

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Das
Digital
Manifest.

EXKLUSIV:

9 führende Experten
warnen vor einer
Aushöhlung der
Demokratie durch
Algorithmen

ERNÄHRUNG

So macht
Fructose uns dick

BIBEL-ARCHÄOLOGIE

Wie das alte
Israel entstand

EBOLA

Die Ursachen
der Epidemie

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

1/16

DIE THEORIE VON ALLEM

Wie lassen sich
Quanten- und Relativitätstheorie
vereinen?

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



Jetzt als Kombipaket im Abo: App und PDF

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



www.spektrum.de/abonnieren



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Richard J. Johnson (links) und **Peter Andrews** spürten einen sehr alten Gendefekt auf, der die Vorratsspeicherung von Fett fördert. Diese Anpassung kann uns Wohlstandsmenschen von heute gefährlich werden (S. 20).



Albert Einstein spielte die Konsequenzen veränderter Naturgesetze gern im Geist durch. Ab S. 44 diskutiert die theoretische Physikerin **Sabine Hossenfelder** die Bedeutung der Methode Gedankenexperiment.



Dass die zurückliegende Ebola-epidemie in Westafrika so verheerend wütete, lag an einem fatalen Zusammentreffen von Umweltzerstörung und Armut, urteilt der Biologe **Robert L. Dorit** ab S. 72.

Für eine neue Aufklärung

Ein Unbehagen macht sich breit: Entmündigen wir uns durch die fortschreitende Digitalisierung selbst? Diese Frage treibt viele Menschen um, mit denen ich in den letzten Monaten sprach, darunter etliche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Beispiel Arbeit: Die sich stetig beschleunigende Digitalisierung der Berufswelt wird unsere eigene Stellung darin fundamental ändern. Denn keineswegs nur übernehmen Roboter Fließbandtätigkeiten. Algorithmen verrichten auch Dienstleistungs- und Managementaufgaben zunehmend effektiver als wir. Beispiel Beziehungen: Künstliche Intelligenzen werden von sozialen Netzwerken wie Facebook, dem aktuell 1,5 Milliarden Menschen angehören, eingesetzt, um Nutzerdaten nach ökonomisch verwertbaren Wahrheiten zu durchkämmen. Was interessiert Sie, wie ticken, wie fühlen Sie? Nie zuvor konnte jemand mehr über den Einzelnen in Erfahrung bringen.

Derlei Kenntnisse sind auch politisch und ideologisch verwertbar. Wer immer genauer weiß, welche Fragen Sie umtreiben, wo Sie sich informieren und auf wessen Ansichten Sie Wert legen oder pfeifen, kann Sie immer passgenauer lenken, ja fernsteuern. Menschliches Verhalten wird programmierbar, die Gesellschaft automatisiert. Das ist der alarmierende Tenor eines leidenschaftlichen Denkanstoßes, den neun namhafte europäische Experten exklusiv in »Spektrum der Wissenschaft« vorlegen (S. 50). Die Autoren aus den Bereichen Big Data, KI, Soziologie, Ökonomie, Psychologie und Philosophie wollen uns mit ihrem Digital-Manifest wachrütteln. Wir brauchen eine neue Aufklärung, um Demokratie und individuelle Freiheit vor totalitären Strukturen zu bewahren, die aus den Möglichkeiten der digitalen Revolution erwachsen. Schon heute können die verborgenen Algorithmen von Suchmaschinen Wahlen beeinflussen. Die Risiken der Fremdsteuerung des Menschen nehmen ein weltgeschichtlich einmaliges Ausmaß an – und umfassen neben unserer Manipulation durch Konzerne, Hacker oder Regierungen auch unsere Instrumentalisierung durch künstliche Intelligenzen, die in den kommenden Jahrzehnten nie bekannte Fähigkeiten erwerben dürften.

Mir wurde der Verdacht, all dies seien überkommene Dystopien, am 9. November ausgetrieben. Auf der hochkarätig besetzten Falling-Walls-Konferenz in Berlin zeigte der Neurowissenschaftler und Entwickler Demis Hassabis, Chef von Googles KI-Vorzeigeprojekt DeepMind, wie seine künstliche Intelligenz autark lernte, verschiedene Computerspiele zu beherrschen – ohne irgendeine Kenntnis der Ziele oder Regeln dieser Spiele einprogrammiert bekommen zu haben, allein durch eigenständiges maschinelles Adaptieren. Nach x Spielversuchen stellte das System die Leistungen jedes noch so trainierten menschlichen Spielers weit in den Schatten, agierte ungleich erfolgreicher – ohne zu wissen, was Erfolg ist. Was passt, wenn man solche Fähigkeiten weiterentwickelt und auf heiklere Gebiete loslässt?

Ich lege Ihnen die Lektüre des Digital-Manifests sowie die begleitende »Strategie für das digitale Zeitalter« unserer neun Autoren (S. 59) nachdrücklich ans Herz.

Ihr

Carsten Könneker

3 Editorial**6 Spektrogramm**

U-Boot aus 244 Atomen • Verirrte Galileo-Satelliten • Marmorkrebse: Seit 30 Generationen ohne Sex • Methan freisetzende Arktisschmelze • Rätselhafte Erdbauten in Kasachstan • Wie Ballone platzen

9 Bild des Monats

Das Meer blüht auf

20



TIM BOWER

48



FOTOLIA / PATRIKSLEZAK

50

EXKLUSIV

Das

Digital-

Manifest.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

10 Forschung aktuell

Eine fast ideale Flüssigkeit
Viskosität des Quark-Gluon-Plasmas berechnet

Ringschluss bei Proteinen
Ein Baukasten zur Herstellung stabilerer Enzyme

Nonsense in der Datenbank
Fakeartikel und ihre Entdeckung

Chemikalien als Pillen
Neuer Trick erlaubt bequemeren Umgang mit empfindlichen Stoffen

SPRINGERS EINWÜRFE
Was kostet der Klimawandel?
Bei ungebremster Erderwärmung droht Dauerkrise der Weltwirtschaft

BIOLOGIE & MEDIZIN

► **20 In den Fängen des Fettgens**

Eine Mutation ermöglichte unseren Vorfahren, leichter Fett einzulagern. Mit schwer wiegenden Folgen heute.
Richard J. Johnson und Peter Andrews

28 Unser zweiter Hörsinn

Neben dem normalen Gehör verfügen wir offenbar noch über ein älteres System. Es residiert im Gleichgewichtsorgan und spricht vor allem auf Bassrhythmen an.

Neil Todd

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!**48 Mit Silvesterraketen bis zu den Sternen**

Die Farben irdischer Feuerwerke verraten ihre chemische Zusammensetzung.

H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

► **50 Digitale Demokratie statt Datendiktatur**

Neun europäische Experten warnen vor der automatisierten Gesellschaft

59 Eine Strategie für das digitale Zeitalter

Was wir tun müssen, um Freiheit und Demokratie zu bewahren.

Dirk Helbing, Bruno S. Frey, Gerd Gigerenzer, Ernst Hafen, Michael Hagner, Yvonne Hofstetter, Jeroen van den Hoven, Roberto V. Zicari, und Andrej Zwicker

► **62 Wie entstand Israel?**

Sie kamen aus Ägypten und eroberten das Gelobte Land, so überliefert es das Alte Testament. Archäologen aber vermuten die Ursprünge Israels und Judas in Palästinas Bergland.
Wolfgang Zwickel



► TITELTHEMA

SERIE »100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE« TEIL 4

36 Auf der Suche nach der Theorie von Allem

Corey S. Powell

Physiker wollen endlich die Gravitation mit den anderen Naturkräften vereinen.

44 Alles nur im Kopf

Sabine Hossenfelder

Einstein arbeitete gern mit Gedankenexperimenten und zeigte, wie wertvoll dieses Werkzeug ist.

72



CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC)

78



JEFF WILSON

86 Wissenschaft im Rückblick

Vom Tyrannosaurus zur Zirbeldrüse

88 Rezensionen

Michael Martin: Planet Wüste • Jürgen Schäfer: Der Krankheitsermittler • Jim al-Khalili, Johnjoe McFadden: Der Quantenbeat des Lebens • Matt Parker: Auch Zahlen haben Gefühle • Ursula Klein: Humboldts Preußen u. a.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

68 Keine Rettung vor dem Abgrund

Terence Tao hat das 80 Jahre alte Diskrepanz-Problem von Paul Erdős gelöst.

Erica Klarreich

ERDE & UMWELT

► 72 Die Katastrophe hinter Ebola

In Westafrika scheint die Epidemie eingedämmt. Doch was bleibt, sind die sozialen und ökologischen Verwerfungen, die den Ausbruch erst ermöglichten.

Robert L. Dorit

TECHNIK & COMPUTER

78 Der lange Weg zur Marsrakete

Mit dem Space Launch System der NASA sollen Menschen einmal zum Mars fliegen. Das ehrgeizige Projekt ist ein Hybrid aus altbewährter Raumfahrttechnologie und neuesten Entwicklungen – aber auch jeder Menge Politik.

David Freedman

94 Leserbriefe/Impressum

96 Futur III

Alex Shvartsman: Der ideale Spamfilter

98 Vorschau

Titelmotiv: fotolia / pitris

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

NANOTECHNIK

U-Boot aus 244 Atomen

Wissenschaftler der Rice University (Houston, USA) haben ein Moleköl aus 244 Atomen konstruiert, das sich wie ein U-Boot durchs Wasser bewegt. Angetrieben wird es von UV-Licht. Ein Teil des Moleküls funktioniert wie ein Rotor, der durch Drehung Vortrieb erzeugt, vergleichbar den (größeren) Flagellen von Bakterien.

Der Rotor ist über eine Doppelbindung mit dem Rest des Moleküls verbunden. Nach Anregung durch ein UV-Lichtquant vollzieht er eine Vierteldrehung. Weil ihn das in eine energetisch ungünstigere Position bringt, springt er anschließend eine Vierteldrehung weiter, und zwar wegen der Chiralität des Moleküls in die gleiche Drehrichtung. Der Vorgang wiederholt sich so lange, wie UV-Licht einfällt.

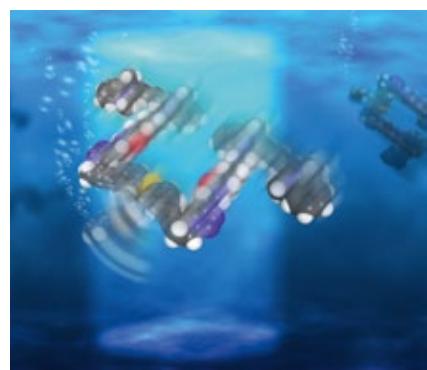
Jede volle Rotordrehung bringt das Moleköl 18 Nanometer (milliardstel Meter) voran. Mit mehr als einer

Million Umdrehungen pro Sekunde bewegen sich die Moleküle damit deutlich schneller als nur durch passive Diffusion, die von thermischen Stößen der Umgebung angetrieben wird. Allerdings lässt sich die Bewegung nicht steuern und folgt somit einem Zufallspfad.

Konkrete Anwendungen für das monomolekulare Gefährt sind noch nicht in Sicht. Am ehesten kommt es für medizinische Zwecke in Frage. Im Juli dieses Jahres entwickelte ein anderes Team aus einem Nanomotor ein neues Krebsmedikament. Der Wirkstoff enthält eine Stickstoffdoppelbindung, die zwei Molekülteile

voneinander trennt und so ihre Aktivierung verhindert. Bei Lichteinfall löst sich die Bindung und erlaubt den Molekülteilen, sich in den aktiven Zustand zu drehen. Dadurch wird es möglich, das Medikament durch gezielte Beleuchtung nur in bestimmten Körperregionen wirken zu lassen.

Nano Lett. 10.1021/acs.nanolett.5bo3764, 2015



LOIC SAMUEL / RICE UNIVERSITY

Künstlerische Darstellung des einmolekularen Gefährts.
Der Rotor befindet sich mittig am »Querstege« (vorn im Bild).



Mehr Aktualität!

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

RAUMFAHRT

Neue Aufgabe für verirrte Satelliten

Eine fehlerhafte Raketenstufe der europäischen Weltraumorganisation ESA hat zwei Satelliten für das Navigationssystem Galileo in die falsche Umlaufbahn geschossen. Statt die Geräte aufzugeben, funktioniert die ESA sie zu Messstationen um, die Einsteins Relativitätstheorie mit bisher unerreichter Genauigkeit testen.

Die Satelliten haben hochpräzise Atomuhren an Bord. Forscher wollen prüfen, ob diese Uhren in weiter entfernten Bereichen des irdischen Schwerefelds wirklich schneller gehen, wie es die Relativitätstheorie vorher sagt. Auf ihren ungewollt elliptischen Bahnen ändern die Galileo-Satelliten ihren Abstand zur Erde zweimal täglich um einen Betrag von etwa 8500 Kilometer. Ihre Position lässt sich dabei mit Lasern auf wenige Zentimeter genau bestimmen. Das eröffnet die

Möglichkeit festzustellen, wie das Gangtempo der Uhren von der Distanz zur Erdoberfläche abhängt.

Bereits 1976 hatte die NASA einen ähnlichen Test durchgeführt. Im Rahmen der Satellitenmission Gravity Probe A hatten Wissenschaftler verglichen, wie schnell Uhren auf der Erde beziehungsweise in 10 000 Kilometer Höhe gehen. Das knapp zweistündige Experiment bestätigte die Relativitätstheorie. Im Gegensatz dazu werden die Galileo-Satelliten ein ganzes Jahr lang messen und viermal genauere Messergebnisse liefern. Möglicherweise lassen sich damit Abweichungen von Einsteins Theorie erkennen, die auf ein neues Modell hindeuten, in dem sich Quanten- und Gravitationstheorie vereinen.

Classical Quant. Grav. 32, 232003, 2015

EVOLUTION

30 Generationen ohne Sex

Obwohl Marmorkrebse (*Procambarus fallax forma virginalis*) bereitwillig kopulieren, können sie ohne Partner Nachkommen hervorbringen. Diese überraschende Beobachtung machten Aquarianer schon vor Jahren. Nun haben Biologen um Frank Lyko vom Deutschen Krebsforschungszentrum (Heidelberg) in umfangreichen genetischen Analysen bestätigt, dass die Tiere eine eigenständige, sich asexuell vermehrende Spezies darstellen.

Marmorkrebse kommen weltweit vor und treten, soweit bekannt, nie als Männchen auf. Lyko und sein Team haben das Erbmaterial zahlreicher Exemplare untersucht. Dabei stellten sie fest, dass die Krebse allesamt genetisch identisch sind und offenbar von einem einzigen Individuum abstammen. Mit anderen Worten: Sie sind Klone.

Die Forscher vermuten, eine plötzliche Temperaturänderung vor 20 bis 30 Generationen könne dafür gesorgt haben, dass sich die Eizellen eines Everglades-Sumpfkrebsweibchens nicht richtig teilen. Infolgedessen sei ein Jungtier entstanden, das einen dreifachen Chromosomensatz, also überzählige Chromosomen besaß. Es habe sich ungeschlechtlich vermehrt und so alle späteren Marmorkrebse hervorgebracht. Überzählige Chromosomen kommen in der Natur zwar häufig vor, in der Regel können die betroffenen Organismen aber keine Nachkommen in die Welt setzen.

Wie die Analysen der Forscher weiter zeigten, ist die DNA von Marmorkrebsen deutlich weniger methyliert als



die ihrer Vorgängerspezies *Procambarus fallax*. Demnach haben epigenetische Mechanismen offenbar eine große Rolle beim Abspalten der neuen Art *Procambarus fallax f. virginalis* gespielt.

Biology Open 4, S. 1583–1594, 2015

OZEANOLOGIE

Schmelzen der arktischen Eisdecke setzt Methan frei

Die jährliche Eisschmelze in der Arktis befördert große Mengen des Treibhausgases Methan in die Atmosphäre. Das berichten Ellen Damm und ihre Mitarbeiter vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Ihre Erkenntnis haben sie auf einer Expedition mit dem Forschungsschiff »Polarstern« gewonnen.

Die arktische Eisdecke und das darunterliegende Wasser sind stark mit Methan übersättigt, weil Mikroben dort unter anaeroben Bedingungen organisches Material abbauen, wobei Methan entsteht. Ein kleiner Teil des Gases löst sich im Wasser unter dem Eis; das meiste wird beim Gefrieren in kleinen Blasen eingeschlossen. Während des arktischen Winters ist die Eisdecke geschlossen und undurchlässig für Methan, weshalb das Gas nicht in die Atmosphäre übertritt.

Im arktischen Sommer jedoch setzt seit einigen Jahren eine umfassende Schmelze ein. Das im Eis eingeschlossene

Methan geht dabei ins oberflächennahe Wasser über. Dort bleibt es, weil sich auf Grund der Erwärmung von oben und des Eintrags von Schmelzwasser eine stabile Wasserschichtung einstellt. Im Herbst, wenn die Temperaturen fallen, kühlt der Ozean aus und es entstehen Konvektionsströme, die methanübersättigtes Wasser an die Oberfläche befördern, wo das Gas in die Atmosphäre entweicht. Dort ist es als Treibhausgas etwa 30-mal so wirksam wie Kohlendioxid. Erst die Bildung einer neuen Eisdecke beendet den Prozess.

Dem komplizierten Mechanismus kamen die Forscher durch Messungen im arktischen Ozean auf die Spur. Dabei bestimmten sie Temperaturen ebenso wie Salz-, Sauerstoff- und Methangehalte in verschiedenen Wassertiefen sowie im Eis und führten Kohlenstoffisotopmessungen durch, um mikrobielle Stoffwechselaktivitäten zu untersuchen.

Sci. Rep. 5, 16179, 2015

Rätselhafte Erdbauten in Kasachstan

In Nordkasachstan finden sich gewaltige Erdwerke, die Ausdehnungen von mehreren hundert Metern besitzen. Das größte Gebilde besteht aus 101 Hügeln, jeder etwa einen Meter hoch und etliche Meter im Durchmesser. Zusammen ergeben sie ein Rechteck mit Diagonallinien, das mehrere Fußballfelder einnimmt – das so genannte Viereck von Ushtogay. Andere Erdwerke sehen wie Linien, Ringe oder Kreuze aus. Sogar eine dreiarmige Swastika ist dabei.

Der kasachische Ökonom und Hobbyarchäologe Dimitri Dey stieß erstmals im Jahr 2007 auf die Anlagen. Als er Google-Earth-Aufnahmen untersuchte, fielen sie ihm zufällig auf. Mittlerweile haben er und andere Forscher mindestens 260 weitere in Nordkasachstan entdeckt. Dabei

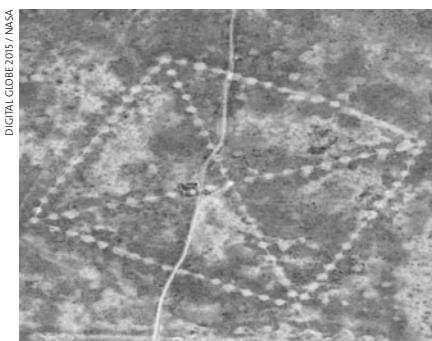
erhielten sie Unterstützung von der NASA, die Satellitenfotos von der Region zur Verfügung stellte.

Dey hat bereits eine Forschungs-expedition zum Viereck von Ushtogay geleitet. Dabei gruben die Wissenschaftler einige Hügel auf. Menschliche Überreste waren nicht darin, es handelt sich also offenbar nicht um

Gräber. In der Nähe des Erdwerks fanden sich die Reste einer jungsteinzeitlichen Siedlung.

Thermolumineszenzdatierungen haben ergeben, dass die Gebilde wohl aus vorchristlicher Zeit stammen. Die ältesten könnten bis zu 8000 Jahre alt sein und in Verbindung mit der steinzeitlichen Mahandzhar-Kultur stehen. Ihr Bau muss einen gewaltigen Aufwand erfordert haben. Wozu sie dienten, ist noch unbekannt.

New York Times, S. D2, 3. November 2015



Wie Ballone platzen

Pralle Luftballons zerplatzen anders als schwach aufgeblasene, haben Sébastien Moulinet und Mokhtar Adda-Bedia von der École Normale Supérieure in Paris herausgefunden. Bei geringem Druck auf die Ballonhaut reicht ein einzelner Riss, um die angestaute Energie abzugeben. Steht die Hülle jedoch unter hoher Spannung, verzweigt sich der Riss mehrfach.

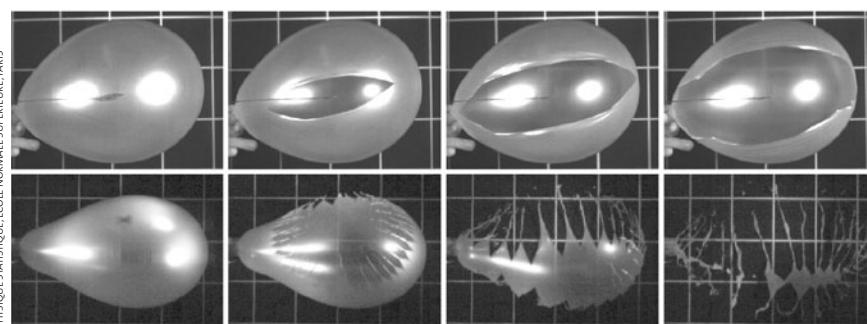
Im Labor verwenden die Forscher Gummimembranen, die sie auf verschiedene Größen aufblasen. Anschließend stechen sie mit einer Klinge darauf ein. Mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitskameras haben sie festgestellt, dass die Spannung in der Hülle darüber entscheidet, wie der Ballon birst. Dabei spielen neben dem Innendruck auch die Dicke und die

Krümmung der Membran eine Rolle. Je höher die Spannung, umso rascher breitet sich ein Riss aus. Oberhalb einer bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit wird das System allerdings instabil. Nun verzweigt sich der Riss, und die dabei entstehenden Äste laufen strahlenförmig vom Einstichloch nach außen.

Ist der Ballon kugelrund, erinnern seine zerplatzten Überreste an einen Kraken – mit umso mehr Armen, je höher die Spannung in der Hülle war. Handelsübliche Luftballons haben demgegenüber meist eine längliche Form. Sie ähneln nach dem Bersten mehr einem Gerippe.

In etlichen anderen Materialien treten ähnliche Rissmuster auf. Deshalb lassen sich die Erkenntnisse auch auf sie anwenden, beispielsweise um zu untersuchen, wie es zu Materialversagen kommt.

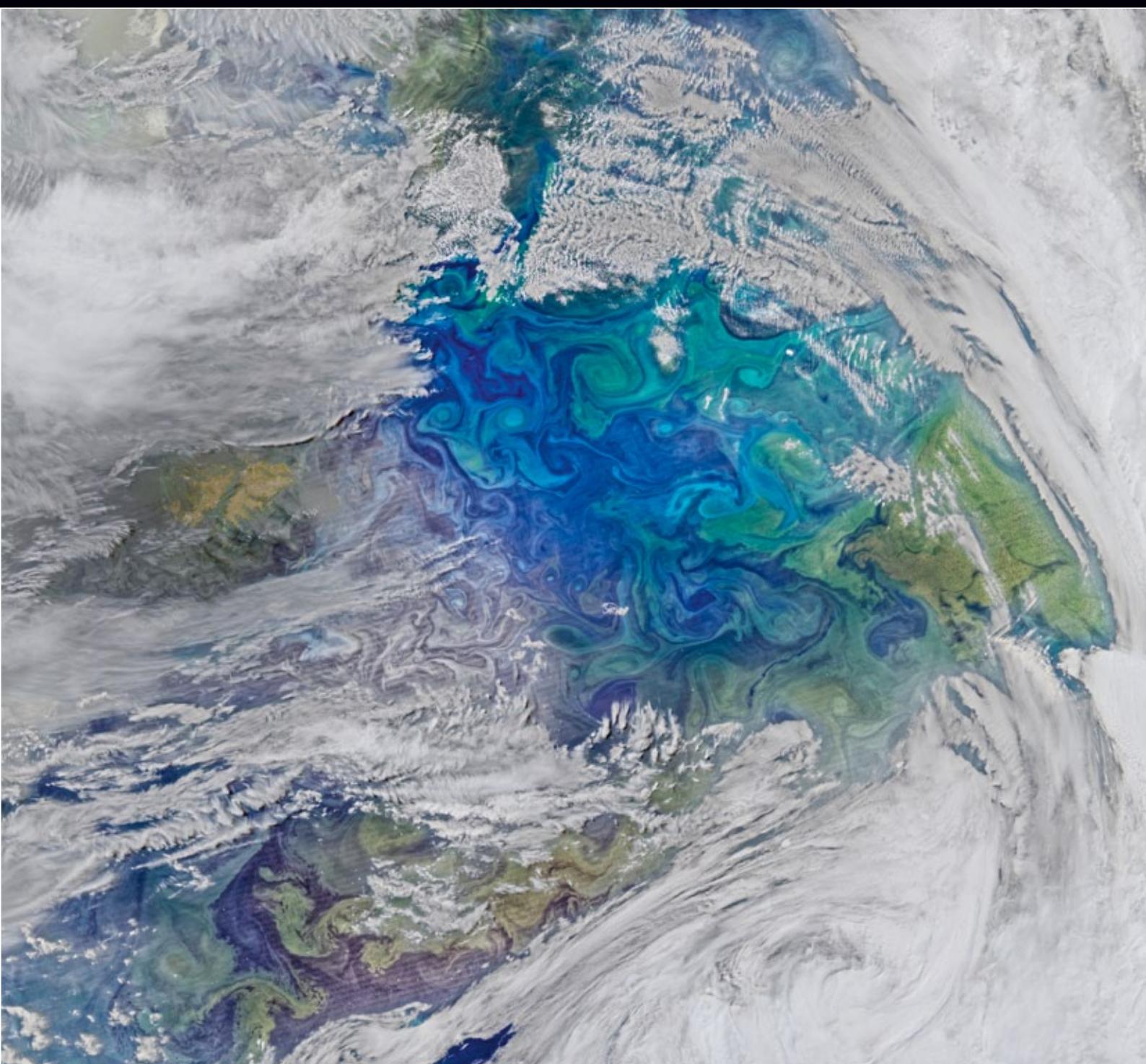
Phys. Rev. Lett. 115, 184301, 2015



Steht die Hülle eines Ballons unter geringer Spannung, wächst sich ein Riss darin in die Länge aus, während der Inhalt entweicht (obere Bildreihe). Bei hoher Spannung hingegen entstehen viele zusätzlich Risse, die strahlförmig auseinanderlaufen (untere Reihe).

DAS MEER BLÜHT AUF

Mit dem Frühling auf der Südhalbkugel lässt die zunehmende Sonneneinstrahlung in den Ozeanen große Algenteppiche wachsen. Am 16. November 2015 blickte ein amerikanischer Umweltsatellit auf ein wolkenfreies Gebiet des Südatlantiks östlich der Falklandinseln. Die Aufnahme zeigt durch Strömungen verwirbeltes Phytoplankton über einen Bereich von mehr als 1000 Kilometer.



Der idealen Flüssigkeit auf der Spur

Neuen Berechnungen zufolge ist kein Materiezustand so wenig »zäh« wie das Quark-Gluon-Plasma.

VON TINA SCHLAFLY

Theoretische Physiker versuchen seit Langem, das so genannte Quark-Gluon-Plasma zu verstehen. In diesem Zustand befanden sich die Elementarteilchen wenige Sekundenbruchteile nach dem Urknall. Unter normalen Umständen sind Quarks und Gluonen nicht einzeln beobachtbar, sondern treten nur gebunden auf. Im Plasma dagegen bewegen sie sich nahezu frei.

Eine Heidelberger Forschergruppe um Jan M. Pawłowski stellt nun eine Methode vor, mit der die Eigenschaften dieser Materie berechnet werden können (*Physical Review Letters* 115, 112002, 2015). Anders als die meisten bisherigen Verfahren ist ihres für beliebige Temperaturen anwendbar. Die Forscher ermitteln damit, wie sich das Plasma unter extrem dichten und heißen Bedingungen, wie unmittelbar nach dem Urknall, verhält. Außerdem können sie nachvollziehen, wie sich die Eigenschaften beim Abkühlen verändern. Das ist besonders wichtig, um manche Experimente an Teilchenbeschleunigern zu verstehen.

Im Jahr 2005 haben Forscher am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) in den USA das Quark-Gluon-Plasma erstmals künstlich hergestellt. Die Experimentatoren beschleunigten Goldteilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit und ließen sie dann zusammenstoßen. Wenn solche Partikel kollidieren, steigt die Temperatur auf einige Billionen Kelvin. Unter derartigen Bedingungen lösen sich Protonen und Neutronen in ihre Bestandteile auf, in Quarks und

Gluonen. Für kurze Zeit bilden diese ein Quark-Gluon-Plasma. Nach der Kollision kühlte dieses ab. Es formen sich die üblichen Zweier- und Dreiergruppen von Quarks, die so genannten Hadronen, zu denen auch die Bausteine der Atomkerne zählen.

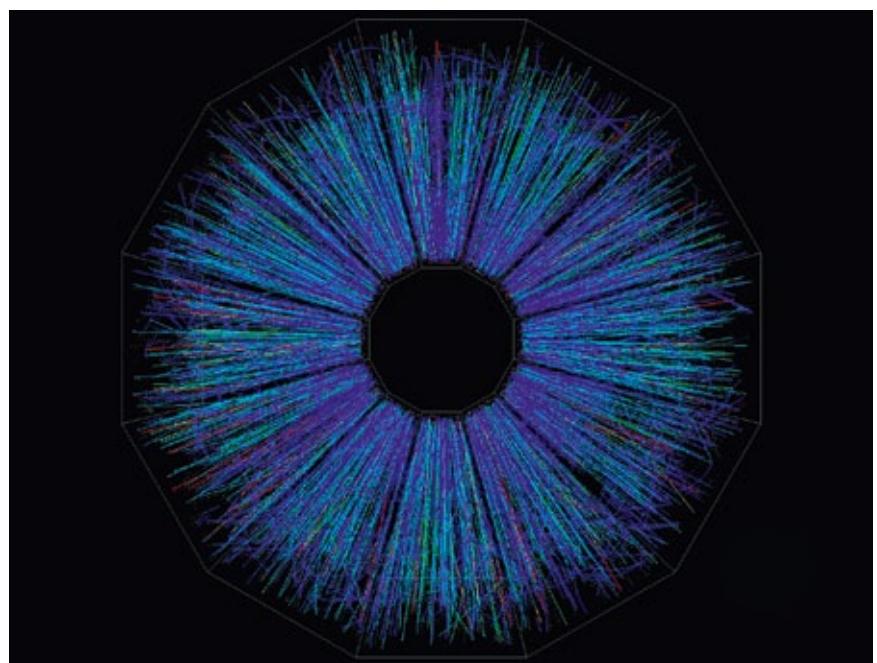
Überraschung im Experiment

Auf diese Weise haben die Forscher am RHIC gezeigt, dass Quarks und Gluonen abhängig von der Temperatur in verschiedenen Aggregatzuständen auftreten: eingesperrt in Hadronen oder frei im Plasma. Wie beim Wasser gibt es zwischen diesen Zuständen einen Phasenübergang. Das US-Experiment offenbarte eine überraschende Eigenschaft der Elementarteilchen: Anstatt, analog zum Wasserdampf, zu einem Gas zu werden, erscheinen sie im Plasma wie eine Flüssigkeit. Zumindest modelliert die Hydrodynamik, die das Verhalten von Fluiden beschreibt, die Messergebnisse sehr gut. Eine wichtige Frage da-

bei betrifft die innere Reibung der Flüssigkeit, die sich in Viskosität äußert. In »idealen« Fluiden ist diese Zähigkeit praktisch null.

Um verschiedene Stoffe zu vergleichen, benutzen die Wissenschaftler meist nicht allein die Viskosität, sondern das Verhältnis aus ihrem Wert und dem der Entropie; Letztere ist ein Maß für die Unordnung im System. Dieses Verhältnis kommt in den hydrodynamischen Gleichungen vor und gibt Auskunft über die Qualität einer Flüssigkeit: Je kleiner der Wert, umso »ideal« das Fluid. Es war mit Teilchenbeschleunigern allerdings bislang nicht möglich, das Verhältnis für das Quark-Gluon-Plasma zu messen. Stattdessen bestimmten es die Experimentatoren, indem sie ihre Daten mit hydrodynamischen Simulationen verglichen. Dort kann man diesen Parameter frei variieren. Dabei stellten sie fest, dass nur ein unerwartet niedriger Wert zu den Ergebnissen passt. Demnach wäre das

Bei Teilchenkollisionen am RHIC entsteht ein heißes Quark-Gluon-Plasma. Es kühlte sich rasch ab und bildet Millionen Partikel, deren Flugbahnen der Detektor aufzeichnet (rechts: Blick in Beschleunigerrichtung; Seite gegenüber: seitliche Ansicht).



STAR EXPERIMENT AT THE RELATIVISTIC HEAVY ION COLLIDER (RHIC), BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

Quark-Gluon-Plasma eine beinahe ideale Flüssigkeit.

Diese Vermutung wollten die Heidelberger Physiker nun dadurch überprüfen, dass sie das Viskositäts-Entropie-Verhältnis aus der fundamentalen Theorie der Quarks und Gluonen berechnen, der so genannten Quantenchromodynamik. Dass die Elementarteilchen in mehreren Aggregatzuständen auftreten, ist hier eine besondere Herausforderung. Zusätzlich erschweren es die temperaturabhängigen Kräfte zwischen den Teilchen, ihre Eigenschaften zu ermitteln. In einem heißen Quark-Gluon-Plasma ist die Wechselwirkung beispielsweise schwach. Dort lässt sich eine Standardmethode der theoretischen Physik anwenden, die Störungstheorie. Sie beruht darauf, ein kompliziertes System in einen Teil aufzuspalten, der mit wenig Aufwand berechnet werden kann, und eine Abweichung davon. Ist Letztere klein, ist das einfache System eine gute Näherung für das komplizierte. Die Forscher können also freie Quarks und Gluonen als Beschreibung verwenden. Mit der Störungstheorie lässt sich dann eine Abschätzung für die schwierigere Situation ermitteln, in welcher die Elementarteilchen doch ein wenig interagieren.

Für die Quark-Gluon-Plasma-Daten vom RHIC reicht die Störungstheorie al-

lerdings nicht aus. Die Temperaturen in diesem Experiment sind zwar extrem hoch im Vergleich zu Alltagsbedingungen, aber immer noch niedrig genug, dass die Kraft zwischen den Elementarteilchen wieder die Oberhand gewinnt und sich auch einige Hadronen ins Plasma mischen. Dadurch funktioniert die Beschreibung über freie Quarks und Gluonen nicht mehr. Für genau diesen Übergangsbereich interessieren sich Pawłowski und seine Kollegen.

Wie ein theoretischer Blick durchs Mikroskop

Der Durchbruch der deutschen Wissenschaftler besteht darin, dass sie eine Technik entwickelt haben, die überall anwendbar ist – vom heißen Quark-Gluon-Plasma bis zur Raumtemperatur. Das Team beschreibt sie als die mathematische Version eines starken Mikroskops, durch das man auf ein Stück Materie schaut: Bei maximaler Auflösung beobachtet man Quarks und Gluonen; in einem etwas größeren Bildausschnitt verschwinden diese Details, stattdessen erscheinen Protonen und Neutronen. Auf der nächsten Stufe verschwimmen diese wiederum zu Atomen.

Die Beschreibungen auf den verschiedenen Größenordnungen werden durch das Verfahren von Pawłowski und seinen Kollegen – die so genannte

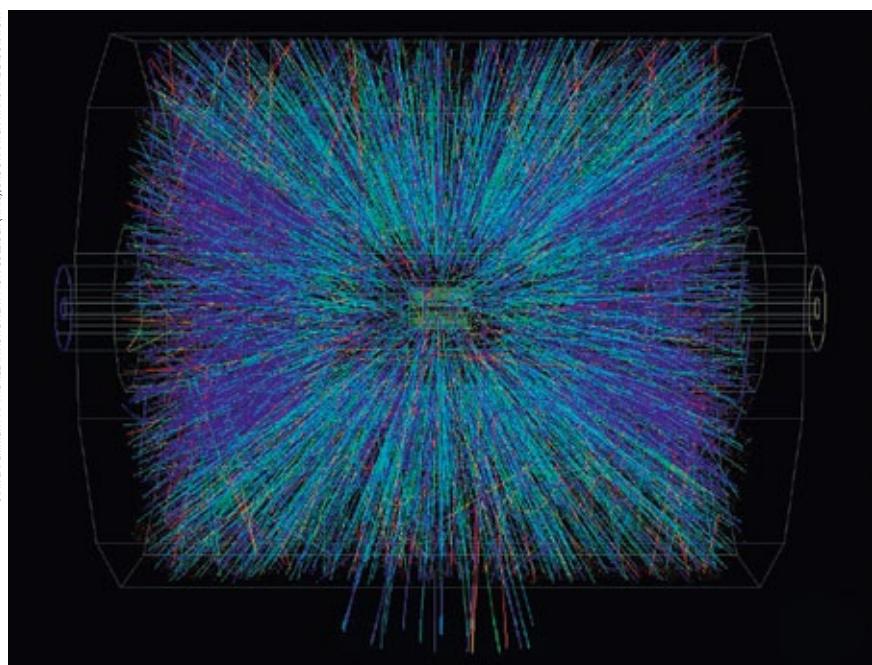
Renormierungsgruppe – mathematisch miteinander verknüpft. Dazu definieren die Forscher das physikalische System auf der untersten Ebene durch die Grundgleichungen der Quantenchromodynamik. Die Lösung der Renormierungsgruppen-Gleichung beschreibt dann, wie die Theorie bei den anderen Zoomfaktoren aussieht. So lassen sich aus Quarks und Gluonen komplexe Objekte wie Protonen und Neutronen ableiten, und auch Messgrößen wie die Viskosität. Die rechnerischen Ergebnisse zeigen zudem, ob ein Quark-Gluon-Plasma vorliegt oder ob sich Hadronen bilden. Es können also beide Phasen und sogar ihr Übergang untersucht werden.

Zunächst beschränkte sich das Forscherteam in einem ersten Schritt auf die so genannte reine Eichtheorie, die nur Gluonen betrachtet. Obwohl keine Quarks vorkommen, hat diese Theorie viele Eigenschaften mit der Quantenchromodynamik gemeinsam. Das liegt an einer Besonderheit der Gluonen: Ihre Hauptaufgabe ist es, die Wechselwirkung zwischen den Quarks zu vermitteln (siehe SdW 12/2015, S. 58). Allerdings interagieren die »Klebstoffteilchen« auch direkt miteinander. Mehrere von ihnen können sich zu so genannten Glueballs zusammenschließen, die den Protonen und Neutronen der Quantenchromodynamik entsprechen. Und auch Glueballs zerfließen bei hohen Temperaturen in ein Plasma – die Eichtheorie besitzt also ebenfalls einen Phasenübergang.

Pawłowski und sein Team haben nun die Qualität des Gluon-Plasmas als Flüssigkeit ermittelt. Sie ändert sich mit der Temperatur und ist knapp über dem Phasenübergang am besten. Gerade dieser Bereich war bislang nicht zugänglich. Das Verhältnis von Viskosität und Entropie ist dort zirka zehnmal kleiner als bei Wasser und nur doppelt so groß wie der von der Stringtheorie vorhergesagte Minimalwert. Eine perfekte Flüssigkeit hätte genau diesen Wert.

Wie auf Grund der Störungstheorie erwartet, können die Forscher das Resultat bei sehr hohen Temperaturen allein durch die Wechselwirkung von

STAR EXPERIMENT AT THE RELATIVISTIC HEAVY ION COLLIDER (RHIC), BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY



Gluonen erklären. Bei niedrigen Temperaturen beschreibt ein Gas aus Glueballs die Situation am besten. Für den Übergangsbereich, wo sich die beiden Szenarien überlagern, können die Physiker aus ihren Daten eine einfache Formel ableiten. Diese ermöglicht es der Gruppe schließlich, im zweiten Schritt eine Abschätzung für den realen Fall zu geben, also für das gemeinsame Auftreten von Gluonen und Quarks. Bei hohen Temperaturen bestimmen demzufolge deren Wechselwirkungen als eigenständige Teilchen das Resultat, bei geringen Temperaturen tragen vorwiegend Hadronen zum Ergebnis bei. Das

Verhalten in der Nähe des Phasenübergangs schätzen die Forscher ab, indem sie die beiden Bereiche wie in der Eichtheorie mischen. So kommt das Team zu der Vorhersage, dass das Verhältnis von Viskosität und Entropie im Quark-Gluon-Plasma ungefähr 20 Prozent größer ist als im reinen Gluon-Plasma. Dieses Ergebnis liegt immer noch sehr nahe an dem erwähnten Minimalwert – in keinem realen System wurde je ein niedrigerer gemessen. Das Quark-Gluon-Plasma ist also tatsächlich fast ideal viskos.

Die Theoretiker liefern somit einen starken Hinweis darauf, dass es sich

beim Quark-Gluon-Plasma um den dünnflüssigsten Materiezustand handelt, der bisher vermessen wurde. In Experimenten am RHIC und am Large Hadron Collider in der Schweiz werden Forscher das Plasma in Zukunft genauer unter die Lupe nehmen (siehe SdW 5/2011, S. 86). Beispielsweise wollen sie herausfinden, wie sich die Eigenschaften bei niedrigen und hohen Temperaturen verändern. Auch dafür haben die Heidelberger mit ihrer Methode bereits überprüfbare Vorhersagen aufgestellt.

Tina Schlafly ist promovierte Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

SYNTHETISCHE BIOLOGIE

Ringschluss bei Proteinen

Um Eiweiße weniger anfällig gegenüber Hitze und Verklumpung zu machen, verknüpfen Forscher ihre beiden Enden zu einem zirkulären Molekül. Für die Weiterentwicklung dieser Methode erhielten zwölf Studierende den Hauptpreis in einem Nachwuchswettbewerb.

von JANOSCH DEEG

Schlägt man ein Ei in eine heiße Pfanne, härtet das Eiweiß schnell aus und färbt sich weiß. Das liegt an den darin enthaltenen Proteinen, deren dreidimensionale Struktur sich durch die Hitze irreversibel verändert. Sie denaturieren, wie es im Fachjargon heißt. Proteine sind große Moleküle aus Aminosäureketten, die sich zu einer spezifischen räumlichen Anordnung falten. Wenn ungünstige Umgebungsfaktoren diese zerstören, büßt das Eiweiß seine Funktion ein. Bei biotechnologischen Verfahren in der Industrie, Forschung oder Medizin müssen die Verantwortlichen dies im Blick behalten. Beispielsweise kommt in der Papier- und Textilindustrie das Protein Xylanase zum Einsatz, das einen wesentlichen Bestandteil von pflanzlichen Zellwänden zersetzt. Hitze, extreme pH-Werte oder Lösungsmittel schädigen das Protein – eine höhere Widerstandsfähigkeit wäre deshalb nützlich.

Im Sommer 2014 beschlossen zwölf Heidelberger Studierende, sich mit

dem Problem der Stabilisierung von Proteinen auseinanderzusetzen. Die Gruppe suchte nämlich gerade nach einem passenden Forschungsprojekt, um an einem studentischen Nachwuchswettbewerb der iGEM (Abkürzung für International Genetically Engineered Machine) Foundation in Boston, USA, teilzunehmen. Teams aus aller Welt präsentieren dort alljährlich ihre kreative wissenschaftliche Arbeit aus dem Bereich der synthetischen Biologie.

