert haben. Sie sind stumme Zeugen einer einst blühenden Kulturlandschaft. ◀

QUELLEN

Heckenberger, M.: Les cités perdues d'Amazonie. In: Pour la Science 388, 2010

Mann, C. C.: 1491. Nouvelles révélations sur les Amériques avant Christophe Colomb. Albin Michel, Paris 2007

Prigent, H. (Hg.): Brésil indien: Les arts des Amérindiens du Brésil. Réunion des Musées Nationaux, Paris 2005

Rostain, S.: Amazonie. Un jardin naturel ou une forêt domestiquée. Actes Sud/Errance, Arles 2016



FREISTETTERS FORMELWELT DIE KÜNSTLERISCHE SEITE DER MATHEMATIK

Um auf neue mathematische Formeln zu stoßen, braucht man mehr als Logik und Objektivität. Hier ist kreative Inspiration gefragt!

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«. [» spektrum.de/artikel/1432753](http://spektrum.de/artikel/1432753)

In der öffentlichen Wahrnehmung gilt die Mathematik als abstrakte, logische, emotionslose Disziplin, in der kein Platz für Gefühle, Kreativität oder die bunte Vielfalt des realen Alltags ist. Doch die Art und Weise, wie in ihr neue Erkenntnisse entstehen, entspricht dem absolut nicht. Hier braucht es Inspiration und freien Geist; man folgt Gefühlen, Vermutungen und Spekulationen – und in dieser Hinsicht gleicht die Welt der Formeln viel mehr jener der Kunst.

Es gibt Kunstwerke, die den Betrachter perplex zurücklassen, die einen völlig neuen und unerwarteten Blick auf einen gewohnten Gegenstand bieten. Sie leben von der kaum nachvollziehbaren Genialität ihres Schöpfers und von der ihnen zu Grunde liegenden überbordenden Kreativität. Genau solche Kunstwerke findet man auch in der Mathematik. Diese Formel ist meiner Meinung nach ein wunderbares Beispiel dafür:

$$\frac{1}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{9801} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(4k)! (1103 + 26390k)}{(k!)^4 396^{4k}}$$

Sie ermöglichte zum Zeitpunkt ihrer Entdeckung Anfang des 20. Jahrhunderts eine besonders rasche und präzise Bestimmung der bekannten Kreiszahl π mit Hilfe einer gegen diesen Wert konvergierenden »unendlichen Reihe«.

Eigentlich klingt die Definition von π sehr einfach: Sie ist das Verhältnis vom Umfang zum Durchmesser eines Kreises. In der obigen Formel präsentiert sich die Kreiszahl jedoch auf eine völlig neue und unerwartete Weise, die selbst auf Mathematiker überraschend wirkt. Denn normalerweise arbeitet man in den Formeln der reinen Mathematik mit Symbolen. Wenn darin überhaupt konkrete Zahlen auftauchen, dann sind es fundamentale Konstanten wie eben π oder elementare »Bausteine« wie 1 oder 0. Dass man mit Zahlen wie 9801 oder 26390 eine sinnvolle Gleichung

aufstellen kann, die eine der wichtigsten Naturkonstanten überhaupt beschreibt, erschließt sich nicht auf den ersten Blick.

Obige Formel entwickelte der indische Mathematiker Srinivasa Ramanujan (1887–1920). Nachdem er sich autodidaktisch zum Mathematiker ausgebildet hatte, begann er in seinen Notizbüchern massenhaft Ergebnisse zu sammeln und eine Vielzahl von Formeln aufzustellen, wobei er sich ganz von seiner eigenen Kreativität inspirieren ließ. Eine Auswahl seiner Funde schickte er an den Briten G. H. Hardy, einen der wichtigsten Mathematiker seiner Zeit. Der stand vor Ramanujans unkonventionellen Resultaten wie das Laienpublikum vor einem modernen Kunstwerk. Obwohl Ramanujan seinen Ergebnissen keine Herleitungen und Beweise beigelegt hatte, war sich Hardy sicher, dass sie richtig sein müssten. Denn die seltsamen Formeln – die sich später tatsächlich so gut wie alle als korrekt und beweisbar herausstellten – waren so außergewöhnlich und überraschend, dass niemand sie sich einfach so hätte ausdenken können, meinte Hardy. Er konnte die Formeln nicht nachvollziehen, erkannte aber ihre Kreativität und Genialität. Man könnte fast sagen: Er erfasste die den Formeln innewohnende Kunst.

Gefragt, woher er denn seine Ideen nehme, antwortete Ramanujan, dass ihn die indische Göttin Mahalakshmi dazu im Traum inspiriere. Während er schlafe, würde er Bilder von Schriftrollen voller mathematischer Symbole sehen. Nun haben Götter in der Mathematik nichts zu suchen – hier regiert die Logik. Aber wenn es darum geht, Mathematik zu schaffen, dann ist die Vorstellung göttlicher oder musischer Inspiration genauso zulässig, wie sie es in der Kunst ist. Denn Mathematik und Kunst haben mehr gemein, als es auf den ersten Blick scheint.

REZENSIONEN

TECHNIK- GESCHICHTE BALANCEAKT AUF RÄDERN

Vor 200 Jahren wurde das Fahrrad erfunden. Den Anstoß dafür gab ein Vulkanausbruch.



Der Karlsruher Forstbeamte Karl Freiherr von Drais (1785–1851) erfand die Tastenschreibmaschine, den Energiesparofen und einen Apparat, der Klaviertöne auf einer Papierrolle festhielt. Er erdachte außerdem eine Schießmaschine, ein Fleischhackgerät und ein von Muskelkraft angetriebenes Schienenfahrzeug, die Draisine. Zudem beanspruchte er für sich, der Menschheit eine Art Morsealphabet, das Periskop und das Dualsystem geschenkt zu haben – freilich ohne zu bemerken, dass es diese Errungenschaften längst gab. Drais hatte das Pech, selten ernst genommen zu werden; entweder waren seine Erfindungen der Zeit zu weit voraus oder sie

hinkten ihr hoffnungslos hinterher.

Doch mit einer seiner Innovationen sollte er einen Volltreffer landen. Es war die Laufmaschine, die Urform des Fahrrads. Dieses Gefährt funktionierte von Anfang an so gut, dass sein Erfinder am 12. Juni 1817, dem Tag der Jungfernfahrt, ganze 14 Kilometer (von seinem Mannheimer Wohnhaus bis zum Schwetzingener Relaishaus und zurück) in kaum einer Stunde zurücklegte.

Drais' Laufmaschine gilt als erstes Fahrzeug mit zwei hintereinanderlaufenden Rädern überhaupt. Mit ihr konnte man sich durch bloßes Abstoßen mit den Füßen erstaunlich schnell fortbewegen, weil das Körpergewicht auf dem Fahrgestell lastete. Anders als die Kutschen der damaligen Zeit verfügte sie bereits über eine Schleifbremse, allerdings nicht über Pedale. Dabei wäre Drais durchaus in der Lage gewesen, das Fahrzeug mit einem Tretkurbelmechanismus auszurüsten. Schon einige Jahre zuvor hatte er einen vierrädrigen Wagen mit Tretmühle gebaut. Aber seinen Zeitgenossen war das Balancieren auf zwei Rädern nicht geheuer, und erst recht wären sie davor zurückgeschreckt, die Füße dauerhaft vom Boden zu nehmen.

Die Erfindung der Laufmaschine ist übrigens das Ergebnis einer verheerenden Naturkatastrophe – des Ausbruchs des Vulkans Tambora auf der indonesischen Insel Sumbawa im April 1815 nämlich. Diese Eruption schleuderte ungeheure Mengen von Asche,

Staub und Schwefelverbindungen in die Atmosphäre. Es entstand ein dichter Aerosolschleier, der sich über die nördliche Hemisphäre ausbreitete und das Sonnenlicht abschirmte. In großen Teilen Europas kam es zu Kälteeinbrüchen und sintflutartigem Regen; im darauf folgenden Jahr blieb der Sommer aus. Das wiederum verursachte Missernten, Hungersnöte, Wirtschaftskrisen und Aufstände. Hafer wurde dermaßen knapp, dass man immer weniger Pferde ernähren konnte.

Diese Umstände veranlassten Drais dazu, ein Fahrzeug zu entwickeln, das ohne Pferde auskommt. Der Zeitpunkt war günstig: Als Arbeitsbeschaffungsmaßnahme investierte der Staat damals reichlich öffentliche Gelder in den Straßenbau. Die neuen Straßen ermöglichten es überhaupt erst, die Laufmaschine einzusetzen.