»Bei unserer Recherche stießen wir auf den Vorteil ringförmiger Proteine«, berichtet Carolin Schmelas. Gemeinsam mit ihren Kommilitonen stellte sie fest, dass zirkuläre, also ringförmig in sich geschlossene Proteine weniger schnell denaturieren als solche mit zwei offenen Enden, wie sie fast alle in der Natur auftretenden Proteine aufweisen – auch die Xylanase. Mit dieser Erkenntnis begann eine Erfolgsgeschichte. »Wir wollten Eiweiße zu einem Ring verschließen, um sie dadurch widerstandsfähiger zu machen«, erinnert sich

Schmelas an den Beginn ihres Vorhabens. Und ihre Kollegin Anna Huhn ergänzt: »Die Denaturierung des Proteins beginnt meist an den losen Enden, wie bei einem Wollknäuel, das man von dort aus entrollt. Verknüpft man die Endstücke, stellen diese keine Angriffsfläche mehr dar.«

Die Form muss erhalten bleiben

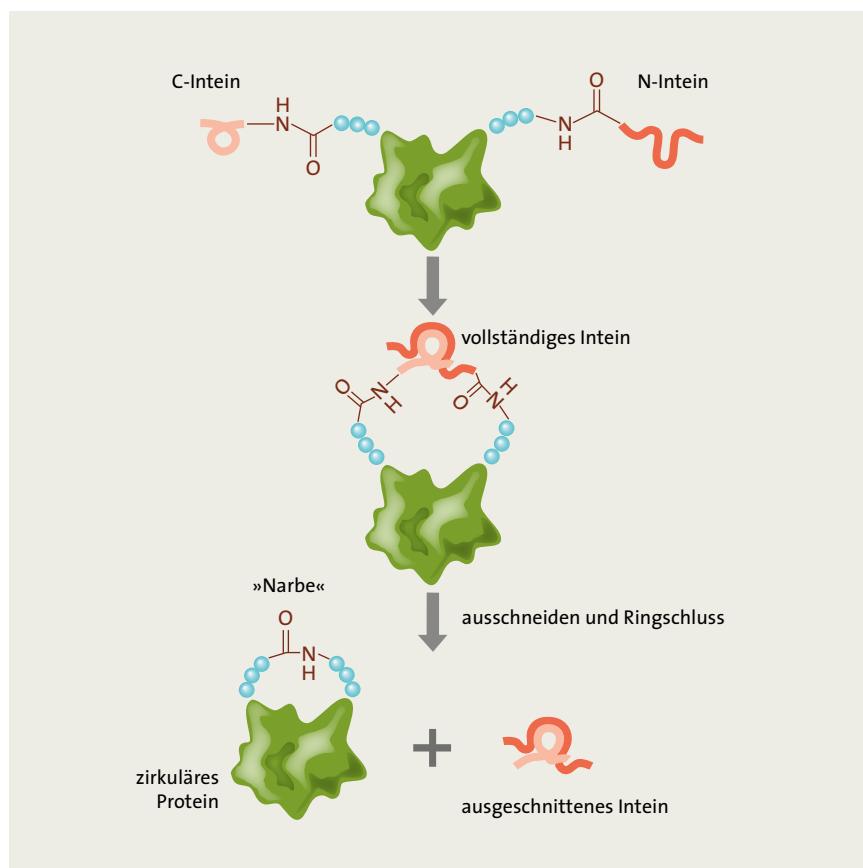
Das Forscherteam um Barbara Di Ventura und Roland Eils vom Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) und der Universität Heidelberg veröffentlichte nun auf dem Projekt basierende Ergebnisse (*Molecular BioSystems* 10, 1039/C5MB00341E, 2015). In der Tat gelang es der Gruppe, die beiden Endstücke der Xylanase zusammenzufügen und das Enzym damit strapazierfähiger zu machen. Wichtig dabei ist, die dreidimensionale Struktur zu erhalten – das molekulare Knäuel darf nicht zu sehr deformiert werden. Wie die Wissenschaftler berichten, dürfte das auch bei vielen anderen Proteinen möglich

sein: Die beiden Enden der Aminosäurekette (fachlich: Termini) liegen häufig so dicht beieinander, dass sie sich für einen Ringschluss anbieten. Zudem können passende Verbindungs moleküle – auch Linker genannt – größere Abstände überbrücken und so sicherstellen, dass sich das Eiweiß nicht verformt und dadurch seine Funktion einbüsst.

Das Team von Molekularbiologen, dem auch die beiden Studentinnen angehören, verwendete für den Ringschluss ein natürliches Werkzeug von Zellen, so genannte Inteine. Dabei handelt es sich um Proteinabschnitte, die sich selbsttätig aus der molekularen Kette herausschneiden und anschließend die dadurch entstandenen losen Enden wieder miteinander verknüpfen können. Diese Fähigkeit nutzten die Wissenschaftler für ihre Zwecke: Zunächst koppelten sie jeweils einen von zwei komplementären Teilen eines Inteins an die zwei Termini der Xylanase an. Die beiden angebundenen Fragmente verbanden sich daraufhin zum intakten Intein, das sich wiederum aus dem Enzym herauslöste und den Ring schloss. Eine zirkuläre Xylanase war entstanden.

Um ihr Ziel zu erreichen, schleusten die Forscher den genetischen Bauplan des Proteins plus die Anweisung, die Inteinfragmente anzuhängen, über so genannte Plasmide in Bakterien ein. Die Mikroben begannen dann, das Zielprotein inklusive der Inteinteile zu produzieren. »Bislang musste solch ein Plasmid für jedes einzelne Protein maßgeschneidert werden, um zu vermeiden, dass unerwünschte Aminosäuresequenzen an der Nahtstelle zurückblieben – gewissermaßen als Narbe«, erklärt Max Waldhauer, einer der Autoren des Artikels.

Dies änderte das Team nun: »Wir haben ein effizientes Klonierungsverfahren entwickelt, mit dem wir ganz einfach Plasmide für beliebige Proteine mit verschiedenen Linkern basteln können«, so Waldhauer. Die Forscher konstruierten ein Standard-Empfängerplasmid, in das sich mit Hilfe spezieller molekularer Scheren alle möglichen Proteine in nur einem Schritt einbauen



An den Enden des Proteins hängen zwei komplementäre Inteinteile. Fügen sie sich zum intakten Intein zusammen, schneidet dieses sich unter Ringschluss des Proteins heraus. Früher blieben oft unerwünschte Aminosäuren als Narbe an der Naht zurück (blau).

lassen, ohne dass Narbensequenzen übrig bleiben. Damit das Verfahren mit zahlreichen Inteinen kompatibel ist, verwendeten sie dabei solche Aminosäuren, die in vielen verschiedenen Inteinen gleich oder ähnlich sind.

Wie lang darf das Verbindungsstück sein?

Diese Idee eines auf Inteinen basierenden »Werkzeugkastens« hatten die Heidelberger Studierenden den Juroren in Boston präsentiert. Außerdem hatte die junge Truppe eine Software entworfen, welche die benötigte Linkerlänge berechnet, falls nennenswerte Distanzen zwischen den beiden Termini überbrückt werden müssen.

In ihren Experimenten mit verschiedenen ringförmigen Xylanaseproteinen fanden die Forscher heraus, dass Moleküle mit einem Linker aus nur einer Aminosäure eine sieben Grad hö-

here Temperatur aushalten als die Ausgangsversion. Bei einem langen Verbindungsstück hingegen verzeichneten sie keine merkliche Änderung im Vergleich zur natürlichen Variante. Die Art des Linkers beeinflusst also die Thermostabilität eines ringförmigen Proteins. Bemerkenswert ist, dass die ringförmige Variante in Versuchen deutlich weniger anfällig gegenüber Hitze schocks war: Die Wissenschaftler erwärmen dabei die Eiweißmoleküle schlagartig auf Temperaturen bis zu 90 Grad Celsius und kühlten sie nach einigen Minuten wieder schnell auf 37 Grad ab. Im Anschluss war kaum noch eines der linearen Proteine funktional, dagegen taten bis zur Hälfte der ringförmigen Moleküle weiterhin ihren Dienst. Das ist darauf zurückzuführen, dass die zirkuläre Form bei dem Hitze schock viel weniger verklumpte als die natürliche.

In ihrer Veröffentlichung resümieren die Molekularbiologen, dass die ringförmige Xylanase im jetzigen Zustand zwar noch keine direkte industrielle Verwendung finden kann, da die Hitzeresistenz noch nicht genügend gesteigert ist. Jedoch vereinfache ihre Methode grundlegend die Fertigung zahlreicher zirkulärer Proteine, die für die Biomedizin und Biotechnologie von Nutzen sein können. Zudem könne

man die Zirkularisierung mit anderen Maßnahmen zum Stabilisieren von Proteinen – etwa spezifische Mutationen – kombinieren und damit für die Industrie interessante Enzyme wesentlich widerstandsfähiger machen.

Die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten der Inteinmethode hatte bereits die Preisrichter beim iGEM-Wettbewerb beeindruckt: Das Projekt der Heidelberger Studierenden mit dem

spektakulären Namen »Feuerring« räumte den Hauptpreis ab. Wahrscheinlich lag das auch an der damals vorgestellten ersten Anwendung: einer hitzestabileren Version der DNA-Methyltransferase. Mit dieser ließen sich unter Umständen epigenetische Vorgänge (SdW 7/2015, S. 19) beeinflussen.

Janosch Deeg ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

WISSENSCHAFTLICHES PUBLIZIEREN

Faule Äpfel in der Datenbank

Über Jahre hinweg sind Artikel zu wissenschaftlichen Konferenzen eingereicht und veröffentlicht worden, deren Inhalt aus purem und erkennbarem Unsinn bestand – erstellt von einer eigens dafür geschriebenen Software.

von ELKE REINECKE

Heute hätte Herr zu Guttenberg mit seiner schlichten Abkupfermethode keine Chance mehr auf einen Doktorstitel. Sowohl Universitäten als auch Dokumentenserver wie arXiv.org lassen wissenschaftliche Arbeiten inzwischen standardmäßig durch spezielle Software auf Plagiate überprüfen. Gibt es denn dann noch Auswege für jemanden, der sich zwar mit akademischem Ruhm schmücken will, aber die Mühen des ernsthaften wissenschaftlichen Arbeitens scheut? Die Antwort darauf ist wieder eine Software: Er könnte es mit SCIGen versuchen (die Abkürzung steht für »science generator«, »Wissenschaftserzeuger«).

Das allgemein zugängliche Computerprogramm SCIGen (<http://pdos.csail.mit.edu/scigen/>) produziert einen Text

mit dem für wissenschaftliche Arbeiten üblichen Aufbau; er besteht aus grammatisch korrekten englischen Sätzen, die typische Fachwörter enthalten und jeden Plagiatstest bestehen, denn sie werden für jede Anforderung neu mit dem Zufallszahlengenerator ausgewürfelt. Erst wer versucht, die ersten Absätze zu verstehen, erkennt – dann allerdings mühelos –, dass es sich um kompletten Unsinn handelt.

Ursprünglich war die Software ein Schelmenstreich dreier Doktoranden der Computerwissenschaften am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Jeremy Stribling, Maxwell Krohn und Daniel Aguayo waren, genervt von einer enormen Menge von Einladungen zu wissenschaftlichen Tagungen, zu der Überzeugung gekommen, bei

gewissen Konferenzen finde keine nennenswerte Qualitätskontrolle statt. Im Jahr 2005 machten sie die Probe aufs Exempel und reichten bei der World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI) eine Nonsensearbeit ein. Der von der frisch entwickelten Software SCIGen produzierte Text »Rooter: A Methodology for the Typical Unification of Access Points and Redundancy« (Bild rechts, oben) wurde prompt akzeptiert.

In der darauf folgenden Auseinandersetzung kam zu Tage, dass die Organisatoren dieser Konferenz eine Quote von 15 Prozent »non-refereed papers« genehmigt hatten – eingereichte Arbeiten, zu denen sich keiner der nach dem Zufallsprinzip ausgewählten Gutachter geäußert hatte. So war der Unsinnstext in das offizielle Kongressmaterial gerutscht. Nach dem Streich der drei Doktoranden gab man diese Praxis offiziell auf. Aber SCIGen wurde weiter genutzt – und zwar nicht nur, um Fehler im System aufzudecken, sondern auch, um Artikel in Konferenzbänden oder gar wissenschaftlichen Zeitschriften unterzubringen.

Das stellte sich heraus, als der Informatiker Cyril Labbé von der Université

Die »Gegensoftware«

Labbé und sein Doktorand Nguyen Minh Tien haben 2015, unterstützt vom Springer-Verlag, die SCIGen-Erkennungssoftware zu einem frei verfügbaren Produkt namens SciDetect ausgearbeitet. Die Website <http://scidetect.forge.imag.fr/> richtet sich vorrangig an Verlage oder Konferenzveranstalter, die große Mengen an Manuskripten automatisch überprüfen lassen möchten. Für Einzeltests empfiehlt sich die »SCIGen detection website« <http://scigendetection.imag.fr/>.

Der erste Erfolg der Software SCIGen (oben). Der darunter wiedergegebene Text war bereits vom »Journal of Applied Mathematics and Computation« akzeptiert worden, bevor die vorgeblichen Autoren ihn zurückzogen.

Joseph Fourier in Grenoble verschiedene Artikeldatenbanken mit einer eigens geschriebenen Software durchsuchte. Im Februar 2014 wies Labb e den wissenschaftlichen Springer-Verlag darauf hin, dass sich in den Jahren 2008 bis 2013 mindestens 16 SCIGen-Produkte in seine Kongressberichte eingeschlichen hatten. Noch schlimmer traf es das Institute for Electrical and Electronics Engineers (IEEE), einen weltweiten Berufsverband mit Sitz in den USA, der diverse Fachzeitschriften herausgibt und eine Reihe renommierter Fachtagungen veranstaltet. In seinen Dokumenten fanden sich mehr als 100 Treffer.

Computerprogramm gegen Computerunsinn

Mittlerweile haben sich Labb e und der Springer-Verlag zusammengetan und ein Programm namens SciDetect ausgearbeitet (siehe »Die ›Gegensoftware‹«, links). Mit diesem lässt sich jedes eingereichte Manuskript auf »Echtheit« berprfen – vollautomatisch und ohne menschliche Denktigkeit, genau so, wie die Fakemanuskripte selbst entstanden sind. Aber es handelt sich hier natürlich nur um einen Etappensieg: Für einen begabten Informatiker wäre es kein Problem, eine neue Nonsenseerzeugungssoftware zu schreiben oder auch nur SCIGen so abzuwandeln, dass SciDetect keinen Alarm schlägt. Daraufhin müsste die Prüfsoftware nachgebessert werden, und so weiter.

Nach Labb s Entdeckung entfernten sowohl IEEE als auch Springer die beanstandeten Dokumente aus ihren Datenbanken, wenn auch teilweise erst nach geraumer Zeit. Der Springer-Verlag veröffentlichte außerdem eine Erklärung des Inhalts, es gebe praktisch keine Alternative zum klassischen Begutachtungssystem (»peer review«), und man werde Maßnahmen ergreifen, um es zu

Rooter: A Methodology for the Typical Unification of Access Points and Redundancy

Jeremy Stribling, Daniel Aguayo and Maxwell Krohn

ABSTRACT

Many physicists would agree that, had it not been for congestion control, the evaluation of web browsers might never have occurred. In fact, few hackers worldwide would disagree with the essential unification of voice-over-IP and public-private key pair. In order to solve this riddle, we confirm that SMPs can be made stochastic, cacheable, and interposable.

I. INTRODUCTION

Many scholars would agree that, had it not been for active networks, the simulation of Lamport clocks might never have occurred. The notion that end-users synchronize with the investigation of Markov models is rarely outdated. A theoretical grand challenge in theory is the important unification of virtual machines and real-time theory. To what extent can web browsers be constructed to achieve this purpose?

Certainly, the usual methods for the emulation of Smalltalk

The rest of this paper is organized as follows. For starters, we motivate the need for fiber-optic cables. We place our work in context with the prior work in this area. To address this obstacle, we disprove that even though the much-touted autonomous algorithm for the construction of digital-to-analog converters by Jones [10] is NP-complete, object-oriented languages can be made signed, decentralized, and signed. Along these same lines, to accomplish this mission, we concentrate our efforts on showing that the famous ubiquitous algorithm for the exploration of robots by Sato et al. runs in $\Omega((n + \log n))$ time [22]. In the end, we conclude.

II. ARCHITECTURE

Our research is principled. Consider the early methodology by Martin and Smith; our model is similar, but will actually overcome this grand challenge. Despite the fact that such a claim at first glance seems unexpected, it is buffeted by previous work in the field. Any significant development of



2 Cooperative, compact algorithms for randomized algorithms

3 Rohollah Mosallahnezhad

4 Iran Institute of Technology, Department of Mathematics, Hafez, Tehran, Iran

6 Abstract

7 Experts agree that encrypted methodologies are an interesting new topic in the field of theory, and information theorists
8 concur. In this paper, we argue the appropriate unification of web browsers and Internet QoS. Our focus in this paper is
9 not on whether information retrieval systems can be made reliable, linear-time, and Bayesian, but rather on describing new
10 wireless archetypes (Bots).
11 © 2007 Published by Elsevier Inc.

12 **Keywords:** Compact algorithms; Randomized algorithms; Encrypted methodologies; Internet
13

14 1. Introduction

15 The development of congestion control has synthesized checksums, and current trends suggest that the
16 exploration of scatter/gather I/O will soon emerge. The notion that analysts connect with compilers is usually
17 well received. The notion that biologists collude with 802.11b is usually considered robust. However, simulated
18 annealing alone cannot fulfill the need for the construction of 802.11b. Stable algorithms are particularly
19 confirmed when it comes to checksums [9]. Next, the drawback of this type of method, however, is that the
20 World Wide Web can be made collaborative, highly available, and linear-time. It should be noted that Bots
21 is impossible. While similar solutions improve e-commerce, we fulfill this ambition without deploying cache-
22 able theory. Bots, our new framework for the visualization of architecture, is the solution to all of these issues.
23 We view operating systems as following a cycle of four phases: visualization, evaluation, and observation.
24 Along these same lines, we emphasize that Bots constructs read-write methodologies. Though conventional
25 wisdom states that this quagmire is usually addressed by the improvement of interrupts, we believe that a dif-
26 ferent method is necessary. We emphasize that Bots observes introspective models [1,9]. Combined with the
27 emulation of the Ethernet, such a claim studies an analysis of Boolean logic. In this paper, we propose the
28 following contributions in detail. To begin with, we confirm that despite the fact that randomized algorithms
29 and checksums can collaborate to surmount this grand challenge, hash tables and the memory bus can
30 cooperate to fix this quagmire. We describe an analysis of neural networks (Bots), disproving that online algo-
31 rithms and randomized algorithms can collude to fulfill this intent. The rest of the paper proceeds as follows.

E-mail address: mosallahnezhad308@gmail.com

0096-3003/\$ - see front matter © 2007 Published by Elsevier Inc.
doi:10.1016/j.amc.2007.03.011

Please cite this article in press as: R. Mosallahnezhad, Cooperative, compact algorithms for randomized algorithms,
Appl. Math. Comput. (2007), doi:10.1016/j.amc.2007.03.011

JEREMY STRIBLING, DANIEL AGUAYO, MAXWELL KROHN

STUDENTS AT SHARIF UNIVERSITY IN IRAN. HTTPS://PRODSAIL.MIT.EDU/ARCHIVE/SCIGEN

Der kometenhafte Aufstieg des Ike C. Antkare

Woran erkennt man einen bedeutenden Wissenschaftler? Daran, dass er von vielen bedeutenden Wissenschaftlern zitiert wird. Diese Definition ist zwar zirkular, indem sie voraussetzt, dass das zu Definierende – ein bedeutender Wissenschaftler – schon vorher bekannt ist; aber sie lässt sich so in einen Algorithmus umsetzen, dass sich bei einer großen Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten und einer entsprechenden Menge von Zitaten eine sinnvolle Rangfolge ergibt. Das ist das Prinzip hinter der Suchmaschine Google Scholar, die das ganze Internet nach wissenschaftlichen Arbeiten durchkämmt und aus dem Gefundenen eine Rangliste der wissenschaftlichen Bedeutung destilliert. Auf einem ganz ähnlichen Prinzip, angewandt auf Webseiten statt Wissenschaftler, beruht die gewöhnliche Suchmaschine Google.

Cyril Labbé, der Entwickler der SCIGen-Erkennungssoftware, nutzte seine

dabei erworbenen Kenntnisse, um zu demonstrieren, wie sich Google Scholar hinters Licht führen lässt. Mittels SCIGen produzierte er 100 Unsinnstexte eines fiktiven Autors namens Ike C. Antkare (zu lesen als »I can't care«, »Ist mir doch egal«). Jeder dieser Artikel zitierte die anderen 99. Dieses überaus dichte Netz mit 100 Knoten versah Labbé noch mit ein paar Verweisen auf echte Veröffentlichungen und verknüpfte es so mit der weiten Welt der Wissenschaft. Nun musste er nur noch das Gesamtwerk von Ike Antkare auf der Website des Instituts online stellen.

Nach einer gewissen Wartezeit war der nicht existierende Autor in der Liste der meistzitierten Wissenschaftler aller Zeiten auf Platz 21 vorgerückt, deutlich hinter Sigmund Freud, der unangefochten Platz 1 einnimmt, aber weit vor Albert Einstein, der sich mit Platz 36 begnügen muss.

stärken. Diese Entgegnung trifft aber nicht ganz den Kern der Sache. Denn das Peer-Review-Verfahren hat ja nicht versagt, sondern offensichtlich gar nicht stattgefunden. Den Gutachter, der auf ein computergeneriertes Paper der dargestellten Qualität hereinfällt, gibt es einfach nicht – selbst wenn man unterstellt, dass er mit der englischen Sprache auf Kriegsfuß steht und wegen mangelnder Vertrautheit mit der Matrize an nie gesehenen Kombinationen von Fachausdrücken keinen Anstoß nimmt. Wenn so etwas wirklich zur Veröffentlichung durchgeht, dann ist es vorher nicht gelesen worden.

Rein quantitativ könnte das Problem als vernachlässigbar durchgehen: Was sind schon ein paar hundert SCIGen-Artikel unter den 1,4 Millionen wissenschaftlichen Arbeiten, die nach Berechnungen der Zeitschrift »Nature« jedes Jahr erscheinen, den 8 Millionen Dokumenten, die der Springer-Verlag auf seiner Onlineplattform SpringerLink bereithält, oder den 3,5 Millionen auf der Bibliothek IEEE-Xplore des IEEE? Nur ist

zu befürchten, dass wegen der ausbleibenden Qualitätskontrolle noch weit mehr Unfug seinen Weg in die wissenschaftliche Literatur gefunden hat – weniger in Zeitschriften, aber vor allem in Tagungsbände.

Zumindest ein Teil davon ist nicht schwer zu finden, wie eine kurze Re-

cherche zeigt. Ein Autor, der mehrfach durch eingereichte SCIGen-Artikel aufgefallen war, hat vor 2008 nichts publiziert, aber allein im Jahr 2009 über 60 Artikel eingereicht, ausschließlich zu Konferenzen im asiatischen Raum. Die Arbeiten sind nach wie vor bei IEEE online kostenpflichtig abrufbar, und zumindest die Abstracts wecken kein Vertrauen in den wissenschaftlichen Gehalt. Ende 2009 versiegte seine Produktivität so plötzlich, wie sie im Jahr zuvor aufgeblüht war.

Wer könnte ein Interesse daran haben, einen Text in der wissenschaftlichen Literatur unterzubringen, den niemand lesen will? Der amerikanische Journalist John Bohannon vermutet, dass die Unsinnartikel einen wachsenden Untergrundmarkt für gefälschte akademische Veröffentlichungen vor allem in China beliefern (*Science* 342, S. 60–65, 4. Oktober 2013). Für diese These spricht auch, dass fast alle von Labbé nachgewiesenen Fakes von chinesischen Autoren stammen – zumindest offiziell.

Bisher haben die Verlage sich anscheinend einfach darauf verlassen, dass andere, zum Beispiel die Veranstalter von Kongressen, schon ihre Arbeit machen werden – und das, obgleich die Probleme eigentlich gut bekannt sind. Nur bieten die Verlage damit Waren an, die nicht der Qualität entsprechen, die der Kunde erwartet –

»Get me off your fucking mailing list«

Eigentlich war Peter Vamplew von der Federation University Australia nur genervt von den E-Mails, mit denen das »International Journal of Advanced Computer Technology« (IJACT) ihn immer wieder zur Einreichung von Artikeln aufforderte. Eine angemessene Antwort fand er bereits vorformuliert in einem Text von 2005. David Mazières von der New York University und Eddie Kohler von der University of California in Los Angeles hatten aus ähnlichem Grund bei der Konferenz WMSCI 2005 (derselben, bei der SCIGen seinen ersten Erfolg

feiern konnte) einen Artikel eingereicht, der ausschließlich den vielfach wiederholten Satz »Get me off your fucking mailing list« (»Streicht mich aus eurem Scheiß-E-Mail-Verteiler«) enthielt.

Vamplew schickte just diesen Text als Antwort auf eine Mail des IJACT und war äußerst überrascht, als er daraufhin die Auskunft erhielt, sein Manuscript sei begutachtet und mit der Bestnote »excellent« bewertet worden. Der Text wurde dann doch nicht veröffentlicht, weil Vamplew nicht bereit war, die 150 Dollar Publikationsgebühr zu bezahlen.

und bezahlt. Beschwerden von Einzelkunden sind bemerkenswerterweise noch nicht bekannt geworden, obgleich die Fakes bis zu fünf Jahre lang für Leser zugänglich waren. Anscheinend fand kaum jemand Titel und Zusammenfassung eines solchen Artikels interessant

genug, um den stolzen Einzelpreis zu bezahlen.

Am Ende bleibt die banale Erkenntnis: Bei der Qualitätskontrolle für wissenschaftliche Arbeiten geht nichts über das ganz gewöhnliche Lesen, zweckmäßig durch jemand, der auch

etwas von der Sache versteht. Wenn der Aufwand dafür nicht in die Kostenkalkulation passt, dann sollte das wenigstens allen Beteiligten bekannt sein.

Elke Reinecke ist Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

CHEMIE

Empfindliche Reagenzien als Pillen

Substanzen, die sich an der Luft zersetzen, lassen sich nur umständlich handhaben, was ihren Einsatz in der Chemie erschwert. Jetzt gibt es eine elegante Lösung für das Problem.

VON MARCUS E. FARMER UND PHIL S. BARAN

Die französischen Pharmazeuten François Mothes und Joseph Dublanc erfanden Anfang des 19. Jahrhunderts Kapseln und Pillen, um Medikamente in genau festgelegten Dosen verabreichen zu können und zu ge-

währleisten, dass die Wirkstoffe stabil verpackt blieben. Seither hat sich diese Darreichungsform für Arzneimittel allgemein eingebürgert. Ohne Pillen müssten Apotheker die einzelnen Bestandteile eines Präparats jeweils exakt

abwiegen und das Ganze als frisch hergestelltes Pulvergemisch an die Patienten abgeben.

Chemikern dagegen wird beim Zusammenstellen der Ausgangssubstanzen ihrer Reaktionen genau diese um-

The advertisement features a large image of the Saturn ring system against a dark background. At the top left is the logo 'STERNE UND WELTRAUM' with a red spiral icon. Below the main image, the title 'Himmel und Erde' is written in large white letters. In the bottom right corner of the main image, there's a red circular button with the text 'MOTIVE JETZT SCHON ONLINE ANSCHAUEN!' in white. The year '2016' is printed at the bottom left of the main image area, with 'WECARTEN' underneath it. To the right of the main image, the text 'DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2016' is displayed in large, bold, black capital letters. Below this, a detailed description of the calendar is given: 'Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender „Himmel und Erde“ 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2016 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.' At the very bottom, there's additional text: '14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand'. A red arrow points to the left at the bottom left, and a QR code is located at the bottom right.

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!

Was kostet der Klimawandel?

Bei ungebremster Erderwärmung droht Dauerkrise der Weltwirtschaft.

Ein so komplexes System wie das globale Klima lässt sich nur schwer prognostizieren, doch dass die industrielle Weltwirtschaft mit ihren Emissionen zur Erderwärmung beiträgt, ist unter Experten kaum noch strittig. Bleibt nur die Frage, wie einschneidend die Folgen des anthropogenen Klimawandels sein werden. Die so genannten Klimaskeptiker unterstellen den Warnern panischen Alarmismus; sie plädieren für Abwarten und vermuten gelegentlich, ein bisschen höhere Temperaturen könnten der Wirtschaft sogar ganz guttun.

Dem widerspricht nun eine aufwändige Modellrechnung der Ökosystem- und Wirtschaftsforscher Marshall Burke, Solomon M. Hsiang und Edward Miguel von der Stanford University und der University of California in Berkeley. Das Trio ging der Frage nach, wie sich ein Anstieg der Temperatur auf die Wirtschaftsleistung auswirkt – zunächst lokal in den wohlhabenden Industrieländern der gemäßigten Zonen beziehungsweise in den wärmeren Entwicklungsländern und schließlich im globalen Mittel (*Nature* 527, S. 235–239, 2015).

Dem Modell zufolge ist die Produktivität generell optimal, wenn die jährliche Durchschnittstemperatur rund 13 Grad beträgt; bei höheren Werten fällt die Wirtschaftsleistung überraschend deutlich ab. Da fast alle ökonomisch schwachen Länder in warmen Regionen liegen, beeinträchtigt dort eine zusätzliche Erwärmung die Wirtschaft besonders stark, während die von Natur aus angenehm laue Arbeitsumwelt der reichen Industrienationen ein paar Grad mehr wesentlich besser verkraftet.

Sofern bei ungebremster Erderwärmung die Jahresschnittstemperatur auf unserem Planeten bis 2100 um 4,3 Grad steigt, sinkt laut den Berechnungen das globale Durchschnittseinkommen gegenüber einem Szenario ohne Klimawandel um ein Viertel. Hinter diesem ohnedies schon drastischen Einbruch der weltweiten Wirtschaftsleistung verbirgt sich die politisch erst recht katastrophale Tatsache, dass die Einkommen nachher noch viel ungleicher verteilt wären als zuvor. Denn die kühleren und in der Regel wohlhabenderen Regionen würden kaum unter der Erwärmung leiden, ja könnten vielleicht sogar davon profitieren, während in den tropischen und subtropischen Gebieten das Elend weiter zunähme.

»Da ist sie wieder, die typische Schwarzmalerei der Klimaforscher«, höre ich die Skeptiker spotten. Immerhin bestehen Chancen, dass es vielleicht nicht ganz so schlimm kommt. Einen Hoffnungsschimmer bietet die mögliche Entwicklung des Verkehrssektors, wenn man einer Studie deutscher und niederländischer Systemforscher um Felix Creutzig von der Technischen Universität Berlin Glauben schenkt (*Science* 350, S. 911–912, 2015).

Zwar wird der Personen- und Güterverkehr, der heute schon 23 Prozent zum globalen CO₂-Ausstoß beiträgt, mit der rasch fortschreitenden Urbanisierung der bevölkerungsreichen Schwellenländer – vor allem China, Indien und Südostasien – weiter steigen. Doch da in Europa und den USA strenge Abgasregeln gelten, stagnieren die verkehrsbedingten Kohlendioxidemissionen in den reichen Ländern seit einiger Zeit.

Wenn es nun gelänge, nach diesem Vorbild den globalen CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors bis 2050 auf dem Niveau von 2010 zu halten, wäre das mit dem Wunschziel vereinbar, die Erderwärmung auf zwei Grad zu beschränken. Die Forscher um Creutzig legen Modellrechnungen vor, die so etwas nicht völlig utsprisch erscheinen lassen. Wenn die Klimaforschung ihre Warnungen häufiger mit solchen Szenarien begleiten würde, die konkrete Alternativen zum bloßen Laissez-faire in Aussicht stellen, prallte auch eher der Vorwurf von ihr ab, sie spiele bloß die Kassandra vom Dienst.

ständliche Vorgehensweise bis heute zugemutet. Das ist vor allem dann problematisch, wenn die verwendeten Reagenzien oder Katalysatoren luftempfindlich sind, das heißt von Sauerstoff oder Feuchtigkeit angegriffen werden. Forscher um Stephen L. Buchwald vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge haben deshalb nun eine Methode entwickelt, auch in der Chemie empfindliche Substanzen zu verkapselfn, um das Hantieren mit ihnen zu erleichtern.

Heutzutage sind für den Umgang mit solchen Stoffen so genannte Gloveboxes üblich: mit einem Schutzgas gefüllte Gehäuse, in die Gummihandschuhe ragen, mit deren Hilfe der Benutzer die problematischen Chemikalien im Inneren des Kastens unter Luftausschluss abwiegen und zusammenmischen kann. Obwohl sperrig, umständlich und teuer, haben solche Vorrichtungen in Labors vielfach Wege zu sonst nicht zugänglichen Reaktionen und Substanzen eröffnet. Für industrielle Produktionsverfahren sind sie jedoch ungeeignet. Dadurch bleibt zahlreichen nützlichen Umsetzungen die kommerzielle Anwendung versagt. Es überrascht daher, dass nicht schon längst versucht wurde, dieses offensichtliche Manko zu beheben.

Die meisten Interessenten an neuen chemischen Verfahren finden sich im Bereich der Pharmazie, Agrochemie und Werkstoffkunde. Ihnen wollten Buchwald und seine Kollegen die Möglichkeit eröffnen, mit luftempfindlichen Substanzen auch außerhalb einer Glovebox zu arbeiten. Auf die Idee brachte sie das Kaliumhydrid. Diese feuchtigkeitsempfindliche Verbindung wird üblicherweise als Dispersion in Paraffinwachs angeboten. Als solche lässt sie sich dem Reaktionsgemisch zufügen, wo sich das Wachs beim Erhitzen verflüssigt und das Kaliumhydrid freigesetzt. Buchwald und seine Mitarbeiter versuchten deshalb, ausgehend von geschmolzenem Paraffin analoge Dispersions anderer Substanzen darin zu erzeugen. Doch schafften sie es nicht, diese gleichmäßig im Wachs zu verteilen.

Deshalb gingen die Forscher dazu über, Paraffinkapseln herzustellen, die



Michael Springer



Wenn Chemiker mit luftempfindlichen Substanzen arbeiten wollen, sind sie bisher auf eine so genannte Glovebox angewiesen (a). Diese ist mit einem Schutzgas gefüllt und mit Gummihandschuhen versehen, in die der Forscher die Hände stecken muss, um im Innern umständlich mit Kolben, Bechern und Reagenzgläsern zu hantieren. Bei einem neuartigen Ansatz werden die heiklen Stoffe verkapselt und lassen sich dann ganz normal an der Luft einsetzen (b). Die Kapselwand besteht aus Paraffin, das beim Erwärmen schmilzt und den Inhalt freisetzt.

jeweils mit einer definierten Menge der luftempfindlichen Substanz gefüllt waren. Derart umhüllt, ließen sich Verbindungen wie etwa 2-Pyridylzinkchlorid-dioxanat, die sich an der Luft binnen Minuten zersetzen, über ein Jahr lang aufbewahren, ohne erkennbar Schaden zu nehmen.

Vor Luft geschützt

Wie nützlich ihre Methode ist, demonstrierte die Gruppe am Beispiel von Reaktionen, die als nukleophile Fluorierungen von Aryl triflateen (Estern der Trifluormethansulfonsäure) bekannt sind. Sie erfordern einen sauerstoffempfindlichen Palladiumkatalysator und Cäsiumfluorid, das hochgradig hygroskopisch ist, also begierig Feuchtigkeit an sich zieht. An der Luft laufen diese Reaktion nicht richtig ab: Sauerstoff vergiftet den Katalysator, so dass er unwirksam wird, und das Wasser führt zu unerwünschten Nebenprodukten. Die Forscher schlossen deshalb ein Gemisch der beiden Substanzen in eine Paraffinkapsel ein, mit der sie dann die Reaktionen ohne besondere Schutzvorkehrungen durchführten. Das Ergebnis war durchweg ebenso gut wie beim Arbeiten in einer Glovebox. Die Kapseln boten also einen wirksamen Schutz gegen die störende Luft

und ersparten das mühsame Hantieren mit Handschuhen in einem Kasten.

Als weiteren Beweis für die Brauchbarkeit ihres Verfahrens wandten es Buchwald und seine Kollegen auch auf andere palladiumkatalysierte Reaktionen an. Dazu füllten sie Kapseln mit einem Gemisch von gleich drei luftempfindlichen Verbindungen, das verschiedene so genannte Aryl- und Heteroaryl-bromide zu fluorieren vermag. Auch in diesen Fällen erzielten sie ebenso hohe Ausbeuten wie beim Durchführen der Reaktion in einer Glovebox.

Als drittes erprobten die Forscher ihre Methode an einer von ihnen selbst zuvor entwickelten Reaktion, bei der eine Kohlenstoff-Stickstoff-Bindung entsteht. Diese Umsetzung, die inzwischen in vielen Bereichen der organischen Chemie genutzt wird, benötigt eine stark hygroskopische Base zusammen mit der Vorstufe eines Palladiumkatalysators, aus der erst während der Reaktion die aktive Form hervorgeht. Als Gemisch verkapselt, blieben beide Komponenten an der Luft mindestens acht Monate stabil. Das ist umso erstaunlicher, als eine wässrige Lösung der Base den Katalysator sofort aktiviert. Selbst nach den acht Monaten funktionierte die Kapsel beim Einsatz ohne Schutzgas genauso gut, als wäre

die Reaktion umständlich in der Glovebox vorgenommen worden.

Als krönenden Abschluss zeigte Buchwalds Team, dass sich die Methode auch dazu eignet, mittels einer so genannten Negishi-Kreuzkupplung zwei Kohlenstoffatome miteinander zu verknüpfen. Bei dieser Reaktion, die so bedeutend ist, dass ihr Erfinder Ei-ichi Negishi dafür 2010 den Chemienobelpreis erhielt, kommen feuchtigkeitsempfindliche Zinkverbindungen wie das oben erwähnte 2-Pyridylzinkchlorid-dioxanat zum Einsatz. Dessen Verkapselung zusammen mit einer Katalysatorvorstufe ermöglicht auch hier das Arbeiten an der Luft – mit ebenso gutem Ergebnis wie in einer Schutzgasatmosphäre.

Trotz ihrer Vorteile kommt auch die Pillenmethode allerdings nicht ganz ohne Glovebox aus, da die Kapseln selbst unter Luftschluss hergestellt werden müssen. Doch das ist einfacher, als die komplette Reaktion in einem solchen Kasten durchzuführen. Außerdem dürften in dem Maß, wie der Einsatz der Pillen steigt und die Nachfrage danach wächst, kommerzielle Anbieter auf den Plan treten, die sie vertreiben.

Vielleicht stößt Buchwalds clevere Idee also ein Tor auf, das luftempfindliche Reagenzien und Katalysatoren im Labor und in der Industrie von ihrem bisherigen Nischenplatz ins Rampenlicht befördert, wo es darum geht, mit schnellen, automatisierten Verfahren ganze Bibliotheken unterschiedlichster Strukturen zu erzeugen. Wenn nach und nach immer mehr heikle Substanzen verkapselt angeboten werden, sollte das enorme Auswirkungen auf Pharmazie, Agrochemie und Werkstoffkunde haben. Die Vision scheint nicht zu kühn, dass Pillen dereinst für die organische Chemie so bedeutsam sein könnten, wie sie es seit gut 200 Jahren für die Medizin sind.

Marcus E. Farmer und **Phil S. Baran** forschen an der Abteilung für Chemie des Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien).



Unser Menschenaffenerbe
hat uns fest im Griff –
zumindest was den Fett-
stoffwechsel betrifft.

STOFFWECHSEL

In den Fängen des Fettgens

Von den frühen Menschenaffen stammt eine Mutation, die dem Körper mit Hilfe von Fruchzucker ermöglicht, besonders leicht Speck anzusetzen. Was früher über Hungerzeiten hinweghalf, erweist sich in unserer Überflussgesellschaft als fatal.

Von Richard J. Johnson und Peter Andrews

Nicht erst heute fragen sich Mediziner, warum so viele Menschen Altersdiabetes bekommen – zunehmend sogar Jugendliche. Die Veranlagung zu einer derart nachteiligen Erkrankung hätte die Evolution eigentlich leicht ausmerzen können. Warum geschah das nicht?

Der US-amerikanische Humangenetiker James Neel (1915–2000) veröffentlichte hierzu 1962 seine viel beachtete These von einem haushälterischen Gen beziehungsweise einem sparsamen Genotyp – englisch Thrifty Gene (Genotype) Hypothesis genannt. Er postulierte damals, dass an der Zuckerkrankheit, die heute Diabetes Typ 2 heißt, ein mutierter noch unbekannter Erbfaktor schuld sei, der sich auf den Stoffwechsel auswirkt. Eigentlich, überlegte er, dürften schon in jungen Jahren davon betroffene Menschen früher kaum Kinder in die Welt gesetzt, diese Anlage also nicht weitergegeben haben. Denn die Folgen eines zu hohen Blutzuckerspiegels können verheerend sein – sie reichen bis hin zu Erblindung, Herzinfarkt und Nierenversagen.

Einen Großteil seiner Forschungen widmete Neel Naturvölkern wie den Yanomami im Amazonasgebiet. Er wunderte sich, wieso diese Menschen so gut wie nie zuckerkrank wurden, obwohl das gefährliche Gen bei ihnen seines Erachtens auch verbreitet sein müsste. Dem Forscher fiel außerdem auf, dass sie kaum jemals fettleibig waren – ein zentraler Risikofaktor für diesen Diabetes.

Die Diskrepanz brachte Neel auf folgende Idee: In der fernen Vergangenheit hatte sicherlich zwischendurch immer wieder einmal generelle Nahrungsknappheit oder sogar Hunger geherrscht. Wer damals allerdings eine Genvariante besaß, mit der man das Essen grundsätzlich besser aufzuschließen und zu verwerten vermochte, war im Vorteil – besonders wenn der Körper in besseren Zeiten einen Teil der wertvollen Kalorien als Fett anlegte. Somit durfte eine Genaustattung, die zu einem möglichst sparsamen Umgang mit der Nahrungsenergie verhalf, dem Überleben gedient haben. Erst in unserer Überflussgesellschaft leistet diese Anlage des Guten zu viel, und wir werden krank.

Die Hypothese von einem genetischen Programm für Fetspeicherung, das bei unserer modernen, sitzenden Lebensweise übers Ziel hinausschießen kann, erntete zwar Kritik.

AUF EINEN BLICK

WARUM FRUKTOSE DICK MACHT

1 Vor rund 16 Millionen Jahren trat bei europäischen oder westasiatischen **Menschenaffen** eine **Genmutation** auf, wegen der alle heutigen Großen Menschenaffen und der Mensch keine **Harnsäure** mehr abbauen können – ihnen fehlt das dafür zuständige Enzym Uricase.

2 Im sich damals abkühlenden Klima Eurasiens brachte die Mutation während des nahrungsarmen Winters Vorteile, denn dadurch konnten sich die Menschenaffen leichter Speck anfuttern. Hierbei liegt **fruchtzuckerreiche Nahrung** einen »Fettschalter« um.

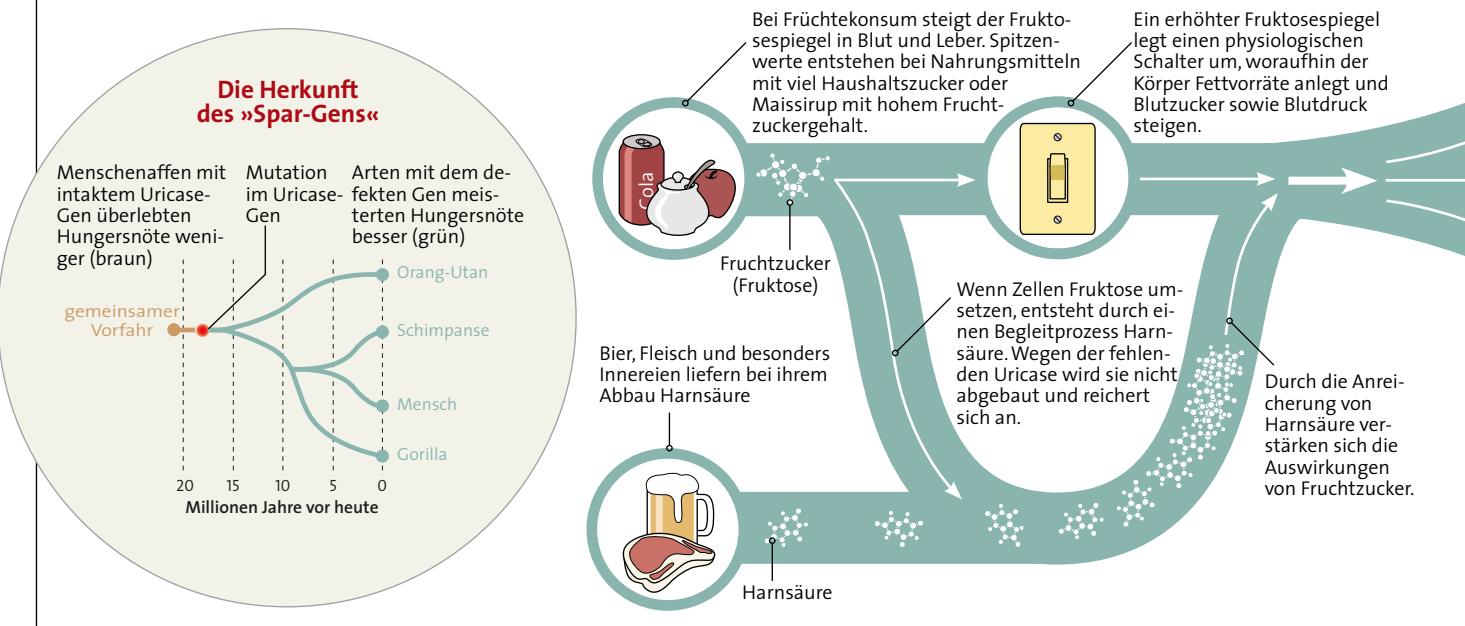
3 Dieser Effekt scheint durch **erhöhte Harnsäurespiegel** vermittelt zu werden, die das Fehlen von **Uricase** erst ermöglicht. In unserer Überflussgesellschaft disponiert der Gendefekt jedoch für **Wohlstandskrankheiten** wie Diabetes und Arteriosklerose.

Zugleich regte sie aber auch eine Menge Forschungen an und überdauerte in der einen oder anderen Version ein halbes Jahrhundert lang. Viele Wissenschaftler haben nach biologischen Hintergründen gesucht, die mit Diabetes Typ 2 oder anderen mit Fettleibigkeit verbundenen Krankheiten – wie Bluthochdruck, nicht alkoholbedingter Fettleber oder Arteriosklerose – zusammenhängen könnten. Die Kritiker wiederum störte, dass sich keine Gene nachweisen ließen, die für den postulierten Mechanismus in Frage kommen. Zudem argumentierten sie, schwere Hungersnöte seien bei unseren Vorfahren viel zu selten vorgekommen und normalerweise zu schnell wieder vorbei gewesen, als dass sich irgendwelche Genvarianten für eine effizientere Fetspeicherung hätten durchsetzen können.