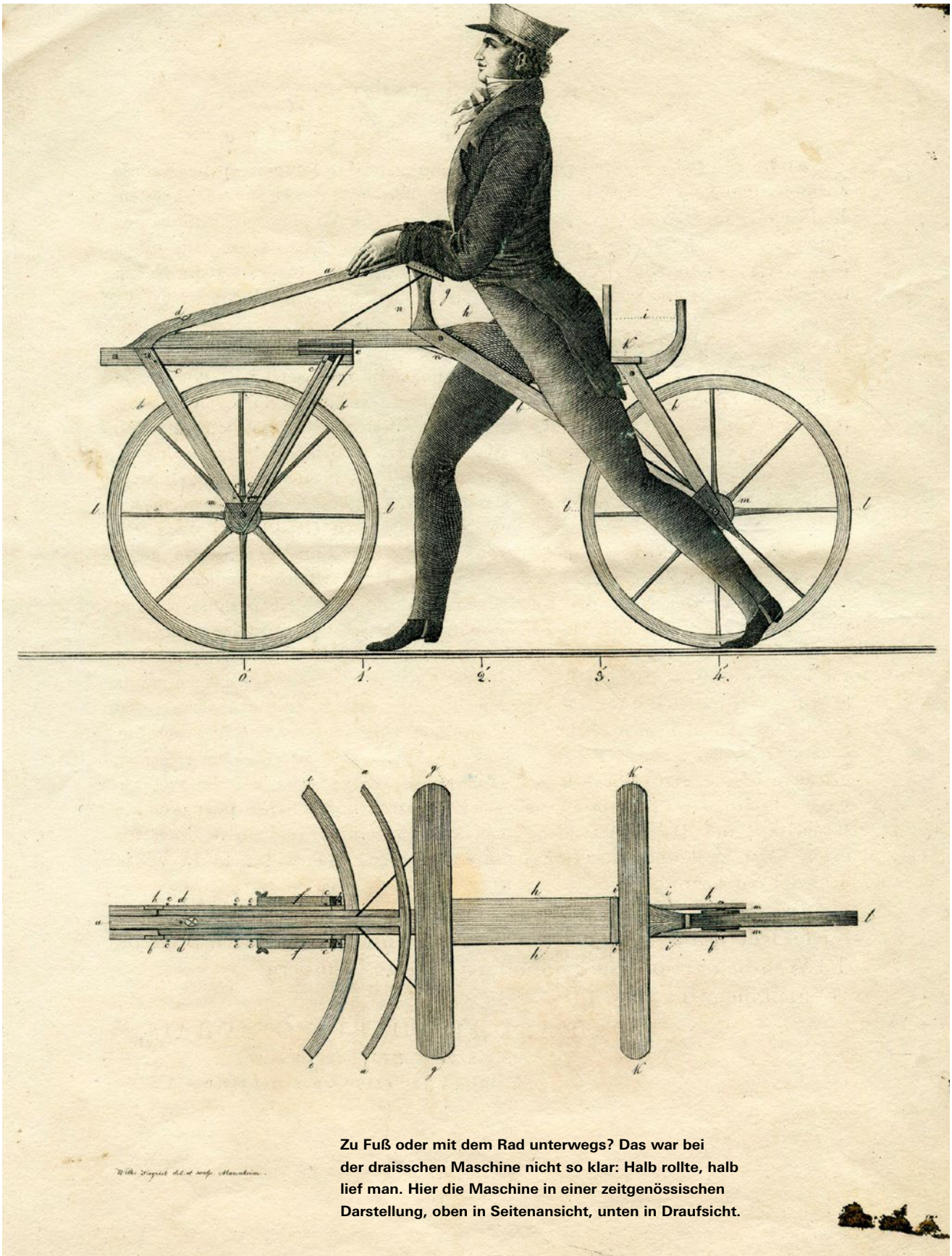
Drais' geniale Konstruktion wurde anfangs eifrig kopiert, jedoch nicht selten stümperhaft. Bald darauf geriet sie wieder in Vergessenheit. Erst fünf Jahrzehnte später stellte der Pariser Kutschenbauer Pierre Michaux sein »Velo-ciped« vor – das vermutlich erste echte Fahrrad, angetrieben per Tretkurbel, die auf die Vorderachse einwirkte. Dieses Gerät läutete die Zeit der Hochräder ein. Aber deren überdimensionale Vorderräder waren schwer zu handhaben und gingen mit einer großen Sturzgefahr bei Bremsmanövern einher. Die Lösung war das »Sicherheitsrad« mit zwei gleich großen Rädern, dessen hinteres per Tretkurbel und

Kettenantrieb in Rotation versetzt wurde.

Ende des 19. Jahrhunderts kamen Fahrräder auf den Markt, die den heutigen bereits weitgehend entsprachen: trapezförmiger Rahmen, Pedale, luftgefüllte Reifen, Gangschaltung. Zudem sahen sie den ursprünglichen Laufmaschinen von Drais ziemlich ähnlich. Von ihnen – und nicht etwa von Kutschen, wie oft behauptet – ging die Entwicklung der ersten Kraftfahrzeuge aus. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts konnten Fahrräder in derart großen Serien produziert werden, dass sie zu erschwinglichen Individualverkehrsmitteln für alle avancierten. Was auch die Frauen mobiler werden ließ und damit einen nicht unerheblichen Beitrag zu deren Emanzipation leistete.

Anlässlich des 200. Jubiläums der draisschen Laufmaschine läuft im Mannheimer Technoseum die Ausstellung »2 Räder – 200 Jahre« (11.11. 2016–25.6. 2017). Das vorliegende Buch besteht aus dem Ausstellungskatalog und einem Dutzend zusätzlicher kurzer Abhandlungen. Es fokussiert auf die Technikgeschichte der Laufmaschine und des Fahrrads, geht aber auch ein auf die Physik des Radfahrens, die Anfänge des Radsports, die Zukunft des Fahrrads und die Kultursoziologie des Radfahrens. Eine exzellente Dokumentation der zweirädrigen Fortbewegungsweise und (fast) allem, was damit zusammenhängt.

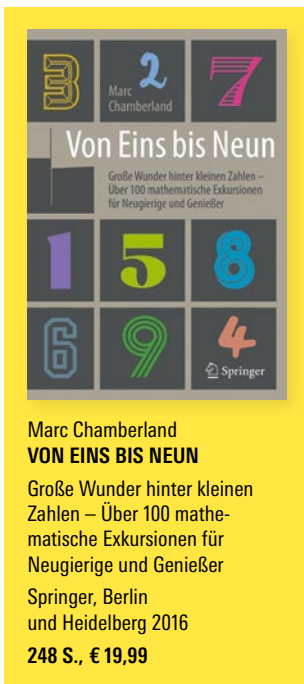
Frank Ufen ist promovierter Soziologe und Wissenschaftsjournalist.



Zu Fuß oder mit dem Rad unterwegs? Das war bei der draisschen Maschine nicht so klar: Halb rollte, halb lief man. Hier die Maschine in einer zeitgenössischen Darstellung, oben in Seitenansicht, unten in Draufsicht.

Wille, Ingenieur del. et sculp. Mannheim.

TECHNOSEUM, ARCHIV / AUS TECHNOSEUM (HG.), 2. FADER - 200. JAHR, THESS, DARMSTADT 2016, MIT FBL. GEN. DER VBG, DARMSTADT



Marc Chamberland
VON EINS BIS NEUN

Große Wunder hinter kleinen Zahlen – Über 100 mathematische Exkursionen für Neugierige und Genießer

Springer, Berlin und Heidelberg 2016
248 S., € 19,99

MATHEMATIK KLEINE ZAHLEN, GROSSE WIRKUNG

Von Origami über Schinkensandwiches bis goldener Schnitt: Einstellige Zahlen regieren die Welt.

Der Autor ist Professor für Mathematik und Naturwissenschaften am Grinnell College in Iowa. Als Begründer des Youtube-Kanals »Tipping Point Math« verfolgt er das Anliegen, möglichst viele Menschen für Mathematik zu interessieren. Auch mit dem vorliegenden Buch zielt er darauf ab, und unter den mehr als 100 meist kurzen Beiträgen finden mathematische Laien sicherlich viele Anregungen, sich mit dem jeweiligen Thema näher zu beschäftigen. Trotzdem richtet sich das Werk eher an Mathematikbegeisterte und

einschlägig Vorgebildete, die noch mehr über das Fach erfahren möchten.

Ungewöhnlich ist das Ordnungsprinzip der bunt gemischten Beitragsammlung. Chamberland lässt sich nicht durch die typischen Fragestellungen der Analysis, Algebra oder Geometrie einengen. Er hat seine Artikel auch nicht alphabetisch sortiert, sondern orientiert sich an einstelligen Zahlen, die im jeweils beschriebenen Zusammenhang eine Rolle spielen.

Zu jeder der Zahlen von Eins bis Neun (englischer Originaltitel: »Single digits – In Praise of Small Numbers«) hat Chamberland eine erstaunliche Kollektion mathematischer Probleme und Sätze zusammengestellt, in denen die entsprechende Ziffer von wesentlicher Bedeutung ist. Oft geht es um verblüffende Eigenschaften mathematischer Objekte oder um bewiesene beziehungsweise nicht bewiesene oder auch widerlegte Vermutungen. Das Buch besteht daher aus neun Kapiteln, jedes davon mit unterschiedlich vielen Einzelbeiträgen, die unabhängig voneinander lesbar sind.

Die Zuordnung der Beiträge ist nicht immer offensichtlich, aber das wirkt keineswegs störend. Beispielsweise findet man den 4-Kreise-Satz von Descartes im zweiten Kapitel, weil das Problem, zu drei sich berührenden Kreisen einen vierten zu finden, der seinerseits diese drei berührt, auf das Lösen einer quadratischen Gleichung hinausläuft – also einer Gleichung vom Grad zwei.

Im ersten Kapitel, das somit der Zahl *Eins* zugeordnet ist, finden wir unter anderem die folgenden drei Abschnitte:

- Origami: Nach geeignetem Falten kann man jedes Muster mit einem *einzigsten* Schnitt herstellen.
- Goldener Schnitt: Die Kettenbruchdarstellung der goldenen Zahl Φ enthält nur *Einsen*; außerdem kann man Φ auch als Wurzelterm aus lauter *Einsen* notieren:

$$\Phi = \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \dots}}}}}$$

- Eindeutige Darstellbarkeit von Zahlen: Jede natürliche Zahl lässt sich auf eindeutige Weise als Produkt von Primzahlen darstellen, als Summe von Zweierpotenzen (Binärdarstellung) oder als Summe von nicht aufeinander folgenden Fibonacci-Zahlen (vorausgesetzt, es handelt sich nicht um eine Fibonacci-Zahl).

An diesen Beispielen lässt sich bereits ablesen, wie spannend und abwechslungsreich die Lektüre ist. Sachkundigen Lesern

sandwich-Satz: Egal, wie ein Sandwich aus zwei Brotscheiben und einer Scheibe Schinken zusammengelegt wird, man kann es immer mit einem einzigen Schnitt in zwei gleich große Hälften teilen. Und Kapitel vier präsentiert unter anderem die Toeplitz-Vermutung: Zeichnet man eine beliebige geschlossene Kurve, dann lassen sich immer vier Punkte auf der Kurve finden, die Eckpunkte eines Quadrats sind.

Die Texte sind durchweg gut lesbar, und das Buch erscheint daher durchaus unterhaltsam und locker. Ausreichend viele Grafiken illustrieren die verschiedenen Sachverhalte. Allerdings hat die Kürze der einzelnen Beiträge ihre Schattenseiten – manchmal lässt Chamberland wichtige Erläuterungen vermissen. Ein umfangreiches, hervorragendes Stichwortverzeichnis erleichtert die Orientierung sehr; außerdem enthält der Band eine brauchbare Zusammenstellung bedeutender Bücher über Mathematik. Leider fehlen gezielte Hinweise auf nützliche

Ein Schnitt genügt, um jedes beliebige Schinkensandwich gerecht zu teilen

mag etliches bekannt sein, doch auch sie werden in dem Werk auf hinreichend viele überraschende Aspekte stoßen. Dabei geht es keineswegs nur um Probleme aus der Zahlentheorie, was der Titel des Buchs zunächst vielleicht vermuten lässt, sondern um diverse Gebiete der Mathematik. Ein Abschnitt in Kapitel zwei etwa befasst sich mit dem Schinken-

Internetquellen. Es wäre für neugierige Leser sicherlich hilfreich gewesen, wenn konkrete Empfehlungen für die weiterführende Lektüre ergänzt worden wären.

Trotz dieser Kritikpunkte lässt sich das Werk mathematisch Interessierten uneingeschränkt empfehlen.

Heinz Klaus Strick ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

GESCHICHTE AUF DEN SPUREN DER ZIVILISATION

Archäologe Sir Barry Cunliffe erzählt die Historie Europas und Asiens vom Sesshaftwerden bis ins Mittelalter.

► Mesopotamischen Kulturen galt der blaue Lapislazuli als so wertvoll wie Gold und Silber. Sie nutzten das begehrte Luxusgut, um Schmuck herzustellen und Götterstatuen zu verzieren. Gewonnen wurde der Edelstein freilich im weit entfernten Afghanistan. Dass er seinen Weg in den Orient fand, war einem jahrtausendealten System von Handelsnetzen und -wegen zu verdanken. Es verband unterschiedlichste ökologische Räume, Völker



Barry Cunliffe
10000 JAHRE
Geburt und Geschichte Eurasiens
Theiss, Darmstadt 2016
598 S., € 49,95

und Kulturen des eurasischen Kontinents und ermöglichte wirtschaftlichen sowie kulturellen Austausch.

Cunliffe beschreibt in seinem Buch die Entstehung dieses eurasischen Kultur- und Wirtschaftsraums. Der Autor war ab 1966 Professor für Archäologie an der University of Southampton und von 1972 bis zu seiner Emeritierung

2007 Professor für europäische Archäologie an der University of Oxford.

Zunächst skizziert Cunliffe den geografisch-klimatischen Rahmen, in dem sich die geschichtliche Entwicklung vollzog. Daraus geht hervor, dass Geschichte als Ergebnis menschlichen Handelns ganz wesentlich von natürlichen Umgebungsbedingungen abhängt. Laut dem Autor haben die Menschen mit ihren grundsätzlichen Bedürfnissen, etwa Ernährung und Fortpflanzung, ökologische Nischen besetzt und sich den Gegebenheiten angepasst, hierin anderen Tieren ähnlich. Allerdings kam bei ihnen noch das Streben nach Ansehen, Besitz und Erkenntnis hinzu.

Ökologische Lebensräume hat Eurasien zwischen Tropen und Tundra reichlich zu bieten. Ergiebige Regio-

nen wie die Täler des Jangtsekiang und des Gelben Flusses in China oder der Fruchtbare Halbmond im Nahen Osten boten günstige Bedingungen für Sesshaftwerdung und Staatenbildung. Andere Völker passten sich mittels Nomadentum den Verhältnissen der Steppe an.

Die sich unterschiedlich entwickelnden Kulturen bildeten bis 2500 v. Chr. erste Handelsverbindungen zwischen dem Nahen Osten, Osteuropa und der Pontisch-Kaspischen Steppe. Doch obwohl die Beziehungen später weiter ausgebaut wurden, verlief das Miteinander keineswegs immer friedlich. Perser und Makedonier beispielsweise betrieben in der klassischen Antike eine Expansionspolitik, und sowohl die Assyrer als auch die chinesischen Zhou-Staaten gerieten immer



Thomas Unnerstall
**FAKTENCHECK
ENERGIEWENDE**
Konzept, Umsetzung, Kosten –
Antworten auf die 10 wichtigsten Fragen
Springer, Berlin
und Heidelberg 2016
267 S., € 14,99

ENERGIEWIRTSCHAFT VON FOSSIL ZU REGENERATIV

Eine Zwischenbilanz zur Energiewende in Deutschland.

► Thomas Unnerstall, Physiker und ehemaliger Referent im Umweltministerium Baden-Württemberg, konzentriert sich in seinem Buch auf die deutsche Energiewende. Anders als der Titel vermuten lässt, ist es keine Faktensammlung; vielmehr analysiert der Autor systematisch die Motive, Ziele und Rahmenbedingungen dieses gesellschaftlichen Übergangsprozesses. Getragen von einem breiten Konsens in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, zielt die Energiewende hauptsächlich auf einen Ausstieg aus der Kernkraft bis 2022 und auf die drastische Reduzierung des CO₂-Ausstoßes im Stromsektor bis 2050. Als wichtige Rahmenbedingungen nennt Unnerstall unter anderem die Versorgungssicherheit und die Kosteneffizienz.