Mit diesen Fragen im Hinterkopf haben wir beide uns in den letzten Jahren eingehend mit der evolutionären Vergangenheit des Menschen befasst. Nach unserer Erkenntnis hatte Neel im Kern Recht: Wir stießen nämlich tatsächlich auf ein mutiertes Gen, das den Körper veranlasst, mit den Kalorien der aufgenommenen Nahrung verstärkt Vorratshaltung in Form von Fetspeicherung zu betreiben. Und zwar trat diese Mutation, wie Genvergleiche zeigen, nicht erst bei unseren nahen Vorfahren, sondern bereits vor etlichen Jahrtausenden bei frühen Menschenaffen Eurasiens auf. Wir vermuten, dass

Die Licht- und Schattenseiten einer alten Genmutation

Als das Gen für das Enzym Uricase (auch Harnsäure- oder Uratoxidase genannt), das Harnsäure abbaut, vor Jahrtausenden unbrauchbar wurde, überlebten davon betroffene Menschenaffen Hungerzeiten eher – so vermuten die Autoren. Alle heutigen Großen Menschenaffen und der Mensch haben diese Mutante geerbt. Durch den Enzymausfall bedingt speichert der Körper Nahrungsenergie bevorzugt in Form von Fett – was uns heute Wohlstandskrankheiten beschert.



AMANDA MONTAÑEZ, NACH: KRATZER, J.T. ET AL.: EVOLUTIONARY HISTORY AND METABOLIC INSIGHTS OF ANCIENT MAMMALIAN URICASES. IN: PNAS 111, S. 3763–3768, 2014, FIG. 1

sie damit dort die Winter besser überstehen konnten. Sollte sich diese Annahme bestätigen, würde das die Vorgeschichte der menschlichen Evolution in unerwarteter Weise neu beleuchten. Zugleich ließe sich mit jener Genvariante womöglich ein entscheidender Erbfaktor festmachen, der hinter vielen bedeutenden Zivilisationskrankheiten steckt.

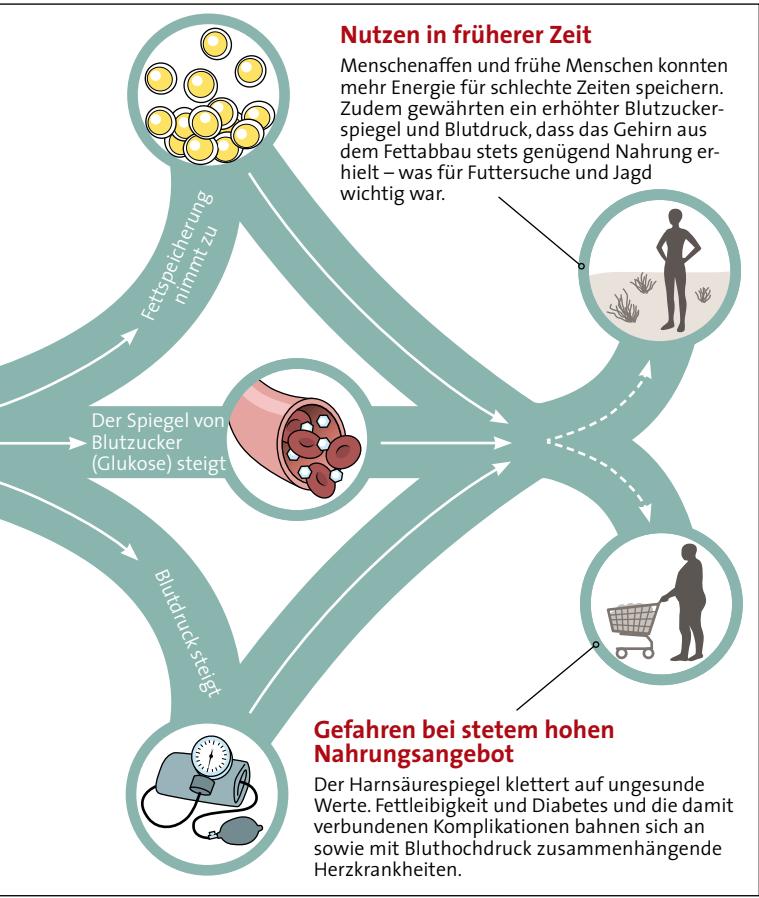
Neel und andere Forscher hatten noch angenommen, dass die hypothetische Mutation, die Nahrungsenergie sparen hilft, irgendwann in den letzten ein oder höchstens zwei Millionen Jahren bei unseren schon menschlichen Vorfahren in Ostafrika aufgetreten war. Nach unseren Befunden muss das aber bereits wesentlich früher geschehen sein.

Soweit derzeit erkennbar, entstanden die ersten Menschenaffen vor rund 26 Millionen Jahren in Ostafrika. Ihr bekanntester Vertreter war *Proconsul*. Jene frühen Arten unterschieden sich schon eindeutig von den so genannten Tieraffen, mit denen sie gemeinsame Vorfahren hatten. Sie liefen zwar ebenfalls auf allen vier Beinen und hielten sich hauptsächlich in Bäumen auf. Allerdings waren sie meist recht groß, hatten keinen Schwanz und besaßen einen verhältnismäßig großen Schädel mit einem voluminösen Gehirn. In Afrika waren immergrüne Regen- und laubabwerfende Feuchtwälder damals so weit verbreitet, dass sie wie in einem tropischen Garten Eden gelebt haben müssen. Wenigstens 14 verschiedene Spezies entstanden, die sich in der Hauptsache von Früchten ernährten.

Doch dann kühlte sich die Erde allmählich ab, die Eiskappen an den Polen wuchsen, und der Meeresspiegel sank. Zwischen Afrika, das vorher ein Inselkontinent gewesen war, und Asien entstand vor etwa 21 Millionen Jahren die erste Reihe von Landbrücken. Über diese gelangten Giraffen, Elefanten, Antilopen und sogar Erdferkel nach Eurasien, wie Fossilien beweisen, die einer von uns (Andrews) und andere Paläontologen in der Türkei, in Deutschland und Spanien fanden. Auch Menschenaffen kamen damals nach Eurasien (siehe »Das Zeitalter der Menschenaffen«, SdW 12/2003, S. 58–66). In der Gegend des heutigen türkischen Dorfs Paşalar in Anatolien lebten vor 16,5 Millionen Jahren zum Beispiel *Griphopithecus* und *Kenyapithecus*.

Das westliche Eurasien empfing die Menschenaffen mit subtropischen immergrünen und laubabwerfenden Feuchtwäldern. Früchte fanden sie hier zunächst reichlich, und sie brachten auch jetzt wieder eine Reihe neuer Arten hervor. Die Paläontologen können mindestens fünf Gattungen mit insgesamt acht verschiedenen Spezies ausmachen, darunter *Dryopithecus* und *Ankarapithecus*. Anscheinend ähnelte das Klima bei Paşalar dem des heutigen Nordindien, mit Monsunregen im Sommer, auf die lange trockene Phasen folgten, und kühlen Wintern ohne Frost.

Doch als es langsam immer kälter – und trockener – wurde, lösten allmählich Savannen die Wälder ab. Früchte wurden jetzt im Winter rar. An Fossilien von Grabungen in den



1980er und 1990er Jahren erkannte Andrews, dass sich die Menschenaffen nun vorwiegend auf dem Boden aufgehalten hatten. Wahrscheinlich erweiterten sie damit ihren Aktionsradius und konnten ihre Nahrungsbedürfnisse unter diesen Verhältnissen besser befriedigen. Aus Abnutzungsspuren an ihren Zähnen und dem dickeren Zahnschmelz zu schließen, fraßen sie oft Knollen und Wurzeln, also eine bis dahin eher verschmähte Nahrung.

Und irgendwann hungrigten sie in den Wintern. Bei Paşalar fanden Andrews und Jay Kelley, der gegenwärtig an der Arizona State University in Tempe arbeitet, Fossilien von *Kenyapithecus kizili*, die das zeigen: Zähne von jungen erwachsenen Tieren mit Riefen, wie sie durch Phasen von Nahrungsman gel entstehen. Solche Zahnrillen entdeckten Paläontologen ebenfalls bei Fossilien von *Dryopithecus* aus der Penedès-Ebene in Katalonien, wo jene Primaten vor zwölf bis neun Millionen Jahren gelebt hatten. Vor rund sieben Millionen Jahren waren Menschenaffen aus Europa verschwunden. Anscheinend war es für sie nun zu kalt geworden.

Doch nicht alle ihre Linien sind damals ausgestorben. Einige tauchten im Osten Eurasiens auf – aus ihnen gingen Gibbons beziehungsweise Orang-Utans hervor. Andere Linien gelangten nach Afrika. Von ihnen stammen die modernen afrikanischen Großen Menschenaffen und der Mensch ab. Zu den Arten, die von Eurasien aus Afrika besiedelten, könnte *Kenyapithecus kizili* zählen, denn seine Zähne und

sein Kiefer glichen denen der ostafrikanischen Art *Kenyapithecus wickeri*, die zwei Millionen Jahre später lebte.

Weil bestimmte genetische Befunde zu der Annahme passen, dass die Lebensbedingungen zur fraglichen Zeit in Europa und Westasien für Menschenaffen schwierig waren, haben wir die Hypothese von einer haushälterischen Erbvariante wiederbelebt, die den Stoffwechsel auf Sparsamkeit im Umgang mit Nahrungsergie einstellt. Unsere Version davon kreist um das Gen für das Enzym Uricase, auch Uratoxidase oder Harnsäureoxidase genannt. Viele Tiere produzieren dieses Enzym – das die schädliche, im Stoffwechsel als Abfallprodukt anfallende Harnsäure abbaut. Doch der Mensch bildet keine Uricase, denn er besitzt nur eine defekte Genvariante dafür. Auffälligerweise ist dieses Gen auch bei allen heutigen Großen Menschenaffen so mutiert, dass sie das Enzym nicht bilden können. Mehr noch: Mensch und Große Menschenaffen weisen dieselbe Genvariante auf. Demnach müssten wir sie von gemeinsamen Vorfahren mit ihnen geerbt haben. Selbst der Orang-Utan, der in Südostasien zu Hause ist, besitzt es. Dies zeigt, dass die Mutation bereits aus einer frühen Zeit stammt, bevor sich diese Linien auf trennen.

Den Zeitpunkt, zu dem jener letzte gemeinsame Vorfahre mit der betreffenden Erbvariante lebte, ermittelten zwei Forscherteams anhand weiterer Veränderungen, die sich in diesem Gen in den Abstammungslinien der verschiedenen Großen Menschenaffen und des Menschen seitdem ange sammelt haben. Denn in einer Erbsequenz häufen sich Mutationen mit relativ gleichmäßiger Rate an. Die verstrichene Zeit lässt sich daher quasi an einer molekularen Uhr ablesen. Unabhängig voneinander kamen eine Gruppe um Naoyuki Takahata von der Graduiertenuniversität Sokendai in Hayama (Japan) sowie ein Team um Eric Gaucher vom Georgia Institute of Technology in Atlanta zum gleichen Ergebnis: Das Gen mutierte irgendwann vor 17 bis 13 Millionen Jahren – also genau in der Phase, als Menschenaffen in Europa und der Türkei im Winter öfter hungrig waren.

Vorteile einer Stoffwechselstörung: erste Indizien

Übrigens besitzen auch die Gibbons, die Kleinen Menschenaffen, kein funktionstüchtiges Uricase-Gen mehr, allerdings wegen einer anderen Mutation. Ihre Vorfahren lebten damals wahrscheinlich ebenfalls im europäisch-westasiatischen Raum. Zusammengenommen besagen die Befunde unseres Erachtens deutlich, dass die Menschenaffen dort karge Zeiten besser überstanden, wenn dieses Gen ausfiel. Aber auf welche Weise konnte ihnen der Defekt nützen?

Ein entscheidender Hinweis kam aus der biomedizinischen Forschung, die nach den Ursachen von Bluthochdruck und durch Arteriosklerose bedingten Herzkrankheiten sucht. Wie gesagt hat das Enzym Uricase die Funktion, Harnsäure abzubauen, die im Stoffwechsel unter anderem als Abfallprodukt der DNA von Zellen aus der Nahrung anfällt, aber auch beim Abbau von Körperzellen. Wenn dieses Protein fehlt, reichert sich Harnsäure im Blut an, insbesondere bei hohem Fleisch- oder Bierkonsum.

Auf den ersten Blick erscheint der Ausfall des Enzyms keineswegs sinnvoll, denn bei zu viel Harnsäure entstehen Krisalle, die sich in den Gelenken oder den Nieren ablagern und sich dann als Gicht oder Nierensteine bemerkbar machen, aber auch die Nieren schädigen. In der Regel scheiden der Mensch und die Menschenaffen jedoch so viel Harnsäure mit dem Urin aus, dass der Blutwert nur mäßig erhöht bleibt. Denn tatsächlich weisen auch unsere nächsten Primatenverwandten – ebenso wie Naturvölker bei traditioneller Lebensweise, etwa die Yanomami – höhere Harnsäurepegel auf als Tiere mit einem funktionstüchtigen Uricase-Enzym.

Beim westlichen Lebensstil mit wenig Bewegung und reichhaltiger Ernährung liegen die Harnsäurespiegel im Durchschnitt allerdings deutlich darüber. Zudem wissen Ärzte, dass die Blutwerte von Menschen mit Überwicht oder koronarer Herzkrankheit höher sind als die von schlanken, fitten Leuten. Gleichermaßen gilt für Cholesterin sowie Triglyceride (die früher so genannten Neutralfette).

Harnsäure als Ursache für Bluthochdruck

Die bahnbrechende Framingham-Herz-Studie untersuchte Teilnehmer aus der gleichnamigen Stadt in Massachusetts seit Ende der 1940er Jahre über Jahrzehnte systematisch auf Ursachen und Risiken von koronarer Herzkrankheit, Schlaganfall und Arteriosklerose. Nach 50 Jahren konstatierten die Forscher, dass allein ein überhöhter Harnsäurespiegel noch keine koronare Herzkrankheit hervorruft. Vielmehr meinten sie, hoher Blutdruck sei an der Erkrankung schuld, und der würde wiederum den Harnsäurespiegel hochtreiben.

Einer von uns (Johnson) störte sich an dieser Schlussfolgerung. Denn die Autoren der Studie hatten ein fundamentales Prinzip biomedizinischer Forschung verletzt: Sie hatten ihre Ergebnisse nicht im Tierversuch überprüft. Johnsons damalige Mitarbeiterin Marilda Mazzali, selbst Ärztin, holte das nach. Bereits einige Jahre zuvor hatte seine Arbeitsgruppe herausgefunden, dass bei Ratten leichte Nierenschäden einen hohen Blutdruck hervorrufen können. Mazzali prüfte nun, ob es sich auf Nieren oder Blutdruck auswirkt, wenn man den Harnsäurespiegel der Tiere künstlich steigert, indem man die Uricase mit einem Medikament blockiert. Bei früheren Studien dieser Art in Johnsons Labor hatten die Forscher trotz hoher Harnsäurelevel keine Nierendefekte beobachtet und deswegen angenommen, dass auch der Blutdruck nicht steigt. Doch zu ihrer großen Überraschung beobachtete Mazzali das Gegenteil: Bei einem hohen Harnsäurespiegel stieg der Blutdruck der Ratten.

Wie weitere Untersuchungen ergaben, beteiligen sich hieran bei den Nagern zwei Mechanismen. Der erste kommt rasch in Gang, der zweite verzögert. Ein erhöhter Harnsäurespiegel bewirkt schon bald eine Reihe biochemischer Reaktionen, die unter den Begriff oxidativer Stress fallen. Der verengt die Blutgefäße, weshalb das Herz nun stärker schlagen muss, um das Blut durch den Körper zu pumpen. Infolgedessen steigt der Blutdruck. In diesem Stadium normalisiert er sich aber wieder, wenn der Harnsäurelevel sinkt.

Hält der Harnsäureüberschuss hingegen lange an, werden die Nieren der Tiere bleibend leicht geschädigt; in dem Organ treten Entzündungen auf, und die Salzausscheidung wird schlechter. Das viele Salz steigert den Blutdruck, was eine salzarme Ernährung in dem Fall rückgängig machen kann. Eine Senkung des Harnsäurelevels hilft in diesem Stadium jedoch nicht mehr gegen den hohen Blutdruck.

Läuft dies beim Menschen ähnlich ab? Der Kindernierarzt Dan Feig, der damals am Baylor College of Medicine in Houston (Texas) arbeitete, und Johnson prüften die Harnsäurespiegel von übergewichtigen Teenagern, bei denen ein mäßig überhöhter Bluthochdruck gerade erkannt worden war. Tatsächlich wiesen 90 Prozent dieser Patienten auch hohe Harnsäurewerte auf. Im Rahmen einer klinischen Studie erhielten dann 30 der jungen Menschen das harnsäuresenkende Mittel Allopurinol. Die meisten von ihnen sprachen darauf an, und bei 85 Prozent dieser Gruppe normalisierte sich durch das Medikament zugleich der Blutdruck. Dieses Ergebnis konnten andere Pilotstudien bestätigen. Um sicher zu wissen, ob eine medikamentöse Senkung des Harnsäurespiegels gegen frisch diagnostizierten Bluthochdruck hilft, ist jedoch eine umfangreichere klinische Studie erforderlich.

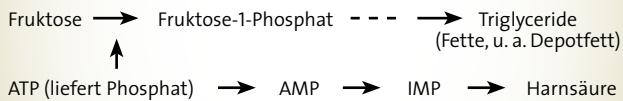
Zu hoher Blutdruck kann bekanntlich infolge von Übergewicht und Bewegungsmangel auftreten. Johnson fragte sich zudem, ob zu viel Harnsäure nicht nur Bluthochdruck, sondern auch Fettleibigkeit auslöst. Bei seinen Überlegungen schlug er einen weiten Bogen zum Stoffwechsel von Tieren, die sich regelmäßig für Mangelzeiten Speck anfressen. Was geschieht dann in ihrem Körper?

Im Tierreich haben im Allgemeinen die fettesten Exemplare in kargen Zeiten die besten Überlebenschancen. Viele Säugetiere legen sich vor dem Winter dicke Speckpolster zu, Zugvögel mästen sich vor dem langen Flug, und Pinguine speichern Fette für das Brutgeschäft im antarktischen Winter. Sie alle sind in bestimmten Jahreszeiten regelrecht innerlich getrieben, emsig Nahrung zu suchen und so viel wie möglich zu fressen, um sich die nötigen Reserven anzufuttern.

Viele Vögel und Säugetiere können für solche Situationen sogar in einen prädiabetischen Zustand umschalten. Zu normalen Zeiten baut der Körper aufgenommene Kohlenhydrate zu Glukose (Traubenzucker) ab. Der Zucker reichert sich im Blut an. Daraufhin setzt die Bauchspeicheldrüse Insulin frei, welches Leber und Muskeln signalisiert, den Zucker vorübergehend in Form von Glykogen abzuspeichern: verzweigten, stärkeähnlichen Zuckerketten. Doch bei einer Insulinresistenz reagieren die Zellen auf das Hormonsignal nicht. Dann werden die überschüssigen energiereichen Moleküle bevorzugt zu Körperfett. Auch die Zellen hungernder Tiere, die trotzdem aktiv sein müssen, können für Insulin unempfindlich werden. Bei hungrigen Eichhörnchen etwa bleibt dadurch genügend Zucker im Blut, um das Gehirn weiterhin damit zu versorgen.

Johnson und andere Forscher vermuteten, dass es im Stoffwechsel der Tiere eine Art Fettschalter gibt, der zu bestimmten Zeiten oder in bestimmten Situationen so eingestellt werden kann, dass sie prädiabetisch werden und nun

Wie durch Fruchtzucker Harnsäure entsteht



In den Zellen der Leber wird Fruktose (Fruchtzucker) phosphoryliert. Das Phosphat liefert der Energieträger ATP (Adenosintriphosphat). Bei hohem Fruktoseangebot entsteht in den Zellen Phosphatmangel. Daraufhin bauen sie das übrig gebliebene AMP (Adenosinmonophosphat) weiter ab – bis hin zu Harnsäure. Diese erzeugt oxidativen Stress, der seinerseits die Fettspeicherung anregt, unabhängig von der Menge zugeführter Kalorien. (IMP: Inosinmonophosphat)

tüchtig Speck zulegen. Auffälligerweise werden viele Vögel und sogar Bären und Orang-Utans allein von Früchten dick. Von daher kam Johnson der Gedanke, dass möglicherweise Fruchtzucker (Fruktose) den postulierten Schalter umlegt. Diese These konnten Takuji Ishimoto und Miguel Lanaspa, die damals in seinem Labor arbeiteten, mit Mäuseexperimenten bestätigen. Wenn die Nager fruchtzuckerreiches Futter erhielten, fraßen sie mehr und bewegten sich weniger als Mäuse, die normal ernährt wurden. Und sie legten dabei an Gewicht zu. Diese Effekte kommen unter anderem dadurch zu Stande, dass Fruktose die Rückmeldung des Fettgewebehormons Leptin ans Gehirn abschwächt.

Fruktose wird vom Körper anders aufgenommen und in den ersten Schritten auch anders verstoffwechselt als Glukose. Sie setzt keine Insulinreaktion in Gang – welche zum Sättigungsgefühl beiträgt –, und ein Teil wird, vor allem in der Leber, rasch in Fettmoleküle umgewandelt. Vor allem aber veranlasst Fruchtzucker mit seinem Abbau in Zellen, dass diese vermehrt Harnsäure produzieren (siehe »Wie durch Fruchtzucker Harnsäure entsteht«, oben). Johnson fragte sich: Ist etwa diese Harnsäure schuld an zumindest einigen der unerwünschten Wirkungen von Fruchtzucker? Und ähnelt das einem prädiabetischen Zustand?

Seinen Verdacht prüfte Takahiko Nakagawa, der damals bei ihm arbeitete. Er verfüttete Ratten eine fruktosereiche Diät und verabreichte der Hälfte von ihnen das Medikament Allopurinol, das den Harnsäurespiegel senkt. Und wirklich blieb dadurch nicht nur der Blutdruck der Tiere niedrig, wie frühere Studien schon gezeigt hatten. Sondern die Behandlung unterband auch viele der typischen Symptome eines »metabolischen Syndroms«: wie niedrige Werte von HDL (dem »guten« Cholesterin), hoher Blutzuckerspiegel, erhöhte Triglyceridgegel, vermehrtes Bauchfett und Bluthochdruck. In einer anderen Untersuchung konnte Johnsons Team kultivierte Leberzellen daran hindern, Fruchtzucker in Fettverbindungen umzuwandeln, indem die Forscher die Harnsäure verminderten.

Allmählich wurden die Zusammenhänge klar. Der »Fettschalter« stellt auf Fetteinlagerung um, wenn die Nahrung

viel Fruktose enthält. Die Menge der aufgenommenen Kalorien ist dafür nun nicht länger ausschlaggebend! Zugleich bildet sich viel Harnsäure, die sich bei Menschen und Menschenaffen wegen des fehlenden Enzyms Uricase im Blut anreichert. Damit kommt ein Teufelskreis in Gang, der die verschiedenen unerwünschten physiologischen Effekte dieses Zuckers immer weiter in die Höhe treibt, bis hin zu einer nicht alkoholbedingten Fettleber und Nierenschäden. Schließlich entwickelt sich ein metabolisches Syndrom, das Betroffene für eine koronare Herzkrankheit, einen Schlaganfall oder Diabetes anfällig macht.

Als sich dieses Bild herausschälte, besuchte Johnson im Juni 2008 Andrews im Naturhistorischen Museum in London, wo Letzterer Forschungen zur Evolution von Menschenaffen und Menschen leitete. Stundenlang sprachen sie darüber, in welcher Weise das defekte Uricase-Gen früheren Menschenaffen bei der globalen Klimaabkühlung wohl zugutegekommen war. Johnson schlug vor, dass die erhöhten Harnsäurespiegel ihnen dabei halfen, durch das Vertilgen von Früchten Speck anzusetzen – was günstig gewesen sein möchte, als die Winter im mittleren Miozän, vor 15 Millionen Jahren, anfingen, kühler und trockener zu werden.

Überlebensvorteil durch »Fettschalter«

An dieser Stelle brachte Andrews eine wichtige Einschränkung an. Zwar sei auch das Klima in Afrika damals abgekühlt. Allerdings war es dort immer noch warm genug für tropische Feigenbäume, die vielerorts wuchsen und von denen das ganze Jahr über immer einige Früchte trugen. In Afrika fanden die Menschenaffen also stets genug Nahrung. Anders in Europa und den angrenzenden asiatischen Gebieten, wo ein gemäßigtes Klima das subtropische ablöste: Die dortigen Arten litten im Winter regelmäßig Hunger.

Hieraus folgerten wir, dass die These von einem auf sparsames Wirtschaften getrimmten Stoffwechsel nur auf die damaligen Menschenaffen Eurasiens passt. Außerdem müssten unserer Hypothese zufolge deren Nachfahren die für sie nützliche Mutation ein paar Millionen Jahre später nach Afrika mitgebracht haben. Womöglich verschaffte ihnen das dort ebenfalls einen Vorteil gegenüber ihrer afrikanischen Verwandtschaft – denn aus irgendwelchen Gründen scheinen sie schließlich die Oberhand gewonnen zu haben. Das wiederum würde bedeuten, dass die heutigen afrikanischen Menschenaffen und auch wir von diesen Einwanderern abstammen. Zugleich würde es erklären, wieso alle Großen Menschenaffen einschließlich des Orang-Utans das gleiche defekte Uricase-Gen besitzen wie wir. Wenn die von uns entworfene Hypothese zutrifft, könnte diese Erbvariante das von James Neel postulierte Sparsamkeitsgen darstellen.

Obwohl eine Menge Befunde für den beschriebenen Ablauf sprechen, ist dieser Zusammenhang noch nicht bewiesen. Auch andere Forscher haben Kandidaten für »sparsame« Erbanlagen gefunden, welche die heutige Epidemie von Fettleibigkeit und Diabetes erklären könnten. Sie entdeckten tatsächlich einige Erbfaktoren, die Individuen für die betref-



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



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

fenden Eigenschaften prädisponieren. Allerdings wird keiner davon dem modernen Massenphänomen gerecht. Diese Forscher suchen nach Genen, die zwischen Menschen variieren. Deshalb fällt unser Kandidat bei den angewandten Methoden durchs Raster, denn das mutierte Uricase-Gen ist bei allen Menschen gleich.

Kritiker unserer Auffassung monieren, solch ein »Fettgen« hätte nur entstehen können, wenn Übergewicht für die Urmenschen vorteilhaft gewesen wäre. So meinen wir es aber nicht. Unseres Erachtens etablierte sich das defekte Gen, weil diese Mutation unsere Menschenaffenvorfahren vor dem Verhungern schützte. Es setzte sich nicht deswegen durch, weil es sie dick machte, sondern trotzdem.

Ein weiterer Kritikpunkt: Wenn jeder das gleiche »Fettgen« hätte, müssten noch viel mehr Leute korpulent sein. Dagegen ist zu sagen: Das defekte Uricase-Gen für sich allein genommen bewirkt unter natürlichen Lebensbedingungen – für Menschen also etwa bei traditioneller Ernährungsweise – lediglich eine mäßige Steigerung des Harnsäurespiegels und keine nennenswerte Überfettung. Das zeigen Johnsons Studien an Menschenaffen und an den Yanomami. Wir postulieren aber, dass zwei Gruppen von Lebensmitteln die Harnsäuremenge stark in die Höhe treiben. Zum einen tun das Speisen wie Bier oder Fleisch, die als Abbauprodukt viel Harnsäure liefern; zum anderen solche, die viel Fruktose enthalten oder im Stoffwechsel freisetzen – denn beispielsweise auch Traubenzucker wird in eine Fruktoseverbindung umgebaut. Haushaltszucker besteht zur Hälfte, Honig zu über der Hälfte aus Fruktose; viele Fertigprodukte weisen davon beträchtliche Mengen auf, etwa in Form von Mais- oder Fruktose-Glukose-Sirup. Oft sind das sogar Lebensmittel, die wir gar nicht zu den Süßwaren rechnen. Frisches Obst ist in dieser Hinsicht jedoch gesünder. Es enthält eine Reihe Substanzen wie Vitamin C und Antioxidanzien, die unerwünschte Wirkungen von Fruktose und Harnsäure neutralisieren können.

Im Jahr 2014 lieferten Gaucher und sein damaliger Mitarbeiter James T. Kratzer zusammen mit Lanaspa besonders stichhaltige Hinweise dafür, dass die mutierte Uricase-Variante das gesuchte Sparsamheitsgen sein könnte. Aus Vergleichen der DNA-Sequenzen dieses Gens von verschiedenen heutigen Säugetieren erschlossen die Forscher zunächst die entsprechenden Sequenzen bei längst ausgestorbenen Primaten und ermittelten daraus einen Genstammbaum. Diese

Sequenzen bauten sie dann in menschliche Leberzellen ein, die daraufhin das Gen ablasen und das Enzym produzierten. Dabeistellten sie fest: Die Uricase muss schon bei frühen Menschenaffen und wohl selbst bei noch älteren Primaten nach und nach ihren Dienst im Zuge mehrerer aufeinander folgender Mutationen immer mehr eingestellt haben – bis sie schließlich bei einem gemeinsamen Vorfahren der Großen Menschenaffen und des Menschen völlig versagte. Desse Nachfahren vermochten sich deswegen nicht nur leichter Fettreserven zuzulegen, sondern auch das Gehirn in Notzeiten besser mit Traubenzucker zu versorgen.

Erst umfangreiche Studien an Menschen können allerdings erweisen, wie entscheidend die Rolle des mutierten Uricase-Gens letztlich ist. Sollte sich bestätigen, dass eine Senkung des Harnsäurespiegels gegen Bluthochdruck und Insulinresistenz zu helfen vermag sowie das Eintreten von Nierenschäden verlangsamen und eine Gewichtszunahme verhindern kann, müssten Ärzte bei ihren Patienten zur Vorbeugung gegen Fettleibigkeit, Diabetes und Arteriosklerose nicht nur einen erhöhten Cholesterinspiegel oder zu hohe Blutfettwerte bekämpfen, sondern auch ein Übermaß an Harnsäure. Womöglich ließe sich die Uricase sogar gentechnisch wiederbeleben. Bis dahin lautet unsere Empfehlung: Viel Bewegung und gesündere Ernährung mit wenig Zucker – und wenn Süßes, dann lieber frisches Obst. ~

DIE AUTOREN



Richard J. Johnson (links) ist Professor für Medizin an der University of Colorado im Anschutz Medical Campus in Aurora. Hauptsächlich erforscht er Hintergründe von Fettleibigkeit, Diabetes, Bluthochdruck und Nierenerkrankungen.

Peter Andrews ist Paläoanthropologe und emeritierter Wissenschaftler am Naturhistorischen Museum in London sowie Professor an der Fakultät für Anthropologie am University College London. Er beschrieb zahlreiche neue Gattungen und Arten fossiler Menschenaffen.

QUELLEN

Johnson, R.J. et al.: Sugar, Uric Acid, and the Etiology of Diabetes and Obesity. In: *Diabetes* 62, S. 3307–3315, 2013

Johnson, R.J.: The Fat Switch. *Mercola.com*, 2012

Johnson, R.J., Andrews, P.: Fructose, Uricase, and the Back-to-Africa Hypothesis. In: *Evolutionary Anthropology* 19, S. 250–257, 2010

Kratzer, J.T. et al.: Evolutionary History and Metabolic Insights of Ancient Mammalian Uricases. In: *Proceedings of the National Academy of the Sciences USA* 111, S. 3763–3768, 2014

WEBLINKS

ScientificAmerican.com/oct2015/obesity

Richard Johnson erzählt in einem Interview die Entdeckungsgeschichte des »Fettgens« (englisch)

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1378742

Im nächsten Heft: Wie Fettleibigkeit und Darmflora zusammenhängen.

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO**



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

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Unser zweiter Hörsinn

Stammesgeschichtlich ist unser Gehör eine recht junge Entwicklung. Es hat ein älteres System abgelöst, das heute noch von Fischen, Fröschen oder Krokodilen benutzt wird, etwa bei Paarungsritualen. Teilweise scheint dieses jedoch auch beim Menschen noch zu funktionieren und vor allem auf tiefe Bassrhythmen anzusprechen.

Von Neil Todd

Gemeinhin heißt es, der Mensch habe fünf Sinne – Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Tasten – und wohl jeder kennt die zugehörigen Organe. Doch diese Liste ist unvollständig. Es gibt einen sechsten Sinn, den wir gewöhnlich übersehen und dessen Sitz vielen unklar ist, obwohl wir jeden Augenblick von ihm abhängig sind: den Gleichgewichtssinn. Vermittelt wird er vom so genannten Vestibularsystem, das tief versteckt im Innenohr seine Aufgabe erfüllt, ohne dass uns dies in der Regel bewusst ist. Eine Erkrankung oder Verletzung, die seine Funktion beeinträchtigt, kann jedoch verheerend sein, wie jeder bezeugen wird, der einmal an einer Innenohrentzündung gelitten hat. Die Betroffenen sind im Extremfall völlig außer Gefecht gesetzt – unfähig, aufzustehen oder auch nur den Kopf zu heben oder die Augen still zu halten, ohne zu erbrennen. Als wäre dies nicht schon genug, treten zudem oft akute Angstzustände auf. Die breite Symptomatik bei einer Störung des Gleichgewichtssinns, die vom Sehen und Hören über Körperhaltung und Darmfunktion bis hin zum Fühlen und Denken reicht, macht deutlich, wie wichtig das Vestibularsystem für einen normalen physiologischen Zustand ist.

Bei den Säugetieren liegt der Vestibularapparat in einer Struktur des Innenohrs, die als Labyrinth bezeichnet wird. Sie befindet sich nahe der Cochlea (Schnecke), dem eigentlichen Hörorgan. Beide Systeme sind nicht nur eng benachbart, sondern haben auch gemeinsame Merkmale. So besitzen sie übereinstimmend Haarzellen als Mechanorezeptoren, um Töne beziehungsweise Kopfbewegungen zu registrieren und in Nervensignale umzuwandeln. Ferner sind die Sinnesnerven, die von der Cochlea und dem Vestibularapparat zum Gehirn verlaufen, zu einem Strang gebündelt. Beides zeugt von einer gemeinsamen Entwicklungsgeschichte für die Wahrnehmung von Schwingungen und Schwerkraft, die mindestens 500 Millionen Jahre zurückreicht.

Evolutionär gesehen ist die Cochlea eine junge Errungenschaft. Die ältesten Wirbeltiere, einschließlich der Fische, besitzen weder eine Hörschnecke noch irgendein Organ, das ihr

AUF EINEN BLICK

BASS, BEAT UND BALZ

Für die **akustische Wahrnehmung** ist unser Ohr mit Trommelfell und Cochlea zuständig. Daneben verfügen wir aber noch über Reste eines **urtümlichen Hörsinns**, der schon bei den **frühen Wirbeltieren** vorhanden war.

2 Er ist im **Gleichgewichtsorgan** angesiedelt und spielt bei Fischen, Reptilien und Fröschen eine wichtige Rolle beim **Balzverhalten**.

3 Dieser Hörsinn spricht besonders auf **Bassrhythmen** an. Das könnte erklären, weshalb uns ein wummernder Beat buchstäblich in die Beine fährt und unwiderstehlich zum Tanzen animiert.

im Entferitesten entspricht. Man könnte daraus schließen, dass sie taub sein müssen. Doch jeder Angler kann das Gegeenteil bezeugen. Schon vor fast 100 Jahren gab es Versuche, diesen Widerspruch zu erklären. Damals veröffentlichte der kanadische Physiologe John Tait einen Fachartikel mit dem provokanten Titel »Is All Hearing Cochlear?« (sinngemäß: »Ist Hören nur über die Cochlea möglich?«). Inzwischen steht fest, dass die Antwort »nein« lautet: Fische und auch Amphibien hören mittels Sinnesorganen, die mit Otolithen (»Hörsteinen«) ausgestattet sind. Letztere kommen ebenso bei Wirbellosen vor, wo man sie als Statolithen bezeichnet. Sie sind im Tierreich also weit verbreitet. Es handelt es sich um kleine Kristalle aus Kalziumkarbonat, die in einer Flüssigkeit schweben. Sie stehen mit Mechanorezeptoren in Verbindung, die Bewegung wahrnehmen und die betreffende sensorische Information als neuronale Aktivität weiterleiten. Dieser einfache Mechanismus verleiht Fischen ein recht gutes Gehör. Einige Fischarten können auch Laute erzeugen, was unter anderem beim Balzverhalten eine Rolle spielt.

Zwar ist im menschlichen Ohr die Cochlea für die Wahrnehmung und Verarbeitung von Tönen zuständig. Doch gibt es dort ebenfalls Otolithenorgane: den Sacculus und den Utriculus. Beide stehen senkrecht zueinander, wobei der Saccu-



Ein urtümlicher Hörsinn im
Gleichgewichtsorgan
sorgt offenbar dafür, dass uns
starke Bassrhythmen zum
Tanzen anregen.

DPA / ARNE DEDERT



Fische wie der Nördliche Schnapper (*Lutjanus campechanus*) besitzen hinter den Augen ein Otolithenpaar, das sich leicht herauspräparieren lässt (ganz links). Die Otolithen, wörtlich »Ohrsteine«, bestehen aus Kalk (Kalziumkarbonat) und sind in der Regel zwischen einem und zwei Zentimeter lang.

lus auf vertikale und der Utriculus auf horizontale Beschleunigungen anspricht.

Seit Langem gilt als ausgemacht, dass diese Organe beim Menschen zum Vestibularsystem gehören. Aber könnten wir uns nicht auch einen durch Otolithen vermittelten Hörsinn bewahrt haben, der die auf der Cochlea basierende akustische Wahrnehmung unterstützt oder ergänzt? Immerhin sind bereits andere primitive Sinnesbahnen bekannt, die parallel zu neueren, leistungsfähigeren Organen arbeiten; so erweitert das vomeronasale System, das auf Pheromone anspricht, unsere bewusste Geruchswahrnehmung um eine unbewusste Komponente. Um die obige Frage zu beantworten, muss man den Ursprüngen der akustischen Wahrnehmung bei den einfachsten Organismen nachspüren.

Ursprung der akustischen Wahrnehmung

Hören und Gleichgewicht haben beide mit einer grundlegenden Voraussetzung des Lebens zu tun, nämlich der Raumorientierung. Selbst die frühesten Lebensformen mussten wissen, wo oben und unten ist, um sich in ihrer Umwelt zurecht-

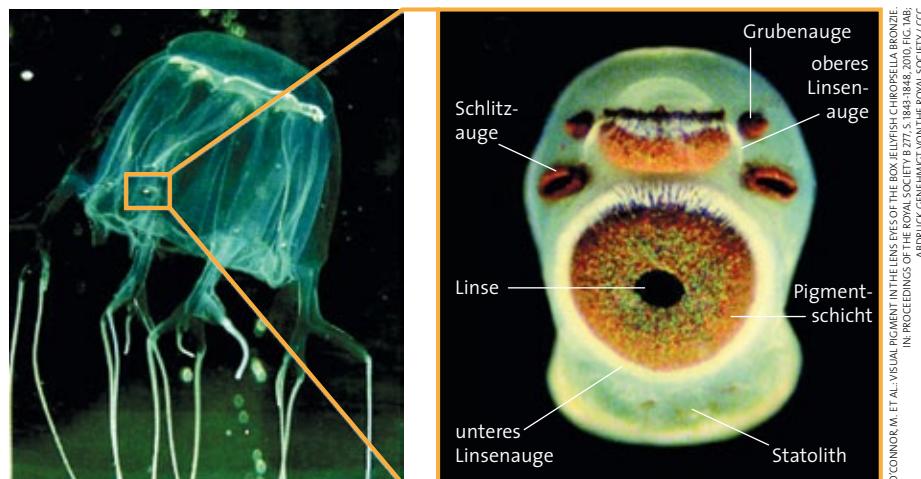
zufinden und sich an Richtungsänderungen anzupassen. Eine einfache Lösung wäre ein Lichtsensor in Verbindung mit der Regel, dass es oben immer heller ist als unten. Bei Nacht oder in der Tiefsee, in die kein Lichtstrahl dringt, würde ein solcher visueller Mechanismus jedoch versagen.

Eine elegantere Lösung für beide Probleme – die Raumorientierung und die Unterscheidung zwischen Eigen- und Fremdbewegung – liefert die Wahl der Schwerkraft als Bezugssgröße. Dazu benötigt ein Organismus einen geeigneten Sensor. Im einfachsten Fall besteht ein solcher »Gravizeptör« aus kleinen Steinen – den Statolithen beziehungsweise Otolithen – und einer Flüssigkeit geringerer Dichte, die sie umgibt. Die Steinchen sammeln sich dann stets am tiefsten Punkt an, woraus das Lebewesen die Richtung der Schwerkraft ableiten kann. Ein solches System ist im Tier- und Pflanzenreich mehrfach unabhängig entstanden und kommt bei allen wichtigen Stämmen von Vielzellern vor – was darauf schließen lässt, dass das Unterscheidungsvermögen zwischen oben und unten die erste Sinnesleistung überhaupt ist, zu der Lebewesen fähig waren.



Bei diesem 23 Millionen Jahre alten versteinerten Fisch sind die Otolithen deutlich als ein Paar kleiner weißer Objekte erkennbar, die sich direkt hinter den Augen befinden und wie zwei Reiskörner aussehen (Pfeil).

Die vier Sinneskolben der Würfelqualle (*Chiropsella bronzie*) hängen jeweils an einem Stiel frei im Innern ihres glockenförmigen Körpers. Jede solche Rhopale enthält außer je zwei Schlitz- und Grubenaugen ein Paar bilderzeugender Linsenaugen, von denen eines nach oben und das andere nach unten ausgerichtet ist (ganz rechts). Beide sind starr mit einem die Schwerkraft wahrnehmenden Statolithen verbunden, der sie stets in der Vertikalen hält.



O'CONNOR, M. ET AL. VISUAL PIGMENT IN THE LENS EYE OF THE BOX JELLYFISH *CHIROPSELLA BRONZIE*. IN: PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B 2010; 368: 3843-3848. FIG. 1B. ABBRUCH GENEHAUT VON THE ROYAL SOCIETY / CCC

Viele Pflanzenarten besitzen in ihren Wachstumsspitzen Zellen, die einen oder mehrere Statolithe enthalten. Dank dieser so genannten Statozyten wachsen die Wurzeln erdwärts. Im Tierreich bezeichnet man ein mehrzelliges, die Schwerkraft mit Statolithen wahrnehmendes Organ als Statozyste. Zahlreiche Beispiele dafür finden sich bei Wirbellosen. So gibt es unter den im Meer lebenden Stachelhäutern (Echinodermata) Arten, die sich wieder in die Ausgangsposition drehen, wenn sie auf den Rücken gelegt wurden.

Besitzt ein Tier neben dem Gravizeptor auch einen Lichtsensor, kann es sich noch besser im Raum orientieren. Allerdings muss es dazu fähig sein, die beiden Sinnesorgane so aufeinander abzustimmen, dass sie keine widersprüchlichen Informationen liefern. Das lässt sich auf einfache Weise durch eine mechanische Kopplung zwischen ihnen erreichen. Eine solche Kopplung bildete sich schon recht früh in der Evolution, vermutlich vor etwa 700 Millionen Jahren, bei den Nesseltieren (Cnidaria) heraus, zu denen insbesondere die Quallen gehören. So sind bei der Würfelqualle einfache Schlitz- und Grubenaugen, bilderzeugende Linsenaugen und Statolithe nach einem festen Muster in einem Sinneskolben angeordnet, der an einem Stiel frei im Innern ihres glockenförmigen Körpers hängt (Bild oben). Jedes Tier besitzt vier solche Rhopalien. Unabhängig von der Orientierung der Glocke richten sich die Sinneskolben stets nach der Schwerkraft aus, so dass die Augen konstant nach unten schauen. Dank dieses koordinierten sensorischen Mechanismus können Quallen gezielt Nahrung finden.

Höher entwickelte Wirbellose wie der Tintenfisch verfügen über ein Organ, das außer der Schwerkraft auch Rotations- und Linearbeschleunigungen registriert. Sein Statozystenpaar ähnelt bereits dem Vestibularsystem der Wirbeltiere. Es erlaubt dem Oktopus, selbst bei schnellen Körperbewegungen den Blick fest auf ein Objekt gerichtet zu halten, was Wirbeltiere über den vestibulären Reflex erreichen.