Hier sieht der Autor jedoch ein Problem. Die Energiewende sei bisher unnötig teuer gewesen. Unnerstall benennt Fehler, die seiner Meinung nach in der Vergangenheit begangen wurden, und macht Vorschläge, wie man die Kosten künftig in den Griff bekommen könne. Dies sei wichtig, damit die Energiewende weiterhin gesellschaftlich breit akzeptiert werde. Das Buch ist gut strukturiert und verständlich geschrieben. Prägnante kurze Kapitel, Zusammenfassungen und Frage-Antwort-Blöcke sorgen für Anschaulichkeit und gute Übersicht. Jürgen Scharberth

REZENSIONEN

wieder in Konflikt mit Räubernomadern. China, argumentiert Cunliffe, sei allerdings weniger an Gebietsgewinnen als an stabilen Grenzen interessiert gewesen. Ohnehin habe die geografische Lage sein Expansionsvermögen eingeschränkt: Berge, Wüsten und Steppen im Norden und Westen, tropischer Urwald und Meer im Süden und Osten. Das Reich war aber ertragreich genug, um eine große Bevölkerung zu ernähren.

Politische Grenzen, hebt der Autor hervor, seien für wirtschaftlichen, kulturellen und personellen Austausch immer durchlässig gewesen. Handelswege wie die Seidenstraße belegen dies sehr eindrücklich: Während die Steppennomaden Pferde, Felle, Pelze, Nutztiere, Getreide und andere Naturprodukte lieferten, kamen aus dem Süden Konsumgüter. Auch Religionen hielten sich nicht an Grenzen: Der Buddhismus beispielsweise verbreitete sich vom Gangestal bis in den Westen des heutigen China. Und die römische Armee, Speer der sesshaften Zivilisation, bediente sich unter anderem nomadischer Hilfstruppen.

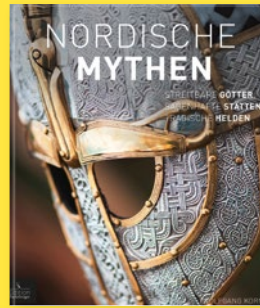
Eine neue Situation entstand nach der Völkerwanderung im 4. bis 6. Jahrhundert n. Chr. mit dem Aufstieg arabischer Stämme und der Begründung des Islam. Es folgten weit reichende Eroberungen islamischer Herrscher, die sich bis auf die Iberische Halbinsel erstreckten. Cunliffe ordnet diese Entwicklungen in einen größeren Zusammenhang ein und verweist darauf, dass auch andere

Gegenden des eurasischen Raums damals in Aufruhr waren. In der Steppe etwa rebellierten Uiguren gegen die Herrschaft der Köktürken, in Zentralasien entstand bei Aufständen gegen die Umayyaden-Herrschaft das Abbassidenkalifat, in China tobten Revolten gegen die Tang-Regierung, im Nahen Osten taumelte das byzantinische Reich am Abgrund, und im westeuropäischen Frankenreich der Merowinger rissen die Karolinger die Macht an sich. Ob man aber diese fast zeitgleichen Krisen tatsächlich als eine Folge des eurasischen Wirtschafts- und Kulturaustauschs interpretieren kann, wie es Cunliffe in seinem Werk tut, erscheint zumindest fraglich.

»10 000 Jahre« ist dank einer reichhaltigen Bebilderung sehr anschaulich gestaltet. Besonders fällt der hohe Anteil von Karten auf, die geografische, klimatische und kulturelle Zusammenhänge verdeutlichen. Der Band vermittelt tiefe Einblicke in die Entwicklung von Völkern und Imperien sowie in die vielfältigen Beziehungen zwischen ihnen. Positiv sticht auch die umfangreiche, kommentierte Auflistung weiterführender Literatur hervor.

Das Werk eignet sich gleichermaßen für archäologisch und historisch interessierte Laien als auch für einschlägige Fachleute. Es zeichnet die eurasische Geschichte nach und behält dabei die wesentlichen Zusammenhänge im Blick.

Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Vorstandsvorsitzender der Wissenschaftspressekonferenz.



Wolfgang Korn
NORDISCHE MYTHEN

Streitbare Götter, sagenhafte Stätten, tragische Helden

Fackelträger, Köln 2016
336 S., € 40,-

MYTHOLOGIE VON STEIN- KREISEN UND HELDENSAGEN

Seinen Anspruch, nordische Mythen über die Jahrzehntausende abzubilden, kann dieser Band nicht ganz erfüllen.

► In zwölf Kapiteln spannt Wissenschaftsjournalist Wolfgang Korn einen enormen Bogen: von den Neandertalern über die Eiszeiten, Megalithkulturen, Kelten, Germanen und Wikinger bis hin zu den Nationalepen des 19. und 20. Jahrhunderts. Dabei beschreibt er Mythen, Sagen und Legenden des Nordens und geht jeweils darauf ein, wie sie entstanden sind, sich geografisch verbreitet haben und inwiefern sie übereinstimmen. Korn erhebt den Anspruch, das Thema in seiner ganzen Bandbreite darzustellen – von den ältesten Kultstätten bis hin zu modernen Nibelungen-Adaptionen. Leider gelingt ihm dies nicht sehr überzeugend, denn jedem einzelnen der von ihm behandelten Teilbereiche könnte man einen ganzen, wenn nicht gar

mehrere Bände widmen. So entspricht »Nordische Mythen« eher dem, was der Autor ein »Bilderbuch« nennt: eine gelungene Auswahl hervorragender Bildmaterials, qualitativ hochwertig produziert und ansprechend gestaltet. Viele großformatige Fotos kultischer Stätten, beeindruckende Landschaftsaufnahmen und interessante Objektdarstellungen bereichern das Leseerlebnis und ergänzen die Lektüre überwiegend sinnvoll.

Dagegen bleibt der Text meist an der Oberfläche, oder aber er überfrachtet die Leser mit nicht näher erläuterten Detailinformationen. Manchmal ist er auch zerstückelt von zwar lesenswerten, aber unpassend eingefügten Einschüben, vorwiegend zu germanischen Gottheiten. Ohne Vorkenntnisse dürfte so mancher Leser mit den verwendeten Fachtermini überfordert sein, etwa wenn von den Y- oder Z-Löchern die Rede ist, mit denen die Stonehenge-Anlage vollendet wurde. Der Autor meint hier Lochgrabungen, die um 1700 v. Chr. ringförmig außerhalb des Steinkreises angelegt worden sind und 30 beziehungsweise 29 Löcher umfassen. Ein Glossar hätte dem Band sicherlich gutgetan.

Als »Bilderbuch« kann das Werk dennoch informative Überblicke gewähren, zu einer tiefer gehenden Lektüre anregen oder, wegen der überzeugenden Bildauswahl, vielleicht zum Besuch einiger vorgestellter Orte inspirieren.

Bernadett Fischer ist Historikerin und in der Öffentlichkeitsarbeit eines Museums tätig.



Ille C. Gebeshuber
**WO DIE MASCHINEN
WACHSEN**

Wie Lösungen aus dem
Dschungel unser
Leben verändern werden

Ecowin, Wals bei Salzburg 2016
236 S., € 24,-

BIONIK VON DER NATUR INSPIRIERT

Technische Innovationen aus der Wildnis.

► Klettverschlüsse, Schmutz abweisende Beschichtungen, Nurfügel-Flugzeuge und Stahlkonstruktionen wie der Eiffelturm – die Natur hat Erfinder und Ingenieure in etlichen Bereichen inspiriert. Unzähliges können wir aber auch noch von ihr lernen: Farbpigmente, die nie verblassen, so wie bei Schmetterlingen. Glasherstellung mit Algen im Aquarium. Bergbau betreibende Pflanzen, die Gold am Feld gewinnen.

All das und mehr stellt die Physikerin Ille C. Gebeshuber in ihrem Buch vor. Ihr Forschungsgebiet, die Bionik, vereint Wissenschaft und Natur mit Technik und sogar Kunst. Jener Schmelzriegel der Disziplinen hat besonders in den zurückliegenden Jahren zahlreiche spannende Erkenntnisse hervorgebracht.

Die Autorin beschränkt sich aber nicht darauf, diese Errungenschaften zu beschreiben. Sie bringt auch viel Persönliches ein und schildert eingehend, was sie denkt, hofft und erlebt hat. Zentrale Themen sind dabei Nachhaltigkeit, Querdenken sowie Leben und Arbeiten im Einklang mit der Natur. Immer wieder erzählt sie Anekdoten aus ihrer Kindheit und ihrem siebenjährigen Forschungsaufenthalt im malaysischen Regenwald. Das verleiht dem Werk streckenweise mehr Ähnlichkeit mit einer Autobiografie als mit einem Sachbuch.

Gebeshubers Erzählfreude lenkt leider mehr von der Wissenschaft ab, als diese zu ergänzen. Auch der rote Faden geht des Öfteren verloren, das Gesamtwerk scheint zuweilen fragmentiert und unorganisiert. Fehl am Platz wirken vor allem die letzten Kapitel. Sie behandeln »Innovation« – eine Wortschöpfung, die den Begriff Innovation erweitern soll – und den »Baum des Wissens«. So nennt Gebeshuber ein Konzept, mit dem das Gesamtwissen der Menschheit leichter zugänglich gemacht werden soll, etwa mittels Änderungen in der Forschungskultur und mehr Interdisziplinarität im Wissenschaftsbetrieb.

Interessant ist das Buch vor allem für diejenigen, die mehr über die Autorin erfahren möchten. Wer sich vorrangig einen Überblick über das Forschungsfeld Bionik verschaffen möchte, kommt dagegen kaum auf seine Kosten.

Michaela Maya-Mrschtik ist Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Aus unserem Lesershop



Spektrum- Sammelkassette

Die Sammelkassette aus schwarzem Kunststoff bietet Platz für 12 bis 15 Hefte. Sie können darin alle Ihre **Spektrum**-Hefte und -Sonderhefte aufbewahren. Die Sammelkassette kostet € 9,50 (zzgl. Versand).

Hier bestellen:

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

www.spektrum.de/sammeln

ASTROPHYSIK MIT DEM KENNER DURCHS ALL

Vom anthropischen Prinzip bis zur Zeitdilatation: Ulrich Walter führt in Astrophysik und Raumfahrt ein.

Das Ende der Welt könnte ganz plötzlich kommen. Dann nämlich, wenn sich das Universum in einem falschen Vakuumzustand befände, der leere Raum also nicht den energetisch günstigsten Zustand innehatte – was im Bereich des Möglichen liegt. Dann könnte jederzeit und an jedem beliebigen Ort das Vakuum plötzlich durch quantenmechanisches Tunneln in den Grundzustand fallen. Dabei würde pro Kubikzentimeter eine Energie von 10^{80} Kilowattstunden frei, eine Eins mit 80 Nullen.

Einmal entstanden, würde sich die Vakuumzerfallsfront lichtschnell in alle Raumrichtungen ausbreiten. Es entstünde eine expandierende Blase aus richtigem Vakuum, Aberbillarden Grad heiß und angefüllt mit einem brodelnden Teilchengemisch; ein Zustand, wie er ähnlich kurz nach dem Urknall existierte. Unnötig zu sagen, dass jedwede Struktur dabei augenblicklich zerstört würde, selbstverständlich auch wir. Tröstlich jedoch: Das Ende käme extrem schnell. Da die Zerfallsfront mit Lichtgeschwindigkeit heranrücken würde, kündigte sie sich vorher nicht an, und der Vakuumzerfall selbst löste alles in Sekundenbruchteilen auf. Zapp und aus, ohne

jede Vorwarnung – es wäre der humanste Tod, den man sich vorstellen kann.

Dieses Thema behandelt Ulrich Walter – neben vielen anderen – im vorliegenden Werk. Er flog als Astronaut mit dem Space Shuttle und leitet heute den Lehrstuhl für Raumfahrttechnik an der TU München. Sein Buch ist kurzweilig und erfrischend zu lesen, vor allem wegen des ungewöhnlichen Formats. Einige dutzend Kurzbeiträge, die auch in der N24-Sendereihe »Spacetime« verarbeitet wurden, füllen insgesamt 270 Seiten. Die Beiträge sind lose gruppiert und bauen kaum aufeinander auf, man kann sie also in weitgehend beliebiger Reihenfolge lesen.

Angesichts dessen, dass die Kapitel jeweils nur wenige Seiten umfassen, ist es erstaunlich, wie weit der Autor in den Stoff vordringt. Er behandelt Einsteins Relativitätstheorien, den kosmischen Mikrowellenhintergrund und dessen Bedeutung für die Urknalltheorie, Dunkle Materie und Dunkle Energie, Schwarzslochphysik und Wurmlöcher, Quantenfluktuationen und Parallelwelten, Außerirdische und anthropisches Prinzip, Exoplaneten und Marsmissionen. Das alles natürlich sehr gedrängt und überwiegend formelfrei, aber prägnant und erhellend. Wenn der Autor sich allerdings in die Lebenswissenschaften wagt und über chemische und biologische Evolution schreibt, wird er spürbar unsicher; hier kann er nicht so recht überzeugen.

Manche Einschätzung Walters überrascht. So hält er es nicht für völlig illusor-



risch, viele Millionen Menschen über interstellare Entfernungen zu transportieren. Er verweist auf »O’Neill-Kolonien«, dutzende Kilometer große Raumarchen mit Fusionsantrieben, die bereits in den 1970er Jahren erfunden wurden und, so der Autor, schon mit den Techniken der damaligen Zeit realisierbar erschienen.

In jedem Fall, das geht aus der Lektüre hervor, verschlänge ein interstellarer Flug gigantische Ressourcen. Das ist auch der Grund, warum wir lieber nicht darauf hoffen sollten, dass uns irgendwann Außerirdische besuchen. Wer aus den Tiefen des Alls hierher kommt, hat eine viele Generationen dauernde Reise hinter sich – in Raumschiffen, die allein wegen der nötigen Treibstoffmengen etliche hundert Meter groß sein müssen. Sie auf interstellare Geschwindigkeiten zu beschleunigen, kostet Millionen Tonnen Treibstoff. Nach der Ankunft bei der Erde gäbe es deshalb wohl keine Möglichkeit mehr,

einen zweiten Planeten anzusteuern. Außerirdische würden das nur tun, wenn sie sehr triftige Gründe dafür hätten; jedenfalls nicht, um mit Erdenbürgern nachts Versteck zu spielen. Der Besuch von Aliens hätte vermutlich mehr Ähnlichkeit mit dem Film »Independence Day« als mit »E.T.«.

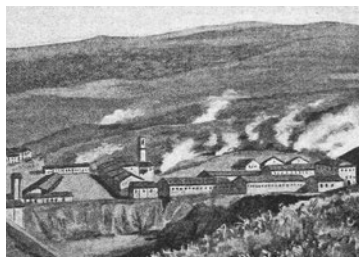
Es gibt an dem Buch jedoch das eine oder andere zu kritisieren. Der Titel etwa erinnert an Bud-Spencer-Filme, was gewiss nicht die Absicht war. Wirklich störend sind die vielen Fehler in Rechtschreibung, Satzbau, manchmal auch inhaltlicher Art. Dass die Bebilderung karg und lediglich in Grautönen gehalten ist, schmerzt nicht weiter; jedoch fragt man sich, warum der Autor mehrmals auf farbige Bildelemente verweist. Zudem formuliert er nicht optimal, wenn er im Hinblick auf wissenschaftliche Theorien immer wieder schreibt, dass Wissenschaftler an diese »glauben«. Und warum befasst sich Walter, wenn er auf künftige Marsmissionen blickt und als Tag der ersten bemannten Marslandung den 2. August 2048 postuliert, ständig nur mit den Amerikanern und der NASA? Als gäbe es keine Russen, Chinesen, Japaner, Inder und so weiter.

Wer über diese Schwächen hinwegsehen kann, findet in dem Buch ein unterhaltsames, aufschlussreiches Werk – wegen der kurzen Beiträge und des handlichen Formats gern auch für unterwegs und zwischendurch.

Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

1917

DIE ANFÄNGE DER GEOTHERMIE



Die »Vulkanfabrik« von Larderello.