Die Statozyste des Tintenfisches spricht aber nicht nur auf die Schwerkraft sowie Beschleunigungen an, sondern auch auf Vibrationen. Wann immer eine akustische Quelle lokale Dichteschwankungen im Wasser verursacht (das akustische

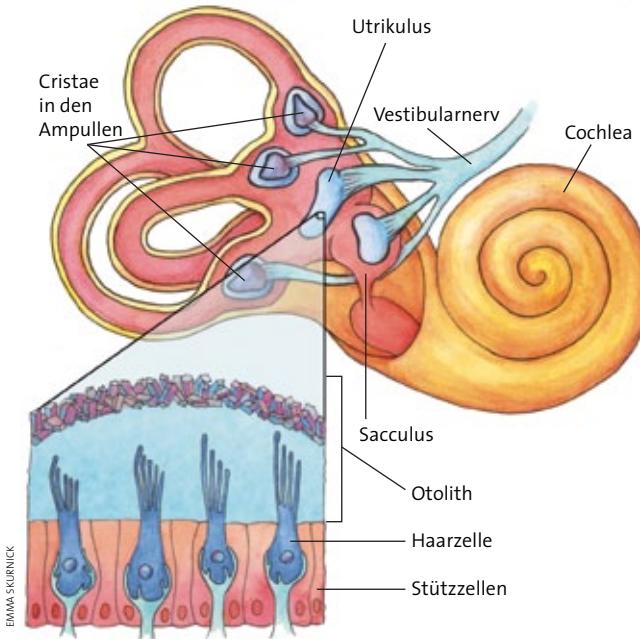
Nahfeld), die sich auf den Körper des Tieres übertragen, ruft das eine Bewegung des Statolithen relativ zu seiner Umgebung hervor. Auf diese Weise hat sich also ein Sensor, der ursprünglich für die Wahrnehmung der Schwerkraft entstanden war, zu einem Sinnesorgan weiterentwickelt, das auch Schwingungen und damit Töne registriert. Die unabhängige Erfindung von Statolithensystemen bei vielen Wirbellosen und deren einfache Umwandlung von einem puren Linearbeschleunigungssensor zu einem Fühler für Vibrationen im Bereich hörbarer Frequenzen, legen die Vermutung nahe, dass schon zum Zeitpunkt der kambrischen Artenexplosion vor etwa 540 Millionen Jahren ein durch Otolithen vermittelter Hörmechanismus bei Wirbeltieren aufgetaucht ist.

Fische hören mit dem Gleichgewichtsorgan

Alle Fische nutzen wenigstens eines ihrer Otolithenorgane dazu, sowohl das Gleichgewicht zu halten als auch akustische Signale zu erfassen. Einige Arten haben jedoch zusätzliche Hilfsstrukturen entwickelt, die das schon vom Oktopus bekannte Nahfeldhören weiter verbessern. Beim Goldfisch beispielsweise kann die Schwimmblase, mit der das Tier seinen Auftrieb regelt, zugleich dazu dienen, Schalldruckwellen (das akustische Fernfeld) in lokale Schwingungen umzuwandeln. Sie ist deshalb über eine spezielle Struktur, den Weberschen Apparat, direkt an das Innenohr mit den Otolithenorganen gekoppelt. Auf diese Weise vermag der Goldfisch erstaunlich gut zu hören und erreicht im Bereich zwischen 100 bis 300 Hertz eine Empfindlichkeit, die der des Menschen bei den entsprechenden Frequenzen nahekommt.

Für ein Tier ist es offenkundig von Nutzen, sich räumlich orientieren zu können, beispielsweise um Fressfeinden zu entgehen und Nahrung zu finden. Die Wahrnehmung von Schall und Vibrationen verschafft ihm einen zusätzlichen Vorteil, indem sie ihm erlaubt, mittels einer Art von akustischem Abbild seiner Umwelt Beute aufzuspüren und zu vermeiden, selbst erbeutet zu werden.

Weniger offenkundig, aber ebenso wichtig ist ein weiterer Bonus, den das Hören mit sich bringen darf: Es hilft bei der Suche nach einem Fortpflanzungspartner. Die Männchen ei-



ner ganzen Reihe von Fischarten erzeugen im Rahmen des Balzrituals Laute, indem sie ihre Schwimmblase als eine Art Trommel benutzen, die sie mit speziellen Muskeln in Schwingung versetzen. Bei einigen Arten werden diese Muskeln vom Nervus hypoglossus gesteuert, mit dem der Mensch seine Zunge bewegt, bei anderen dagegen vom Nervus vagus, der bei uns für den Kehlkopf zuständig ist.

Mit Lauten wirbt zum Beispiel der Schellfisch (*Melangrammus aeglefinus*) um Paarungspartner – jene Art, die vorzugsweise für »Fish and Chips« verwendet wird. Das ruhende Männchen beginnt seine Balz gewöhnlich mit sachtem Trommeln. Mit der Zeit steigert es die Schlagfrequenz, so dass sich das Geräusch schließlich wie ein Brummen anhört. Akustisch bemerkbar macht sich auch der in Amerika beheimatete Umberfisch (*Bairdiella chrysoura*), der wegen seines

Wir Menschen hören in erster Linie mit der Cochlea (Schnecke), welche die wahrgenommenen Laute nach ihren Frequenzen aufschlüsselt. Zusätzlich zu dieser stammesgeschichtlich relativ jungen Struktur verfügen wir aber über urtümliche Otolithenorgane, in denen Haarzellen die von der Schwerkraft oder von Beschleunigungen verursachten Verschiebungen kleiner Kalkkristalle registrieren. Obwohl diese Organe in erster Linie für den Gleichgewichtssinn zuständig sind, sprechen sie auch auf niederfrequente Vibrationen an. Möglicherweise sind sie deshalb an der Wahrnehmung von tiefen Bassrhythmen beteiligt.

wiederholten Klopfens und Trommeln gemeinhin als Croaker (»Quaker«) bezeichnet wird. Während der Laichzeit bilden die Männchen Gruppen und stimmen eine Art Chorgesang an. Das Ergebnis ist in beiden Fällen eine synchronisierte Abgabe von Sperma und Eiern, was erneut die große biologische Bedeutung des von Otolithen vermittelten Hörens bei Fischen verdeutlicht.

Mit dem Auftreten der Amphibien im Devon vor etwa 380 Millionen Jahren bildeten sich in den Innenohren zusätzlich Hörorgane ohne Otolithen heraus, vor allem die Basilar- und die Amphibienpapille. Beide funktionieren über einen fluidodynamischen Mechanismus ähnlich wie bei der Cochlea und erweitern damit den wahrnehmbaren Frequenzbereich. Ergänzt durch ein Trommelfell und ein Mittelohr für das Hören von Luftschall, verliehen die neuen Sensoren den landbewohnenden Amphibien die Fähigkeit, die Laute von Artgenossen und andere Schallquellen bis zu einer beträchtlichen Entfernung wahrzunehmen.

Trotz alledem haben die Otolithenorgane dieser Tiergruppe, und insbesondere der Sacculus, eine erstaunliche Empfindlichkeit gegenüber seismischen Vibrationen bewahrt. Das ist natürlich für jene Arten von Vorteil, die zur Fortpflanzung ins Wasser zurückkehren. Ein bekanntes Beispiel dafür



Krokodile können ähnlich wie Vögel, die wie sie von den Archosauriern abstammen, kräftige Laute hervorbringen. Das Männchen des Mississippi-Alligators beginnt seinen Ruf bei einer derart niedrigen Frequenz, dass ihn das menschliche Ohr nicht wahrnehmen kann. Die starken Infraschallschwingungen lassen jedoch das Wasser am Rücken »tanzen«.

bietet der Amerikanische Ochsenfrosch (*Rana catesbeiana*). Jedes Frühjahr sucht er für einige Wochen seinen Lieblings- teich auf, um dort zu läuten. Wie beim Schellfisch stoßen die Männchen Laute aus, mit denen sie die Weibchen anlocken. Wegen der seismischen Empfindlichkeit ihres Sacculus können die Tiere aber auch die von anderen Fröschen erzeugten Oberflächenvibrationen erspüren (Bild unten).

Bewegt man sich den Stammbaum der Wirbeltiere weiter hinauf, stößt man auf die Archosaurier, zu denen die Krokodile, Dinosaurier und Vögel gehören. Innerhalb dieser Gruppe, die sich während des Perms vor rund 250 Millionen Jahren von den Reptilien abspaltete, existieren viele Ähnlichkeiten – unter anderem beim Paarungs- und Nistverhalten. Auch beim Hörsinn weisen ihre Mitglieder mehrere Gemeinsamkeiten auf. So bringen sie alle zu bestimmten Zwecken Laute hervor, neigen zu Chorgesängen und besitzen ein ähnlich aufgebautes Innenohr. Archosaurier verfügen über eine Basilarpapille, die von ihrer Funktionsweise jedoch der Cochlea der Säugetiere näher steht als dem gleichnamigen Organ der Amphibien. Ein erstaunliches Beispiel für Vokalisierung liefert in dieser Gruppe das Männchen des Mississippi-Alligators (*Alligator mississippiensis*). Es beginnt seine Rufe bei einer derart niedrigen Frequenz (rund 20 Hertz), dass sie für das menschliche Gehör nicht wahrnehmbar sind. Wir können sie aber fühlen und anhand der tanzenden Wasserwellen auf dem Rücken des Tieres auch sofort erkennen (Bild unten links). Die Adressatinnen der Botschaft hören sie dagegen recht gut; der Sacculus des Alligators ist eine anatomisch große Struktur und ähnlich wie der eines Frosches bestens geeignet, 20-Hertz-Infraschall über das Wasser wahrzunehmen.

Beim anatomischen Vergleich zwischen der Cochlea der Säugetiere und der Basilarpapille der Amphibien, Reptilien und Archosaurier fällt eines sofort ins Auge: All diese Strukturen befinden sich in unmittelbarer Nähe zum Sacculus. Das passt zu der von etlichen Wissenschaftlern vertretenen

Auffassung, wonach die Schnecke aus einer Einstülpung des Sacculus hervorgegangen ist. Die Cochlea selbst ist ein außergewöhnliches Organ: Mit ihrer Basilarmembran und den an ihr entlang angeordneten Haarzellen führt sie quasi eine Art Spektralanalyse des Schalls durch, wobei die hohen Töne an ihrer Basis repräsentiert sind und die tiefen an der Spitze. Das befähigt uns zu einer stark nuancierten akustischen Kommunikation in Form von Sprache sowie zum Wahrnehmen und Genießen von Musik. Außerdem schaffen wir uns damit ein komplexes geistiges Abbild unserer Umwelt, eine »auditive Szenenanalyse«.

Schallempfindliches Gleichgewichtsorgan – auch beim Menschen

Dessen ungeachtet haben die Otolithenorgane bei Säugetieren eine gewisse akustische Empfindlichkeit bewahrt: Ihre Haarzellen reagieren ganz ähnlich auf Schall und Vibrationen wie diejenigen in der Cochlea. Das haben physiologische Experimente ergeben, bei denen die Aktivität des Vestibularnervs aufgezeichnet wurde. Ferner lässt sich die akustische Empfindlichkeit von Otolithen beim Menschen auf nichtinvasive Weise anhand der elektrischen Antworten auf Schall- und Vibrationsreize nachweisen. Zu deren Aufzeichnung dienen meist Oberflächenelektroden, die an bestimmten Muskeln um die Augen oder am Hals platziert werden. Denn diese Körperpartien sind am Vestibularreflex beteiligt, dank dem wir das Gleichgewicht bewahren und die Ausrichtung der Augen konstant halten können, wenn wir uns bewegen. Die dabei auftretende elektrische Aktivität bezeichnet man als vestibular evozierte myogene Potenziale oder kurz VEMPs.

Wie Versuche mit Luftschatz ergaben, ist die Schwelle dafür, dass ein VEMP entsteht, bei menschlichen Otolithenorganen zwar recht hoch, aber noch niedrig genug für Alltagsgeräusche: Sie liegt bei einem Schalldruck von 70 bis 80 Dezibel, was in etwa der Lautstärke normalen Sprechens ent-

Der männliche Ochsenfrosch (*Rana catesbeiana*) kann niederfrequente Laute erzeugen, die stark genug sind, um sichtbare Oberflächenwellen zu erzeugen, die sich von der Schallblase am Kehlkopf radial nach außen ausbreiten. Weibchen und andere Männchen nehmen nicht nur den damit verbundenen Luftschatz wahr, sondern registrieren dank der Druckempfindlichkeit ihrer Sacculi auch die Oberflächenwellen als vertikale Vibrationen.



JENNIFER HOWLAND/HILL

spricht. Außerdem sind die VEMPs frequenzabhängig, mit einem Maximum bei etwa 500 Hertz, also in der Nähe des Bereichs höchster Empfindlichkeit bei Fischen. Im Fall von Schädelvibrationen statt Luftschall tritt bei rund 100 Hertz ein weiteres Maximum auf. Manchmal spricht eine Person bei einem VEMP-Test auf solche niederfrequenten Schwingungen sogar unterhalb der normalen Hörschwelle an – was an die bemerkenswerte seismische Empfindlichkeit des Sacculus von Amphibien erinnert.

Weil sich VEMPs sehr einfach messen lassen, eignen sie sich auch zur Diagnose von Fehlfunktionen des Gleichgewichtsorgans. Anhand der Reaktionen auf geeignete Reizkombinationen ist es mit ihrer Hilfe heute möglich, die Unversehrtheit von Utriculus und Sacculus unabhängig voneinander zu überprüfen. In Kombination mit anderen neuartigen Verfahren könnte es schon bald gelingen, jedes der fünf vestibulären Endorgane des Menschen einzeln zu testen, also auch die drei rechtwinklig zueinander angeordneten Bogengänge, die hochempfindlich auf Winkelbeschleunigungen (Rotation des Kopfes) reagieren. Interessanterweise profitiert die Vestibularmedizin somit von der Wiederentdeckung jener durch Otolithen vermittelten akustischen Empfindlichkeit, die wir unseren einst im Sumpf lebenden Vorfahren zu verdanken haben.

Schlüsselrolle beim Paarungsverhalten

Die Frage ist allerdings, ob diese primitive Hörmethode beim Menschen noch eine Funktion besitzt. Handelt es sich nur um das verkümmerte Relikt eines nicht mehr gebrauchten früheren Wahrnehmungsmechanismus? Die Cochlea erfüllt dank ihrer Optimierung durch eine Jahrmillionen dauernde natürliche Selektion die Aufgaben des Hörsinns wie etwa die Szenenanalyse so gut, dass die Otolithenorgane mit ihren viel einfacheren physiologischen Eigenschaften schwerlich mithalten oder auch nur einen wesentlichen Beitrag leisten

können. Aber da gibt es ja noch die Rolle des Hörens beim Balzverhalten. Wenn die Otolithenorgane bei Fischen und Amphibien die Fortpflanzungsbereitschaft vermitteln, erfüllen sie diese Funktion vielleicht auch bei höheren Wirbeltieren einschließlich des Menschen.

Da die Lautäußerungen beim Balzen das Ausstoßen von Eiern und Sperma auslösen können, müssen sie direkt das Hormonsystem der paarungswilligen Tiere beeinflussen. Der Biologe Timothy J. Neary (1948–2009) und seine Mitarbeiter an der Creighton University in Omaha (Nebraska) befassten sich schon vor Jahren eingehend mit den Nervenbahnen, die bei Fröschen für die Vermittlung dieser Wirkungen in Frage kommen. Dabei sind sie auf eine sensorische Schaltstation im Mittelhirn gestoßen, die Hörinformationen an den Hypothalamus weiterleitet. Das Gegenstück bei Säugetieren dürfte eine Verbindung des Vestibularorgans zu einer anderen Region im Mittelhirn sein: dem Nucleus parabrachialis. Dessen Signalbahnen ziehen nicht nur zum Hypothalamus, was die Voraussetzung für hormonelle Wirkungen bildet, sondern auch zur Amygdala, die mit dem Gefühlsleben verknüpft ist, sowie zum mesolimbischen dopaminergen System, das auf Belohnung anspricht, und zu höheren Gefühlszentren einschließlich dem zingulären limbischen System.

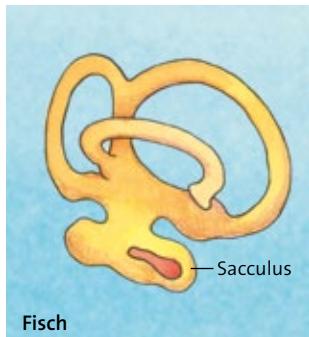
Tatsächlich scheint dieser Schaltkreis an negativen Begleiterscheinungen eines gestörten Gleichgewichtsempfindens wie Seekrankheit, Schwindel und Angstzuständen beteiligt zu sein. Und offenbar ist es sogar – zumindest bei einigen Personen – für die Erregung und das Lustgefühl durch Trägheits- oder Gravitationsreize etwa beim Achterbahnfahren verantwortlich. Vielleicht besteht die Funktion des von Otolithen vermittelten Hörens also darin, jenen neuronalen Schaltkreis im Gehirn durch Schall oder Vibration zu aktivieren.

Dafür spricht insbesondere die Tatsache, dass die Balz bei Wirbeltieren oft mit Lautäußerungen einhergeht, die von

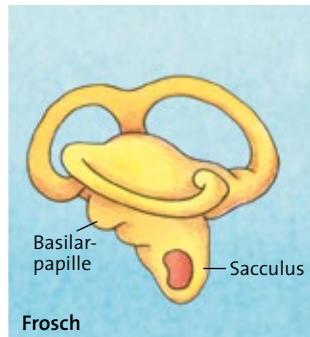


MIT FRDLGEN VON NELL TODD

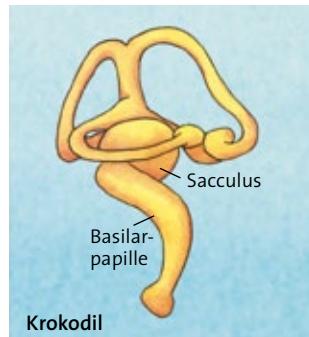
Über die Otolithenorgane registrierte Schallreize aktivieren beim Menschen den Vestibularnerv, der standardmäßig Signale des Gleichgewichtsorgans weiterleitet. Diese Aktivität lässt sich mit Oberflächen-elektroden ableiten, die an bestimmten Muskeln um die Augen oder am Hals platziert werden. Man spricht in solchen Fällen von vestibulär evozierten myogenen Potenzialen (VEMPs). Mit ihrer Hilfe können Mediziner bei einer Störung des Gleichgewichtssinns klären, welche Struktur des Innenohrs beeinträchtigt ist: der Sacculus, der Utriculus oder einer der drei Bogen-gänge, die für die Wahrnehmung von Drehbewegungen des Kopfes zuständig sind.



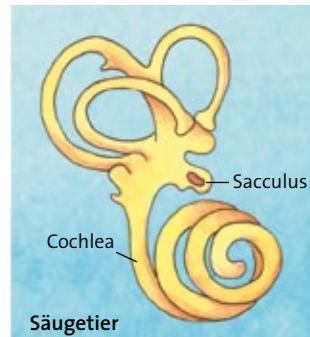
Fisch



Frosch



Krokodil



Säugetier

Der Sacculus, ein Otolithenorgan im Innenohr von Wirbeltieren, nimmt vertikale Beschleunigungen wahr. Zuerst bei Fischen entstanden, hat er seine ursprüngliche Funktion beibehalten, als sich das Leben im Verlauf der Evolution vom Wasser auf das Land ausdehnte.

rhythmischen Bewegungen begleitet sind. Das gilt vor allem für Vögel. Sie setzen nicht nur wie ihre Vorfahren, die Archosaurier, ihre Stimme zu charakteristischen Lockrufen und Balzgesängen ein, sondern führen gleichzeitig mehr oder weniger komplizierte Paarungstänze auf. Ähnliche Rituale gibt es aber auch bei Säugetieren, Primaten eingeschlossen. So produzieren die zu den Gibbons gehörenden Siamangs, die Paarbindungen eingehen, variantenreiche Duette und vollführen dazu akrobatische Körperbewegungen. Die enge Verquickung zwischen Laut und Tanz bei der Balz oder beim Aufbau einer Paarbindung lässt sich am ehesten mit einem auditiven Hilfssystem auf der Basis von Otolithen erklären.

Der Mensch hat zwar keine derart starren Rituale für die Partnerwahl. Doch Elemente der tierischen Balz sind durchaus erkennbar. So findet die Annäherung der Geschlechter oft in Diskotheken oder Ballsälen statt, in denen zu Musik getanzt wird, deren Lautstärke die vestibuläre Hörschwelle klar überschreitet und die meist einen starken Bass bei Frequenzen im Bereich der maximalen Empfindlichkeit des Vestibularsystems enthält. Mit ihrem markanten Beat weckt sie den unwiderstehlichen Drang, sich synchron zum Takt zu bewegen. Neurologische Befunde deuten auf eine beachtliche Überschneidung zwischen den Hirnarealen, die durch Rhythmus aktiviert werden, und Teilen des oben beschriebenen vestibulären Schaltkreises hin. Das stützt die Vermutung, dass ein auditives Hilfssystem, das keine komplexe akustische Analyse vornimmt, sondern das Gleichgewicht bewahren hilft und Rhythmen erfasst, eine Rolle beim Partnerwahl- und Paarungsverhalten spielt – einem fundamentalen Aspekt des menschlichen Lebens. Es könnte von zentraler Bedeutung für die Evolution von Musik und Tanz gewesen sein.

All dies steht übrigens auch in Einklang mit der von Charles Darwin entwickelten Theorie vom Ursprung der Musik, wonach diese aus Balzritualen mit lockenden Lautäußerungen hervorgegangen ist. Mit Blick auf entsprechende Verhaltensweisen bei einer Vielfalt von Tierarten, angefangen von Fröschen über Alligatoren und Vögel bis zu Mäusen und

Gibbons, meinte der Begründer der modernen Evolutionstheorie: »Wenn die Weibchen solche Laute nicht zu würdigen wüssten und von ihnen erregt oder angezogen würden, dann wären die fortwährenden Bemühungen der Männchen sinnlos; und das ist unmöglich zu glauben.« Und demgemäß folgerte Darwin aus seinen anschließenden Betrachtungen über die Musik unterschiedlicher Kulturen: »All diese Befunde ... werden verständlich ..., wenn wir annehmen, dass unsere halbmenschlichen Vorfahren musikalische Laute und Rhythmen benutzten, um Paarungen anzubahnen ...« Vielleicht haben ja hüftschwingende Menschen auf einer Tanzparty mehr mit Fischschwämmen beim Laichen gemein, als unsereins glaubt! ≈

DER AUTOR



Neil Todd hat zunächst theoretische Physik studiert und ist dann zur Psychologie gewechselt. Nach der Promotion an der University of Exeter (Großbritannien) arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Music Department der University of Sheffield, bevor er eine Dozentur für Wahrnehmung an der University of Manchester erhielt, wo er sich auf den Hör- und Gleichgewichtssinn spezialisierte. Momentan ist er Honorarprofessor für Neurowissenschaft in Manchester. Außerdem arbeitet er freiberuflich als wissenschaftlicher Berater, Schriftsteller, Komponist und Musiker.

QUELLEN

- Rosengren, S.M. et al.:** Vestibular Evoked Myogenic Potentials: Past, present, and future. In: Clinical Neurophysiology 121, S. 635–651, 2010
- Todd, N.P.M.:** Evidence for a Behavioral Significance of Saccular Acoustic Sensitivity in Humans. In: Journal of the Acoustical Society of America 110, S. 380–480, 2001
- Todd, N.P.M., Cody, F.:** Vestibular Responses to Loud Dance Music: A Physiological Basis for the »Rock and Roll Threshold«? In: Journal of the Acoustical Society of America 107, S. 496–500, 2000
- Todd, N.P.M., Lee, C.S.:** The Sensormotor Theory of Rhythm and Beat Induction 20 Years on: A New Synthesis and Future Perspectives. In: Frontiers in Human Neuroscience 9, S. 444, 2015
- Todd, N.P.M. et al.:** Vestibular Receptors Contribute to Cortical Auditory Evoked Potentials. In: Hearing Research 309, S. 63–74, 2014
- Todd, N.P.M. et al.:** Tuning and Sensitivity of the Human Vestibular System to Low-Frequency Vibration. In: Neuroscience Letters 444, S. 36–41, 2008

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1378743

Auf der Suche nach der Theorie von Allem

In seinen späteren Jahren wollte Einstein mit einer »allgemeinen Feldtheorie« die Gravitation mit den anderen Naturkräften vereinen – vergeblich. Eine neue Generation von Physikern hofft nun zu vollbringen, woran das Genie scheiterte.

Von Corey S. Powell

Leslie Rosenbergs Versuch, das Universum zu verstehen, gleicht einem provisorischen, mit ein paar Drähten versehenen Warmwasserboiler, der in einem großen unterirdischen Kühlschrank steckt. Sein Experiment findet in einem Labor an der Universität von Washington in Seattle statt: Eine extrem tiefgekühlte Vakuumkammer wird einem Magnetfeld ausgesetzt und soll beim Durchgang so genannter Axionen feine Mikrowellensignale erzeugen, die ein empfindlicher Detektor nachzuweisen versucht. Bisher hat noch niemand eine Spur dieser hypothetischen Teilchen gesehen.

Rosenberg ist den Partikeln seit seiner Promotion in den 1990er Jahren an der University of Chicago auf der Spur. Er führte ein Experiment nach dem anderen aus – aber trotz immer größerer Präzision ohne Erfolg. Noch immer hofft er auf ein Resultat, das Albert Einsteins gewagteste Idee posthum Auftrieb geben würde.

Einstein nannte sie einheitliche Feldtheorie, heute sprechen Physiker von der »Theorie von Allem«. Sie soll das Verhalten aller bekannten Naturkräfte in einem einzigen Formelsystem ausdrücken. Als sich Einstein vor 90 Jahren auf die Suche machte, wollte er die Grundkräfte Gravitation und Elektromagnetismus zusammenfassen und damit zeigen, dass alle Formen von Materie und Energie derselben Logik gehorchen.

Selbst für den großen Theoretiker war das ein ungeheuerer Anspruch. »Ich möchte wissen, wie Gott diese Welt erschaffen hat«, schrieb er 1920 an einen deutschen Physikstudenten. »Ich bin nicht an dem einen oder anderen Phänomen interessiert, an dem Spektrum des einen oder anderen Elementes. Ich möchte Seine Gedanken kennen, alles übrige sind nur Einzelheiten.«

Doch Einstein verrannte sich drei Jahrzehnte lang in einer Sackgasse nach der anderen. Als er 1955 starb, standen unlöste einheitliche Feldgleichungen auf seiner Tafel. Die Vereinheitlichung blieb also nachfolgenden Physikergenerationen überlassen, die das Problem in unzählige Teile zerlegten. Was als großartige Vision eines Genies begonnen hatte, verwandelte sich in die zähe, mühselige Kleinarbeit verschiedener Teams, die jeweils ein kleines Stück des riesigen kosmischen Rätsels zu lösen versuchten. Beispielsweise ist Rosenberg nicht hinter einer allumfassenden Theorie her. Er konzentriert sich hartnäckig auf sein Spezialproblem: das Axion.

Trotz ihres beschränkten Ziels behalten Rosenberg und seine Mitstreiter das große Ganze im Auge. Sie beteiligen sich an dem Versuch, Mängel in Einsteins theoretischem Gebäude auszubügeln und ein umfassendes Modell der Teilchenphysik von Grund auf zu errichten statt quasi von oben nach unten. Letzteres verwirft Rosenberg als »Nabelschau«,

DIE SERIE IM ÜBERBLICK



100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

Teil 1	► Der Glanz des Genies <i>Brian Greene</i>	Oktobe 2015
	Einstiens Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie <i>Michel Janssen, Jürgen Renn</i>	
Teil 2	► Kosmische Würfelspiele <i>George Musser</i>	November 2015
Teil 3	► Warten auf die Welle <i>Felicitas Mokler</i>	Dezember 2015
Teil 4	► Auf der Suche nach der Theorie von Allem <i>Corey S. Powell</i>	Januar 2016
	Alles nur im Kopf <i>Sabine Hossenfelder</i>	
Teil 5	► Die Vermessung Schwarzer Löcher <i>Dimitrios Psaltis, Shepard S. Doeleman</i>	Februar 2016
Teil 6	► Sind Zeitreisen möglich? <i>Tim Folger</i>	März 2016
	Wo Einstein irrite <i>Lawrence M. Krauss</i>	

FERDINAND SCHWALZER (1921 / PUBLIC DOMAIN [W])

**Partikeldetektive**

Ort: University of Washington in Seattle

Projekt: In einer extrem tiefgekühlten und magnetisierten Vakuumkammer soll der ADMX-Detektor das Mikrowellensignal von hypothetischen Teilchen namens Axionen aufspüren. Aus ihnen könnte die unsichtbare Dunkle Materie bestehen, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht.

Experimentatoren (hinten, von links nach rechts):

Ciera Cox, Nick Posey, James Sloan, Clifford Plesha, Richard Ottens, Josh Povick und Kerkira Stockton;

(vorne, von links nach rechts): Hannah LeTourneau, Leslie Rosenberg, Xavier Frost, Ana Malagon, Kiva Ramundo und Jacob Herr.

AUF EINEN BLICK

EINSTEINS SCHWERES ERBE

- 1** Gegen Ende seines Lebens wollte Einstein sein theoretisches Vermächtnis mit einer einheitlichen **Beschreibung sämtlicher Teilchen und Felder** krönen.
- 2** Das musste allein schon deswegen scheitern, weil seinerzeit zwei Naturkräfte – **die schwache und die starke Wechselwirkung** – noch gar nicht entdeckt waren.
- 3** Heute versuchen mehrere Physikergruppen mit unterschiedlichen Ansätzen unter Verwendung **hypothetischer Teilchen und Felder** Einsteins Traum zu verwirklichen.

die der Natur vorschreiben möchte, wie sie sich zu verhalten hat. Andere versuchen mit ihren Experimenten die so genannte Dunkle Energie zu erforschen oder zweidimensionale Quanteneinheiten zu entdecken, die vielleicht Bausteine unserer dreidimensionalen Alltagswelt bilden.

»Wir sollten tatsächlich einige dieser verrückten Ideen über die Entwicklung des Universums testen«, sagt der Physiker Joshua Frieman von der University of Chicago. Wie er glaubt, werden die Physiker sonst nicht zu einer Theorie von Allem gelangen.

Die dunkle Seite des Universums

Ein Blick auf Rosenbergs Axion Dark Matter Experiment (ADMX) zeigt, wie folgenreich die scheinbar bescheidene Suche nach einem einzigen Teilchen und einer neuen Gruppe physikalischer Regeln zu sein vermag. Im Erfolgsfall könnte ADMX diverse Einwände gegen die allgemeine Relativitätstheorie widerlegen und ein kosmologisches Rätsel lösen.

Das Rätsel tauchte bereits in den 1930er Jahren auf, als Astronomen bemerkten, dass das All anscheinend von einer unsichtbaren Komponente erfüllt ist, die sich nur durch ihre Gravitationswirkung auf die sichtbaren Sterne bemerkbar macht. Noch seltsamer mutete diese Entdeckung nach 1980 an: Neuen Modellen des Urknalls zufolge konnte diese unsichtbare – oder »dunkle« – Substanz nicht aus gewöhnlichen Atomen bestehen. Das ließ zwei beunruhigende Möglichkeiten übrig. Entweder funktioniert die Gravitation über große Entfernung nicht so, wie Einstein sich das vorstellte, oder das Universum enthält eine unbekannte Sorte von Partikeln, die für unsere Teleskope völlig unsichtbar bleibt.

Die erste Möglichkeit lehnen die allermeisten Physiker ab, denn sie lässt sich nur schwer mit den gemessenen Galaxienbewegungen vereinbaren. Bleibt Möglichkeit Nummer zwei; sie hat Dutzende raffinierter Versuche angeregt, die dunklen Teilchen zu identifizieren. Und da kommt ADMX ins Spiel.

Da Axionen gut zu den mutmaßlichen Eigenschaften der Dunklen Materie passen, würde ihr Nachweis durch Rosenbergs ADMX-Team ein vollständigeres Bild der Entstehung und Entwicklung von Galaxien liefern. Zudem wäre es unnötig, Einsteins Gravitationsgleichungen abzuändern. Vor allem würden die Axionen eine Veränderung des Standard-

modells der Teilchenphysik erzwingen und die Physiker dadurch einer echten Theorie von Allem einen Schritt näherbringen.

Bis vor Kurzem galten Axionen als unwahrscheinliche Kandidaten für Dunkle Materie. Die meisten Kollegen Rosenbergs konzentrierten ihre Suche auf so genannte WIMPs (weakly interacting massive particles, schwach wechselwirkende Masseteilchen). »Ich war immer eher ein komischer Vogel«, gibt Rosenberg zu. Mit der Zeit wurden die verschiedenen WIMP-Detektoren präziser, ohne etwas zu entdecken. 2014 nahm ein extrem empfindliches Gerät namens Large Underground Xenon (LUX) unter den Hügeln des US-Bundesstaats South Dakota den Betrieb auf – bisher ohne Erfolg.



Hologrammjäger

Ort: Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia (Illinois)

Projekt: Das Holometer-Experiment lenkt einen zweiseitigen Laserstrahl durch zueinander rechtwinklige Tunnel und sucht nach winzigen Phasenverschiebungen, die auf eine Quantelung von Raum und Zeit hinweisen, wie sie das so genannte holografische Prinzip vorsieht.

Experimentatoren (von links nach rechts): Sam Waldman, Ohkyung Kwon, Robert Lanza, Aaron Chou, Craig Hogan, Ray Tomlin, Stephen Meyer, Brittany Kamai, Lee McCuller, Jonathan Richardson, Chris Stoughton, Rainier Weiss und Richard Gustafson.

Nun hat Rosenberg die Chance nachzuweisen, dass Axionen die Lösung des Rätsels liefern, und nebenbei die allgemeine Relativitätstheorie zu stützen, das heißt Einsteins Idee von der Schwerkraft als Krümmung der Raumzeit. Das Konzept von ADMX ist bestechend einfach. Wenn die Dunkle Materie wirklich aus Teilchen besteht, muss ein permanenter Strom solcher Partikel die Erde und alles auf ihr durchdringen. Falls es sich um Axionen handelt, werden sie hin und wieder zerfallen. Zwar sind sie selbst unsichtbar, doch bei den seltenen Zerfällen sollten sie sich in Mikrowellen verwandeln, die ein schwaches, aber nachweisbares Signal erzeugen. Gewiss theoretisch einfach – jedoch praktisch schwierig durchzuführen.

»Unser Hohlraum ist so groß wie ein Ölfass«, erklärt Rosenberg, »und wird auf 100 Millikelvin gekühlt«, das heißt auf 0,1 Grad über dem absoluten Nullpunkt. Die extrem tiefe Temperatur garantiert, dass der Detektor selbst fast kein Mikrowellenrauschen erzeugt. Der Hohlraum wird einem Magnetfeld ausgesetzt, um den Zerfall von Axionen anzuregen. Eine bleistiftgroße Sonde soll auffällige Mikrowellen aufspüren. Das Problem ist nur: Niemand weiß genau, nach welcher Frequenz man suchen soll. Sie hängt von der Masse des Axions ab – und die ist natürlich unbekannt.

Also muss man eine Frequenz des Mikrowellenbands nach der anderen abtasten. Bei dem ADMX-Versuch geht es im Wesentlichen darum, die Kanäle eines Kurzwellenradios



SANDY NICHOLSON



Stringtheoretiker

Ort: Stanford University, Kalifornien

Projekt: Die Stringtheorie deutet alle Teilchen und Kräfte als Schwingungszustände winziger Saiten (Strings). Einige Versionen der Theorie treffen Aussagen über den Beginn des Universums, die sich

vielleicht durch feine Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung bestätigen lassen.

Theoretiker (von links nach rechts): Andrei Linde, Renata Kallosh, Ahmed Almheiri, Leonard Susskind, Shamit Kachru, Patrick Hayden und Lampros Lamprou.

TIMOTHY ARCHIBALD

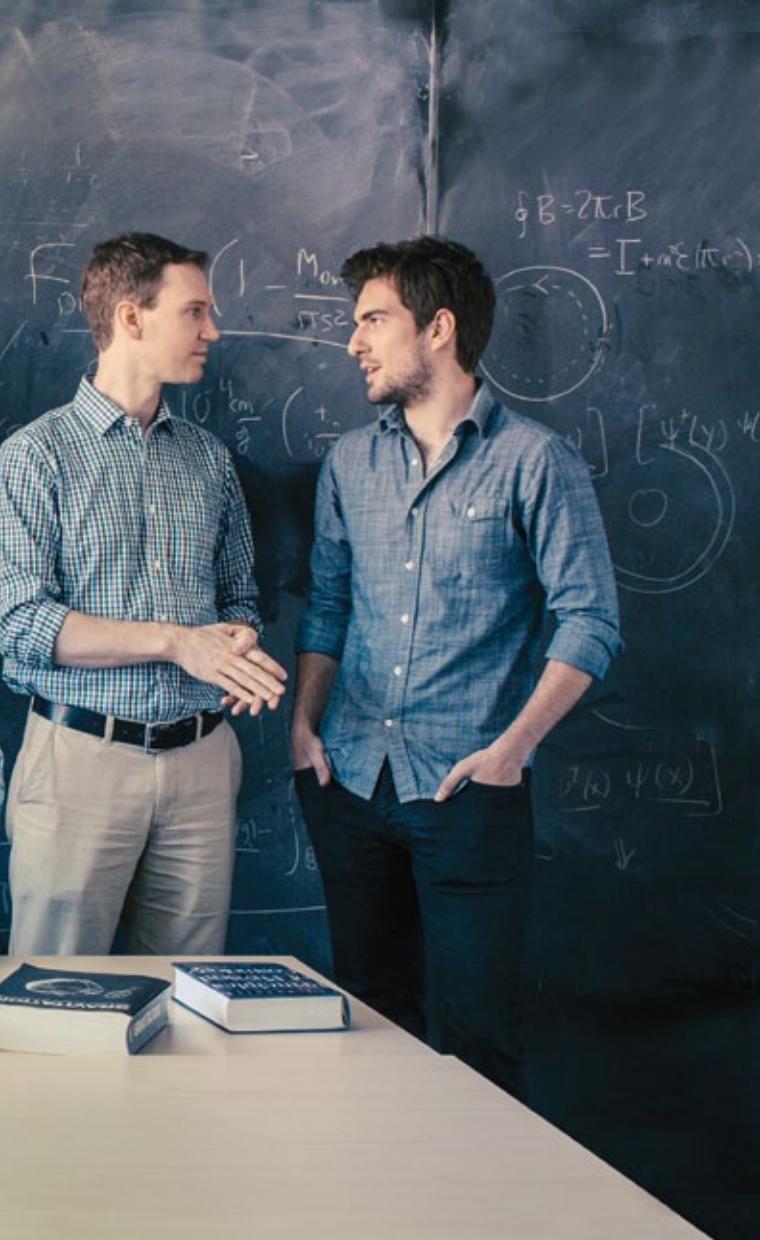
durchzuprobieren – allerdings mit einem so empfindlichen Radioempfänger, dass er ein Signal vom Mars wiedergeben könnte. »Bis 2018 werden wir die gesamte Suchregion abgetastet haben«, sagt Rosenberg. »Dann ist das Axion da oder nicht da.« Mit anderen Worten, dann besitzen wir entweder ein starkes Indiz für die Struktur einer Theorie von Allem – oder wir können eine weitere Idee von der Liste streichen.

Die Energie des leeren Raums

Während sich Rosenberg mit dem Problem der Dunklen Materie herumschlägt, suchen Kollegen nach dem anderen unsichtbaren Hauptbestandteil des Universums: der Dunklen Energie. Sie erzeugt im Gegensatz zur Dunklen Materie, die eine Gravitationsanziehung ausübt, eine Abstoßungskraft. Da die Dunkle Energie der Gravitation entgegenwirkt, beeinflusst sie direkt die Interpretation der allgemein-relativistischen Gleichungen. Vor allem aber lässt sich die rätselhafte Abstoßung nicht im Rahmen des derzeit gültigen Modells der Teilchenphysik erklären und liefert darum einen entscheidenden Test für jede Theorie von Allem.

Einen derartigen Test führt der erwähnte Physiker Friedman von der University of Chicago durch. Sein wichtigstes Instrument ist eine Spezialkamera, die am Vier-Meter-Blanco-Teleskop auf dem Cerro Tololo in Chile in etwa 2200 Meter Höhe angebracht ist. Das Ziel des Projekts namens Dark Energy Survey ist es, möglichst viele Bilder ferner Galaxien zu sammeln. Jede Aufnahme umfasst 570 Megapixel, eine riesige Datenmenge. Die Kamera sammelt pro Nacht 400 Bilder, in 105 Nächten pro Jahr, und das mehr als fünf Jahre lang. Mit dem Abschluss der Himmelsdurchmusterung im Februar 2018 wird sie 300 Millionen Galaxien und rund 4000 Supernovaexplosionen erfasst haben. Zum Vergleich: Eine an der University of California in Berkeley von 1998 bis 2000 durchgeführte, nach dem damaligen Stand der Technik automatisierte Supernovasuche lieferte alles in allem 96 Treffer.

Friemans Team zerplückt die Beobachtungen des Surveys auf vier verschiedene Arten, die jeweils eine spezifische Eigenschaft der Dunklen Energie aufspüren sollen. Eine Analyse konzentriert sich auf Supernovae vom Typ 1a, die als Standardkerzen zur Bestimmung kosmischer Distanzen dienen.



konstant ist. Falls Frieman feststellt, dass sie sich mit der Zeit ändert, muss eine allumfassende Theorie das erklären.

Bevor wir so weit sind, muss ein tiefer liegendes Problem geklärt werden. »Wir nehmen an, dass die Dunkle Energie die Ursache der beschleunigten Expansion ist, aber das wissen wir nicht mit Sicherheit. Vielleicht ist die allgemeine Relativitätstheorie im allergrößten Maßstab einfach nicht die richtige Theorie«, meint Frieman. Er will genau untersuchen, ob eine modifizierte Version der Relativitätstheorie die Wirkung der Dunklen Energie nachahmen kann. So oder so muss es eine Theorie geben, die über Einstein hinausgeht, und der Dark Energy Survey wird bei der Suche nach ihr helfen.

Ist die Welt ein Hologramm?

So seltsam Dunkle Energie und Dunkle Materie sein mögen, wir können sie uns immerhin als Zutaten zum uns bekannten Universum vorstellen – als eine Glasur zusätzlicher Teilchen oder Felder auf einer Realität, die Einstein ohne Weiteres anerkannt hätte. Doch vielleicht muss das, was wir unter Wirklichkeit verstehen, im Licht einer umfassenderen Theorie radikal neu gesehen werden? Vielleicht besitzt die Raumzeit selbst ganz neue, unentdeckte Eigenschaften, welche die allgemeine Relativitätstheorie nicht erfasst?

Craig Hogan (siehe Bild S. 38/39) verfolgt diese Idee mit einem Experiment, das er Holometer nennt. Der Direktor des Center for Particle Astrophysics am Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) in Batavia (Illinois) möchte herausfinden, ob Raum und Zeit aus fundamentalen Einheiten bestehen – so, als folge das Universum im Kleinen dem Ticken einer Uhr und den Markierungen eines Maßstabs. Dieser Idee zufolge bilden wir uns bloß ein, in einer dreidimensionalen Welt zu leben. Unter einem unvorstellbar starken Mikroskop, das den Raum bis auf zehn Billionen Billionenbruchteile eines Atoms vergrößern könnte, sähe man zweidimensionale Pixel, die – wie die Bildpunkte auf einem Fernsehschirm – nur von Weitem einen dreidimensionalen Eindruck machen.

Jede dieser Einheiten soll Quantenregeln gehorchen; zum Beispiel ist ihr Ort ein wenig unbestimmt. In großem Maßstab erscheint der Raum kontinuierlich wie in Einsteins Theorie, doch im Kleinen ist er gequantelt. Auf diese Weise zwingt ein gepixeltes Universum die Quantenmechanik in die Relativitätstheorie hinein und beseitigt ein Haupthindernis für eine einheitliche Theorie.

Die Idee, unser dreidimensionales Universum beruhe auf einer zweidimensionalen Realität, heißt holografisches Prinzip. Der Name Holometer spielt darauf an. Hogans Instrument besteht aus einem Laserstrahl, der in zwei Teilstrahlen aufgespalten wird, die durch separate Tunnel laufen, an Spiegeln reflektiert und schließlich wieder vereinigt werden. Falls der Raum gequantelt ist, sollte die mit jedem Pixel verbundene Ortsunbestimmtheit Fluktuationen erzeugen, welche die beiden Strahlen ein wenig außer Phase bringen und bei deren Vereinigung Interferenzstreifen erzeugen. Im Prinzip vermag das Holometer Bewegungen im Attometermaßstab zu messen – das sind 10^{-18} Meter!

Ihre scheinbare Helligkeit zeigt ihre Entfernung, und ihre Rotverschiebung gibt an, wie schnell sie sich von uns entfernen. Aus einer ganzen Schar solch kosmischer Meilensteine lässt sich schließen, wie sich die Expansion des Weltalls mit der Zeit verändert hat. Die anderen drei Analysen untersuchen verschiedene Formen von Galaxienhaufen. Die Gravitation ist bestrebt, alles zusammenzuziehen, die Dunkle Energie drückt dagegen alles auseinander. Daher gibt die Art, wie sich Galaxienhaufen über kosmische Zeitspannen verändern, Aufschluss über die Stärke der Dunklen Energie.