»Norbert Lallié berichtet über in Italien gemachte Versuche. In und um Larderello steigen auf einem mehrere Quadratkilometer umfassenden Gebiete mächtige Strahlen heißen Wasserdampfes auf, reich an Borsäure. Wenn man diese in einem Rohrleitungsnetz auffängt, so erhält man Dampfmengen mit einem Druck von 2 – 3 Atmosphären und einer Temperatur von zuweilen 190°. Die ersten Versuche wurden 1903 gemacht. Infolge der seit Beginn des Krieges stetig zunehmenden Teuerung der Kohle wurden drei Turbinen mit Wechselstrom-Dynamomaschinen von 3000 Kilowatt aufgestellt. Um die chemische Einwirkung auf das Metall der Turbinen auszuschalten, werden die Dämpfe nur zum Heizen der Siederöhrenkessel benutzt. Mittels Transformatoren wird der elektrische Strom auf 36 000 Volt gebracht und dient zur Versorgung von Volterra, Sienna, Cecina, Livorno und Florenz.« *Die Umschau 11, S. 210–211*

SCHWERTER ZU PFLUGSCHAREN

»Technische Errungenschaften, die der Völkerkrieg zum Zwecke gegenseitiger Vernichtung hervorgebracht hat, werden im Frieden Dienste leisten. Der deutsche Zoologe Thilo Krumbach, der die Station in Rovigno der Front wieder besetzt hat, hat dort das erste Unterseeboot für wissenschaftliche Zwecke erbauen lassen. Es ist kurzlebig ohne Seerohr, da es ja über Wasser nichts zu suchen hat. Dafür besitzt es statt der Guckschlitze große Fenster, und auch der Schiffsboden ist durch starke Glasplatten unterbrochen. Ein elektrischer Scheinwerfer soll die Meerestiefen beleuchten, ein photographischer Apparat das Erspähte im Lichtbild festhalten.« *Kosmos 3, S. 82*

GERMANEN ODER SLAWEN – EINE REINE KOPFSACHE

»Typisch ist, was der Anthropologe Keith gesagt hat. Nach seiner Meinung wurde Deutschland durch die Auswanderung der Franken und Angelsachsen nach Frankreich und England seiner langköpfigen Bevölkerung beraubt, in das Vakuum wären Slawen eingeströmt, mit flachem Hinterhaupt und kurzen Köpfen. Keith hat unrecht, ausgenommen darin, daß die Engländer Germanen sind. Er stimmt auch mit seinen Landsleuten nicht überein. Deniker findet blonde langschädelige Germanen in Norddeutschland, Skandinavien, Großbritannien und Irland.« *Die Umschau 10, S. 193*

1967

EIN WIRKLICH GROSSER SCHACHTELHALM



Der Abdruck eines Riesenschachtelhalms auf der arktischen Bäreninsel.

»Die oberdevonische Flora der Bäreninsel gilt als die reichhaltigste der Welt. Der bedeutsamste Fund war der Stamm von *Pseudobornia ursina*. Nach den bisher vorliegenden Fossilien hatte man sich eine Pflanze vorgestellt, deren kriechende Sprosse sich 1 bis 2 m über den Boden erhoben. *Pseudobornia* ist in Wirklichkeit ein hoher Baum gewesen. Der neu entdeckte Stamm ist über eine Länge von 10 m aufgeschlossen. An Knoten entspringen aufsteigende Äste erster Ordnung. Sie erreichen eine Länge von 3 m und sind deutlich gegliedert. Die Art dürfte ähnliche Wuchsorte besiedelt haben wie der rezente Teichschachtelalm.« *Die Umschau 6, S. 196–197*

WANN ENDETE DIE STEINZEIT?

»In Süd-Persien fanden Dougherty und Caldwell in einer Schicht, die auf 4091 ± 74 Jahre vor Christus datiert, Scherben von Schmelzriegeln mit Krusten, die als Kupfererz identifiziert wurden. In Catel Hüyük in Anatolien fand Pittioni Spuren einer Verhüttung, die in das 6. vorchristliche Jahrtausend datiert wird. Den Beginn der Metallzeit wird man im anatolisch-iranischen Hochland noch zwei bis drei Jahrtausende früher ansetzen dürfen, weil es dort gediegenes Kupfer gibt, das ohne Schmelzprozeß gehämert werden kann.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 3, S. 118*

HAUTFARBE WECHSEL DICH

»Warum Neger schwarz und Kaukasier weiss sind, haben durch Zufall Wissenschaftler der Universität von Oregon entdeckt. Bei ihren Arbeiten entdeckten die Forscher einen Unterschied in einem Ferment, durch das die Dichte einer Chemikalie bestimmt wird, die Melanin-Formationen verhindert. Weisses haben eine hohe Dichte, Neger sehr wenig und Inder liegen dazwischen. Die Wissenschaftler liessen durchblicken, dass ihre Entdeckung dazu führen könne, dass die Hautfarbe nach Wunsch gewechselt werden kann.« *Neuheiten und Erfindungen 367, S. 36*

EIN GEOLOGISCHES ZEITALTER?

Wir Menschen hinterlassen in der Erde Spuren, die noch in Millionen von Jahren erkennbar sein werden, resümierte der Paläobiologe Jan Zalasiewicz (»Eine vielschichtige Angelegenheit«, *Spektrum* Januar 2017, S. 12).

Peer Hosenthien, Magdeburg: Der Begriff Anthropozän ist interessant, als Begriff für die geologische Stratigrafie aber nach meiner Meinung nicht brauchbar. Es werden im Artikel viele Kennzeichen angegeben, die eine Einordnung des Begriffs Anthropozän als Teil der geologischen Zeitskala rechtfertigen könnten. Die Wissenschaft, die sich mit anthropogenen Strukturen und Artefakten beschäftigt, ist



Wie stark prägen die Menschen das Gesicht der Erde?

aber die Archäologie und soll es auch bleiben. Archäologisch ist die Menschheitsgeschichte in viele Schichten unterteilt; diese geologisch zum Anthropozän zusammenzufassen, erbringt keinen Gewinn. Das Anthropozän soll auch erst 1950 begonnen haben, sodass ich persönlich fast als Fossil aus einem vergangenen Erdzeitalter bezeichnet werden müsste. Um für die geologische Stratigrafie zu taugen, müsste das Anthropozän sehr viel länger andauern. Daher sollten wir die Diskussion erst einmal für ungefähr zehn Millionen Jahre aussetzen.

Friedrich Gebhardt, Bonn: Die Antwort auf die Frage, ob das Anthropozän ein neues Erdzeitalter ist, sollte man den intelligenten Wesen überlassen, die in einigen Millionen

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.

Jahren die Erde bevölkern werden. Die finden dann vielleicht inmitten in der Schicht, die wir Holozän nennen, eine seltsame, meist dünne Ablagerung mit ungewöhnlich hohem Metallanteil, die womöglich oben mit einer noch dünneren Schicht mit Uran- und Plutoniumbeimischungen abschließt. Dass sie zufällig auf das ehemalige New York stoßen, ist kaum zu erwarten, da dieser Bereich tief abgesunken ist.

Hugo Lueders, Brüssel: Mit Interesse habe ich den ersten Artikel der Serie gelesen und warte nun gespannt auf die folgenden Beiträge. Bei diesem ersten Teil ist mir aufgefallen, dass politische Bezüge nur indirekt und nachgeordnet am Rand angesprochen werden. Die angekündigten weiteren Beiträge geben die Möglichkeit, diese Hinweise zu erweitern und zu vertiefen.

Dabei wird es meines Erachtens nicht nur um die gesellschaftspolitischen wie kriegerischen Auseinandersetzungen um die Industrialisierung und die damit verbundenen Erkenntnisinteressen gehen, sondern um die Wissenschaft selbst, wie sie diese Industrialisierung überhaupt erst ermöglicht hat und zusammen mit ihr weiter gewachsen ist. Dies scheint mir eine willkommene Herausforderung gerade für eine Zeitschrift wie »*Spektrum der Wissenschaft*« zu sein.

Naturwissenschaftlich mag es berechtigt sein, den möglichen Übergang vom Holozän zum so genannten Anthropozän in die Zeit nach der Weltkriegsepoche von 1914 bis 1945 zu legen, kulturgeschichtlich wird man diesen Übergang wohl wesentlich früher anzusetzen haben. Nicht nur, dass sich in den Wissenschaften, quasi in den Köpfen der Wissenschaftler, dieses Anthropozän schon lange vorher ankündigte, sondern es wird gleichermaßen in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft ein dramatisches Umdenken erforderlich sein, um mit einer anderen Art im Umgang mit den Ressourcen der Erde die Anthropozängefahren noch abzuwenden, sofern möglich.

SPEICHERBEDARF ÜBERTRIEBEN

Mathematikredakteur Christoph Pöppe schrieb über den Weltrekord von Thomas Preußer und Matthias Engelhardt (»Die Lösung des 27-Damen-Problems«, *Spektrum* Dezember 2016, S. 78).