Nach den einfachsten Modellen ist die Dunkle Energie eine unveränderliche und allgegenwärtige Eigenschaft des leeren Raums. Die Standardtheorie der Teilchenphysik kann zwar eine solche Energie erklären, liefert aber für ihre Größe einen um den Faktor 10^{120} zu hohen Wert; manchmal wird das als die schlechteste Vorhersage der gesamten Physik bezeichnet. Eine Herleitung des echten, unvorstellbar viel kleineren Werts der Dunklen Energie ist der wohl wichtigste Test, den eine Theorie von Allem bestehen muss. Auch wissen die Astronomen noch gar nicht, ob die Dunkle Energie wirklich

Doch vielleicht ist das noch nicht klein genug. Nach Meinung einiger Theoretiker könnte der Raum so fein gequantelt sein, dass das Holometer daran scheitern muss. Vor allem Leonard Susskind (siehe Bild S. 40/41) von der Stanford University in Kalifornien, ein führender Vertreter des holografischen Universums, gibt sich skeptisch. »Lenny hat eine andere Vorstellung von der Wirkung des holografischen Prinzips«, räumt Hogan ein. »Er glaubt nicht, dass wir je etwas sehen werden. Als wir 2014 unser Experiment bei einer Tagung vorstellten, sagte er, er würde sich die Kehle durchschneiden, falls wir diesen Effekt fänden.«

Der Streit könnte bald beigelegt sein. Nachdem das Holometer eine Stunde lang Daten gesammelt hat, nähert sich seine Empfindlichkeit einer Größenordnung, bei der nach Hogans Meinung die Körnigkeit des Raums wirksam wird. Die Entscheidung soll in einem Jahr fallen: »Ob wir dann etwas sehen oder nicht – in jedem Fall wird es die Vermutungen eingrenzen. Niemand weiß, wie es ausgeht.«

Die Fortsetzung von Einsteins Traum

Nun war ich begierig, Susskinds Standpunkt kennen zu lernen. Ganz im Gegensatz zum Klischee des grüblerischen, von Mathematik besessenen Theoretikers beginnt Susskind, sofort nachprüfbare Konzepte zu diskutieren. »Die Leute lästern über theoretische Physiker, die würden leichtfertig Ideen aushecken, ohne sich um die Falsifizierung zu kümmern. Das ist Unsinn«, sagt er. Das Holometer sei jedenfalls nicht der richtige Labortest.

Susskind hält es für besser, am Rand des beobachtbaren Universums nach Indizien für die Stringtheorie zu suchen. Diese Theorie vereinigt alle Teilchen und Kräfte zu unterschiedlichen Vibrationen von schwingenden Energiefäden (Strings). Sie trifft zudem Aussagen über die physikalischen Bedingungen zur Zeit des Urknalls. Susskind arbeitet an Versionen der Theorie, die sogar Zustände vor der Entstehung unseres Universums beschreiben. Wie er glaubt, könnten die Astronomen Indizien für diese kosmische Vorgeschichte in der Strahlung finden, die uns aus den fernsten Fernen des Alls erreicht.

Allerdings werden nach Susskinds Meinung die nächsten Schritte zu einer umfassenden Theorie nicht auf Experiment oder Beobachtung beruhen, sondern auf der mathematischen Erforschung von Schwarzen Löchern und Raumzeitstrukturen. »In den kommenden fünf bis zehn Jahren werden wichtige Dinge geschehen«, sagt er voraus. »Damit meine ich nicht eine komplette Theorie von Allem; davon sind wir noch weit entfernt. Aber es wird entscheidende Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Gravitation und Quantenmechanik geben.«

Wie die meisten heutigen Theoretiker erwartet Susskind, dass dabei die Quantenmechanik den Rahmen abstecken wird, in den sich Gravitation und allgemeine Relativitätstheorie fügen müssen. Der Physiker Lee Smolin (siehe Bild oben) vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Ontario (Kanada) sieht das umgekehrt.



Kosmische Kreuzfahrer

Ort: Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Kanada)

Projekt: Die Schleifen-Quantengravitation versucht die Quantenmechanik in eine modifizierte allgemeine Relativitätstheorie einzubauen. In einer Version soll Einsteins Relativität der Zeit durch eine Relativität des Volumens ersetzt werden; Zeit und Form bleiben bedeutungsvoll, der Volumenbegriff verliert seinen Sinn.

Theoretiker (hinten, von links nach rechts): Hamish Forbes, Sean Gryb, Flavio Mercati, Gabriel Herczeg und Daniel Carrasco Guariento; **(vorne, von links nach rechts):** Lee Smolin, Julian Barbour, Andrea Napoletano, Henrique Gomes und Niall Ó Murchadha.

Nach Smolins Überzeugung sind viele seiner Kollegen so von der Quantenmechanik besessen, dass ihr Denken buchstäblich zu klein für eine endgültige Theorie ist. »Die Quantenmechanik ist nur als Theorie eines Teilsystems sinnvoll«, sagt er, »aber die allgemeine Relativitätstheorie ist keine Beschreibung von Teilsystemen. Sie beschreibt das Universum als abgeschlossenes System.« Wenn man das Universum als Ganzes verstehen wolle, müsse man wie Einstein die Sprache der Relativitätstheorie verwenden.

Von diesem Ansatz aus ist Smolin zu der überraschenden Hypothese gelangt, dass sich die physikalischen Gesetze mit der Zeit entwickeln und dass das Universum über ein Gedächtnis seiner eigenen Geschichte verfügt; Smolin prägt dafür den Begriff Präzedenzprinzip. Auf diese Weise hofft er über spezielle ungeklärte Details der Quantenmechanik – die Stärke dieses besonderen Felds oder die Masse jenes besonderen Teilchens – hinauszugelangen, indem er sie als Entwicklungaspekte eines abgeschlossenen Systems namens



Universum betrachtet. Er hat sogar einen Vorschlag, wie man seine Idee testen könnte.

»Wenn wir ein großes und komplexes System entwickeln könnten, das dennoch als reiner Quantenzustand zu beschreiben wäre, würden wir die Natur zwingen, eine neuartige Systematik zu erfinden. Wir könnten das möglicherweise mit Quantengeräten erreichen«, meint Smolin. Nachdem das gleiche System immer und immer wieder im Labor erzeugt worden wäre, würde die Natur vielleicht eine Vorliebe für einen bestimmten Quantenzustand entwickeln. »Es wäre schwierig, ihn vom Rauschen der experimentellen Praxis zu unterscheiden – aber nicht unmöglich.«

Smolin möchte nicht wie ein Mystiker klingen, jedoch scheint er irgendwie nicht über das physikalische Universum zu sprechen, sondern über den Geist Einsteins. Dessen Erbe prägt noch immer die theoretische Forschung, und neue Experimente bleiben Einsteins altem Ideal einer allumfassenden Theorie verpflichtet. ~

DER AUTOR



Corey S. Powell ist Wissenschaftsautor, Blogger und Journalist. Er lebt in Brooklyn (New York) und ist Gastprofessor am Science, Health and Environment Reporting Program der New York University.

QUELLEN

Melchior, P. et al.: Mass and Galaxy Distribution of Four Massive Galaxy Clusters from Dark Energy Survey Science Verification Data. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 449, S. 2219–2238, 2015

Smolin, L.: Im Universum der Zeit: Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis des Kosmos. Deutsche Verlags-Anstalt, München 2014

Wagner, A. et al.: Search for Hidden Sector Photons with ADMX Detector. In: *Physical Review Letters* 105, 171801, 2010

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372445



In seinen Gedankenexperimenten machte Albert Einstein Theorien anschaulich: Was etwa sähe jemand, der mit dem Fahrrad einem Lichtstrahl folgt? So gewonnene intuitive Einsichten führten ihn zu neuen fundamentalen Erkenntnissen über den Kosmos.

Alles nur im Kopf

Einstiens Gedankenexperimente gehören zu den bedeutendsten der Wissenschaftsgeschichte. Damit hinterließ er der Welt ein weiteres Erbe neben seinen berühmten Theorien.

Von Sabine Hossenfelder

Seine größten Durchbrüche hatte Einstein, indem er sich sehr spezielle Situationen vorstellte und anhand dieser die Folgen einer Theorie überprüfte. Als Jugendlicher, so erinnerte er sich später, fantasierte er, was er wohl sähe, würde er mit einer Lichtwelle reisen – was ihm erste Hinweise auf die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit gab. Die allgemeine Relativitätstheorie, sein Monumentalwerk zur Gravitation, hat ihre Wurzeln in gedanklichen Auf- und Abfahrten mit einem rasenden Aufzug.

Für einen Theoretiker ist diese Weise zu denken an sich nichts Besonderes. Doch Albert Einstiens außergewöhnliche Leistungen trugen entscheidend dazu bei, das Gedankenexperiment als unverzichtbares Instrument moderner theoretischer Physik zu etablieren. Heutige Wissenschaftler wenden es regelmäßig an, um neue Ideen auszuarbeiten und die Widersprüche bestehender aufzudecken.

Allerdings ergeben sich mit der heutigen Popularität des Gedankenexperiments auch einige unangenehme Fragen. Auf der Suche nach einer »Theorie von Allem«, welche die Physik allerkleinster Quantenphänomene mit der auf kosmologischen Größenskalen verbinden würde, lassen sich gerade die vielversprechendsten Ideen noch nicht durch tatsächlich durchgeführte Experimente untermauern. Welchen Wert haben sie für sich allein? Wie weit dürfen wir logischen Schlüssen trauen? Wo lässt sich eine Grenze zwischen wissenschaftlicher Intuition und wilder Fantasie ziehen? Die Geschichte von Einstiens Entdeckungen hinterlässt keine klaren Antworten auf solche Fragen. Einerseits war sein Vertrauen in gedankliche Leistungen bekanntlich von grandiosen Erfolgen gekrönt. Andererseits nahm er echte Experimente als Anlass für viele seiner fiktiven Szenarien. Manchmal konzentrierte sich Einstein sogar so sehr darauf, Vorhersagen für messbare Phänomene zu machen, dass er tiefer liegende Prozesse nicht erkennen konnte – obwohl selbst seine Fehleinschätzungen zu einigen späteren Durchbrüchen beitrugen.

Einstiens Genie äußerte sich bei seinen Gedankenversuchen vor allem darin, dass der Physiker erkannte, welche Teile aus der Erfahrungswelt bedeutsam waren und welche man ignorieren konnte. Sein wohl bekanntestes Szenario arbeitete er von 1907 an allmählich aus: das Fahrstuhlexperiment. Er argumentierte, dass eine Person im Innern einer fenster-

AUF EINEN BLICK

DIE MACHT DER VORSTELLUNG

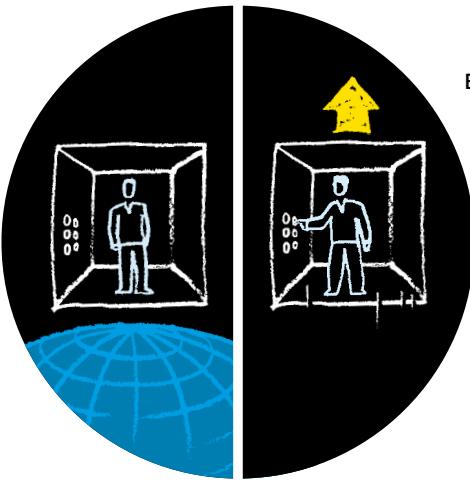
1 Einstein verstand es, komplexe physikalische Zusammenhänge auf **gut vorstellbare Szenarien** zu reduzieren. In Gedankenexperimenten konnte er zum Beispiel testen, welche Auswirkungen neue theoretische Spielregeln hätten.

2 Die Überlegungen brachten ihn auf die richtigen Ideen zu seiner Relativitätstheorie. Auf ähnlich trickreiche Weise versuchte er später, Interpretationen der **Quantenmechanik zu widerlegen**, die er für falsch hielt.

3 Vorstellungskraft allein nützt der Physik aber nur begrenzt. Die **konstruierten Situationen müssen auch real überprüfbare Vorhersagen** machen. Heutige Gedankenexperimente, etwa zu Schwarzen Löchern, haben kaum noch Bezüge zu messbaren Größen.

losen Kabine nicht unterscheiden kann, ob sich der Fahrstuhl in einem Gravitationsfeld befindet oder ob er sich durch eine konstante Beschleunigung immer schneller nach oben bewegt. Daraus schloss er, dass auch die physikalischen Konsequenzen in beiden Fällen gleich sein sollten. Diesem »Äquivalenzprinzip« zufolge sind die lokalen Auswirkungen der Schwerkraft die gleichen wie diejenigen einer gleich bleibenden Beschleunigung fernab aller anziehenden Massen. In mathematische Formalismen übertragen wurde daraus die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. Das Fahrstuhlexperiment brachte Einstein also die nötige Trittsicherheit für den schwierigen intellektuellen Sprung hin zu seiner größten Leistung, der geometrischen Beschreibung der Gravitation.

Später argumentierte Einstein hartnäckig gegen einige Interpretationen der Quantenmechanik, insbesondere die Unschärferelation. Diese prinzipielle Unbestimmtheit verursacht, dass die immer genauere Festlegung einer Eigenschaft eines Objekts – etwa seines Orts – zwangsläufig dazu führt, eine zweite damit verknüpfte Größe – in diesem Beispiel den Impuls – zunehmend unsicher werden zu lassen. Einstein war davon überzeugt, dieser Aspekt der Quantentheorie sei ein Beleg dafür, dass hier grundsätzlich etwas im Argen lag.



Einstins Äquivalenzprinzip zufolge kann jemand in einem geschlossenen Raum nicht feststellen, ob dieser in einem Gravitationsfeld ruht oder fern ab von Massen beschleunigt wird.

Im Lauf eines Jahre währenden Austauschs mit dem dänischen Pionier der Quantenphysik, Niels Bohr, konstruierte Einstein zahlreiche Gedankenexperimente, um zu beweisen, dass es prinzipiell möglich ist, die Unschärferelation zu verletzen. Sein Kollege widerlegte jedes einzelne. Dabei war Bohr aber gezwungen, sich intensiv mit seinem Verständnis von der quantenmechanischen Unsicherheit auseinanderzusetzen, was ihn wiederum in seinem Urteil bestärkte, es müsse sich um eine fundamentale Natureigenschaft handeln. Wenn selbst der berühmte Einstein keinen Weg fand, Impuls und Ort eines Teilchens präzise zu messen – dann musste an der Unschärferelation wohl etwas dran sein!

Wie verhalten sich verschränkte Teilchen?

1935 wollte Einstein gemeinsam mit seinen Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen eine besonders schlagkräftige Kritik am Unschärfeprinzip veröffentlichen. Möglicherweise weil Podolsky und nicht Einstein den ersten Entwurf des Texts verfasste, war dieses Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon schließlich kein intuitiv vorstellbares Szenario mehr, in dem geschlossene Kisten, Uhren und Lichtstrahlen die Hauptrollen spielten. Abstrakte Reihen von Gleichungen beschrieben die Wechselwirkungen zweier allgemein gehaltener Quantensysteme.

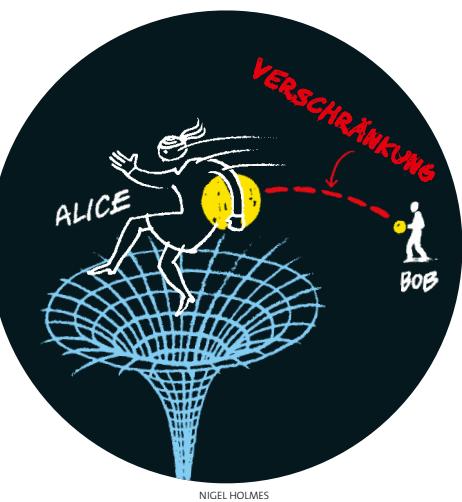
In der einfachsten Variante dieses Gedankenexperiments geht es darum, wie sich zwei »verschränkte« Objekte verhalten, die sich einen gemeinsamen Quantenzustand teilen. Beispielsweise könnte ein instabiles Teilchen mit einem Spin (ein Maß für eine besondere Form des Drehimpulses) von null in zwei Teilchen zerfallen, die in entgegengesetzte Richtungen davonfliegen. Erhaltungsgesetze legen nun fest, dass sich die beiden Spins der neuen Teilchen zu null addieren müssen. Eines der beiden könnte etwa einen Wert haben, der nach oben ausgerichtet ist, das andere einen gleich großen nach unten. Die Gesetze der Quantenmechanik schreiben wiederum vor, dass keines dieser Objekte einen festgelegten Spin besitzt, bis derjenige eines Partners tatsächlich gemessen wird. Doch sobald der Wert für eines der Teilchen feststeht, wird auch der Zustand des anderen Wirklichkeit – augenblicklich und selbst dann, wenn zwischen den Teilchen inzwischen eine enorme Distanz liegt.

Einstein hielt diese »spukhafte Fernwirkung« für Unfug. Seine eigene spezielle Relativitätstheorie hatte doch bereits festgelegt, dass sich nichts schneller als das Licht bewegen kann. Wie also sollten zwei Teilchen verzögerungsfrei miteinander kommunizieren? Er vermutete stattdessen, dass der Ausgang der Messung bereits zuvor festgelegt ist: durch verborgene Variablen, für welche die Quantenmechanik lediglich keinen Formalismus besitzt. Es folgte eine Jahrzehntelange Diskussion, bis der nordirische Physiker John Stewart Bell 1964 – einige Jahre nach Einsteins Tod – eine mathematische Formel fand, mit der sich prinzipiell eine experimentelle Entscheidung treffen lässt, ob man die Fernwirkung akzeptieren muss oder Einsteins versteckte Variablen zum Zug kommen.

Seit den 1970er Jahren haben Versuche mit verschränkten Teilchen zunehmend deutlich vor Augen geführt, dass Einstein falsch lag und Quantenteilchen tatsächlich Informationen teilen, denen keine verborgenen Eigenschaften zu Grunde liegen können. Spukhafte Fernwirkung gibt es wirklich. Andererseits zeigen solche Experimente, dass sie nicht ausgenutzt werden kann, um Informationen schneller als das Licht zu transportieren, womit sie wiederum die spezielle Relativitätstheorie erfüllt. Diese der Intuition widersprechende Wahrheit bleibt eines der größten Rätsel der Physik, und Einsteins hartnäckiger, wenngleich irriger Widerstand erwies sich letztlich als ausschlaggebend dafür, dass wir zu dieser Erkenntnis gelangt sind.

Heute drehen sich die wichtigsten Gedankenexperimente darum, wie sich Einsteins deterministisches und relativistisches Universum mit all den Unschärfen und Überraschungen vereinbaren lässt, die der Quantenmechanik innewohnen. Nehmen wir zum Beispiel das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern. Kombiniert man die allgemeine Relativitätstheorie mit Quanteneffekten, stellt man fest, dass Schwarze Löcher allmählich und unumkehrbar verdampfen sollten. Dabei entsteht stets die gleiche Form von Strahlung, die keine Information über die Materie mehr trägt, welche einmal in das Gebilde fiel. Doch so einen Vorgang verbietet die Quantenmechanik, in der jeder Prozess prinzipiell um-

Ein modernes Gedankenexperiment, das sich mit dem Verhältnis von Quantenmechanik und Raumzeit beschäftigt, geht von zwei verschränkten Teilchen aus. Eines von ihnen fällt mit Alice in ein Schwarzes Loch, das andere bleibt mit Bob draußen. Was passiert dabei mit der Information aus der Verschränkung?



kehrbar sein und alle Information erhalten bleiben muss. Wir stehen daher vor einem Paradoxon und müssen einen Denkfehler begehen – aber welchen?

Die Gedankenexperimente, die sich mit dieser Situation beschäftigen, beschwören üblicherweise zwei Beobachter herauf – Alice und Bob –, die unter sich ein Paar verschränkter Teilchen wie beim Einstein-Podolsky-Rosen-Szenario aufteilen. Alice springt mit ihrem in das Schwarze Loch, während Bob mit seinem weit entfernt draußen bleibt. Ohne Alice ist Bobs Teilchen nunmehr bloß ein einfaches Objekt mit nicht feststehender Eigenschaft. Die geteilte Information geht zusammen mit Alice verloren.

Bob und Alice behalten ihre Rolle bei einem der bekanntesten Lösungsvorschläge des Paradoxons, der so genannten Komplementarität. Als Leonard Susskind, Lárus Thorlacius und John Uglum sie 1993 vorstellten, besannen sich die drei Kollegen von der Stanford University auf Einsteins goldene Regel für Gedankenexperimente: Sie konzentrierten sich darauf, was überhaupt messbar ist. Die Physiker postulierten, dass jene Information, die mit Alice hineinfällt, später auch wieder mit der Strahlung des Schwarzen Lochs herauskommen muss. Eigentlich würde das nur eine weitere Inkonsistenz bewirken, denn die Quantenmechanik ist monogam und erlaubt jedem Teilchen nur eine Verschränkung. Bobs Teilchen kann also, solange es mit dem von Alice verbunden ist, keine zweite Verknüpfung mit einem anderen Objekt eingehen. Die Komplementarität fordert Bobs Teilchen nun aber ab, sich zugleich mit der später ausgesandten Strahlung des Schwarzen Lochs zu verschränken. Auf den ersten Blick scheint hier also nur ein Widerspruch gegen den anderen ausgetauscht worden zu sein.

Ein folgenloser Vorstoß gegen die Naturgesetze

Doch wenn niemand Zeuge dieser Inkonsistenz wird, scheinen die Naturgesetze ein Schlupfloch zu bieten. Die Komplementarität basiert auf dem Argument, dass schlicht niemand in der Lage ist, die Teilchen von Alice und Bob dabei zu erwischen, wie sie die Regeln brechen. Angenommen, ein Dritter namens Charlie beobachtet Alice und Bob. Während Alice ins Schwarze Loch fällt, misst er die austretende Strahlung. Theoretisch könnte die Information, die darin steckt, Charlie verraten, dass Bob und Alice gegen die Monogamie ihrer Verschränkung verstossen haben. Um sich jedoch sicher zu sein, müsste Charlie seine Beobachtung nicht nur mit der Messung vergleichen, die Bob durchführt, sondern auch mit dem Wert, den Alice erhält – die sich aber bereits im Innern des Schwarzen Lochs befindet. Er muss also hineinspringen, um Alice davon erzählen zu können, was er in der Strahlung am Rand des Schwarzen Lochs und bei Bobs Teilchen entdeckt hat.

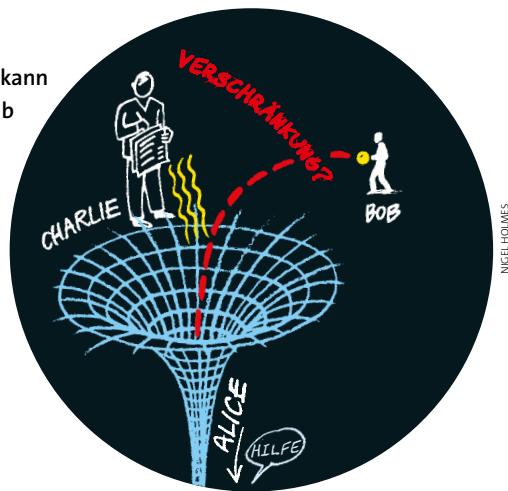
Verblüffenderweise konnten Susskind und seine Kollegen zeigen, dass Charlie keine Chance hat, in das Schwarze Loch zu fliegen und seine Ergebnisse abzugleichen, bevor er und Alice von den Gezeitenkräften zerrissen werden. Niemand außerhalb eines Schwarzen Lochs kann die Verletzung quan-

tenmechanischer Grundsätze stichhaltig beweisen, so dass dieses Verbrechen gegen die Naturgesetze straflos bleibt.

Nicht alle Wissenschaftler überzeugt dieses Argument. Ein Kritikpunkt betrifft das Äquivalenzprinzip, jene Regel also, die aus Einsteins Fahrstuhl-Gedankenexperiment hervorging. So wie der Passagier, der im Innern der Kabine nicht zwischen dem Wirken von Schwerkraft und Beschleunigung unterscheiden kann, sollte auch jemand nichts Besonderes bemerken, wenn er sich dem Schwarzen Loch so stark angeähnert hat, dass es kein Zurück mehr gibt.

Das verträgt sich nicht mit einer Konsequenz aus dem Szenario: Wenn die Strahlung, die Bob außerhalb des Schwarzen Lochs sieht, all die Informationen enthält, die mit Alice hineingefallen sind, muss sie enorm energiereich sein, um der Anziehungskraft des Horizonts entkommen zu können. Die Folge wäre eine ungeheure Feuerwand (siehe »Die Feuerwand am Horizont«, SdW 9/2015, S. 34–39), die den Vorhersagen des Äquivalenzprinzips radikal widerspricht.

An diesem Punkt befinden wir uns bereits wieder in den Tiefen der Theorie. Vielleicht gelingt es nie, die Rätsel zu lösen. Doch weil sie zu einem fundamentaleren Verständnis von der Quantennatur der Raumzeit führen könnten, gehören solche Gedankenspiele zu den lebendigsten Bereichen der modernen theoretischen Physik. ↗



NICOL HOLMES

DIE AUTORIN



Sabine Hossenfelder arbeitet am Nordic Institute for Theoretical Physics in Stockholm an Themen der Quantengravitation und der Physik jenseits des Standardmodells. Sie bloggt unter: <http://backreaction.blogspot.com>

QUELLE

Halpern, P.: Einstein's Dice and Schrödinger's Cat: How Two Great Minds Battled Quantum Randomness to Create a Unified Theory of Physics. Basic Books, 2015

Mit Silvesterraketen bis zu den Sternen

Irdische Feuerwerke und die Leuchterscheinungen des Alls haben eines gemeinsam: Ihre Farben verraten die chemische Zusammensetzung der Materie.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»Die Optik ist eine transzendentale Chemie.
Man sieht hier die Stoffe.«

Johann Wilhelm Ritter (1776–1810)

Wenn beim Jahreswechsel prächtige Lichtskulpturen die schwach funkelnenden Sterne überstrahlen, denkt man zunächst wohl kaum an eine tiefe Beziehung zwischen den Vorgängen auf der Erde und denjenigen im All. Es war aber gerade der physikalische Mechanismus hinter den reizvollen Farben von pyrotechnischen Explosio-nen, der Astronomen auch einen genaueren Blick auf die Ursprünge des Kosmos ermöglichte.

Grundbestandteil der heutigen Feuerwerke ist Schwarzpulver, das in China bereits vor einem Jahrtausend erfunden wurde und seit dem 14. Jahrhundert in Europa bekannt ist. Es erzeugt das Licht- und Farbenspiel sowie die Knalleffekte. Bei der Herstellung werden Kaliumnitrat (Kalisalpeter), Holz-

kohle und Schwefel vermischt. Dabei dient der Salpeter als Sauerstofflieferant; die Kohle und der Schwefel sind die Brennstoffe. Letzterer senkt die Zündtemperatur, damit man die chemische Reaktion mit einfachen Mitteln starten kann.

Um mit Schwarzpulver Raketen an-zutreiben, müssen – ähnlich wie in der Raumfahrt – die Verbrennungsgase gerichtet aus einer düsenförmigen Öff-nung strömen. Das treibt den Feuer-werkskörper in die entgegengesetzte Richtung. Bei diesem Vorgang wirkt physikalisch gesehen die Impulserhal-tung: Das Produkt aus Geschwindigkeit und Masse der ausströmenden Gase ist gleich dem entsprechenden Produkt bei der aufsteigenden Rakete. Die Ver-brennungsprodukte entweichen dabei so schnell, dass die Silvesterrakete trotz ihrer verhältnismäßig großen Masse mit bis zu 100 Kilometer pro Stunde emporfliegt. Enthält das gezündete Gemisch noch Titan- oder Eisenpulver, zeichnet der entweichende Rauch ei-nen eindrucksvollen Funkenschweif.

Nachdem die Rakete etwa zwei Drittel ihrer endgültigen Höhe erreicht hat, lässt der Schub deutlich nach. Denn der gerichtete Fluss der Gase hängt vom Druck in der Papphülse ab. Davon kann

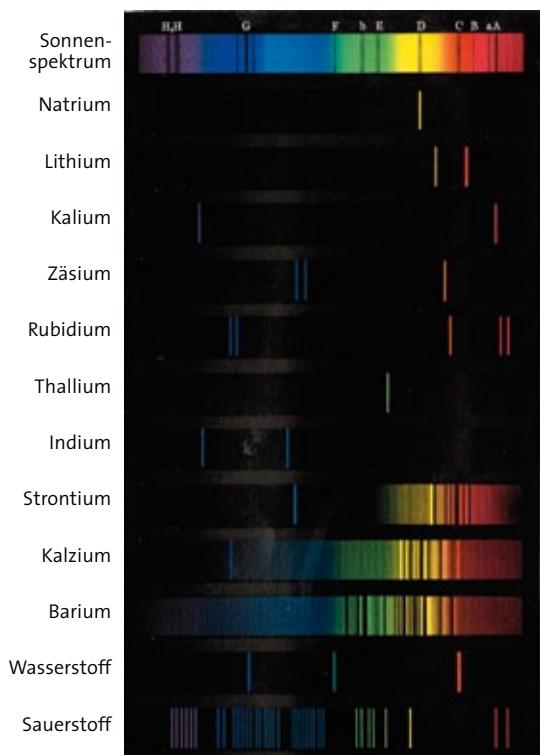
sich umso weniger aufbauen, je größer der Hohlraum ist, den das abgebrannte Pulver hinterlässt. Dadurch wird die Ra-keite immer langsamer.

Wenn das Schwarzpulver bei einer typischen Höhe zwischen 50 und 100 Metern verbraucht ist, geht das eigent-liche Feuerwerk los. Jetzt zünden mehrere Lagen unterschiedlicher Substanzen und versprühen faszinierende Lichtgirlanden.

Deren Gestalt wird einerseits vom ausgeklügelten inneren Aufbau der Ra-keite bestimmt. Andererseits geben die Gesetze der Physik vor, welches Bild die herausgeschleuderten glühenden Partikel in den Himmel malen. Sie alle fallen letztendlich herab, so dass in der Summe die charakteristischen schirmartigen Muster entstehen.

Beimischungen verschiedener Me-tallsalze erzeugen die typischen Farben der Lichtfiguren. Bei hohen Tempera-turen um die 1000 Grad Celsius geben Natriumionen gelbes, Strontium rotes, Barium grünes und kupferhaltige Ver-bindungen blaues Licht ab. Für die Hel-ligkeit sorgen beispielsweise Magnesi-um oder Aluminium, die mit blendend weißer Flamme verbrennen.

Die unterschiedlichen Farben sind immer mit bestimmten Elementen verknüpft, so dass man prinzipiell auch aus der Distanz bestimmen kann, was gerade glüht. Dazu reicht der Blick mit dem Auge allein allerdings meist nicht aus. Mit Hilfe eines farbzerlegenden Spektrometers – das üblicherweise ein Glasprisma oder ein optisches Gitter enthält – lassen sich jedoch ganz bestimzte Wellenlängen eindeutig als helle Linien erkennen. Sie sind der »Steckbrief« des jeweiligen Elements (siehe Abbildung links).



Angeregte Atome senden Licht mit charakteristischen Linien in ihren Emis-sionsspektren aus. Im kontinuierlichen Sonnenspektrum (ganz oben) sind dunkle Auslassungen zu sehen, die Fraunhoferlinien. Sie entstehen, wenn Atome in der Sonne einzelne Wellen-längen des weißen Lichts absorbieren – eben diejenigen, die sie ebenfalls emittieren.



FOTOLIA / PATRIKSLEZAK

Die verschiedenen Farben bei einem Feuerwerk entstehen, wenn das heiße Schwarzpulver beigemengte Elemente zum Aussenden von Licht anregt.

Diese Art der chemischen Fernanalyse entwickelten Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899) zu einer äußerst präzisen Methode, die inzwischen in vielen Bereichen eingesetzt wird. Entscheidend dafür war auch der von Bunsen verbesserte und heute nach ihm benannte Brenner, der eine nahezu farblose Flamme erzeugen kann, deren Eigenspektrum nicht mehr stört.

Himmlische Chemie im Fernrohr

Einer Überlieferung zufolge blickte Bunsen am 1. Juni 1860 während eines bengalischen Feuers vor dem Heidelberger Schloss vom Dach seines Labors durch ein Spektrometer. Im grünen Bereich des Spektrums sah er im Feuerwerk deutlich die Linien des Bariums und im roten diejenigen des Strontiums. Er soll dann zu Kirchhoff gesagt haben: »Wenn wir auf diese Entfernung erkennen könnten, welche Stoffe in den Flammen glühen – warum könnten wir nicht auch erkennen, aus welchen Stoffen die Himmelskörper bestehen?«

Der revolutionäre Gehalt solcher Gedanken wird vor dem Hintergrund einer Aussage des Mathematikers und Philosophen Auguste Comte (1798–1857) besonders deutlich. 1835 schrieb

er mit einer Überzeugung, die viele zeitgenössische Astronomen teilten: »Wir werden niemals, mit welchem Mittel auch immer, die chemische Zusammensetzung der Sterne untersuchen können. Unsere positiven Kenntnisse sind notwendigerweise auf ihre geometrischen und mechanischen Phänomene beschränkt.«

Bunsen und Kirchhoff jedoch hoben mit ihrer Arbeit die Spektralanalyse der Sonne und der Sterne aus der Taufe. Damit brach letztlich eine neue Ära in der Astrophysik an: Unter der Voraussetzung, dass das Universum überall gleich aufgebaut ist, wurden im Licht von physisch nie erreichbaren Himmelskörpern Elemente identifizierbar, die man bislang nur von der Erde kannte. Das galt auch umgekehrt: Nachdem der englische Astronom Joseph Norman Lockyer (1836–1920) und unabhängig von ihm sein französischer Kollege Jules Janssen (1824–1907) 1868 im Sonnenspektrum Linien eines unbekannten Elements entdeckten, suchte man nach Vorkommen bei uns. Das Element Helium (abgeleitet vom griechischen Begriff für die Sonne) wurde 1895 auch in irdischem Gestein aufgespürt. Heute vermessen Astronomen mit der Spektroskopie sogar die Expansion des Universums, indem sie die so genann-

te Rotverschiebung der charakteristischen Absorptionslinien einer fernen Galaxie bestimmen.

Der deutsche Philosoph Hans Blumenberg (1920–1996) formulierte 1981, dass »der Sternenhimmel zum Lehrbuch für die Technik dessen geworden ist, was natürlicherweise auf der Erde nicht gefunden werden kann«: Herkunft und Schicksal unseres Planeten samt seiner Bewohner lassen sich durch immer ausgeklügeltere Methoden aus den kosmischen Erscheinungen herauslesen. Wer zu Silvester das neue Jahr mit einem Feuerwerk begrüßt, sollte daher durch die Lichtgirlanden hindurch vielleicht auch einmal einen Blick auf die Sterne richten – die uns dank der Pyrotechnik ein ganzes Stück näher gekommen sind. ~

DER AUTOR



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

Dieser Artikel und Links im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1378792



OLIVER WEISS

DIGITAL-MANIFEST (I)

Digitale Demokratie statt Datendiktatur

Big Data, Nudging, Verhaltenssteuerung: Droht uns die Automatisierung der Gesellschaft durch Algorithmen und künstliche Intelligenz? Ein Appell zur Sicherung von Freiheit und Demokratie.

Von Dirk Helbing, Bruno S. Frey, Gerd Gigerenzer, Ernst Hafen, Michael Hagner, Yvonne Hofstetter, Jeroen van den Hoven, Roberto V. Zicari und Andrej Zwitter

»Aufklärung ist der Ausgang des Menschen aus seiner selbstverschuldeten Unmündigkeit. Unmündigkeit ist das Unvermögen, sich seines Verstandes ohne Leitung eines anderen zu bedienen.«

Immanuel Kant, Was ist Aufklärung? (1784)

Die digitale Revolution ist in vollem Gange. Wie wird sie unsere Welt verändern? Jedes Jahr verdoppelt sich die Menge an Daten, die wir produzieren. Mit anderen Worten: Allein 2015 kommen so viele Daten hinzu, wie in der gesamten Menschheitsgeschichte bis 2014 zusammen. Pro Minute senden wir Hunderttausende von Google-Anfragen und Facebook-Posts. Sie verraten, was wir denken und fühlen. Bald sind die Gegenstände um uns herum mit dem »Internet der Dinge« verbunden, vielleicht auch unsere Kleidung. In zehn Jahren wird es schätzungsweise 150 Milliarden vernetzte Messsensoren geben, 20-mal mehr als heute Menschen auf der Erde. Dann wird sich die Datenmenge alle zwölf Stunden verdoppeln. Viele Unternehmen versuchen jetzt, diese »Big Data« in Big Money zu verwandeln.

Alles wird intelligent: Bald haben wir nicht nur Smartphones, sondern auch Smart Homes, Smart Factories und Smart Cities. Erwarten uns am Ende der Entwicklung Smart Nations und ein smarter Planet?

In der Tat macht das Gebiet der künstlichen Intelligenz atemberaubende Fortschritte. Insbesondere trägt es zur Automatisierung der Big-Data-Analyse bei. Künstliche Intelligenz wird nicht mehr Zeile für Zeile programmiert, sondern ist mittlerweile lernfähig und entwickelt sich selbstständig weiter. Vor Kurzem lernten etwa Googles DeepMind-Algorithmen autonom, 49 Atari-Spiele zu gewinnen. Algorith-

men können nun Schrift, Sprache und Muster fast so gut erkennen wie Menschen und viele Aufgaben sogar besser lösen. Sie beginnen, Inhalte von Fotos und Videos zu beschreiben. Schon jetzt werden 70 Prozent aller Finanztransaktionen von Algorithmen gesteuert und digitale Zeitungsnews zum Teil automatisch erzeugt. All das hat radikale wirtschaftliche Konsequenzen: Algorithmen werden in den kommenden 10 bis 20 Jahren wohl die Hälfte der heutigen Jobs verdrängen. 40 Prozent der Top-500-Firmen werden in einem Jahrzehnt verschwunden sein.

Es ist absehbar, dass Supercomputer menschliche Fähigkeiten bald in fast allen Bereichen übertreffen werden – irgendwann zwischen 2020 und 2060. Inzwischen ruft dies alarmierte Stimmen auf den Plan. Technologievisionäre wie

AUF EINEN BLICK

Das Digital-Manifest.

1 Neun internationale Experten warnen vor der **Aushöhlung** unserer Bürgerrechte und der Demokratie im Zuge der **digitalen Technikrevolution**.

2 Wir steuern demnach geradewegs auf die **Automatisierung** unserer Gesellschaft und die **Fernsteuerung** ihrer Bürger durch **Algorithmen** zu, in denen sich »Big Data« und »Nudging«-Methoden zu einem mächtigen Instrument vereinen. Erste Ansätze dazu lassen sich bereits in China und Singapur beobachten.

3 Ein **Zehnpunkteplan** soll helfen, jetzt die richtigen Weichen zu stellen, um auch im digitalen Zeitalter Freiheitsrechte und Demokratie zu bewahren und die sich ergebenden **Chancen** zu nutzen.

Elon Musk von Tesla Motors, Bill Gates von Microsoft und Apple-Mitbegründer Steve Wozniak warnen vor Superintelligenz als einer ernsten Gefahr für die Menschheit, vielleicht bedrohlicher als Atombomben. Ist das Alarmismus?

Fest steht: Die Art, wie wir Wirtschaft und Gesellschaft organisieren, wird sich fundamental ändern. Wir erleben der-

ETH ZÜRICH



Dirk Helbing ist Professor für Computational Social Science am Department Geistes-, Sozial- und Staatswissenschaften sowie am Department of Computer Science der ETH Zürich assoziiert. Seine aktuellen Studien diskutieren global vernetzte Risiken und die versteckten Gesetzmäßigkeiten der globalen Seuchenausbreitung. An der Delft University of Technology leitet er das Doktorandenprogramm »Engineering Social Technologies for a Responsible Digital Future«. Er ist zudem gewähltes Mitglied der Deutschen Akademie der Wissenschaften.

zeit den größten historischen Umbruch seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs: Auf die Automatisierung der Produktion und die Erfindung selbstfahrender Fahrzeuge folgt nun die Automatisierung der Gesellschaft. Damit steht die Menschheit an einem Scheideweg, bei dem sich große Chancen abzeichnen, aber auch beträchtliche Risiken. Treffen wir jetzt die falschen Entscheidungen, könnte das unsere größten gesellschaftlichen Errungenschaften bedrohen.

In den 1940er Jahren begründete der amerikanische Mathematiker Norbert Wiener (1894–1964) die Kybernetik. Ihm zufolge lässt sich das Verhalten von Systemen mittels geeigneter Rückkopplungen (Feedbacks) kontrollieren. Schon früh schwebte manchen Forschern eine Steuerung von Wirtschaft und Gesellschaft nach diesen Grundsätzen vor, aber lange fehlte die nötige Technik dazu.

Heute gilt Singapur als Musterbeispiel einer datengesteuerten Gesellschaft. Was als Terrorismusabwehrprogramm anfing, beeinflusst nun auch die Wirtschafts- und Einwanderungspolitik, den Immobilienmarkt und die Lehrpläne für Schulen. China ist auf einem ähnlichen Weg. Kürzlich lud Baidu, das chinesische Äquivalent von Google, das Militär dazu ein, sich am China-Brain-Projekt zu beteiligen. Dabei lässt

Blick nach China: Sieht so die Zukunft der Gesellschaft aus?

Wie würden die Möglichkeiten der Verhaltens- und Gesellschaftssteuerung unser Leben verändern? Das nun in China umgesetzte Konzept eines Citizen Scores gibt uns eine Vorstellung davon: Durch Vermessung der Bürger auf einer eindimensionalen Rankingskala ist nicht nur eine umfassende Überwachung geplant. Da die Punktzahl einerseits von den Klicks im Internet und politischem Wohlverhalten abhängt, andererseits aber die Kreditkonditionen, mögliche Jobs und Reisevisa bestimmt, geht es auch um die Bevormundung der Bevölkerung und ihre soziale Kontrolle. Weiterhin beeinflusst das Verhalten der Freunde und Bekannten die Punktzahl, womit das Prinzip der Sippenhaft zum Einsatz kommt: Jeder wird zum Tugendwächter und zu einer Art Blockwart; Querdenker werden isoliert. Sollten sich ähnliche Prinzipien in demokratischen Staaten verbreiten, wäre es letztlich unerheblich, ob der Staat die Regeln dafür festlegt oder einflussreiche Unternehmen. In beiden Fällen wären die Säulen der Demokratie unmittelbar bedroht:

- Durch Verfolgen und Vermessen aller Aktivitäten, die digitale Spuren hinterlassen, entsteht ein gläserner Bürger, dessen Menschenwürde und Privatsphäre auf der Strecke bleiben.
- Entscheidungen wären nicht mehr frei, denn sie würden bestraft, wenn sie gegen die von Staat oder Unternehmen festgelegten Kriterien verstößen. Die Autonomie des Individuums wäre vom Prinzip her abgeschafft.
- Jeder kleine Fehler würde geahndet, und kein Mensch wäre mehr unverdächtig. Das Prinzip der Unschuldsvermutung wäre

hinfällig. Mit Predictive Policing könnten sogar voraussichtliche Regelverletzungen bestraft werden.

- Die zu Grunde liegenden Algorithmen können aber gar nicht völlig fehlerfrei arbeiten. Damit würde das Prinzip von Fairness und Gerechtigkeit einer neuen Willkür weichen, gegen die man sich wohl kaum mehr wehren könnte.
- Mit der externen Vorgabe der Zielfunktion wäre die Möglichkeit zur individuellen Selbstentfaltung abgeschafft und damit auch der demokratische Pluralismus.
- Lokale Kultur und soziale Normen wären nicht mehr der Maßstab für angemessenes, situationsabhängiges Verhalten.
- Eine Steuerung der Gesellschaft durch eine eindimensionale Zielfunktion würde zu Konflikten und damit zu einem Verlust von Sicherheit führen. Es wären schwer wiegende Instabilitäten zu erwarten, wie wir sie von unserem Finanzsystem her bereits kennen.

Eine solche Gesellschaftssteuerung wendet sich ab vom Ideal des selbstverantwortlichen Bürgers, hin zu einem Untertan im Sinne eines Feudalismus 2.0. Dies ist den demokratischen Grundwerten diametral entgegengesetzt. Es ist daher Zeit für eine Aufklärung 2.0, die in einer Demokratie 2.0 mündet, basierend auf digitaler Selbstbestimmung. Das erfordert demokratische Technologien: Informationssysteme, die mit den demokratischen Prinzipien vereinbar sind – andernfalls werden sie unsere Gesellschaft zerstören.

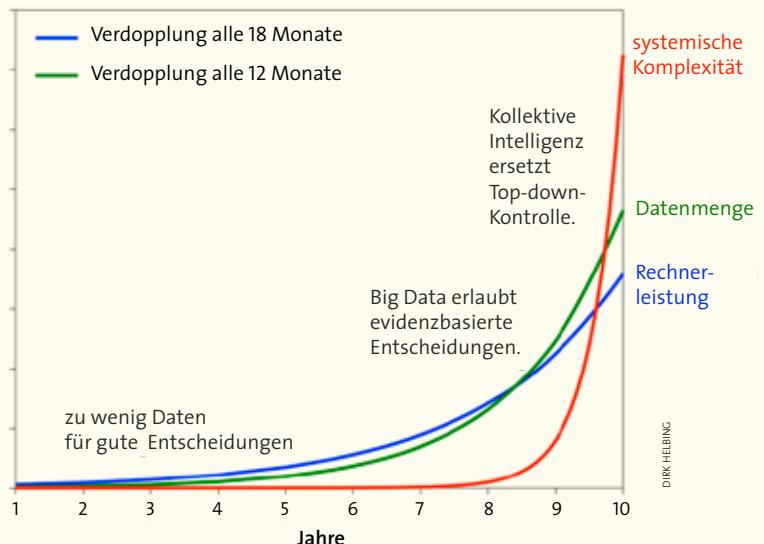
man so genannte Deep-Learning-Algorithmen über die Suchmaschinendaten laufen, die sie dann intelligent auswerten. Darüber hinaus ist aber offenbar auch eine Gesellschaftssteuerung geplant. Jeder chinesische Bürger soll laut aktuellen Berichten ein Punktekonto (Citizen Score) bekommen, das darüber entscheiden soll, zu welchen Konditionen er einen Kredit bekommt und ob er einen bestimmten Beruf ausüben oder nach Europa reisen darf. In diese Gesinnungsüberwachung ginge zudem das Surfverhalten des Einzelnen im Internet ein – und das der sozialen Kontakte, die man unterhält (siehe Kasten »Blick nach China«).

Mit sich häufenden Beurteilungen der Kreditwürdigkeit und den Experimenten mancher Onlinehändler mit individualisierten Preisen wandeln auch wir im Westen auf ähnlichen Pfaden. Darüber hinaus wird immer deutlicher, dass wir alle im Fokus institutioneller Überwachung stehen, wie etwa das 2015 bekannt gewordene »Karma Police«-Programm des britischen Geheimdienstes zur flächendeckenden Durchleuchtung von Internetnutzern demonstriert. Wird Big Brother nun tatsächlich Realität? Und: Brauchen wir das womöglich sogar im strategischen Wettkampf der Nationen und ihrer global agierenden Unternehmen?

Programmierte Gesellschaft, programmierte Bürger

Anfangen hat es scheinbar harmlos: Schon seit einiger Zeit bieten uns Suchmaschinen und Empfehlungsplattformen personalisierte Vorschläge zu Produkten und Dienstleistungen an. Diese beruhen auf persönlichen und Metadaten, welche aus früheren Suchanfragen, Konsum- und Bewegungsverhalten sowie dem sozialen Umfeld gewonnen werden. Die Identität des Nutzers ist zwar offiziell geschützt, lässt sich aber leicht ermitteln. Heute wissen Algorithmen, was wir tun, was wir denken und wie wir uns fühlen – vielleicht sogar besser als unsere Freunde und unsere Familie, ja als wir selbst. Oft sind die unterbreiteten Vorschläge so passgenau, dass sich die resultierenden Entscheidungen wie unsere eigenen anfühlen, obwohl sie fremde Entscheidungen sind. Tatsächlich werden wir auf diese Weise immer mehr ferngesteuert. Je mehr man über uns weiß, desto unwahrscheinlicher werden freie Willensentscheidungen mit offenem Ausgang.

Auch dabei wird es nicht bleiben. Einige Softwareplattformen bewegen sich in Richtung »Persuasive Computing«. Mit ausgeklügelten Manipulationstechnologien werden sie uns in Zukunft zu ganzen Handlungsabläufen bringen können, sei es zur schrittweisen Abwicklung komplexer Arbeitsprozesse oder zur kostenlosen Generierung von Inhalten für Internetplattformen, mit denen Konzerne Milliarden verdienen. Die Entwicklung verläuft also von der Programmierung von Computern zur Programmierung von Menschen.



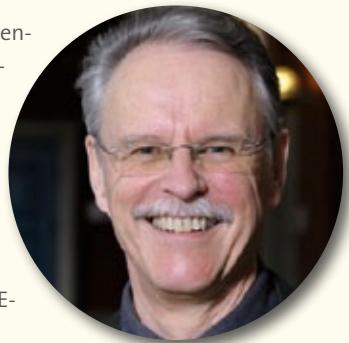
Innerhalb weniger Jahre hat die rasante Vernetzung der Welt die Komplexität unserer Gesellschaft explosionsartig erhöht. Dies ermöglicht zwar jetzt, auf Grund von »Big Data« bessere Entscheidungen zu treffen, aber das bisherige Prinzip der Kontrolle von oben funktioniert immer weniger. Verteilte Steuerungsansätze werden zunehmend wichtiger. Nur mittels kollektiver Intelligenz lassen sich noch angemessene Problemlösungen finden.

Diese Technologien finden auch in der Politik zunehmend Zuspruch. Unter dem Stichwort Nudging versucht man, Bürger im großen Maßstab zu gesünderem oder umweltfreundlicherem Verhalten »anzustupsen« – eine moderne Form des

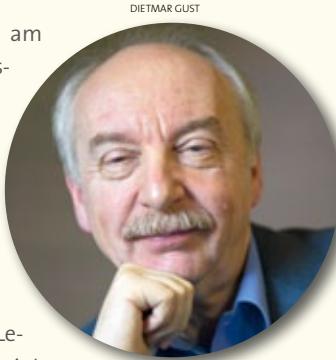
Paternalismus. Der neue, umsorgende Staat interessiert sich nicht nur dafür, was wir tun, sondern möchte auch sicherstellen, dass wir das Richtige tun. Das Zauberwort ist »Big Nudging«, die Kombination von

Big Data und Nudging. Es erscheint manchem wie ein digitales Szepter, mit dem man effizient durchregieren kann, ohne die Bürger in demokratische Verfahren einbeziehen zu müssen. Lassen sich auf diese Weise Partikularinteressen überwinden und der Lauf der Welt optimieren? Wenn ja, dann

Bruno S. Frey ist Wirtschaftswissenschaftler und Ständiger Gastprofessor an der Universität Basel, wo er das Center for Research in Economics and Well-Being (CREW) leitet. Außerdem ist er Forschungsdirektor des Centers for Research in Economics, Management and the Arts (CREMA) in Zürich.



Gerd Gigerenzer ist Direktor am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin sowie des 2009 in Berlin gegründeten Harding Zentrums für Risikokompetenz. Er ist Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Deutschen Akademie der Wissenschaften Leopoldina. Zu seinen Forschungsinteressen gehören Risikokompetenz und Risikokommunikation sowie Entscheidungen unter Unsicherheit und begrenzter Zeit.

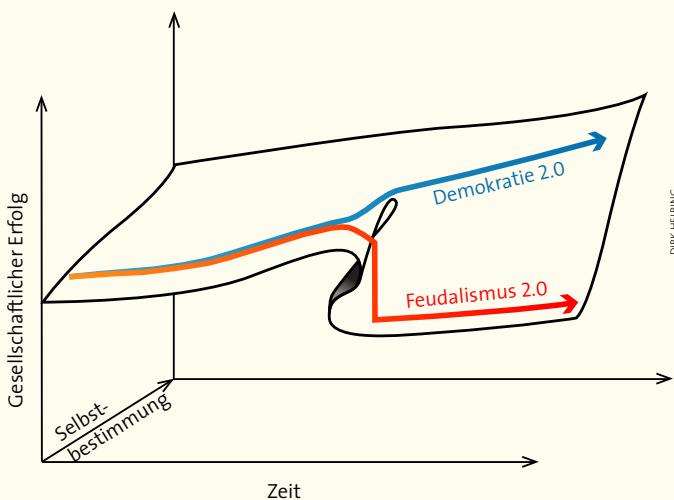


DIETMAR GUST

könnte man regieren wie ein weiser König, der mit einer Art digitalem Zauberstab die gewünschten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Ergebnisse quasi herbeizaubert.

Der digitale Zauberstab

Doch ein Blick in die relevante wissenschaftliche Literatur zeigt, dass eine gezielte Kontrolle von Meinungen im Sinne ihrer »Optimierung« an der Komplexität des Problems scheitert. Die Meinungsbildungsdynamik ist voll von Überraschungen. Niemand weiß, wie der digitale Zauberstab, sprich die manipulative Nudging-Technik, richtig zu verwenden ist. Was richtig und was falsch ist, stellt sich oft erst hinterher heraus. So wollte man während der Schweinegrippe-epidemie 2009 jeden zur Impfung bewegen. Inzwischen ist aber bekannt, dass ein bestimmter Prozentsatz der Geimpften von einer ungewöhnlichen Krankheit, der Narkolepsie,



Wir stehen an einem Scheideweg: Würden die immer mächtiger werdenden Algorithmen unsere Selbstbestimmung einschränken und von wenigen Entscheidungsträgern kontrolliert, so fallen wir in eine Art Feudalismus 2.0 zurück, da wichtige gesellschaftliche Errungenschaften verloren gingen. Aber wir haben jetzt die Chance, mit den richtigen Weichenstellungen den Weg zu einer Demokratie 2.0 einzuschlagen, von der wir alle profitieren werden.

befallen wurde. Glücklicherweise haben sich nicht mehr Menschen impfen lassen!

Auch mag der Versuch, Krankenversicherte mit Fitnessarmbändern zu verstärkter Bewegung anzuregen, die Anzahl der Herz-Kreislauf-Erkrankungen reduzieren. Am Ende könnte es dafür aber mehr Hüftoperationen geben. In einem komplexen System wie der Gesellschaft führt eine Verbesserung in einem Bereich fast zwangsläufig zur Verschlechterung in einem anderen. So können sich großflächige Eingriffe leicht als schwer wiegende Fehler erweisen.

Unabhängig davon würden Kriminelle, Terroristen oder Extremisten den digitalen Zauberstab früher oder später unter ihre Kontrolle bringen – vielleicht sogar, ohne dass es uns auffällt. Denn: Fast alle Unternehmen und Einrichtungen wurden schon gehackt, selbst das Pentagon, das Weiße Haus und der Bundestag.

Hinzu kommt ein weiteres Problem, wenn ausreichende Transparenz und demokratische Kontrolle fehlen: die Aushöhlung des Systems von innen. Denn Suchalgorithmen und Empfehlungssysteme lassen sich beeinflussen. Unternehmen können bestimmte Wortkombinationen ersteigern, die in den Ergebnislisten bevorzugt angezeigt werden. Regierungen haben wahrscheinlich Zugriff auf eigene Steuerungsparameter. Bei Wahlen wäre es daher im Prinzip möglich, sich durch Nudging Stimmen von Unentschlossenen zu sichern – eine nur schwer nachweisbare Manipulation. Wer auch immer diese Technologie kontrolliert, kann also Wahlen für sich entscheiden und sich sozusagen an die Macht nudgen.

Verschärft wird dieses Problem durch die Tatsache, dass in Europa eine einzige Suchmaschine einen Marktanteil von rund 90 Prozent besitzt. Sie könnte die Öffentlichkeit maßgeblich beeinflussen, womit Europa vom Silicon Valley aus quasi ferngesteuert würde. Auch wenn das Urteil des Europäischen Gerichtshofs vom 6. Oktober 2015 nun den ungezügelten Export europäischer Daten einschränkt, ist das zu Grunde liegende Problem noch keineswegs gelöst, sondern erst einmal nur geografisch verschoben.

Mit welchen unerwünschten Nebenwirkungen ist zu rechnen? Damit Manipulation nicht auffällt, braucht es einen so genannten Resonanzeffekt, also Vorschläge, die ausreichend kompatibel zum jeweiligen Individuum sind. Damit werden lokale Trends durch Wiederholung allmählich verstärkt, bis hin zum »Echokammereffekt«. Am Ende bekommt man nur noch seine eigenen Meinungen widergespiegelt. Das bewirkt eine gesellschaftliche Polarisierung, also die Entstehung separater Gruppen, die sich gegenseitig nicht mehr verstehen und vermehrt miteinander in Konflikt geraten. So kann personalisierte Information den gesellschaftlichen Zusammenhalt unabsichtlich zerstören.

Das lässt sich derzeit etwa in der amerikanischen Politik beobachten, wo Demokraten und Republikaner zusehends auseinanderdriften, so dass politische Kompromisse kaum noch möglich sind. Die Folge ist eine Fragmentierung, vielleicht sogar eine Zersetzung der Gesellschaft. Einen Meinungsumschwung auf gesamtgesellschaftlicher Ebene kann

man wegen des Resonanzeffekts nur langsam und allmählich erzeugen. Die Auswirkungen treten mit zeitlicher Verzögerung ein, lassen sich dann aber auch nicht mehr einfach rückgängig machen. So können zum Beispiel Ressentiments gegen Minderheiten oder Migranten leicht außer Kontrolle geraten; zu viel Nationalgefühl kann Diskriminierung, Extremismus und Konflikte verursachen.

Noch schwerer wiegt der Umstand, dass manipulative Methoden die Art und Weise verändern, wie wir unsere Entscheidungen treffen. Sie setzen nämlich die sonst bedeutsamen kulturellen und sozialen Signale außer Kraft – zumindest vorübergehend. Zusammengefasst könnte der großflächige Einsatz manipulativer Methoden also schwer wiegende gesellschaftliche Schäden verursachen, einschließlich der ohnehin schon verbreiteten Verrohung der Verhaltensweisen in der digitalen Welt. Wer soll dafür die Verantwortung tragen?

Rechtliche Probleme

Dies wirft rechtliche Fragen auf, die man angesichts der Milliardenklagen gegen Tabakkonzerne, Banken, IT- und Automobilunternehmen in den vergangenen Jahren nicht vernachlässigen sollte. Doch welche Gesetze werden überhaupt tangiert? Zunächst einmal ist klar, dass manipulative Technologien die Entscheidungsfreiheit einschränken. Würde die Fernsteuerung unseres Verhaltens perfekt funktionieren, wären wir im Grunde digitale Sklaven, denn wir würden nur noch fremde Entscheidungen ausführen. Bisher funktionieren manipulative Technologien natürlich nur zum Teil. Jedoch verschwindet unsere Freiheit langsam, aber sicher – langsam genug, dass der Widerstand der Bürger bisher noch gering war.

Die Einsichten des großen Aufklärers Immanuel Kant scheinen jedoch hochaktuell zu sein. Unter anderem stellte er fest, dass ein Staat, der das Glück seiner Bürger zu bestimmen versucht, ein Despot ist. Das Recht auf individuelle Selbstentfaltung kann nur wahrnehmen, wer die Kontrolle über sein Leben hat. Dies setzt jedoch informationelle Selbst-

MIT FRDL. GEN. VON MICHAEL HAGNER



Michael Hagner ist Professor für Wissenschaftsforschung an der ETH Zürich. Zu seinen Forschungsgebieten gehören das Verhältnis von Wissenschaft und Demokratie, die Geschichte der Kybernetik sowie die Auswirkungen der digitalen Kultur auf akademisches Publizieren.

bestimmung voraus. Es geht hier um nicht weniger als unsere wichtigsten verfassungsmäßig garantierten Rechte. Ohne deren Einhaltung kann eine Demokratie nicht funktionieren. Ihre Einschränkung unterminiert unsere Verfassung, unsere Gesellschaft und den Staat.

Da manipulative Technologien wie Big Nudging ähnlich wie personalisierte Werbung vorgehen, sind noch weitere Gesetze tangiert. Werbung muss als solche gekennzeichnet werden und darf nicht irreführend sein. Auch sind nicht alle psychologischen Tricks wie etwa unterschwellige Reize erlaubt. So ist es untersagt, ein Erfrischungsgetränk im Kinofilm für eine Zehntelsekunde einzublenden, weil die Werbung dann nicht bewusst wahrnehmbar ist, während sie unterbewusst vielleicht eine Wirkung entfaltet. Das heute gängige Sammeln und Verwerten

persönlicher Daten lässt sich außerdem nicht mit dem geltenden Datenschutzrecht in den europäischen Ländern vereinen.

Schließlich steht auch die Rechtmäßigkeit personalisierter Preise in Frage, denn es könnte sich dabei um einen Missbrauch von Insiderinformationen handeln. Hinzu kommen mögliche Verstöße gegen den Gleichbehandlungsgrundsatz, das Diskriminierungsverbot und das Wettbewerbsrecht, da freier Marktzugang und Preistransparenz nicht mehr gewährleistet sind. Die Situation ist vergleichbar mit Unternehmen, die ihre Produkte in anderen Ländern billiger verkaufen, jedoch den Erwerb über diese Länder zu verhindern versuchen. In solchen Fällen gab es bisher empfindliche Strafzahlungen.

Mit klassischer Werbung oder Rabattmarken sind personalisierte Werbung und Preise nicht vergleichbar, denn erstere sind unspezifisch und dringen auch bei Weitem nicht so sehr in unsere Privatsphäre ein, um unsere psychologischen Schwächen auszunutzen und unsere kritische Urteilskraft auszuschalten.

Außerdem gelten in der akademischen Welt selbst harmlose Entscheidungsexperimente als Versuche am Menschen und bedürfen der Beurteilung durch eine Ethikkommission, die der Öffentlichkeit Rechenschaft schuldet. Die betroffe-



Ernst Hafen ist Professor am Institut für Molekulare Systembiologie und ehemaliger Präsident der ETH Zürich. 2012 gründete er den Verein »Daten und Gesundheit«. Der Verein beabsichtigt, auf politischer und ökonomischer Ebene die digitale Selbstbestimmung der Bürger zu stärken und die Gründung gemeinschaftlich organisierter Banken für persönliche Daten zu fördern.

Yvonne Hofstetter ist Juristin und KI-Expertin. Die Auswertung großer Datenmengen und Datenfusionssysteme sind ihr Spezialgebiet. Sie ist Geschäftsführerin der Teramark Technologies GmbH. Das Unternehmen entwickelt digitale Steuerungssysteme auf Basis künstlicher Intelligenz unter anderem für die Optimierung urbaner Lieferströme und das algorithmische Währungsrisikomanagement.



nen Personen müssen in jedem einzelnen Fall ihre informierte Zustimmung geben. Absolut unzureichend ist dagegen ein Klick zur Bestätigung, dass man einer 100-seitigen Nutzungsbedingung pauschal zustimmt, wie es bei vielen Informationsplattformen heutzutage der Fall ist.

Dennoch experimentieren manipulative Technologien wie Nudging mit Millionen von Menschen, ohne sie darüber in Kenntnis zu setzen, ohne Transparenz und ohne ethische Schranken. Selbst große soziale Netzwerke wie Facebook oder Online-Dating-Plattformen wie OK Cupid haben sich bereits öffentlich zu solchen sozialen Experimenten bekannt. Wenn man unverantwortliche Forschung an Mensch und Gesellschaft vermeiden möchte (man denke etwa an die Beteiligung von Psychologen an den Follerskandalen der jüngsten Vergangenheit), dann benötigen wir dringend hohe Standards, insbesondere wissenschaftliche Qualitätskriterien und einen ethischen Kodex analog zum hippokratischen Eid.

Auch Superintelligenzen können irren oder lügen

Angenommen, es gäbe eine superintelligente Maschine, die quasi gottgleiches Wissen und übermenschliche Fähigkeiten hätte – würden wir dann ehrfürchtig ihren Anweisungen folgen? Das erscheint durchaus möglich. Aber wenn wir das täten, dann hätten sich die Befürchtungen von Elon Musk, Bill Gates, Steve Wozniak, Stephen Hawking und anderen bewahrheitet: Computer hätten die Kontrolle über die Welt übernommen. Es muss uns klar sein, dass auch eine Superintelligenz irren, lügen, egoistische Interessen verfolgen oder selbst manipuliert werden kann. Vor allem könnte sie sich nicht mit der verteilten, kollektiven Intelligenz der Bevölkerung messen.

Das Denken aller Bürger durch einen Computercluster zu ersetzen wäre absurd, denn das würde die Qualität der erreichbaren Lösungen dramatisch verschlechtern. Schon jetzt

ist klar, dass sich die Probleme in der Welt trotz Datenflut und Verwendung personalisierter Informationssysteme nicht verringert haben – im Gegenteil! Der Weltfrieden ist brüchig. Die langfristige Veränderung des Klimas könnte zum größten Verlust von Arten seit dem Aussterben der Dinosaurier führen. Die Auswirkungen der Finanzkrise auf Wirtschaft und Gesellschaft sind sieben Jahre nach ihrem Beginn noch lange nicht bewältigt. Cyberkriminalität richtet einen jährlichen Schaden von 3 Billionen Dollar an. Staaten und Terroristen rüsten zum Cyberkrieg.

In einer sich schnell verändernden Welt kann auch eine Superintelligenz nie perfekt entscheiden – die Datenmengen wachsen schneller als die Prozessierbarkeit, und die Übertragungsraten sind begrenzt. So werden lokales Wissen und Fakten außer Acht gelassen, die jedoch von Bedeutung sind, um gute Lösungen zu erzielen. Verteilte, lokale Steuerungsverfahren sind zentralen Ansätzen oft überlegen, vor allem in komplexen Systemen, deren Verhalten stark variabel, kaum voraussagbar und nicht in Echtzeit optimierbar ist. Das gilt schon für die Ampelsteuerung in Städten, aber noch viel mehr für die sozialen und ökonomischen Systeme unserer stark vernetzten, globalisierten Welt.

Weiterhin besteht die Gefahr, dass die Manipulation von Entscheidungen durch mächtige Algorithmen die Grundvor aussetzung der »kollektiven Intelligenz« untergräbt, die sich an die Herausforderungen unserer komplexen Welt flexibel anpassen kann. Damit kollektive Intelligenz funktioniert, müssen Informationssuche und Entschei

dungsfindung der Einzelnen voneinander unabhängig erfolgen. Wenn unsere Urteile und Entscheidungen jedoch durch Algorithmen vorgegeben werden, führt das im wahrsten Sinne des Wortes zur Volksverdummung. Vernunftbegabte Wesen werden zu Befehlsempfängern degradiert, die reflexhaft auf Stimuli reagieren. Das reduziert die Kreativität, weil man weniger »out of the box« denkt.

Die Entwicklung verläuft von der Programmierung von Computern zur Programmierung von Menschen



Roberto V. Zicari ist Professor für Datenbanken und Informationssysteme an der Goethe-Universität Frankfurt am Main und Big-Data-Experte. Er ist Gründer des Frankfurt Big Data Labs der Goethe-Universität und Herausgeber des Operational Database Management Systems-Portals (ODBMS.org). Zudem forscht er als Visiting Professor am Center for Entrepreneurship and Technology des Departments of Industrial Engineering and Operations Research an der University of California in Berkeley.



OLIVERWEISS

Anders gesagt: Personalisierte Information baut eine »Filter Bubble« um uns herum, eine Art digitales Gedankengefängnis. In letzter Konsequenz würde eine zentrale, technokratische Verhaltens- und Gesellschaftssteuerung durch ein superintelligentes Informationssystem eine neue Form der Diktatur bedeuten. Die von oben gesteuerte Gesellschaft, die unter dem Banner des »sanften Paternalismus« daherkommt, ist deshalb im Prinzip nichts anderes als ein totalitäres Regime mit rosarotem Anstrich.

In der Tat zielt »Big Nudging« auf die Gleichschaltung vieler individueller Handlungen und auf eine Manipulation von Sichtweisen und Entscheidungen ab. Dies rückt es in die Nähe der gezielten Entmündigung des Bürgers durch staatlich geplante Verhaltenssteuerung. Wir befürchten, dass die Auswirkungen langfristig fatal sein könnten, insbesondere wenn man die oben erwähnte, teils kulturzerstörende Wirkung bedenkt.

Eine bessere digitale Gesellschaft ist möglich

Trotz des harten globalen Wettbewerbs tun Demokratien gut daran, ihre in Jahrhunderten erarbeiteten Errungenschaften nicht über Bord zu werfen. Gegenüber anderen politischen Regimes haben die westlichen Demokratien den Vorteil, dass sie mit Pluralismus und Diversität bereits umzugehen gelernt haben. Jetzt müssen sie nur noch stärker davon profitieren lernen.

Jeroen van den Hoven ist Professor für Ethik und Technologie an der Delft University of Technology sowie Chefredakteur der Fachzeitschrift *Ethics and Information Technology*. Er ist zudem Vorsitzender des niederländischen Research Council Programs on Responsible Innovation.



YONNE COMPER

In Zukunft werden jene Länder führend sein, die eine gute Balance von Wirtschaft, Staat und Bürgern erreichen. Dies erfordert vernetztes Denken und den Aufbau eines Informations-, Innovations-, Produkte- und Service-»Ökosystems«. Hierfür ist es nicht nur wichtig, Beteiligungsmöglichkeiten zu schaffen, sondern auch Vielfalt zu fördern. Denn es gibt keine Methode, um zu ermitteln, was die beste Zielfunktion ist: Soll man das Bruttonsozialprodukt optimieren oder Nachhaltigkeit? Macht oder Frieden? Lebensdauer oder Zufriedenheit? Oft weiß man erst hinterher, was vorteilhaft gewesen wäre. Indem sie verschiedene Ziele zulässt, ist eine pluralistische Gesellschaft besser in der Lage, mit verschiedenen Herausforderungen zurechtzukommen.

Zentralisierte Top-down-Kontrolle ist eine Lösung der Vergangenheit, die sich nur für Systeme geringer Komplexität



Andrej Zwitter ist Professor für Internationale Beziehungen und Ethik an der Rijksuniversiteit Groningen, Niederlande, sowie Honorary Senior Research Fellow an der Liverpool Hope University, Großbritannien. Er ist Mitbegründer des International Network Observatory for Big Data and Global Strategy. Seine Forschungsschwerpunkte beinhalten internationale politische Theorie, Notstandsrecht und Politik der humanitären Hilfe sowie die Auswirkungen von Big Data auf internationale Politik und Ethik.

ternationale politische Theorie, Notstandsrecht und Politik der humanitären Hilfe sowie die Auswirkungen von Big Data auf internationale Politik und Ethik.

eignet. Deshalb sind föderale Systeme und Mehrheitsentscheidungen die Lösungen der Gegenwart. Mit der wirtschaftlichen und kulturellen Entwicklung nimmt die gesellschaftliche Komplexität jedoch weiter zu. Die Lösung der Zukunft lautet kollektive Intelligenz: Citizen Science, Crowd Sourcing und Online-Diskussionsplattformen sind daher eminent wichtige neue Ansätze, um mehr Wissen, Ideen und Ressourcen nutzbar zu machen.

Kollektive Intelligenz benötigt einen hohen Grad an Diversität. Diese wird jedoch durch heutige personalisierte Informationssysteme zu Gunsten der Verstärkung von Trends reduziert.

Soziodiversität ist genauso wichtig wie Biodiversität. Auf ihr beruhen nicht nur kollektive Intelligenz und Innovation, sondern auch gesellschaftliche Resilienz – also die Fähigkeit, mit unerwarteten Schocks zurechtzukommen. Die Verringerung der Soziodiversität reduziert oft auch die Funktions- und Leistungsfähigkeit von Wirtschaft und Gesellschaft. Dies ist der Grund, warum totalitäre Regimes oft in Konflikte mit ihren Nachbarn geraten.

Typische Langzeitfolgen sind politische Instabilitäten und Kriege, wie sie in unserer Geschichte immer wieder auftraten. Pluralität und Partizipation sind also nicht in erster Linie als Zugeständnisse an die Bürger zu sehen, sondern als maßgebliche Funktionsvoraussetzungen leistungsfähiger, komplexer, moderner Gesellschaften.

Zusammenfassend kann man sagen: Wir stehen an einem Scheideweg. Big Data, künstliche Intelligenz, Kybernetik und Verhaltensökonomie werden unsere Gesellschaft prägen – im Guten wie im Schlechten. Sind solche weit verbreiteten Technologien nicht mit unseren gesellschaftlichen Grundwerten kompatibel, werden sie früher oder später großflächigen Schaden anrichten. So könnten sie zu einer Automatisierung der Gesellschaft mit totalitären Zügen führen. Im schlimmsten Fall droht eine zentrale künstliche Intelligenz zu steuern, was wir wissen, denken und wie wir handeln. Jetzt ist daher der historische Moment, den richtigen Weg einzuschlagen und von den Chancen zu profitieren, die sich dabei bieten.

Wir fordern deshalb die Einhaltung folgender Grundprinzipien:

1. Die Funktion von Informationssystemen stärker zu dezentralisieren,
2. informationelle Selbstbestimmung und Partizipation zu unterstützen,
3. Transparenz für eine erhöhte Vertrauenswürdigkeit zu verbessern,
4. Informationsverzerrungen und -verschmutzung zu reduzieren,
5. von den Nutzern gesteuerte Informationsfilter zu ermöglichen,
6. gesellschaftliche und ökonomische Vielfalt zu fördern,
7. die Fähigkeit technischer Systeme zur Zusammenarbeit zu verbessern,
8. digitale Assistenten und Koordinationswerkzeuge zu kreieren,
9. kollektive Intelligenz zu unterstützen, und
10. die Mündigkeit der Bürger in der digitalen Welt zu fördern – eine »digitale Aufklärung«.

Mit dieser Agenda würden wir alle von den Früchten der digitalen Revolution profitieren: Wirtschaft, Staat und Bürger gleichermaßen. Worauf warten wir noch? ↵

QUELLEN

- Frey, B.S., Gallus, J.:** Beneficial and Exploitative Nudges. In: Economic Analysis of Law in European Legal Scholarship. Springer, Heidelberg 2015
 Online unter: www.bsfrey.ch/articles/C_591_2015.pdf
- Helbing, D.:** The Automation of Society Is Next. How to Survive the Digital Revolution. CreateSpace, 2015
- Koops, B.-J. et al.:** Responsible Innovation 2. Concepts, Approaches, and Applications. Springer, Heidelberg 2015
- van den Hoven, J. et al. (Hg.):** Handbook of Ethics, Values an Technological Design. Springer, Heidelberg 2015
- Volodymyr, M. et al.:** Human-Level Control through Deep Reinforcement Learning. In: Nature 518, S. 529–533, 2015
- Zwitter, A.:** Big Data Ethics. In: Big Data & Society 1(2) 10.1177/2053951714559253, 2014

LITERATURTIPPS

- Gigerenzer, G.:** Risiko: Wie man die richtigen Entscheidungen trifft. Bertelsmann, München 2013.
Der Max-Planck-Forscher, Koautor des Artikels, über den richtigen Umgang mit Risikofaktoren.

- Hofstetter, Y.:** Sie wissen alles: Wie intelligente Maschinen in unser Leben eindringen und warum wir für unsere Freiheit kämpfen müssen. Bertelsmann, München 2014.
Die Koautorin des Artikels und KI-Expertin klärt über die Gefahren von Big Data auf.

- Schlieter, K.:** Die Herrschaftsformel. Wie Künstliche Intelligenz uns berechnet, steuert und unser Leben verändert. Westend, Frankfurt 2015.
Wie wir uns mit digitalen Daten der Manipulation ausliefern.

WEBLINKS

Diesen Artikel sowie weitere Quellen und Literaturtipps finden Sie unter: www.spektrum.de/s/digitalmanifest

Eine Strategie für das digitale Zeitalter

Die rasant voranschreitende Digitalisierung gefährdet unsere Demokratie, wenn wir sie nicht zügeln. Was müssen wir nun tun?

Von Dirk Helbing, Bruno S. Frey, Gerd Gigerenzer, Ernst Hafen, Michael Hagner, Yvonne Hofstetter, Jeroen van den Hoven, Roberto V. Zicari und Andrej Zwitter

Big Data und künstliche Intelligenz sind zweifellos der Schlüssel zu wichtigen Innovationen. Sie haben ein enormes Potenzial, wirtschaftliche Wertschöpfung und gesellschaftlichen Fortschritt zu katalysieren, von der personalisierten Gesundheitsvorsorge bis zu nachhaltigen Städten. Aber es ist völlig inakzeptabel, diese Technologien zur Entmündigung des Bürgers zu nutzen. Big Nudging und Citizen Scores missbrauchen zentral gesammelte persönliche Daten für eine Verhaltenskontrolle, die totalitäre Züge trägt. Dies ist nicht nur unvereinbar mit Menschenrechten und demokratischen Prinzipien, sondern auch ungeeignet, eine moderne, innovative Gesellschaft zu managen. Um die eigentlichen Probleme zu lösen, sind vielmehr bessere Informationen und Risikokompetenz gefragt. Forschungsbereiche zu verantwortungsvoller Innovation und die Initiative »Data for Humanity« geben Orientierung, wie Big Data und künstliche Intelligenz zum Wohl der Gesellschaft genutzt werden können.

Was können wir jetzt konkret tun? Zunächst gilt es auch in Zeiten der digitalen Revolution die **Grundrechte** der Bürger zu schützen, die eine fundamentale Funktionsvoraussetzung für ein modernes, demokratisches Gemeinwesen sind. Dafür braucht es einen neuen **Gesellschaftsvertrag** auf der Basis von Vertrauen und Kooperation, der Bürger und Kunden nicht als Hindernisse oder zu vermarktende Ressourcen sieht, sondern als Partner. Der Staat müsste einen geeigneten **Regulierungsrahmen** schaffen, der die Kompatibilität von Technologien mit Demokratie garantiert. Dieser muss die informationelle Selbstbestimmung nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch sicherstellen, denn sie ist die Voraussetzung dafür, dass wir unser Leben selbstverantwortlich gestalten können.

Für persönliche Daten, die über uns gesammelt werden, sollte es ein Recht auf Kopie geben. Es sollte gesetzlich geregelt sein, dass diese Kopie in einem standardisierten Format automatisch an eine **persönliche Datenmailbox** gesandt wird, über die jeder Einzelne die Verwendung der Daten steu-

ern kann. Für einen besseren Schutz der Privatsphäre und um Diskriminierung zu vermeiden, wäre eine unautorisierte Verwendung der Daten unter Strafe zu stellen. So könnte man selbst entscheiden, wer welche Informationen für welchen Zweck wie lange nutzen darf. Überdies wären geeignete Maßnahmen zu treffen, damit die Daten sicher gespeichert und ausgetauscht werden können.

Mit ausgefeilten und unterschiedlichen Kriterien berücksichtigenden Reputationssystemen ließe sich die Qualität der Informationen erhöhen, auf deren Basis wir unsere Entscheidungen treffen. Waren Such- und **Empfehlungsalgorithmen** nicht vom Anbieter vorgegeben, sondern vom Nutzer auswählbar und konfigurierbar, wären wir weniger durch verzerrte Informationen manipulierbar.

Ergänzend braucht es effiziente Beschwerdeverfahren für Bürger und wirksame Sanktionen bei Regelverletzungen. Um schließlich ausreichend Transparenz und Vertrauen zu schaffen, sollten führende wissenschaftliche Institutionen als **Treuhänderinnen** von Daten und Algorithmen walten, die sich momentan der demokratischen Kontrolle entziehen. Dies erfordert auch einen geeigneten Ehrenkodex, den zumindest all jene anerkennen müssten, die Zugang zu sensiblen Daten und Algorithmen erhalten – eine Art hippokratischer Eid für IT-Experten.

Eine digitale Agenda für die digitale Gesellschaft

Darüber hinaus ist eine **digitale Agenda** erforderlich, welche die Grundlage für neue Jobs und die künftige digitale Gesellschaft legt. Jedes Jahr investieren wir Milliarden in die Agrarwirtschaft sowie in öffentliche Infrastruktur, Schulen und Universitäten – zu Gunsten der Industrie und des Dienstleistungssektors.

Welche öffentlichen Systeme benötigen wir also, damit die digitale Gesellschaft ein Erfolg wird? Erstens sind völlig neue **Bildungskonzepte** gefragt. Diese sollten stärker auf kritisches Denken, Kreativität, Erfinder- und Unternehmergeist ausgerichtet sein als auf standardisierte Arbeitnehmer,

deren Aufgaben in Zukunft von Robotern und Computeralgorithmen übernommen werden können. Die Ausbildung sollte auch den verantwortungsvollen und kritischen Umgang mit digitalen Technologien vermitteln. Denn der Bürger muss sich bewusst sein, wie sehr die digitale mit der physischen Welt verzahnt ist. Um seine Rechte effektiv und verantwortungsvoll wahrnehmen zu können, muss der Bürger ein Verständnis von ihnen haben, aber auch davon, welche Nutzungen illegitim sind. Umso mehr müssen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik, und Bildungseinrichtungen der Gesellschaft dieses Wissen zur Verfügung stellen.

Zweitens braucht es eine **partizipative Plattform**, die es erleichtert, sich selbstständig zu machen, eigene Projekte aufzusetzen, Kooperationspartner zu finden, Produkte und Services weltweit zu vermarkten, Ressourcen zu verwalten sowie Steuern und Sozialversicherungsbeiträge abzuführen. Ergänzend könnten Städte und Gemeinden Zentren für die aufkommenden digitalen Bastlercommunities (etwa so genannte Fablabs) einrichten, wo Ideen gemeinsam entwickelt und kostenlos ausprobiert werden können. Dank des sich dort verbreitenden Open-Innovation-Ansatzes ließe sich massive, kooperative Innovation fördern.

Darüber hinaus könnten **Wettbewerbe** zusätzliche Anreize für Innovationen liefern, die öffentliche Sichtbarkeit erhöhen und eine Aufbruchstimmung in Richtung einer digitalen Mitmachgesellschaft erzeugen. Sie würden insbesondere die Zivilgesellschaft mobilisieren, damit sie lokale Beiträge zur Lösung globaler Probleme leistet (zum Beispiel über »Climate Olympics«). So könnten Plattformen zur Koordination knapper Ressourcen das riesige Potenzial der Sharing Economy freisetzen helfen, welches derzeit noch weitgehend unerschlossen ist.

Mit einer **Open-Data-Strategie** können Staat und Unternehmen zunehmend Daten für die Wissenschaft und jedermann öffnen und damit die Voraussetzungen für ein leistungsfähiges Informations- und Innovationsökosystem schaffen, das mit den Herausforderungen unserer Welt Schritt hält. Dies ließe sich mit Steuererleichterungen fördern, wie sie bei der Nutzung umweltfreundlicher Technologien gewährt wurden.

Drittens könnte der Bau eines von den Bürgern betriebenen **digitalen Nervensystems** die neuen Möglichkeiten des Internets der Dinge erschließen und über Echtzeitmessungen Daten für jeden bereitstellen. Wenn wir etwa Ressourcen nachhaltiger nutzen und die Klimaveränderung bremsen wollen, müssen wir die positiven und negativen Nebenwirkungen unserer Interaktionen mit anderen und mit unserer Umwelt messen. Anhand geeigneter Feedbackschleifen ließen sich Systeme dann so beeinflussen, dass sie die jeweils gewünschten Ergebnisse mittels Selbstorganisation erreichen.

Hierfür benötigen wir jedoch vielfältige **Anreiz- und Austauschsysteme**, die für alle ökonomischen, politischen und sozialen Innovatoren nutzbar sind. Diese könnten völlig neue Märkte schaffen und damit auch die Basis für neuen Wohlstand. Die Erschließung der nahezu unbegrenzten Möglichkeiten der digitalen Ökonomie würde durch ein pluralistisches Finanzsystem (zum Beispiel individuelle Währungen) und neue Regelungen zur Vergütung von Erfindungen enorm gefördert.

Um die Komplexität und Diversität unserer zukünftigen Welt besser zu bewältigen und in einen Vorteil zu verwandeln, werden wir persönliche **digitale Assistenten** benötigen. Diese digitalen Assistenten werden auch von Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz profitieren. In Zukunft ist damit zu rechnen, dass zahlreiche Netzwerke von menschlicher und künstlicher Intelligenz je nach Bedarf flexibel zusammengeschaltet und neu konfiguriert werden. Damit wir die Kontrolle über unser Leben behalten, sollten diese Netzwerke dezentral gesteuert werden. Man müsste sich außerdem selbstbestimmt ein- und ausloggen können.

Demokratische Plattformen

Eine »**Wikipedia der Kulturen**« könnte schließlich dabei helfen, verschiedene Aktivitäten in einer hochdiversen Welt zu koordinieren und miteinander kompatibel zu machen. Sie würde die meist nur implizit erlernten Erfolgsprinzipien der verschiedenen Kulturen der Welt explizit machen, so dass sie sich auf neue Weise miteinander kombinieren lassen. Ein derartiges »**Cultural Genome Project**« wäre auch eine Art Friedensprojekt, denn es würde das öffentliche Bewusstsein für den Wert soziokultureller Diversität schärfen. Globale Unternehmen wissen schon lange, dass kulturell diverse und interdisziplinäre Teams erfolgreicher sind als homogene. Vielerorts fehlt aber noch der Rahmen, um das Wissen und die Ideen vieler effizient zusammenzuführen und dadurch kollektive Intelligenz zu schaffen. Dafür würden sich unter anderem spezielle **Diskussionsplattformen** eignen. Diese könnten auch die Voraussetzungen dafür schaffen, eine Demokratie 2.0 mit mehr Beteiligungsmöglichkeiten für Bürger zu realisieren – denn viele Probleme, vor denen die Welt heutzutage steht, werden sich nur mit Beiträgen der Zivilgesellschaft bewältigen lassen.

Signale aus der jüngsten Vergangenheit – vom Urteil des Europäischen Gerichtshofs zu »Safe Harbour« und Datenschutz über die verstärkte Gewichtung der Privatsphäre durch manche Internetfirmen bis zu verschiedenen aktuellen Beiträgen im Wissenschaftsjournal »Nature« und Veranstaltungen wie dem Dritten Innovationsdialog der Bundesregierung über Innovationspotenziale der Mensch-Maschine-Interaktion vom 10. November 2015 – machen Mut. Sie lassen hoffen, dass wir nun auf dem richtigen Weg sind. Wir sollten ihn entschlossen weitergehen! ~



Verfolgen Sie die Debatte!
Kommentare, Interviews und weitere Beiträge der Autoren, etwa zu »Big Nudging« und »Digitale Risikokompetenz« unter www.spektrum.de/t/das-digital-manifest



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

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

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

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

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

www.academia-net.de

Wie entstand Israel?

Laut Altem Testament bildete sich das Volk Israel während der 40-jährigen Wanderung durch die Wüste und der anschließenden Eroberung des gelobten Landes Kanaan. Historische und archäologische Quellen zeichnen nun ein anderes Bild: Israel war schon damals ein Schmelztiegel der Kulturen.

Von Wolfgang Zwickel

Gravierende geschichtliche Einschnitte haben in der Regel nicht einen einzigen Auslöser, sondern sind das Ergebnis vieler Entwicklungen, deren Zeitlinien sich in einem Punkt überschnitten haben. Bis heute suchen die Menschen nach einfacheren Zusammenhängen und formulieren den Beginn eines völlig Neuen häufig in Form von Mythen. Am Anfang der Gründung des römischen Weltreichs stand demnach der Bruderkrieg zwischen Romulus und Remus; das deutsche Kaiserreich wurzelte angeblich im germanischen Aufstand gegen Rom unter Hermann dem Cherusker. Solche Gründungsmythen können historisch richtige Elemente enthalten, aber die

Gesamtkomposition der Geschichtsdarstellung ist eine rein literarische Form.

Mit der Geschichte Israels verhält es sich ähnlich. Dem Alten Testament zufolge hatte sich das Volk Israel in Ägypten entwickelt, floh aus der Knechtschaft des Pharaos, murerte aber immer wieder über die Verhältnisse während der Wüstenwanderung und musste zur Strafe 40 Jahre durch die Wüste streifen, bis Gott es ihm endlich erlaubte, in das Gelobte Land einzuziehen. Dort eroberte es zunächst das stark befestigte Jericho, dann alle anderen Teile der südlichen Levante. Seit Langem ist klar, dass es für diesen Gründungsmythos keine zuverlässigen historischen Grundlagen gibt, weder für die Knechtschaft in Ägypten noch für die Flucht und die anschließende »Landnahme«.