Reinhard Kern, Pfullingen: In dem Artikel wird am Ende erwähnt, dass es keine Datei der Lösungen des 27-Damen-Problems gebe, weil dafür alle Festplatten der Welt nicht ausreichen würden. Das erschien mir schon gefühlsmäßig

übertrieben, und es lässt sich ja leicht nachrechnen: Für eine Lösung braucht man $27 \cdot 27$ bit (Dame oder nicht), also 729 bit oder weniger als 100 Byte. Lösungen gibt es ganz grob $2 \cdot 10^{17}$. Die heutige PC-Standardfestplatte hat mindestens 1 Terabyte, für die $2 \cdot 10^{19}$ Byte große Datei braucht man also $2 \cdot 10^7$ Festplatten, 20 Millionen, das ist nicht mal eine halbe Monatsproduktion und noch lange nicht mehr als die weltweite Speicherkapazität. Die dürfte derzeit um die 5000 Exabyte liegen.

Bei Organisationen wie der NSA oder in der Cloud könnte man die Daten also leicht speichern. Sinnvoll wäre das natürlich trotzdem nicht; was könnte man schon damit anfangen.

Antwort von Th. Preußer und M. Engelhardt:

Der Leser hat vollkommen recht, die Phrase »alle Festplatten der Welt« ist tatsächlich übertrieben. Man kann die Eigenschaft, dass eine Lösung in jeder Spalte nur eine Dame enthalten kann, sogar zur weiteren Reduktion der Kodierung verwenden: Die Position einer Dame in einer Spalte ist mit 5 Bit zu beschreiben. Das wären dann 135 Bit pro Lösung. Mit der Interpretation als 27-stellige Zahl zur Basis 27 kommt man sogar auf $\lg(27^{27}) < 129$ Bit. In beiden Fällen würde man wohl auf eine Abspeicherung in 17 oder eher 20 Byte zurückgreifen. Damit liegt man noch einmal deutlich unter den Annahmen des Lesers.

KEIN HERVORRAGENDER INGENIEUR

Der Kernphysiker Manfred Popp erklärte, warum es die Nationalsozialisten nicht schafften, Nuklearwaffen zu entwickeln (»Störfall der Wissenschaftsgeschichte«, **Spektrum** Dezember 2017, S. 12).

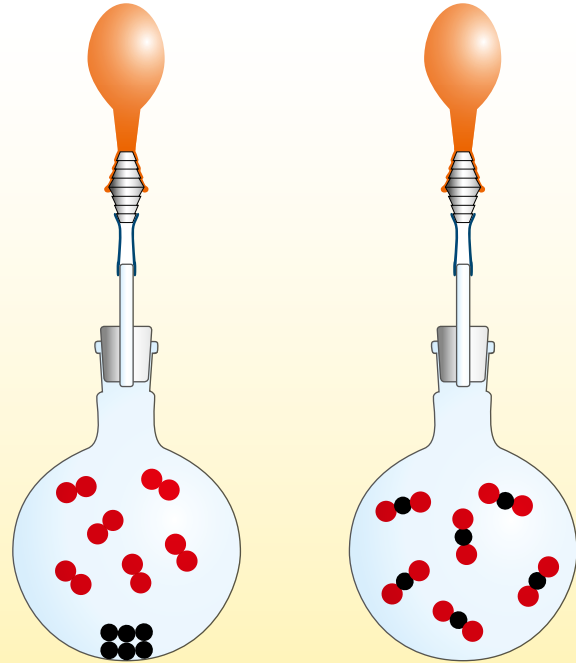
Giovanni Corsini, per Mail (aus dem Englischen übersetzt): Der Mitarbeiter am Manhattan-Projekt und spätere Nobelpreisträger Emilio Segré war zum gleichen Schluss wie Manfred Popp gekommen. Auf einer Konferenz in Italien Anfang der 1990er Jahre fragte ich ihn, ob die deutschen Physiker die Atombombe nicht bauen wollten oder es nicht konnten.

Seine Antwort war eindeutig: »Ich hatte Gelegenheit, die Aufnahmen aus Farm Hall anzuhören, und es besteht kein Zweifel daran, dass die deutschen Physiker zuerst ungläubig und dann wütend auf die Neuigkeiten von Hiroshima reagierten. Als ich Fermi in Chicago besuchte, fragte ich ihn, wie er die Kettenreaktion kontrollieren könne. Da er keine Zeit zum Erklären hatte, drückte er mir einige Papiere zum Lesen in die Hand. Nach drei Stunden hatte ich es verstanden. Für mich ist klar: Die Deutschen bauten deshalb keine Bombe, weil Heisenberg »nur« ein hervorragender Physiker war. Fermi hingegen war sowohl ein hervorragender Physiker als auch ein hervorragender Ingenieur.«

ERRATA

»Das Rätsel der verschwundenen Kohle«, **Spektrum** Januar 2017, Chemische Unterhaltungen, S. 52

Auf dem Weg vom Manuskript zum Druck ist in der rechten Abbildung auf S. 54 leider ein Sauerstoffmolekül in der linken Hälfte verloren gegangen: Es müssten sechs statt fünf sein. Untenstehend die korrekte Abbildung:



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).

SPKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH MARCO GETKEN

»Wie man einen Faustkeil macht«, **Spektrum** November 2016, S. 30

Das Altpaläolithikum in Afrika dauerte bis vor 200 000 Jahren an (S. 34), auf S. 35 ist korrekt von 500 000 Jahre alten Geräten die Rede.

»Die zwei Gesichter des Huntington-Gens«, **Spektrum** Januar 2017, S. 33

Die frühen Tiere spalteten sich vor mehr als 550 Millionen Jahre in die beiden großen heutigen Äste auf, nicht vor 550 000 Jahren, wie fälschlicherweise im Text steht.

futur III

Offizielle Erklärung zum Stand der menschlichen Forschung

Anlässlich der Abschlusskonferenz der Akademie der Vereinten Nationen am 23.1. 2117.

Eine Kurzgeschichte von Ted Chiang

Es ist nun schon 25 Jahre her, dass bei unserer Zeitschrift zum letzten Mal ein namentlich gezeichneter Forschungsartikel zur Veröffentlichung eingereicht wurde. Anlässlich dessen möchten wir rückblickend eine Frage wieder aufnehmen, die schon damals breit diskutiert wurde: Welche Rolle spielen menschliche Wissenschaftler in einer Ära, in der kein Mensch mehr wirklich verstehen kann, was die neuesten Resultate bedeuten?

Ohne Zweifel erinnern sich viele unserer Leser noch an Artikel, deren Autoren die ersten Personen waren, welche die darin beschriebenen Resultate gewonnen hatten. Doch sobald Metamenschen die experimentelle Forschung zu dominieren begannen, machten sie ihre Entdeckungen nur noch über digitalen Neuraltransfer (DNT) zugänglich. Den Fachjournalen blieb die Aufgabe, Berichte aus zweiter Hand zu publizieren – Übersetzungen in die menschliche Sprache.

Ohne DNT konnten Menschen weder aktuelle Ergebnisse der Grundlagenforschung vollständig begreifen noch die neuen Forschungswerkzeuge sinnvoll nutzen. Unterdessen vervollkommneten die Metamenschen den digitalen Neuraltransfer und bedienten sich seiner immer mehr. Zeitschriften für menschliche Leser dienten nur noch der Popularisierung – und das gelang ihnen schlecht, denn selbst die brilliantesten Köpfe verstanden die Übersetzung der neuesten Ergebnisse kaum.

Niemand leugnet heute die vielen Vorteile der metahumanen Wissenschaft, aber zu ihren Nachteilen

gehörte, dass menschliche Forscher wohl niemals wieder einen wirklich originellen Beitrag zur Naturwissenschaft leisten werden. Einige gaben den Beruf ganz auf, und die übrigen verlagerten ihr Interesse von der Grundlagenforschung zur Hermeneutik: Sie interpretierten die Forschungsarbeit der Metamenschen.

Zunächst wurde die Text-Hermeneutik populär, denn es gab schon Terabytes von metahumanen Publikationen, deren Übersetzung einerseits kaum verständlich, andererseits wahrscheinlich nicht völlig ungenau war. Das Entziffern dieser Texte weist zwar wenig Ähnlichkeit mit der herkömmlichen Aufgabe auf, alte Schriften zu übersetzen, macht aber Fortschritte: Neue Experimente verwenden mit Erfolg die jahrzehntealte Methode von Crystal Humphries zur Dekodierung der Histokompatibilitätsgenetik.