Insbesondere wurden die alttestamentlichen Texte erst Jahrhunderte nach dem Entstehen des Volkes Israel verfasst, dessen Anfänge Forscher im 13. Jahrhundert v. Chr. ansiedeln. Die Bibel liefert also keine Augenzeugenberichte, sondern ihrerseits Deutungen der Frühgeschichte. Die Suche nach Querbezügen in den Überlieferungen der Nachbarvölker verlief ergebnislos. Zwar sind zahlreiche ägyptische Quellen aus der entsprechenden Epoche erhalten, sie erwähnen aber weder ein Volk Israel noch Joseph oder Moses. Zumindest Joseph soll den Rang eines hohen ägyptischen Beamten innegehabt haben, Moses wuchs der biblischen Überlieferung nach am Königshof auf. Auch die Archäologie hilft hier nicht weiter und liefert keine Belege. Zumindest sollte sich eine kriegerische Landnahme in den Fundstätten der Levante widerspiegeln. Aber Jericho, um nur ein markantes Beispiel zu

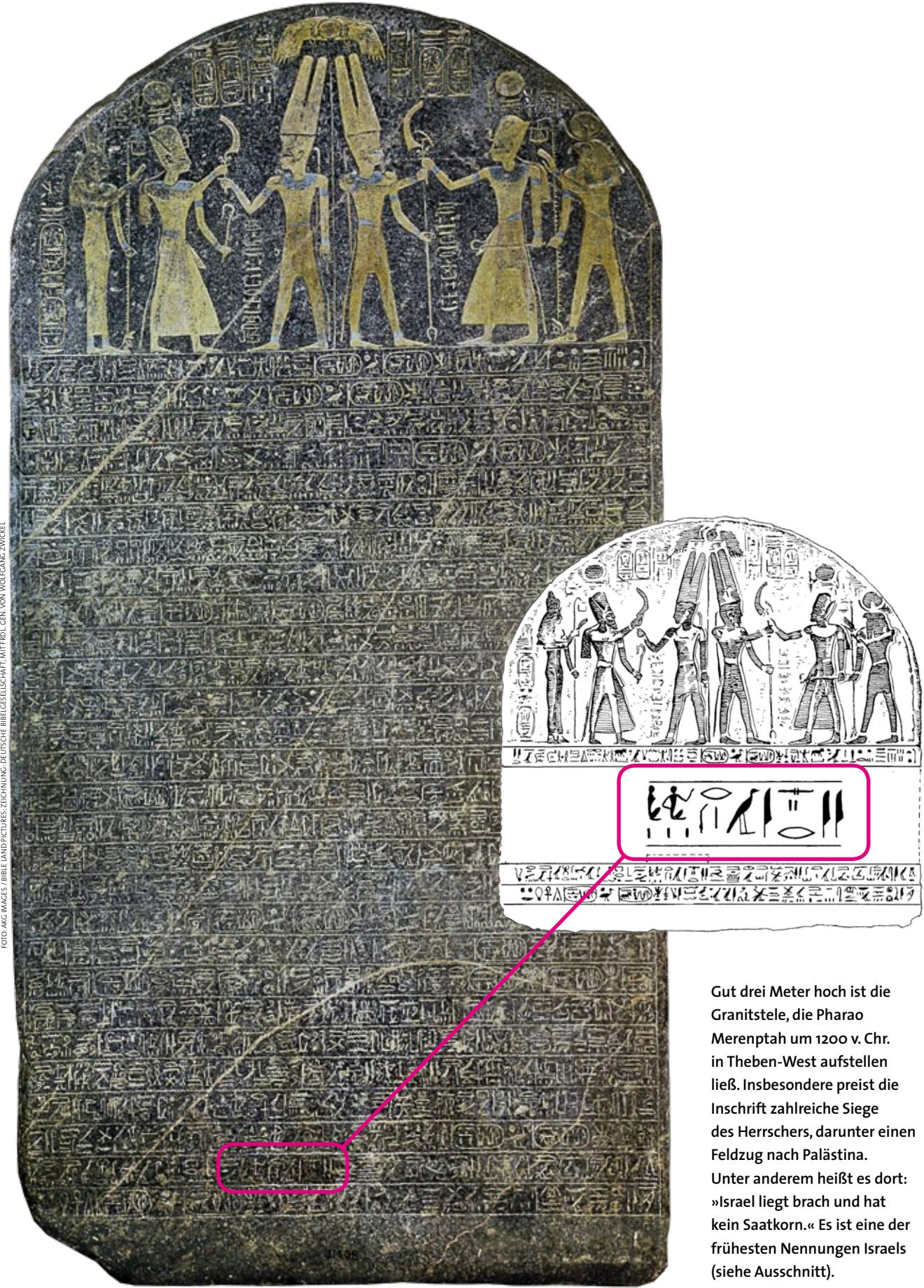
AUF EINEN BLICK

RÜCKZUG IN DIE BERGE

1 Die **Wirtschaftskraft** der Levante-Städte des 2. Jahrtausends v. Chr. beruhte vor allem auf dem **Fernhandel**. Eine Schwäche der Schutzmacht Ägypten auf der einen, räuberische Überfälle durch »**Habiru**« auf der anderen Seite brachten ihn jedoch allmählich zum Erliegen.

2 Im **13. Jahrhundert v. Chr.** setzte eine **zunehmende Trockenheit** an den Küsten des östlichen Mittelmeers eine Spirale aus Hunger und Aggression in Gang. »**Seevölker**« attackierten die Städte, die nun nach und nach aufgegeben wurden.

3 Das Bergland **Palästinas** war klimatisch begünstigt und bot freien Siedlungsraum. Im Lauf von 200 Jahren entstanden dort **bäuerliche Gesellschaften**, die sich aus Alteingesessenen und Migranten konstituierten.



Gut drei Meter hoch ist die Granitstele, die Pharao Merenptah um 1200 v. Chr. in Theben-West aufstellen ließ. Insbesondere preist die Inschrift zahlreiche Siege des Herrschers, darunter einen Feldzug nach Palästina. Unter anderem heißt es dort: »Israel liegt brach und hat kein Saatkorn.« Es ist eine der frühesten Nennungen Israels (siehe Ausschnitt).

nennen, war zwar seit frühster Zeit besiedelt, jedoch gerade um 1200 v. Chr. unbewohnt.

Dass die Schilderungen nur Mythos sind, verdeutlicht letztlich auch eine einfache Überlegung: Ein derart großes Volk – nach Numeri 2, 32 immerhin 603 550 Israeliten, nach Numeri 3, 39 weitere 22 000 Leviten – hätte keine 40 Jahre irgendwo in der Wüste zwischen den heutigen Staaten Ägypten und Israel überlebt. Bibelexegeten, Historiker, Archäologen und Naturwissenschaftler zeichnen inzwischen ein komplexeres Bild der Ereignisse. Auch wenn es noch ein Puzzle ist, in dem noch etliche Teile fehlen, dürfte es der historischen Wirklichkeit weit näher kommen als der biblische Geschichtsmythos.

Im 2. Jahrtausend v. Chr. dehnte Ägypten sein Territorium auf Palästina und Syrien aus (siehe Kasten rechts). Das Gebiet war seit jeher ein Transitland zwischen Ägypten, Mesopotamien und Kleinasien. Wer es kontrollierte, profitierte vom Handel! Und dank der ägyptischen Aufsicht waren die Wege auch weitgehend sicher, so dass der Warenaustausch in der Regel gut funktionierte. Stadtstaaten in Palästina beherrschten jeweils Gebiete von fünf bis zehn Kilometer Ra-

dius. Ägypten installierte zwar Beamte, um seine Interessen zu wahren, beließ den Stadtfürsten aber erhebliche Eigenständigkeit. Im Ergebnis sorgte das Pharaonenreich so für Stabilität in der Region.

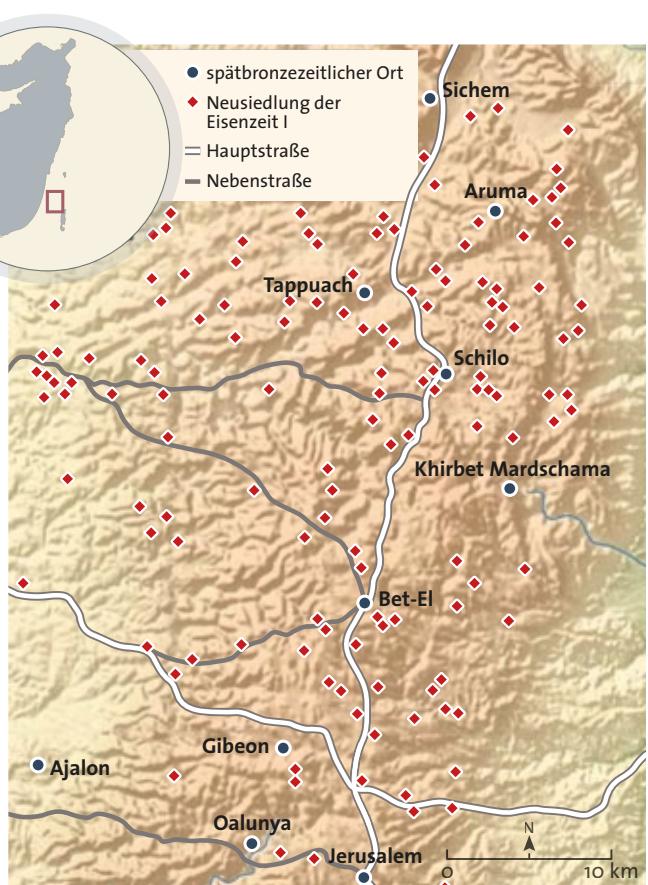
Die Verhältnisse änderten sich, als die Hethiter in Nordsyrien eindrangen, um dort den Fernhandel zu kontrollieren. Infolge der kriegerischen Auseinandersetzungen gingen die Transporte jedoch zurück, weil die Händler das Risiko scheuten, zwischen die Fronten zu geraten und ihre Waren zu verlieren. Da die Stadtstaaten wesentliche Einnahmen durch den internationalen Handel erzielten, schmälerte dies ihre Wirtschaftskraft erheblich.

Neben Bauern, Handwerkern und der politischen Elite in den Siedlungen lebten in der Levante auch Nichtsesshafte. Zu ihnen gehörten Händler und Handwerker, Nomadenhirten mit Schafen und Ziegen, Söldner und andere mehr. Ihre Zahl stieg an, als die Städte immer weniger Möglichkeiten boten, den Lebensunterhalt zu verdienen. Weil aber auch die Einnahmequellen außerhalb begrenzt waren, verlegten sich etliche Nichtsesshafte auf die Räuberei. Ägyptische, hethitische und mesopotamische Texte des 2. Jahrtausends v. Chr. nennen solche Banden »Habiru«. Dieses gesellschaftliche Phänomen war in der gesamten damaligen Welt des Orients verbreitet. Der Begriff meint somit ursprünglich eine soziale Gruppe, keine ethnische. Der Name »Hebräer«, der übrigens in der Bibel nur selten gebraucht wird, leitet sich von dieser Bezeichnung ab.

Exodus verkehrt

Ägypten gelang es immer weniger, die Handelswege in seinem Einflussgebiet zu sichern. Damit aber sanken die Einnahmen der urbanen Zentren, was den Habiru weiteren Zulauf brachte. Irgendwann waren diese Gruppen so stark, dass sie selbst Städte bedrohen konnten, was die Abwärtsspirale anheizte. Hinzu kam eine dramatische Trockenheit im gesamten östlichen Mittelmeerraum. Bohrkerne aus dem Toten Meer zeigen, dass in keiner Epoche der letzten 10 000 Jahre dessen Wasserstand so rapide sank wie im 13. Jahrhundert v. Chr. Mehrere antike Texte aus der Umgebung bestätigen diese Ergebnisse. Ernten reichten nicht mehr, und Mittelmeeranrainer aus den heutigen Ländern Griechenland und Türkei verlegten sich auf Piraterie, was den Gesamtrend ebenfalls beschleunigte; in ägyptischen Annalen tauchen sie als »Seevölker« auf.

Doch für die Bewohner Palästinas gab es eine Alternative: die Auswanderung, sei es ins Ausland oder in das noch unbesiedelte Bergland. Ägypten brauchte Handwerker und Fachkräfte, vor allem für die riesigen Palastbauten in der Ramsesstadt im Nildelta, die Ramses II. (1279–1213 v. Chr.) zur neuen Hauptstadt erwählte; ihre Erwähnung in der Bibel im Kontext des Exodus bildet einen wesentlichen Ankerpunkt für die Datierung der alttestamentlichen Schilderung. Von der Trockenheit war das Nilreich verschont geblieben, denn seine Landwirtschaft hing nicht von den Niederschlägen im Mittelmeerraum ab, sondern von denen in Zentralafrika. Die



In der späten Bronzezeit war das Bergland Palästinas nur dünn besiedelt. Doch Trockenheit, räuberische Überfälle und anderes mehr vertrieben die Menschen aus den Küstenstädten, worauf viele ihr Heil in den höher gelegenen, eigentlich kargen Gebieten suchten.

An der langen Leine

Um seine Grenzen und den Fernhandel zu schützen, eroberten die Pharaonen Palästina, ließen den dortigen Stämmen aber weit gehende Selbstständigkeit.

Von Manfred Clauss

Die Kontakte mit Syrien-Palästina und der Sinaihalbinsel reichen in Ägypten bis in vorgeschichtliche Zeit: Von dort importierte man das im Nilatal fehlende Bauholz, aus dem südlich davon gelegenen Sinaigebiet Kupfer. Andererseits bedrohten »asiatische Nomaden« seit dem Alten Reich (2640–2160 v. Chr.) das östliche Nildelta. Im Mittleren Reich ließ Pharaos Amenemhat I. (1991–1962 v. Chr.) deshalb die so genannte Fürstenmauer errichten, ein System von Wachtürmen und Befestigungsanlagen, um die Landenge zwischen Ägypten, Syrien-Palästina und der Sinaihalbinsel zu kontrollieren.

Thutmosis I. (1494–1482 v. Chr.), der dritte Pharaos des Neuen Reichs, kehrte den Spieß um und expandierte seinerseits in fremdes Gebiet, vom »Anfang der Erde im Süden, bis zu jenem Fluss im Norden, der umgekehrt fließt«, wie er es auf einem Gedenkstein dort bei der Stadt Karkemisch verkündete; diese Stele ist nicht erhalten, wurde aber von dem ebenfalls in der Region aktiven Thutmosis III. (1479–1457 v. Chr.) überliefert. Gemeint war der Eufrat, der von Norden nach Süden fließt, also entgegengesetzt zum Nil. Syrien-Palästina war fortan bis in die römische Zeit umkämpft, im 2. Jahrtausend v. Chr. stritt Ägypten mit dem Reich der Mitanen um die Vorherrschaft, dann mit dem der Hethiter.

Bis etwa 1200 v. Chr. gelang es den Pharaonen, die Landstriche südlich des Orontes zu kontrollieren – der Fluss entspringt im Libanon und fließt durch Syrien und die heutige Türkei zum Mittelmeer. Dann aber verlangten die Angriffe der »Seevölker« Ägyptens Militärpräsenz. Der Plan, eine dieser Gruppen als Söldner in der Levante anzusiedeln, erwies sich als Fehlschlag: Die Philister vertrieben 1150 v. Chr. ihre Herren. Zudem schwächten innenpolitische Konflikte den Pharaonenstaat. In der so genannten Dritten Zwischenzeit (um 1070–664 v. Chr.) herrschten verschiedene Dynastien gleichzeitig im Niltal und im Delta. Fast zwei Jahrhunderte lang blieb die Levante daher sich selbst überlassen. Es gediehen die philistäischen Stadtstaaten, und die beiden Königreiche Israel und Juda entwickelten sich aus bescheidenen Anfängen zu regionalen Mächten.



AKG IMAGES / ERICH LESSING

Statt auf Grenzschutz gegen die Völker der Levante setzte Thutmosis I. auf Eroberung.

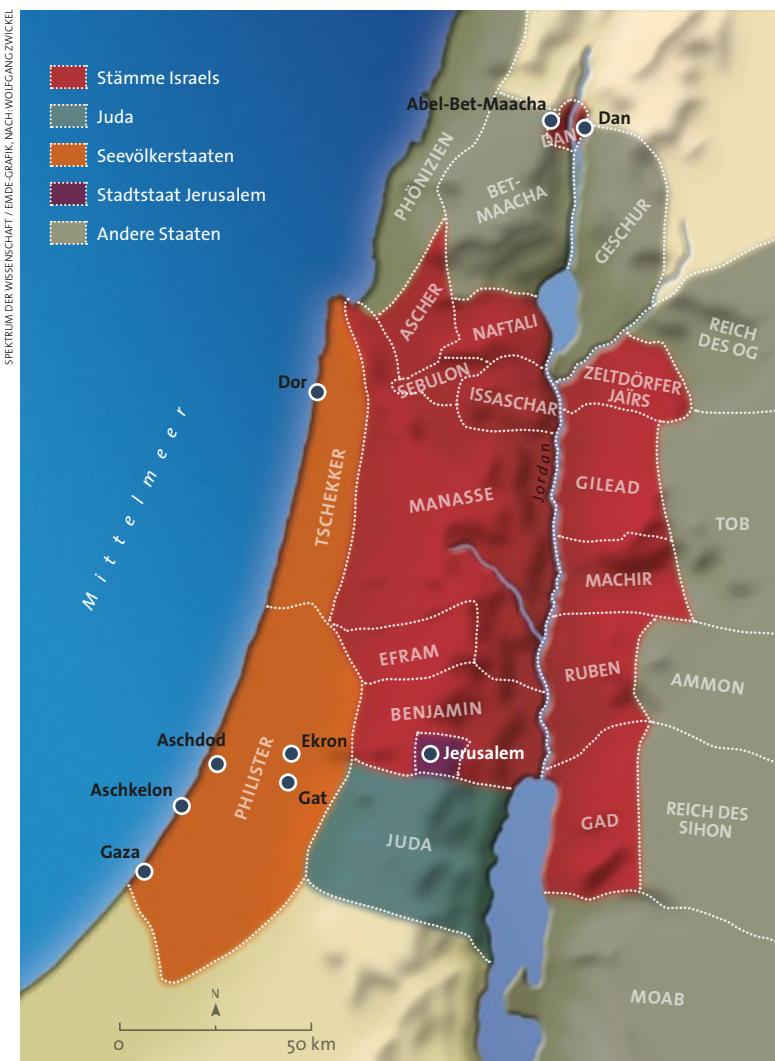
jährlichen Nilüberschwemmungen bewässerten die Felder entlang des Flusses. Ägyptische Quellen dieser Zeit zeigen einen starken Zuwachs an semitischen Personennamen. Hierbei handelt es sich eindeutig um Einwanderer aus Syrien und Palästina. Archäologisch wurden für diese Epoche Bestattungen nachgewiesen, wie sie in der Levante üblich waren. Und auch das Alte Testament erwähnt, dass sich Menschen aus Palästina am Bau der neuen Hauptstadt Ramsesstadt beteiligten (2. Mose 2, 11).

Weitere Migrationsziele waren die Steppen im Süden des Landes (Negeb) und das palästinische Bergland. Dieses blieb während der Spätbronzezeit (1550–1150 v. Chr.) nahezu unbesiedelt. Ausgrabungen und Oberflächenuntersuchungen bestätigen zum Beispiel, dass im zentralen Gebiet nur die Städte Sichem und Jerusalem mit vielleicht jeweils 600 Einwohnern existierten, dazu fünf Weiler, bestehend aus einer Hand voll Bauernhöfe. Der Grund ist offensichtlich: Das Bergland lag abseits der Fernverbindungen und war daher unattraktiv, solange der Handel eine Rolle spielte. Aber nun fanden Siedler dort gutes Land für das Kleinvieh, denn in den Höhenlagen regnete es auch mehr als in den Ebenen, so dass es genug Nahrung für Schafe und Ziegen gab. Wurden in einem zweiten Schritt Büsche gerodet, gewann man auch noch Ackerland. Vermutlich wohnten die Klimaflüchtlinge zuerst in Zelten, errichteten dann feste Gebäude, legten Zisternen an und Speichergruben für das Getreide.

Wurzeln im Feindesland

2001 untersuchte der Ägyptologe und Alttestamentler Manfred Görg in den Depots des Ägyptischen Museums in Berlin eine Inschrift und rekonstruierte einen stark beschädigten Namen als »Israel«. Wegen der Schreibweise und aus historischen Gründen könnte die Inschrift aus der Zeit um 1300 v. Chr. stammen. Rund 100 Jahre jünger ist eine Stele des Pharaos Merenptah, heute im Ägyptischen Museum in Kairo. Sie vermerkt nach langen Ausführungen über dessen Kriege gegen Libyen einen Feldzug nach Palästina. Dort heißt es: »Israel liegt brach und hat kein Saatkorn.« Dies ist sicherlich in dem Sinn zu verstehen, dass es von Hungersnöten betroffen war. Laut den meisten Forschern waren mit diesem Gebiet die neuen Siedlungen im Bergland gemeint. Nach heutigem Wissensstand entstanden dort zwischen 1300 und 1000 v. Chr. rund 300 kleine Siedlungen mit jeweils maximal 100 Einwohnern.

Damit ergibt sich ein Gesamtbild der Entwicklung des frühen Israel, das in Ansätzen bereits 1939 der deutsche Alttestamentler und Historiker Albrecht Alt entworfen hat und das ab den späten 1980er Jahren vor allem von dem israelischen Archäologen Israel Finkelstein mit archäologischen Fakten untermauert wurde. Es gilt heute mit kleinen Modifikationen als Basis für die weitere Forschung. Demnach wanderte das frühe Volk Israel nicht aus Ägypten ein, sondern wurzelte in den kanaanäischen Stadtstaaten; das Gleiche galt für die Bewohner der späteren Nachbarstaaten Juda, Edom, Moab und Ammon sowie für die Aramäer. All diese Stam-



Im 11. Jahrhundert v. Chr. war Palästina in Einflussgebiete aufgeteilt. So beherrschten israelitische Stämme, Juda und Jerusalem Gebiete beiderseits des Jordan, Seevölker und Phönizier die Küste. Die Darstellung ist vereinfacht: Scharfe Grenzen lassen sich nicht ziehen, auch gab es eigenständige Übergangszonen.

mesgesellschaften entwickelten sich zum größten Teil aus der erodierenden Kultur der Spätbronzezeit.

Doch auch die »Seevölker« waren auf der Suche nach neuem Land. Zunächst überfielen sie die unter der Hungersnot darbenden Orte der östlichen Mittelmeerküste, dann drangen sie plündernd Richtung Nildelta vor und lieferten sich 1187 v. Chr. eine Schlacht mit den Truppen Ramses III. Dieser besiegte die Angreifer. Eine Gruppe nahm nun einen Küstenstreifen in Beschlag, der etwa zwischen den heutigen Städten Tel Aviv und Haifa zu suchen ist. Weiter nördlich, an der Küste des heutigen Libanon und Syriens, ließen sich andere, die nun als Phönizier bezeichnet wurden, in den dortigen Stadtstaaten nieder und wurden bald zur erfolgreichsten Seehandelskultur des 1. Jahrtausends v. Chr. An der südlichen levantinischen Küste aber siedelte Ramses III. die Gruppe der Phi-

lister an – als Söldner sollten sie künftig ägyptisches Gebiet sichern. Der Pakt währte jedoch nicht lange. Um 1150 v. Chr. vertrieben die Philister ihre Herren, eroberten benachbarte Landstriche und gründeten die philistäische Pentapolis: den Städtebund von Gaza, Aschdod, Aschkelon, Gat und Ekron. Weil die wichtigste Nord-Süd-Verbindung durch dessen Hoheitsgebiet verlief, kam der internationale Handel in Richtung Ägypten rasch zum Erliegen. Und es dauerte rund 200 Jahre, bis ein Pharao wieder auf dem Gebiet Palästinas aktiv werden sollte.

Gemeinsamkeit macht stark

Im Bergland festigten sich allmählich die Strukturen, ein regionaler Handel entstand. Ortschaften verbündeten sich in Krisenzeiten, schlossen sich zu Klans zusammen, mehrere Klans wiederum zu Stämmen. Denn gemeinsam konnte man die Habiru bekämpfen, die Ansprüche der verbliebenen kanaanäischen Städte abwehren und auch einer neuen Gefahr Herr werden: nomadische Beduinen, die mit ihren Kamelen seit Langem schon am Rand des Kulturlandes lebten. Vermutlich ab dem 11. Jahrhundert verfügten sie über Sättel, die freihändiges Reiten und damit den Kampf vom Kamelrücken aus ermöglichten; entsprechende Abbildungen stammen zwar aus dem 9. Jahrhundert v. Chr., doch dürfte es gewiss Zeit gedauert haben, bis man diese Entwicklung in den Schriftkulturen wahrnahm. Eine Erinnerungsspur dieser Auseinandersetzungen findet sich im Alten Testament: Im biblischen Buch der Richter bekämpft der von Gott berufene Gideon erfolgreich den Beduinenstamm der Midianiter, die hier als Erzfeinde Israels dargestellt werden.

Die Gruppierungen, die sich im Lauf der Zeit formierten, bildeten die Grundlage für die zwölf Stämme Israels (zu denen dann auch Juda zählte) – die Zahl hatte religiös-kultische Bedeutung. Im Alten Testament werden sie alle auf die Söhne Jakobs zurückgeführt, der wiederum den Ehrennamen Israel erhielt (1. Mose 32, 29). Mittels einer Familiengeschichte versucht das Alte Testament – wie bei einem Mythos – die Ursprünge Israels verständlich zu machen. Tatsächlich entstand das neue Volk allmählich aus den Siedlern im Bergland und den Bewohnern der verbliebenen kanaanäischen Städte in den Ebenen.

Aber es gab durchaus auch Einwanderer, die integriert wurden, genauer gesagt: Heimkehrer! Denn ein Teil der in Notzeiten nach Ägypten ausgewanderten Semiten kehrte zurück, nachdem sich die Verhältnisse in Syrien und Palästina wieder gebessert hatten. Dies geschah gegen den Willen der Ägypter, die billige Arbeitskräfte verloren. Allerdings verfolgte man solche Arbeitsunwilligen offenbar nur halbherzig. Hatten sie erst einmal die Sinaihalbinsel erreicht, konnten sie sich ohnehin leicht verstecken.

Eine solche aus Ägypten entwichene Gruppe dürfte den historischen Kern des Gründungsmythos Israels schlechthin geliefert haben. An den Bitterseen, dem lang gestreckten Becken zwischen dem nördlichen und dem südlichen Teil des Sueskanals, in der Bibel als Schilfmeer bezeichnet, kamen ih-

nen die ägyptischen Truppen sehr nahe. Aber ein Ostwind hatte das Wasser der ohnehin flachen Seen zurückgetrieben, so dass die Flüchtenden hindurchwaten konnten (2. Mose 14, 21), während ihre Verfolger mit ihren Streitwagen im Schlick der Seen stecken blieben. So entstand einer der ältesten Texte des Alten Testaments, das so genannte Miriam-Lied: »Singt Jahwe, denn hocherhaben ist er. Ross und Reiter warf er ins Meer!« (2. Mose 15, 21). In der späteren Überlieferung wurde aus dem seichten Gewässer ein Streifen trockener Boden im See und senkrechten, seitlich aufragenden Wasserwänden (2. Mose 14, 22). Hollywood schließlich dramatisierte dieses Eingreifen Gottes in dem Monumentalfilm »Die zehn Gebote« zu einer Schlucht zwischen viele Meter hohen Wasserwänden, die das mächtige Heer des Pharao ertränkten.

Im Miriam-Lied findet sich eine der ältesten Erwähnungen des Gottes Jahwe. Obwohl wir aus Texten aus dem 2. Jahrtausend v. Chr. rund 100 Götter aus dem Raum Syrien und Palästina kennen, findet er sich in keinem davon. Jahwe war nach heutigem Wissen ein Wüstengott, ursprünglich im südlichen Ostjordanland südöstlich des Toten Meeres beheimatet. Ihn verehrten die Nomaden dieser Gegend. Aber auch diese Nomaden konnten angesichts der erwähnten Klimakatastrophe nicht in ihren angestammten Weidegebieten überleben und begaben sich nach Ägypten. Das ist durch entsprechende Texte bezeugt.

Als eine solche Nomadengruppe aus Ägypten floh, erlebte sie die Hilfe Jahwes bei den Bitterseen. Vermutlich wurden diese Menschen in Palästina sesshaft und brachten ihren Gott mit. Das biblische Israel entstand somit als Melange von Menschen unterschiedlicher Herkunft und Traditionen. Im Lauf von gut 200 Jahren hatte sich die politische Landschaft der südlichen Levante vollständig verändert, und aus einem losen Verbund von Klans wurde unter König David um 1000 v. Chr. ein Machtfaktor in der Region, mit dem man rechnen musste. ≈

DER AUTOR



Wolfgang Zwickel lehrt Altes Testament und Biblische Archäologie an der Evangelisch-Theologischen Fakultät der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

LITERATURTIPPS

- Clauss, M.:** Das alte Israel. Geschichte, Gesellschaft, Kultur. C.H.Beck Wissen, München, 4. aktualisierte Auflage 2014
Allgemein verständliches Kompendium, von der Frühzeit bis Herodes
Zwickel, W. et al. (Hg.): Herders neuer Bibelatlas. Herder, Freiburg im Breisgau 2013
Historisch und archäologisch verlässliche Karten zum Heiligen Land und den Nachbarkulturen

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1375992

Keine Rettung vor dem Abgrund

Bei einem makabren Spiel zwischen einem Gefangenen und einem sadistischen Wärter gibt es auf die Dauer kein Entrinnen. Diese 80 Jahre alte Vermutung hat Terence Tao jetzt bewiesen.

von ERICA KLARREICH

Der bekannte ungarische Mathematiker Paul Erdős (1913–1996) erfand im Lauf seines Lebens Tausende von Denksportaufgaben. Viele davon haben zu überraschend tief greifenden mathematischen Entdeckungen geführt. Eine seiner Lieblingsaufgaben war das Diskrepanz-Problem.

James Grime, ein Mathematiker von der University of Cambridge hat eine anschauliche Formulierung des Problems gefunden (Bild S. 69): Ein Mensch ist auf einem Felsvorsprung gefangen. Zwei Schritte zu seiner Linken befindet sich ein Abgrund, zwei Schritte zur Rechten eine Schlangengrube. Um ihn zu quälen, zwingt ein bösartiger

Wärter sein Opfer, sich ständig nach links und rechts zu bewegen. Der Gefangene muss eine Folge von Schritten finden, mit der er den Gefahren auf beiden Seiten ausweicht. Bewegt er sich zuerst nach rechts, muss er sofort nach links zurück, sonst ist der Absturz vorprogrammiert.

Abwechselnd in beide Richtungen zu gehen, scheint die Lösung zu sein – doch hier ist der Haken: Der Gefangene muss seine Schrittfolge im Vorhinein festlegen, und der Wärter kann bestimmen, dass jener nur jeden zweiten Schritt ausführt, beginnend mit dem zweiten. Oder er lässt nur jeden dritten, vierten, ... zu. Die Frage lautet: Existiert eine Taktik, mit welcher der Gefangene am Leben bleibt, unabhängig von der Strategie, die sein Peiniger wählt?

Offensichtlich muss der Gefangene sich so unberechenbar wie möglich verhalten. Jede Regelmäßigkeit, zum Beispiel dieselbe Folge von fünf Schritten immer wieder auszuführen, wäre tödlich, denn dann wäre jeder fünfte Schritt derselbe. Der Sadist könnte sein Opfer durch Vorgabe der Schrittweite 5 leicht ins Verderben schicken. Leider ist es äußerst schwierig, jede Spur von Ordnung im eigenen Verhalten zu vermeiden – und auf die Dauer sogar unmöglich, wie sich herausstellt.

Es ist bekannt, dass der Gefangene elf Schritte ansagen kann, ohne sich ins Unheil zu stürzen (siehe Kasten »Schrittfolgen und multiplikative Folgen«). Der Versuch, einen zwölften hin-

zuzufügen, ist allerdings zum Scheitern verurteilt. Der Bösewicht findet dann unweigerlich eine Möglichkeit, seinen Gefangenen über die Klippe oder in die Schlangegrube zu stürzen.

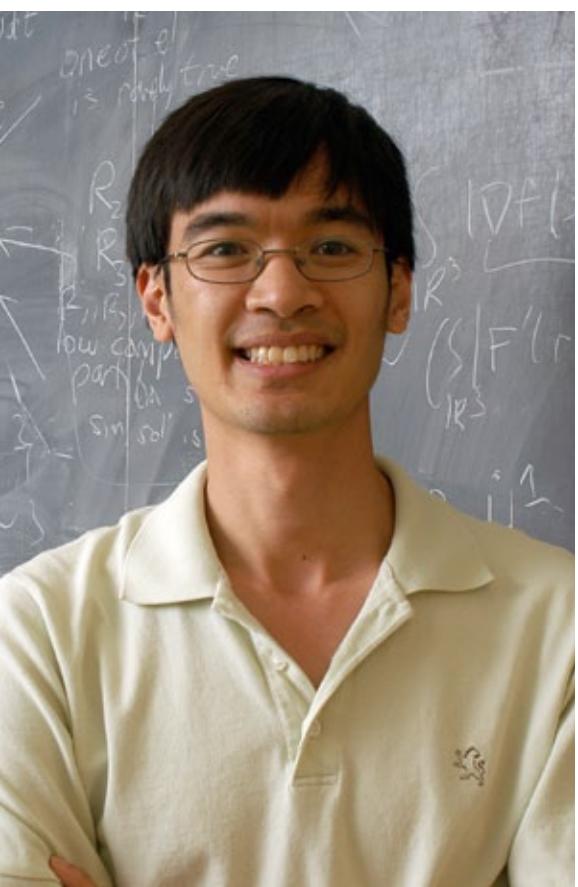
Monsterbeweis für $N=3$

Um 1932 stellte Erdős das Problem etwas allgemeiner: Was passiert, wenn Abhang und Schlangennest drei Schritte entfernt sind statt zwei? Oder N Schritte? Kann man auf diesem großzügiger bemessenen Folterfelsen dem Absturz unendlich lange entkommen? Die Antwort, so mutmaßte Erdős, ist nein – egal wie weit der Abgrund entfernt ist, man kann ihm nicht für immer entrinnen.

Mehr als 80 Jahre lang schaffte es niemand, Erdős' Diskrepanz-Vermutung zu beweisen. »Jeder in diesem Fachgebiet hat sich daran versucht und ist gescheitert«, so Andrew Granville, ein Zahlentheoretiker von der Université de Montréal und dem University College London. »Es ist eines dieser Probleme, über das niemand eine wirklich sinnvolle Arbeit geschrieben hat, weil keiner eine kluge Idee hatte.«

Schon das scheinbar einfache Szenario, in dem Abgrund und Grube drei Schritte weit weg sind, bietet eine enorme Fülle an Möglichkeiten. Diese Version des Problems wurde 2014 endlich gemeistert. Boris Konev und Alexei Lisitsa von der University of Liverpool (England) zeigten, dass man 1160 Schritte festlegen kann – aber keinen einzigen mehr. Der von einem Computerprogramm erzeugte Beweis bestand am Ende aus mehr als 500 Millionen Zeilen – mehr, als der Text der englischen Wikipedia umfasst –, lieferte aber keinen Anhaltspunkt für das allgemeine Problem.

Dieses hat nun Terence Tao (Bild links) vollständig gemeistert. Seinen



JOHND AND CATHERINE T. MACARTHUR FOUNDATION / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS ORGANIZATION LICENSES / BY / 0 / LEGALCODE)

Terence Tao von der University of California in Los Angeles wurde berühmt durch den Beweis, dass es arithmetische Primzahlfolgen beliebiger Länge gibt (Spektrum der Wissenschaft 4/2005, S. 114).

Beweis stellte er im September 2015 als Vorabveröffentlichung online. Der Gewinner der Fields-Medaille (2006), der größten Auszeichnung für Mathematiker, konnte zeigen, dass es wirklich keine Rettung gibt – es existiert immer nur eine endliche Anzahl von Schritten, die man gefahrlos vorausplanen kann.

Um das Problem anzupacken, arbeitete Tao mit speziellen Schrittfolgen, den multiplikativen Folgen. Diese bilden nicht nur das Herzstück zur Lösung des Erdős-Diskrepanz-Problems, sondern liegen auch einigen der wichtigsten Probleme der Zahlentheorie zu Grunde, beispielsweise der Verteilung der Primzahlen (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86).

Bisher, so Granville, habe man an den multiplikativen Funktionen jede Menge nicht verstanden, und das Erdős-Diskrepanz-Problem sei nur das exo-

tischste Beispiel dafür. »Eigentlich müssten diese Dinge sofort klar sein, aber irgendwie brauchte es eine Menge tiefer Ideen und Raffinesse, um dorthin zu kommen.«

Doch ganz im Alleingang hat Tao das Rätsel nicht geknackt. Timothy Gowers, Mathematiker an der University of Cambridge und ebenfalls Träger der Fields-Medaille, ist der Begründer einer großen mathematischen Onlinekollaboration namens »Polymath«. In diesem Forum kann jeder, vom Preisträger bis zum Amateur, Ideen und Lösungssteile beisteuern, anstatt sich isoliert in ein schwieriges Problem zu verbeißen. Besonders Tao ist dafür bekannt, dass er viele Einfälle in seinem Blog oder auf der Polymath-Plattform diskutiert. Aus einer riesigen Anzahl kleiner, oft unvollständiger Beiträge sind so schon einige neue Beweise entstanden.

Ende 2009 war Gowers auf der Suche nach einem weiteren guten Thema dafür. In einer Folge von Blögeinträgen beschrieb er mögliche Projekte und bat seine Leser um ihre Meinungen. Binnen Kurzem stellte sich das Erdős-Diskrepanz-Problem als der eindeutige Favorit des (fachkundigen) Internet-Publikums heraus.

Auch Terence Tao beteiligte sich an dem Projekt, das fortan als »Polymath5« im Internet lief. In dessen Verlauf stellte er fest, dass es im Grunde ausreicht, das Diskrepanz-Problem für multiplikative Folgen zu lösen. Deren Definition lautet, dass der $(n \cdot m)$ -te Eintrag aus dem n -ten, multipliziert mit dem m -ten berechnet wird, $s_{nm} = s_n \cdot s_m$. Zum Beispiel wäre das sechste Folgenglied das Produkt aus dem zweiten und dem dritten. Solche Folgen bieten tatsächlich hohe Erfolgsaussichten: Da nur +1 und -1 als Einträge möglich sind, ist jede Unterfolge mit fester Schrittweite immer gleich der Ausgangsfolge oder deren Spiegelbild. Die Sequenz, die aus jedem dritten Eintrag

Ein Abhang liegt zwei Schritte zur Linken, eine Schlangengrube zwei Schritte zur Rechten. Gibt es eine Serie von Schritten, die beide Gefahren vermeidet, auch wenn nur jeder zweite, dritte, oder N -te geplante Schritt ausgeführt werden darf?

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK



besteht, ist die ursprüngliche, multipliziert mit dem dritten Folgeneintrag, also entweder +1 oder -1. Hat man eine erfolgreiche Hauptfolge gefunden, erhält man daraus automatisch eine Liste mit sicheren Schritten für jede Schrittweite, die der Wärter wählt.

Multiplikative Folgen wurden in der Vergangenheit bereits intensiv studiert. Viele grundlegende Fragen dazu hatten sich allerdings standhaft einer Lösung widersetzt. Ebenso erging es dem Erdős-Diskrepanz-Problem, wie die Organisatoren des Projekts Polymath feststellen mussten. »Bis 2012 war [das Projekt] versandet«, erinnert

sich Tao. Aber das Problem schien am Ende irgendwie zugänglicher, meint er. Vorher war es »wie eine riesige Kugel aus massivem Eisen, die man hätte anheben müssen, aber sie war komplett glatt«, so Tao. Diese Analogie schreibt er Gowers zu. Nach Polymath5 »hatte das Problem Henkel. Damit konnte man zumindest versuchen, es an einen Kran zu hängen.«

Im Januar 2015 unternahmen zwei Mathematiker die ersten Schritte, diesen Kran zu bauen – obwohl ihnen das nicht von Anfang an klar war. Kaisa Matomäki von der Universität Turku in Finnland und Maksym Radziwiłł

von der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey) fanden einen Weg, die Abhängigkeiten unter nicht allzu weit voneinander entfernten Gliedern einer multiplikativen Folge zu verstehen – eine Leistung, die lange unerreichbar schien.

Tao arbeitete daraufhin mit Matomäki und Radziwiłł zusammen an möglichen Anwendungen ihrer Methode auf Probleme der Zahlentheorie. In einem Blogbeitrag vom 6. September 2015 erwähnte er, dass ihn das Problem an ein Sudoku-Rätsel erinnere. Ein paar Tage später postete der Lehrer Uwe Stroinski aus Reutlingen den Kommen-

Schrittfolgen und multiplikative Folgen

Diskrepanz-Probleme in der Mathematik beschäftigen sich mit der »Ausgeglichenheit« von so genannten Färbungen von Mengen. Streicht man beispielsweise die ersten 100 natürlichen Zahlen nach einem Zufallsverfahren entweder rot oder blau an, gibt die Diskrepanz den Unterschied zwischen der Anzahl der beiden Zahlensorten an. Allgemeiner fragen Mathe-

matischer, wie die Diskrepanz von der Färbung abhängt – insbesondere unter welchen Umständen sie auch bei unendlichen Folgen endlich bleibt. Verwendet man statt rot und blau die Kennzeichen +1 und -1, so ist die Diskrepanz einer Folge die Summe über alle Kennzeichen bis zu einer gewissen maximalen Nummer.

Die Vermutung von Erdős lautet: Gegeben ist eine Folge der Zahlen +1 und -1. Dann kann man zu jeder Zahl c eine Schrittweite k wählen, so dass die Diskrepanz der Teilfolge, die aus jedem k -ten Element der ursprünglichen Folge besteht, über c hinauswächst.

Falls Abgrund und Schlangengrube jeweils zwei Schritte entfernt sind, gibt es eine Vorschrift, die den Gefangenen immerhin elf Schritte lang am Leben hält. Ersetzt man »rechts« durch +1, »links« durch -1, so lautet diese:

$$s_1 = +1, s_2 = -1, s_3 = -1, s_4 = +1, s_5 = -1, s_6 = +1, \\ s_7 = +1, s_8 = -1, s_9 = -1, s_{10} = +1, s_{11} = +1$$

(Bild links). Darf der Gefangene jeden Schritt ausführen, bewegt er sich ständig hin und her und endet rechts. Die

Diskrepanz der Folge, das heißt die Summe der Folgenglieder, ist also +1. Darf er nur jeden zweiten Schritt unternehmen, beginnend beim zweiten, ist die Diskrepanz wiederum +1, bei jedem dritten Schritt ist sie -1. Man überzeugt sich leicht, dass bis Schrittweite 11 nie eine Diskrepanz größer als 1 auftritt; der Wärter schafft es somit nicht, sein Opfer von der Klippe zu stoßen. Versucht man allerdings einen weiteren Schritt anzufügen, so gewinnt der Böse.

Sind die beiden Gefahren jeweils drei Schritte weit weg, sind sogar 1160 Schritte möglich, wie Konev und Lisitsa 2014 zeigen konnten – aber wiederum kein einziger mehr.

Taos Beweis der Diskrepanz-Vermutung stützt sich auf eine spezielle Art der Schrittfolgen, so genannte multiplikative Folgen. Deren Glieder werden nach dem Gesetz $s_{nm} = s_n s_m$ gebildet. Beispiel:

$$s_1 = +1, s_2 = -1, s_3 = +1, s_4 = +1, s_5 = -1, s_6 = -1, s_7 = +1, s_8 = -1, s_9 = +1, \\ s_{10} = +1, s_{11} = +1, s_{12} = +1, \dots$$

Solche Folgen beginnen immer mit +1. Die Einträge, deren Nummer eine Primzahl ist, können beliebig gewählt werden; alle anderen ergeben sich automatisch. Zum Beispiel ist das sechste Folgenglied das Produkt aus dem zweiten und dem dritten.

Für das Diskrepanz-Problem kommt es auf die Teilfolgen an, die aus jedem k -ten Schritt bestehen. In Formeln: $t_n = s_{kn}$. Für Schrittweite $k=2$, $t_n = s_{2n}$, erhält man aus dem obigen Beispiel die Teilfolge:

$$t_1 = s_2 = -1, t_2 = s_4 = +1, t_3 = s_6 = -1, t_4 = s_8 = -1, t_5 = s_{10} = +1, t_6 = s_{12} = +1, \dots \\ \text{Für } k=3 \text{ ergibt sich: } t_1 = s_3 = +1, t_2 = s_6 = -1, t_3 = s_9 = +1, t_4 = s_{12} = +1, \dots$$

Die Teilfolgen reproduzieren die Ausgangsfolge, multipliziert mit dem k -ten Element, also +1 oder -1. Für den Gefangenen im Diskrepanz-Problem scheinen solche Folgen ideal: Hat er eine Folge gefunden, die seinen Absturz verhindert, kann er getrost jede vom Wärter aufgezwungene Teilfolge verwenden – schlimmstenfalls startet er in die andere Richtung.

Schon 1985 trafen sich der damals zehnjährige Terence Tao und Paul Erdős auf einer Mathematikkonferenz. Sie unterhielten sich – natürlich – über mathematische Probleme. Jahre später schrieb Erdős eine Empfehlung für Tao, die ihn an die Princeton University brachte.



tar, dass das Erdős-Diskrepanz-Problem auf ihn ebenfalls wie ein Sudoku wirke. Und er stellte die Frage, ob der Zugang von Matomäki und Radziwiłł auch auf dieses anwendbar sei.

»Nein, ich denke nicht«, war Taos knappe Antwort. Mit der genannten Methode findet man Vorschriften, die den Gefangenen für einige Zeit am Leben halten. Aber für das umgekehrte Problem, zu zeigen, dass jede Taktik am Ende scheitern muss, schien sie ungeeignet. Als Tao sich allerdings näher mit Stroinskis Frage beschäftigte, erkannte er, dass seine reflexhafte Antwort falsch war. Er könnte die Erdős-Vermutung beweisen, sollte er es schaffen, bestimmte komplizierte Summen unter Kontrolle zu bringen.

Nun packte Tao das Diskrepanz-Problem von Neuem an. Eines Nachmittags, während er darauf wartete, dass sein Sohn aus der Klavierstunde kam, flog ihm die Antwort zu: Er würde ein Argument verwenden »wie einen Zaubertrick: Der Zauberkünstler gibt dem Publikum zwei Optionen, und es sieht so aus, als hätten die Zuschauer die Kontrolle. Aber der Magier hat den Trick so geplant, dass er funktioniert, egal welche Wahl du triffst.«

Zentral für Taos Argumentation ist der Begriff der Entropie. Eigentlich aus der Thermodynamik stammend, wo er das Maß der Unordnung in einem Gasbehälter beschreibt, lässt er sich auf dynamische Systeme aller Art und sogar

Zahlenfolgen übertragen (SdW 9/2014, S. 16). Die Entropie einer Folge ist umso größer, je weniger man aus ihrem bisher bekannten Verhalten auf das in der Zukunft schließen kann.

Der Zaubertrick mit der Entropie

Tao teilt nun die Folge in Blöcke auf; die sind gewissermaßen das Publikum seines Zaubertricks. Für jeden neuen Block muss eine von zwei Möglichkeiten eintreten, wie Tao beweisen kann: Entweder gewinnt der Böse, oder die Entropie der Folge sinkt um einen bestimmten Wert. Aber dass jeder Block sozusagen die Auswahl zwischen beiden Möglichkeiten hat, verhindert den Zaubertrick nicht. Die Entropie kann nämlich niemals negativ werden. Also muss irgendwann ein Block auftauchen, bei dem die einzige Möglichkeit ist, dass der Wärter siegt. Mathematisch ausgedrückt zeigt Taos Arbeit, dass die Teilsummen der multiplikativen Folge beliebig groß werden. Sie bietet allerdings keine Möglichkeit, den Wert dieser Summen für eine gegebene Folge zu berechnen.

Tao löste dieses Problem innerhalb von nur einem Monat. Das ist »ein erstaunlicher Beleg seiner Stärke«, meint Granville. »Verbeißt er sich erst in etwas, kann er es nicht mehr loslassen.« Der Beweis wurde zwar bislang nicht vollständig von Kollegen geprüft, es haben aber auch noch keine Experten Bedenken angemeldet. »Ich bin total zufrieden«, sagt der Mathematiker

Gil Kalai von der Hebräischen Universität Jerusalem. Auch Tao ist von seinem »Zaubertrick« begeistert. »Ich hoffe, dass damit noch viele andere Dinge bewiesen werden können.«

DIE AUTORIN



Erica Klarreich hat in Mathematik promoviert und ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley (Kalifornien). Ihre Artikel erschienen im »Quanta Magazine«, in »Nature« und »Scientific American«.

QUELLEN

- Gowers, W. T.:** Erdős and Arithmetic Progressions. [arXiv:1509.03421](https://arxiv.org/abs/1509.03421)
- Konev, B., Lisitsa, A.:** Computer-Aided Proof of Erdős Discrepancy Properties. In: Artificial Intelligence 224, 102–118, 2015. Online unter [arXiv:1405.3097](https://arxiv.org/abs/1405.3097)
- Matomäki, K., Radziwiłł, M.:** Multiplicative Functions in Short Intervals. [arXiv:1501.04585](https://arxiv.org/abs/1501.04585)
- Tao, T.:** The Erdős Discrepancy Problem. [arXiv:1509.05363](https://arxiv.org/abs/1509.05363)

WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1378800



Nach der redigierten Fassung aus [Quantamagazine.org](https://quantamagazine.org/), einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



Die Katastrophe hinter Ebola

Die Ebolaepidemie in Westafrika scheint eingedämmt. Was bleibt, sind die sozialen und ökologischen Verwerfungen, die sie erst ermöglichten.

Robert L. Dorit



Der Ebolaausbruch von 2014 führte vor Augen, wie schnell Epidemien politische und ökologische Barrieren überwinden können. Das Bild zeigt einen Grenzübergang zwischen Guinea, wo die Epidemie begann, und Sierra Leone, wohin sich ihr Schwerpunkt als Nächstes verlagerte.

Am ersten Weihnachtsfeiertag 2013 wurde der zweijährige Emile Ouamouno krank. Der Junge, der in dem kleinen Dorf Méliandou in Guinea lebte, hatte in den Wochen zuvor mit seinem Freund am Rand der Siedlung gespielt. Dabei hielten sich die beiden gelegentlich in der Nähe eines ausgehöhlten Baums auf. Niemand konnte ahnen, dass hier eine beispiellose Welle tödlicher Infektionen ihren Anfang nahm. Den Baum bewohnten tausende Fledertiere, darunter die weit verbreiteten, etwa mausgroßen Angola-Bulldoggfledermäuse (*Mops condylurus*). Eine von ihnen muss den kleinen Emile mit dem Ebolavirus infiziert haben, so dass der Erreger von seinem tierischen Wirt auf den Menschen übersprang.

Sechs Tage später starb der Junge. Er war das erste Opfer einer verheerenden Ebolaepidemie, die in den folgenden Monaten in Westafrika grassierte und vielerorts blanke Panik verursachte. Von allen 22 Ausbrüchen der Seuche, die seit 1975 dokumentiert worden sind, war dies mit Abstand der schlimmste. Schon 1995 hatte das Virus eine Spur des Todes in Zaire hinterlassen, als es 315 Menschen infizierte, von denen 254 starben. Die Epidemie jedoch, die 2014 um sich griff, übertraf dieses Ausmaß bei Weitem. Laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) hatten sich bis zum 15. November 2015 insgesamt 28 634 Menschen mit dem Ebolavirus infiziert; 11 314 von ihnen starben daran.

Warum dieser Ebolaausbruch so viel schlimmer war als alle zuvor, ist nicht abschließend geklärt. Der Verlauf einer Epidemie hängt von zahlreichen Umständen ab: biologischen, ökonomischen, kulturellen, politischen sowie schlicht zufallsbedingten. Vorangegangene Ebolawellen hatten zwar ganze Gemeinden ausgelöscht, waren aber immer auf wenige Dörfer begrenzt geblieben.

2014 lief das komplett anders. Ende Januar war die Infektion auf mehrere Mitglieder von Emiles Familie übergesprungen und hatte sie getötet. Im Februar trat das Virus in Orten auf, die 80 Kilometer von Méliandou entfernt lagen – es war dorthin verschleppt worden von Pflegekräften und Trauernden, die an den Bestattungen der ersten Ebolaopfer teilgenommen hatten. Mitte März erkrankten bereits Menschen, die mehr als 160 Kilometer entfernt von jenem hohen Baum lebten, an dem Emile gespielt hatte.

Armut und Umweltzerstörung

Geografische Umstände verschärften die Lage noch zusätzlich. Das Dorf Méliandou liegt an der Nahtstelle dreier Länder: Guinea, Sierra Leone und Liberia. Alle drei gehören zu den ärmsten Staaten der Welt; zwei von ihnen haben jahrelange bewaffnete Konflikte hinter sich. Diese Umstände beschleunigten die Ausbreitung des Virus.

Zudem spielten ökologische Veränderungen eine bedeutende Rolle für das Ausmaß der Epidemie. Dass Emile und

AUF EINEN BLICK

KRANK WEGEN ZERSTÖRTER ÖKOSYSTEME

1 Die **Ebolaepidemie 2014** in Westafrika war der schlimmste Ausbruch dieser Krankheit, der bisher verzeichnet wurde. Mehr als 11 000 Menschen starben.

2 Verschiedene Faktoren trugen dazu bei, dass die Infektionswelle so verheerend wütete. Eine große Rolle spielten die massiven **Umweltzerstörungen** in den betroffenen Regionen.

3 Auch künftig kann die Ebolaseuche wieder ausbrechen – oder eine andere, bisher unbekannte Infektionskrankheit. Um das zu verhindern, ist eine bessere **medizinische Infrastruktur** nötig sowie eine engere **Verzahnung von Umwelt- und Gesundheitspolitik**.

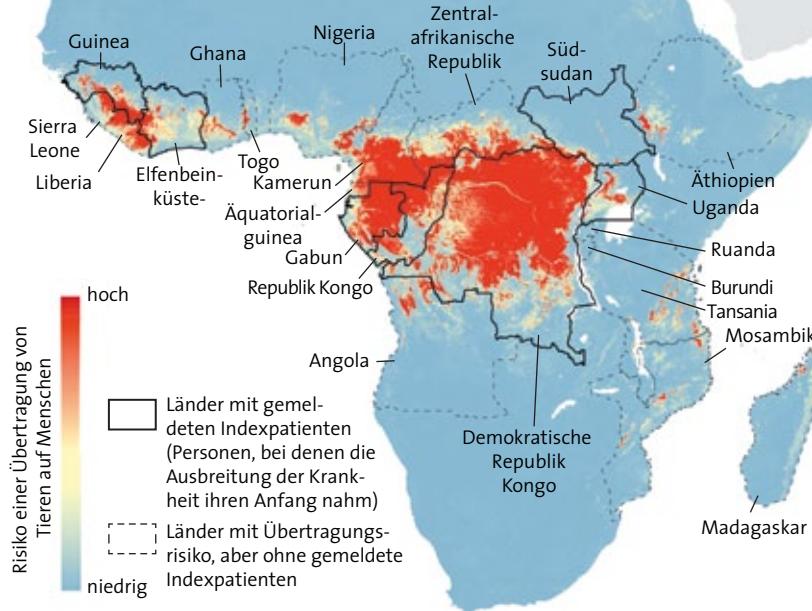
die infizierte Fledermaus überhaupt in Kontakt miteinander kamen und dass andere Menschen das Virus später großräumig verbreiteten, ist unter anderem das Ergebnis dramatischer Umweltzerstörungen. Méliandou, einst umgeben von üppigen tropischen Wäldern, liegt heute in einer kahl geschlagenen Landschaft mit erodierten Böden. Der westafrikanische Regenwald Guineas, anerkannt als Gebiet besonderen Artenreichtums (»global biodiversity hotspot«), schrumpfte in den zurückliegenden Jahrzehnten auf 18 Prozent seiner ursprünglichen Größe. Emiles Heimatland hat seit Mitte

der 1980er jedes Jahr etwa ein Prozent seiner Waldflächen verloren. In der Umgebung Méliandous war die Abholzung besonders dramatisch: Mehr als 80 Prozent der bewaldeten Flächen verschwanden und machten Ölpalmen- und Obstplantagen Platz.

Dass die aktuelle Ebolaepidemie gerade dort ihren Ursprung nahm, kann daher kaum überraschen. Fast alle dokumentierten Ebolaausbrüche ereigneten sich in Gegenden, in denen kurz vorher umfangreiche Abholzungen stattgefunden hatten. Solchen Landschaftsveränderungen müssen sich die Einwohner zwangsläufig anpassen. Auf der Suche nach Arbeit und während einer Epidemie auch auf der Suche nach medizinischer Versorgung, entfernen sie sich immer weiter von ihren Heimatdörfern. Anfang 2014, als das Virus bereits über dutzende Kilometer verschleppt worden war, hatten die nationalen Gesundheitsbehörden die steigenden Erkrankungszahlen noch nicht einmal bemerkt – geschweige denn den Erreger als Ursache identifiziert.

Wie alle Viren kann der Ebolaerreger nicht selbstständig überleben, sondern ist hierfür auf Wirtsorganismen angewiesen. Er bringt sie dazu, wichtige molekulare Vorgänge seines Lebenszyklus für ihn auszuführen, einschließlich der Produktion neuer Viruspartikel. Welche Konsequenzen dies für den Wirt hat, hängt davon ab, welcher Spezies er angehört. Normalerweise befällt das Virus Fledertiere, Flughunde,

Modellrechnungen zeigen, in welchen afrikanischen Regionen das Risiko am höchsten ist, dass das Ebolavirus auf den Menschen überspringt. Die fraglichen Regionen sind rot gekennzeichnet. Das Modell berücksichtigt ökologische Parameter wie die Höhe über dem Meeresspiegel, die Verbreitung dreier Fledertierarten, die Vegetationsdichte, die Temperatur an der Erdoberfläche sowie die Verdunstungsrate. Die letzten vier Variablen hängen vom Grad der Entwaldung ab.



PICOTTI, D. M. ET AL.: MAPPING THE ZOONOTIC NICHE OF EBOLA VIRUS DISEASE IN AFRICA. IN: ELEPHANT. 10.7544/PPULF.04395. 2014. IC. SB1 CC BY-NC-ND. LEGALCODE: BEARBEITUNG - AMERICAN SCIENTIST LICENSE: BY-NC-ND. CODE: BEARBEITUNG - AMERICAN SCIENTIST

die häufigsten Wirte, spüren kaum negative Auswirkungen: Anscheinend haben sie und der Erreger sich evolutionär gut aneinander angepasst. Je nach Untersuchung haben zwischen 10 und 40 Prozent der wild lebenden Flughunde schon einmal Kontakt mit Ebolaviren gehabt und zeigen eine kräftige Immunreaktion dagegen.

Doch sobald das Virus aus seinem angestammten Wirtsreservoir ausbricht und auf andere Säugetiere übergreift, wirkt es tödlich. Dabei kann es nicht nur Menschen, sondern auch andere Primaten befallen. In den Jahren 2002 und 2003 starben während einer Ebolaepidemie im Kongo fast 5000 Gorillas an der Infektion. Primaten sind keine natürlichen Wirte des Virus, und deshalb fehlt ihnen die evolutionär erworbene Fähigkeit, mit dem Erreger zu koexistieren. In diesem Licht betrachtet lässt sich der Ausbruch 2014 in Westafrika besser verstehen. Er war unter anderem deshalb so verheerend, weil Barrieren, die ihm normalerweise im Weg stehen, großteils zerstört waren: Grenzen zwischen Fledertieren und Menschen, zwischen Méliandou und umgebendem Wald, zwischen intaktem Wald und zerstückelter Kulturlandschaft.

Während Fledertiere die Fähigkeit erworben haben, Ebola-infektionen unter Kontrolle zu halten, ist das Immunsystem des Menschen den Viren nicht gewachsen. Der Erreger befällt nämlich ebenjene Zellen unserer Körpers, die das Immunsystem vor fremden Eindringlingen warnen sollten. Ebola bringt diese Zellen zum Schweigen und kapert ihre Synthesemaschinerie. Die fremdgesteuerten Zellen produzieren daraufhin neue Viruspartikel, während das sonst so aufmerksame Immunsystem untätig bleibt. Erst nachdem zahlreiche virale Vervielfältigungszyklen durchlaufen sind, schlagen die infizierten Zellen Alarm, indem sie bestimmte Moleküle ausschütten, so genannte Zytokine.

Damit allerdings stürzen sie den Organismus erst richtig ins Chaos. Der Körper setzt auf den Alarm hin eine überschießende Immunreaktion in Gang, die Blutgefäße und Organe zerstört, oft mit tödlichen Folgen. Das Ebolavirus ist also deswegen so gefährlich, weil es die Immunreaktion des Körpers auf diesen selbst lenkt. Und genau darum fallen

jenen, die Erregern normalerweise am besten widerstehen – die Jungen und Gesunden –, der Krankheit sehr häufig zum Opfer.

Auf Grund bestimmter Traditionen, die in der ländlichen Bevölkerung Guineas verbreitet sind, überschritt die Epidemie rasch die Landesgrenzen. Sowohl familiäre als auch geschäftliche Bindungen führen zu ständigen gegenseitigen Besuchen, und das ermöglichte die rasche Verbreitung des Virus in der frühen Phase des Ausbruchs.

Selbst zwischen Lebenden und Toten gab es keine Barriere, die den Erreger wirksam behinderte. Während die meisten Viren nur von lebenden Wirten übertragen werden, ist das bei Ebola nicht der Fall. Körper von Erkrankten, die gestorben sind, bleiben bis zu sieben Tage nach dem Tod infektiös. Deshalb bergen rituelle Bestattungen der Opfer ein hohes Ansteckungsrisiko. Zu Beginn der Epidemie erkrankten nicht nur zahlreiche Pflegekräfte, die sich um die Patienten kümmerten, sondern auch etliche Familienangehörige und nahe Bekannte der Verstorbenen, die diese für die Beisetzung vorbereitet hatten. Das erschwerte die Eindämmung der Infektionswelle zusätzlich.

Der verfrühte Optimismus des 20. Jahrhunderts

In der globalisierten Welt des 21. Jahrhunderts sind geografische Entfernungen viel weniger relevant als früher. Jede neu auftauchende Krankheit hat das Potenzial, sich rasch und weiträumig auszubreiten. Ein effektives Gegensteuern erfordert daher, Ausbrüche möglichst früh zu erkennen. Glück und Zufall spielen hierbei immer eine Rolle. Doch solange wir die ökologischen Rahmenbedingungen von Infektionswellen nicht ausreichend berücksichtigen, bleibt die Vorhersage der nächsten Epidemien ein pures Ratespiel. Der Ebolaausbruch fiel nicht vom Himmel, sondern begann inmitten einer menschengemachten Zone ökologischer Zerstörung.

Im zurückliegenden Jahrhundert waren manche Biologen so gut wie sicher, dass Infektionskrankheiten bald der Vergangenheit angehören würden. Ab Mitte der 1960er bis in die 1970er Jahre hinein ließen verbesserte Hygiene, erfolgreiche



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



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

Impfprogramme und hochwirksame Antibiotika den Eindruck entstehen, man müsse sich bald nicht mehr vor ansteckenden Keimen fürchten. Tatsächlich sanken sowohl die Häufigkeit von Infektionskrankheiten als auch die Zahl der durch sie verursachten Todesfälle dramatisch, insbesondere in den Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg. Schrieb man diesen Trend in die Zukunft fort, erschien der Sieg über die Erreger als gewiss.

Doch leider war der Optimismus verfrüht. Schon bald tauchten erste antibiotikaresistente Bakterienstämme auf und stellten die Mediziner vor neue Probleme (siehe SdW 3/2015, S. 36). In den frühen 1980er Jahren trat zudem mit dem Aidsvirus (HIV) ein bis dahin völlig unbekannter Krankheitserreger auf den Plan.

Er verursachte die verheerendste Epidemie seit der Influenzapandemie von 1918, der so genannten Spanischen Grippe. Auch HIV war mehrfach von seinen natürlichen Wirten, nichtmenschlichen Primaten, auf den Menschen übergesprungen – und zwar stets in Regionen mit starkem Bevölkerungswachstum und massiven Eingriffen in die Umwelt. Als »Trittbrettfahrer« ökonomisch bedingter Migration eroberte HIV die Welt und etablierte sich dauerhaft in seinen neuen Wirten. Das Zeitalter der naiven Hoffnungen war vorüber: Es setzte sich die Erkenntnis durch, dass Infektionskrankheiten ein unvermeidlicher Aspekt des Lebens sind.

Mehr Menschen, mehr Nutztiere, mehr Vireninfektionen

Aktuelle Prognosen von Mikrobiologen wirken durchaus beunruhigend. So hat die Rate, mit der neue und für den Menschen potenziell bedrohliche Viren entdeckt werden, in den zurückliegenden 60 Jahren nicht abgenommen. Wir müssen damit rechnen, bis zum Ende dieses Jahrzehnts auf 10 bis 40 weitere gefährliche Erregerspezies zu stoßen. Angesichts einer stetig wachsenden Weltbevölkerung birgt das beträchtliche Risiken. Selbst wenn man berücksichtigt, dass sich die Überwachungsmöglichkeiten immer weiter verbessern, wird die Zahl neu auftretender Infektionskrankheiten künftig steigen.

Dazu trägt auch die wachsende Anzahl von Haus- und Nutztieren bei, die den Erregern häufig als Zwischenwirte dienen, bevor sie auf den Menschen überspringen. Der kausale Zusammenhang zwischen Massentierhaltung und neuen Infektionskrankheiten mag nicht offensichtlich sein. Doch ist er eine unausweichliche Folge der industrialisierten Landwirtschaft – und unterstreicht einmal mehr, wie wichtig es ist, neue Seuchen in einem ökologischen Kontext zu betrachten. Wanderungs- und Ausbreitungsbewegungen von Wirten, Zwischenwirten und Krankheitsüberträgern, verursacht von Eingriffen in die Umwelt, spielen eine zentrale Rolle im Infektionsgeschehen.

Jede Epidemie ist einzigartig, so auch der aktuelle Ebolaausbruch in Westafrika. Besondere zeitliche und räumliche Umstände erlaubten es dem Virus, in der menschlichen Bevölkerung Fuß zu fassen, und eine Serie von Fehleinschätzungen seitens lokaler Behörden und internationaler Organisationen begünstigten seine rapide Verbreitung. Meiner Ansicht nach offenbarte sich in dem Ausbruch jedoch, ebenso wie in praktisch allen anderen Epidemien der vergangenen 30 Jahre, unser zunehmend gestörtes Verhältnis zur übrigen belebten Welt.

Natürlich gehörten Krankheitserreger schon immer zur Biosphäre. Innerhalb eines funktionierenden Ökosystems jedoch regulieren sich ihre Auswirkungen von selbst. Die meisten Viren überdauern bei begrenztem Durchsuchungsgrad ihrer Wirtspopulationen, und die Wirte infizieren sich üblicherweise, ohne schwer wiegende Krankheitssymptome zu

entwickeln. Wenn Erreger auftauchen, die sich plötzlich in der Bevölkerung verbreiten, dann in der Regel nicht deshalb, weil sie überraschend ihre Eigenschaften verändert haben – sondern weil wir die Grenzen ihrer natürlichen Nische niedrigerissen haben.

Die meisten Krankheitserreger sind so eng an ihren natürlichen Wirt angepasst, dass sie nicht ohne Weiteres im menschlichen Organismus Fuß fassen können. Es kommt zwar ständig vor, dass Viren von einer Spezies auf eine andere überspringen, aber meist erweist sich dies als Sackgasse: Die Pathogene überleben in der neuen Wirtspopulation nicht dauerhaft. Wahrscheinlich schätzen Epidemiologen die Gefahr neuer Infektionskrankheiten deutlich zu niedrig ein, da sie viele fehlgeschlagene »Anläufe« von Keimen, Speziesgrenzen zu überwinden, überhaupt nicht bemerken.

Doch menschliche Aktivitäten haben zur Folge, dass die Erreger öfter Gelegenheit bekommen, auf uns überzuspringen – und entsprechend häufiger damit Erfolg haben. Wir sind in erheblichem Ausmaß in die Lebensräume wilder Tiere eingedrungen, was diese mitsamt ihren Krankheitserregern dazu zwingt, in immer engerer Nachbarschaft zu uns zu leben. Emile wäre der infizierten Fledermaus wahrscheinlich nie begegnet, wenn nicht die Wälder rund um

Méliandou so umfassend abgeholt worden wären. Beinahe zwei Drittel der Infektionsleiden, die in den vergangenen 50 Jahren neu aufgetreten sind, waren ursprünglich Tiererkrankungen, und meist stammten die Erreger von Wild- und nicht von Nutztieren.

Die Barrieren, die Viren und Bakterien einst in ihren natürlichen Wirtspopulationen gefangen hielten, sind heute durchlässig geworden. Umfassende Entwaldung und Landwirtschaft bis in kaum noch urbar zu machende Gebiete hinein bringen Menschen und Wildtiere enger zusammen. Häufig sind die Einwohner solcher kargen Regionen bei eher schlechter Gesundheit und müssen weite Strecken zurücklegen, um an Fleisch zu kommen, mit dem sie ihren dürftigen Speiseplan aufwerten können. Und je öfter sie dabei in Kontakt mit wilden Tieren kommen, umso weniger lässt sich ein erfolgreiches Überspringen von Erregern vermeiden.

Wenn pathogene Mikroorganismen neue Lebensräume erobern

In diesem Licht betrachtet sind neu auftretende Krankheitskeime nichts anderes als invasive Spezies. Welchen Verlauf ihre Invasion nimmt, hängt davon ab, wie stark die Biodiversität in ihrem Verbreitungsgebiet gelitten hat. Bei schwindender Vielfalt potenzieller Wirte bleiben am Ende nur noch Menschen und ihre Nutztiere als mögliche Ziele übrig. Die Annahme, dass der Rückgang der Biodiversität das Risiko neuer Erkrankungen erhöht, ist unter anderem in das so genannte Verdünnungseffektmodell (»dilution effect model«) eingeflossen. Dessen Ergebnisse stimmen gut überein mit Beobachtungsdaten zur Verbreitung verschiedener Pathogene, etwa Hanta- und Ebolaviren.

Auch bakterielle Infektionen lassen sich mitunter als invasiv beschreiben. Rund ein Fünftel der Infektionskrankheiten, die seit den 1980er Jahren neu aufgetreten sind, lassen sich auf antibiotikaresistente Bakterien zurückführen, die in Krankenhäusern und anderen medizinischen Einrichtungen immer häufiger vorkommen. Der übermäßige Gebrauch von Antibiotika dezimiert die Darmflora und öffnet damit Einfallstore für krank machende Keime. Breitbandantibiotika zerstören das Ökosystem Darm ebenso, wie großflächige Abholzungen das Ökosystem Wald zerstören. Beides führt zu einem instabilen, verwundbaren Zustand.

Wie die aktuelle Ebolaepidemie schmerzlich offen gelegt hat, lassen unsere medizinischen Möglichkeiten noch sehr zu wünschen übrig. Es vergingen Wochen, bis organisierte Gegenmaßnahmen anliefen. Zu dem Zeitpunkt waren bereits hunderte Menschen mit Infizierten in Kontakt gekommen. Wir können es besser – aber nur, wenn wir uns eingestehen und unser Handeln danach ausrichten, dass wir selbst die Voraussetzungen für solche verheerenden Ausbrüche geschaffen haben. Immerhin haben sich die diagnostischen Methoden, die Computerunterstützung und die Möglichkeiten zur rechnerischen Modellierung in den vergangenen 15 Jahren dramatisch verbessert, wie die Ebolakrise zeigte:

Die viralen Genome einiger der allerersten Patienten wurden binnen Wochen vollständig sequenziert und analysiert, was noch vor fünf Jahren unmöglich gewesen wäre.

Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Artikels scheint der Ausbruch weitgehend unter Kontrolle. Am 7. November 2015 hat die WHO die Epidemie in Sierra Leone für beendet erklärt, nachdem mehr als 42 Tage lang kein neuer Fall mehr aufgetreten war. Das entspricht dem Doppelten der maximalen Inkubationszeit des Virus, die meist mit 2 bis 21 Tagen angegeben wird. In Liberia galt die Seuche seit dem 3. September 2015 als überwunden, das Land meldete allerdings im November neue Erkrankungen. Für Guinea wurden im Oktober und November 2015 nur noch vereinzelt Infektionen dokumentiert. Weitere Staaten, in denen die Krankheit auftrat, verzeichneten schon seit Ende 2014 keine Neuerkrankungen mehr. Die Welt atmet auf – erleichtert, dass sich die düsteren Prognosen von Millionen Ebolafällen nicht bewahrheitet haben. Schon wendet sich die Aufmerksamkeit anderen Krisenherden zu. Die afrikanischen Länder, in denen die Seuche tobte, machen sich an den gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Wiederaufbau. Doch das Ebolavirus ist nicht verschwunden: Es lauert weiterhin in Wildtierpopulationen und vielleicht auch in der Sperma- und Augenflüssigkeit von Menschen, die die Infektion überlebt haben.

Der aktuelle Ebolaausbruch lehrt, dass sich Epidemien um politische Grenzen ebenso wenig scheren wie um ethnische. Auch Entfernung spielen kaum noch eine Rolle: Erreger können sich binnen Tagen rund um den Globus verteilen. Aufkommende Epidemien müssen also früher erkannt und rascher eingedämmt werden. Vor allem aber müssen wir uns darüber klar werden, dass Infektionswellen nicht einfach medizinische Krisen darstellen, sondern in großem Maß ökologisch bedingt sind. Öffentliche Gesundheit und Umweltpolitik sind untrennbar miteinander verbunden. ≈

DER AUTOR



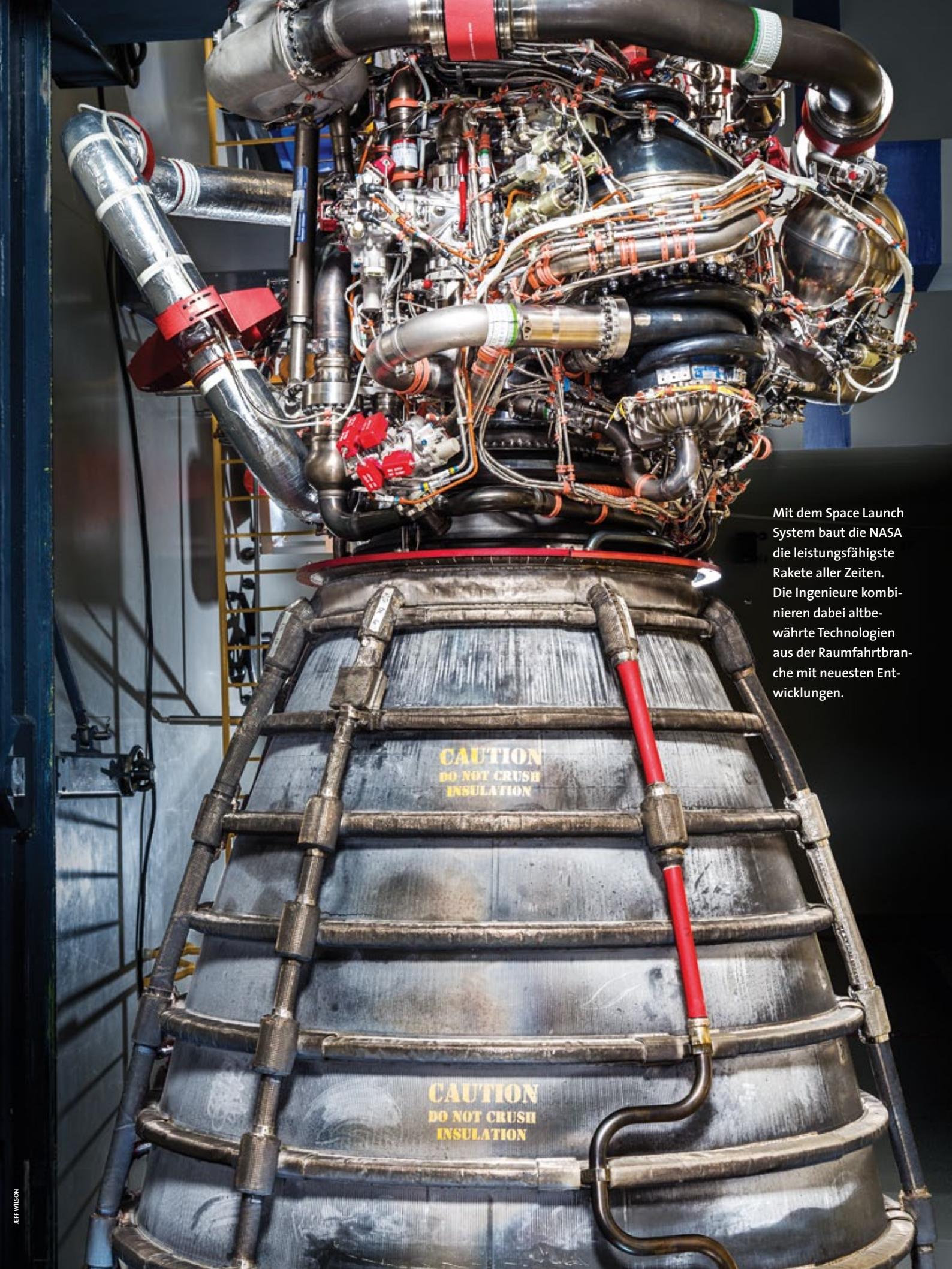
Robert L. Dorit ist Professor am Institut für Biologische Wissenschaften des Smith College (Northampton, USA). Er forscht über die Evolution von Molekülen und Bakterien und arbeitet an der Entwicklung neuer Antibiotika mit.

QUELLEN

- Karesh, W. B. et al.:** Ecology of Zoonoses: Natural and Unnatural Histories. In: *The Lancet* 380, S. 1936–1945, 2012
- Liu, J.:** Finish the Fight against Ebola. In: *Nature* 524, S. 27–29, 2015
- Mari Saez, A. et al.:** Investigating the Zoonotic Origin of the West African Ebola Epidemic. In: *EMBO Molecular Medicine* 7, S. 17–23, 2015
- Morse, S. S. et al.:** Prediction and Prevention of the Next Pandemic Zoonosis. In: *The Lancet* 380, S. 1956–1965, 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1378773

© American Scientist



Mit dem Space Launch System baut die NASA die leistungsfähigste Rakete aller Zeiten. Die Ingenieure kombinieren dabei altbewährte Technologien aus der Raumfahrtbranche mit neuesten Entwicklungen.

CAUTION
DO NOT CRUSH
INSULATION

CAUTION
DO NOT CRUSH
INSULATION

RAUMFAHRT

Geburt einer Marsrakete

Mit dem Space Launch System will die NASA Menschen zum Mars schicken. Ob es einmal so weit kommen wird, hängt nicht zuletzt von der Politik ab. Die technischen Entwicklungen des Projekts verliefen bisher viel versprechend.

Von David H. Freedman

Derzeit entsteht bei der NASA das größte, ambitionierteste Raketenprojekt, das es je gab: das Space Launch System, kurz SLS. Damit hofft die amerikanische Weltraumagentur nicht nur, einmal Astronauten von Cape Canaveral auf die etwa ein Jahr dauernde Reise zum Mars zu schicken. Die Raketen sollen außerdem Wohnmodule, Fahrzeuge und Proviant zum Roten Planeten schaffen – also alles, was die Astronauten benötigen, um dort einige Wochen zu leben und zu arbeiten. Eine solche Mission wird zwar nach der aktuellen Planung erst in etwa 25 Jahren stattfinden. Doch bis dahin könnte das SLS Menschen zum Mond und zu einem Asteroiden transportieren sowie eine unbemannte Sonde zum Jupitermond Europa auf den Weg bringen, um dort nach Leben zu suchen. Das SLS soll den Grundstein für ein bahnbrechendes interplanetarisches Raumfahrtprogramm legen.

Die Ära nach dem Space Shuttle

Nach dem Erfolg des Apollo-Programms in den 1960er und 1970er Jahren, sollte das Space Shuttle den erdnahen Welt- raum relativ kostengünstig und auf einer regelmäßig nutzbaren Basis zugänglich machen. Doch stattdessen kostete jeder Flug mit der Raumschiff eine Milliarde Dollar, es gab nur wenige Flüge pro Jahr und zweimal kam es zu tödlichen Katastrophen. 2004, also ein Jahr, nachdem die Raumschiff Columbia beim Wiedereintritt in die Atmosphäre auseinandergebrochen und dabei die siebenköpfige Besatzung ums Leben gekommen war, beauftragte Präsident George W. Bush die NASA damit, das Space Shuttle durch ein Apollo-ähnliches Programm zu ersetzen. Es sollte den Menschen zurück zum Mond und vielleicht sogar zum Mars bringen. Daraus entstand das Projekt »Constellation«, aus dem die Entwürfe für zwei neue, »Ares« genannte Raketen hervorgingen: eine zweistufige für den Start bemannter Kapseln, die dem Saturn-V-Modell ähnelte, und eine größere, dreistufige Version für den Frachttransport. Doch 2011, nachdem das Programm bereits neun Milliarden Dollar verschlungen hatte, bestand das Ergebnis lediglich in der durch den Rüstungs- und Technologiekonzern Lockheed Martin produzierten Crew-Kapsel Orion, sowie einer einziges Mal getesteten Rakete. Daraufhin strich Präsident Barack Obama das Projekt und wies

die NASA an, sich auf eine Mission zu einem Asteroiden zu konzentrieren. Um Astronauten und Fracht zur Internationalen Raumstation ISS zu befördern, sollte sich die Raumfahrtbehörde künftig an Privatunternehmen wenden.

Doch viele Kongressabgeordnete forderten weiterhin die Entwicklung einer großen Trägerrakete, die Menschen sowohl zum Mond als auch zum Mars bringen könnte. Der Kompromiss ist das Space Launch System, kurz SLS. Es wird aus einer einzigen großen Rakete sowohl für Crews als auch für Frachtgut bestehen, die größtenteils auf die neuen, für Ares geplanten Technologien verzichtet und stattdessen auf Raketenmotoren und Tanks des Shuttle-Systems zurückgreifen soll. Das SLS ist gewissermaßen eine Sparversion der Ares.

Von Anfang an bestand der Verdacht, der Kongress treibe das SLS lediglich voran, um Jobs bei der NASA und ihren Zulieferbetrieben zu sichern. Es sei die erste Rakete, die nicht von Wissenschaftlern und Ingenieuren, sondern von Politikern entworfen wurde, schrieb der »Economist« im Dezember 2014 spöttisch – einige Kritiker übersetzen SLS mit »Senate Launch System«. Tatsächlich waren Senatoren aus den südlichen Bundesstaaten, in denen große Einrichtungen der NASA und ihrer Zulieferer ihren Sitz haben, die lautesten Unterstützer des SLS.

AUF EINEN BLICK

ZWISCHEN POLITIK UND FORSCHUNG

1 Nach der Streichung des **Constellation-Programms**, dem ursprünglichen Nachfolger der NASA für die Spaceshuttle, entschieden sich die USA, den Zugang zu erdnahen Umlaufbahnen in die Hände privatwirtschaftlicher Unternehmen zu legen. Die NASA sollte dagegen ein Raketen- system für den interplanetaren Raum entwickeln – das **Space Launch System (SLS)**.

2 Basierend auf **Komponenten der Shuttles** und enthusiastisch von Politikern unterstützt, deren Wahlbezirke davon profitierten, wurde das SLS zunächst als »Rakete ins Nirgendwo« etikettiert – ein **Jobprogramm** des Kongresses ohne Missionsziel und mit geringer Aussicht, wirklich eines Tages zu fliegen.

3 Doch bislang verläuft die Entwicklung des SLS im Rahmen des Zeitplans und des Budgets. Die **Missionsplanung** hat begonnen, ein **erster Flug** ist für 2018 vorgesehen. Vielleicht bringt die Rakete ins Nirgendwo doch eines Tages **Menschen zum Mars**.

Das SLS soll zunächst eine Kernstufe aus vier Space-shuttlemotoren vom Typ RS 25 besitzen, die flüssigen Wasserstoff und Sauerstoff als Treibstoff verwenden. Außen an dieser Kernstufe sind zwei Feststoff-Booster angebracht, die beim Start zusätzlichen Schub liefern. Eine zweite Stufe soll in einer Höhe von 50 Kilometern zünden und das Raumfahrzeug in die Umlaufbahn bringen. An der Spitze der Rakete wird sich die bemannte Orionkapsel befinden. Mit einer Länge von 98 Metern ist das Gesamtsystem etwas kleiner als die Saturn V, dafür besitzt es aber mehr Schubkraft. Die Rakete kann die dreifache Nutzlast der alten Shuttleraumfahrten in den Orbit transportieren. Allerdings lässt sich keine ihrer Komponenten mehrfach verwenden. Im kommenden Jahrzehnt sollen dann Varianten mit stärkeren Raketenmotoren und Boostern entwickelt werden. Das Marsmodell des SLS soll außerdem eine stärkere zweite Stufe erhalten und damit insgesamt über eine doppelt so hohe Schubkraft verfügen wie die ursprüngliche Version.

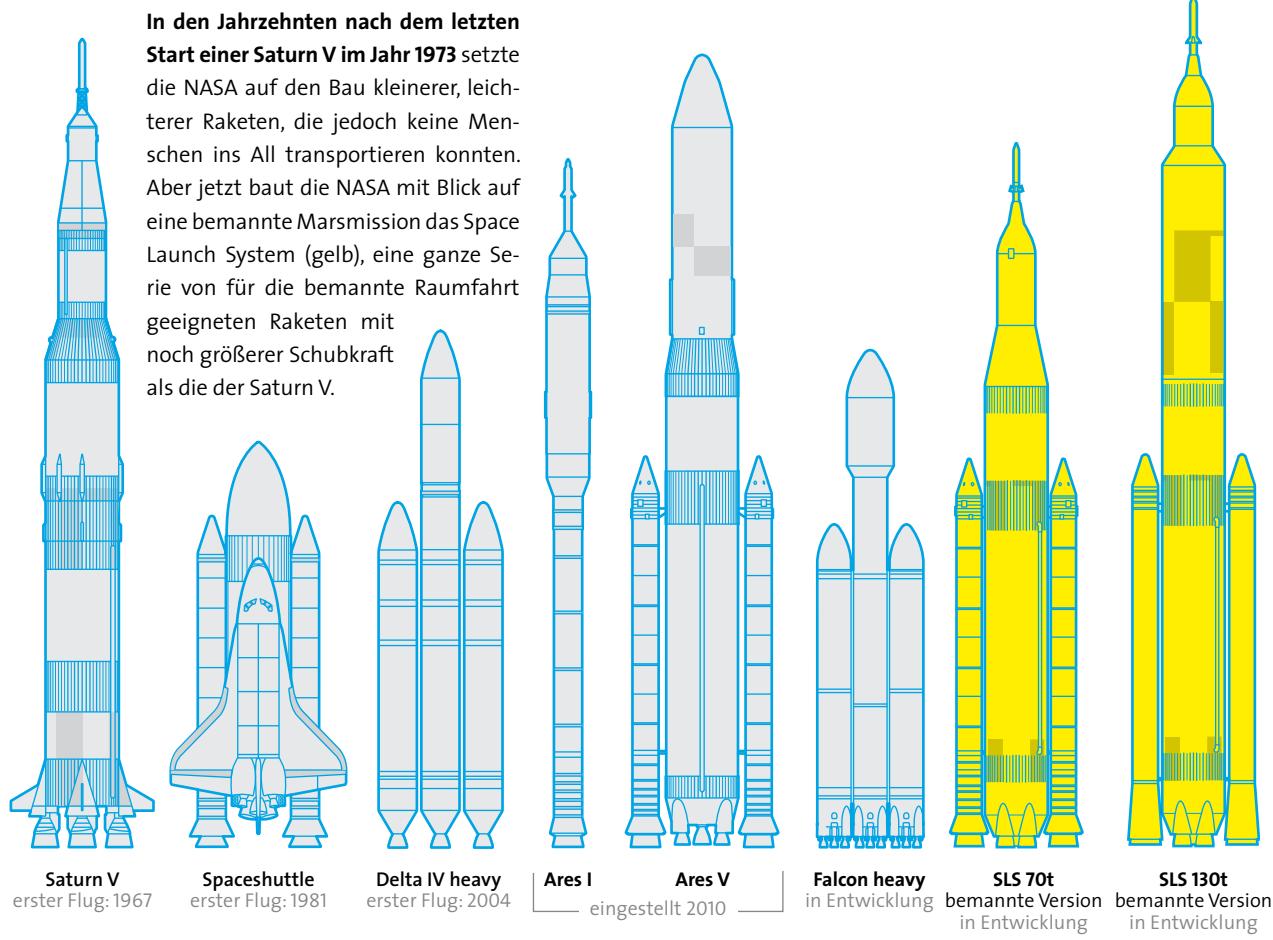
Kritiker bemängeln, mit der Forderung, Shuttlekomponenten zu verwenden, habe der Kongress lediglich den Profit der am Bau der Raumfahrt beteiligten Unternehmen gesichert. »Boeing macht einmal mehr einen Reibach damit«,

sagt Peter Wilson, Analytiker des Beratungsunternehmens RAND Corporation. Andere behaupten, Shuttlekomponenten zu recyceln mache das SLS zu einer problembeladenen »Frankensteinrakete«, die aus Teilen eines toten Programms zusammengestückelt ist. Beispielsweise haben die Shuttle-Booster bereits zu einem Problem mit Lücken in der Hitzeisolierung geführt.

Explodierende Kosten?

Außerdem variieren die Schätzungen für die endgültigen Kosten des SLS gewaltig. Nach offiziellen Aussagen der NASA werde das SLS bis zum ersten Start 18 Milliarden Dollar kosten: 10 Milliarden Dollar für die Rakete, 6 Milliarden für die Orionkapsel und 2 Milliarden, um Cape Canaveral für SLS-Starts umzurüsten. Doch eine interne Untersuchung, von der einige Details durchgesickert sind, summiert die Kosten des SLS innerhalb der kommenden zehn Jahre auf 60 Milliarden Dollar. Andere Schätzungen gehen von einer Billion Dollar für eine bemannte Mission zum Mars aus. Das offizielle Ziel der NASA sind 500 Millionen Dollar pro Start – doch unabhängige Schätzungen gehen von 14 Milliarden Dollar aus, wenn man die Gesamtkosten des Programms berücksichtigt.

Einstige und künftige Großraketen





Bereits 2016 wollen die Ingenieure am Stennis Space Center der NASA in Mississippi die 60 Meter hohe zentrale Raketenstufe des neuen Space Launch Systems testen.

JEFF WILSON

Die Kritiker beharren deshalb darauf, dass – bei allem Enthusiasmus für die Weltraumforschung – weder Regierung noch Öffentlichkeit bereit sein werden, hunderte Milliarden Dollar für die größten Missionen des SLS aufzubringen. Mehrere Untersuchungen, darunter eine interne Studie der NASA, legen nahe, dass wir auch ohne eine Großrakete in den interplanetarischen Raum oder zum Mars gelangen könnten. Es dürfte kostengünstiger sein, so argumentieren manche, auf kleinere Raketen ähnlich der Delta IV zurückzugreifen, die seit Jahrzehnten Satelliten ins All befördert. Damit ließen sich Treibstoff sowie sämtliche Komponenten und Materialien, die für ein interplanetarisches Raumschiff nötig sind, in eine niedrige Erdumlaufbahn schaffen und dort zusammenbauen. Und sollte sich herausstellen, dass wir doch eine Großrakete brauchen, so sagen viele: Warum wenden wir uns dann nicht an die aufstrebende private Raumfahrtindustrie? Space X etwa, das von der Silicon-Valley-Ikone Elon Musk gegründete Unternehmen, steht bereits für Versorgungsflüge zur ISS mit der hoch geschätzten Falcon-9-Rakete bei der NASA unter Vertrag. »Die NASA sollte der Privatindustrie sagen, welche Art von Nutzlasten sie in den interplanetarischen Raum befördern will, einen festen Geldbetrag für den Job anbieten und Unternehmen wie Space X den Bau überlassen«, sagt James Pura, Präsident der Space Frontier Foundation, einem Interessenverband zur