Als Werkzeuge zugänglich wurden, die auf metahumaner Wissenschaft beruhten, entstand die Artefakt-Hermeneutik. Menschliche Forscher versuchten, metahumane Artefakte durch »reverse engineering« nachzukonstruieren. Dabei verfolgten sie nicht die Absicht, ähnlich vollkommene Produkte zu erzeugen; sie wollten bloß die physikalischen Funktionsprinzipien verstehen. Die meistverbreitete Methode ist die kristallografische Analyse von Nanogeräten, die uns häufig neue Erkenntnisse über die Mechanosynthese liefert.

Die neueste und bei Weitem spekulativste Untersuchungsmethode ist die Fernerkundung von metahumanen Forschungseinrichtungen. Ein neues Erkundungsziel ist der kürzlich unter

der Wüste Gobi installierte Exa-Collider, dessen rätselhafte Neutrino-Signatur sehr kontrovers diskutiert wird. (Der tragbare Neutrino-Detektor ist selbstverständlich ein weiteres metahumanes Artefakt, dessen Funktionsprinzip unbekannt ist.)

Das wirft die Frage auf: Was haben menschliche Wissenschaftler von solchen Unternehmungen? Manche halten das alles für Zeitverschwendung – als würden Indianer versuchen, Bronze-Werkzeuge zu entwickeln, während es in Europa längst eine moderne Stahlindustrie gibt. Dieser Vergleich würde vielleicht zutreffen, wenn die Menschen mit den Metamenschen in Konkurrenz träten, aber in der heutigen Überflusswirtschaft fehlen alle Anzeichen für einen solchen Wettbewerb. Tatsächlich macht das einen wichtigen Unterschied zu früheren Konfrontationen zwischen technisch primitiven und hoch technisierten Kulturen: Die Menschen sind überhaupt nicht in Gefahr, assimiliert oder ausgelöscht zu werden.

Derzeit existiert kein Verfahren, ein menschliches Gehirn nachträglich metahuman aufzurüsten. Die Sugimoto-Gentherapie muss durchgeführt werden, bevor der Embryo mit der Neurogenese beginnt, damit das Gehirn zum digitalen Neurotransfer fähig wird. Das Fehlen eines nachträglichen Assimilationsverfahrens zwingt die menschlichen Eltern eines metahumanen Kindes zu einer schwierigen Güterabwägung: Entweder erlauben sie dem Kind den DNT-Zugang zur metahumanen Kultur und

sehen zu, wie es sich zu etwas für sie Unverständlichem entwickelt – oder sie verwehren dem Kind den DNT-Zugang, was aus metahumaner Sicht einer Entwicklungsbehinderung gleichkommt, wie Kaspar Hauser sie erleiden musste. Es überrascht kaum, dass der Prozentsatz der menschlichen Eltern, die für ihr Kind die Sugimoto-Gentherapie wählen, in den letzten Jahren fast auf null gefallen ist.

Aus diesem Grund wird die menschliche Kultur wahrscheinlich noch lange weiterbestehen, und die wissenschaftliche Neugier ist ein wichtiger Bestandteil dieser Kultur. Die Hermeneutik ist eine legitime Untersuchungsmethode und vermehrt das menschliche Wissen genauso wie früher die innovative Naturforschung. Außerdem erkennen die menschlichen Forscher möglicherweise Anwendungen, welche die Metamenschen übersehen haben, da diese auf Grund ihrer Fortschritte für unsere Bedürfnisse blind sind.

Nehmen wir zum Beispiel an, die Forschung würde künftig die Möglichkeit einer neuen Intelligenzsteigernden Therapie eröffnen, mit deren Hilfe die Menschen ihren Geist schrittweise auf metahumanes Niveau aufrüsten könnten. Doch die Metamenschen kämen wahrscheinlich gar nicht auf die Idee, so etwas zu entwickeln. Schon allein diese Chance rechtfertigt es, die menschlichen Forschungen auch künftig fortzusetzen.

Als Fazit bleibt: Wir müssen uns vor den Errungenschaften der metahumanen Wissenschaft nicht fürchten. Wir sollten nie vergessen, dass die Verfahren, auf denen die Existenz der Metamenschen beruht, ursprünglich von Menschen erfunden wurden, die nicht klüger waren als wir.

DER AUTOR

Ted Chiang ist ein US-amerikanischer Sciencefiction-Autor, der für seine Geschichten mehrere Hugo- und Nebula-Awards sowie den Kurd-Laßwitz-Preis erhielt. Der bei den Internationalen Filmfestspielen von Venedig 2016 uraufgeführte Sciencefiction-Film »Arrival« beruht auf Chiangs Kurzgeschichte »Story of Your Life«.

© Nature Publishing Group; www.nature.com; Nature 404, S. 517, 1. Juni 2000

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

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

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

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Michaela Butler, Dr. Rainer Kayser, Christine Kemmet, Dr. Andreas Nestke, Dr. Michael Springer, Dr. Lisa Vincenz-Donnelly, Prof. Klaus Volkert.

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

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

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

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

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

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

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

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



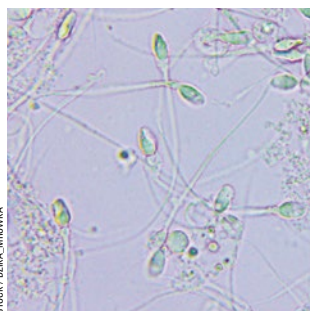
VORSCHAU

DER LEERSTE ORT IM KOSMOS

Aus allen Himmelsrichtungen erreicht uns Strahlung, die kurz nach dem Urknall entstanden ist. Ihre Temperatur ist fast überall gleich – mit Ausnahme eines ungewöhnlich kalten Bereichs. Entzieht ein Milliarden Lichtjahre großer, praktisch leerer Raum dem Licht des Urknalls Energie? Sollte sich die Entdeckung bewahrheiten, ließen sich zentrale kosmologische Theorien daran messen.



ISTOCK / AGSANDREW; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



ISTOCK / DEKA, MROVKA

MENSCHENDESIGN DURCH DIE HINTERTÜR

Mediziner wollen männliche Unfruchtbarkeit therapieren, indem sie Spermienzellen gentechnisch verändern. Doch damit würden sie eine rote Linie überschreiten, weil die Modifikationen in der Keimbahn verbleiben und weitervererbt würden.



ISTOCK / PHOTOFOTOS

DAS PERMAFROST-PROBLEM

Die steigenden Temperaturen lassen in der arktischen Tundra die Böden auftauen. Das setzt große Mengen Treibhausgase frei. Wie stark werden sie die globale Erwärmung anfachen?



TECHNOSEUM, ARCHIV

200 JAHRE FAHRRAD

Was trieb den Erfinder Karl Freiherr von Drais an? Welche gesellschaftliche Bedeutung hatte das Fahrrad zu Zeiten, da Automobile noch nicht verbreitet waren? Und warum fallen wir nicht um, wenn wir auf nur zwei Rädern unterwegs sind?

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

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

Wunschgeschenk:

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

Keine Mindestlaufzeit:

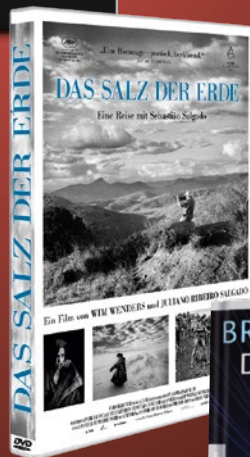
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:

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

DVD »Das Salz der Erde«

In den vergangenen 40 Jahren hat der brasilianische Fotograf Sebastião Salgado auf allen Kontinenten die Spuren unserer sich wandelnden Welt und Menschheitsgeschichte dokumentiert. Spielzeit 106 Minuten



Wählen
Sie Ihr
Geschenk

Buch »Die verborgene Wirklichkeit«

Brian Greene zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind.



Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

www.spektrum.de/abo



Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2017

Der Preis wurde anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemein verständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere aus den Bereichen Naturwissenschaft, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis für Bewerber, die Jahrgang 1988 oder jünger sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert.**

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis.

Bewerben Sie sich bis zum 2. April 2017 mit 3 Beiträgen (Print) bzw. 2-3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

KONTAKT

Veranstaltungsforum Holtzbrinck Publishing Group

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Mitglied des Gesellschafterausschusses,
Boehringer Ingelheim

ULRICH BLUMENTHAL

Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

UTA-MICAELA DÜRIG

Geschäftsführerin, Robert Bosch Stiftung GmbH

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER

Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR

Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co“,
„Wissen vor acht“ u. a.

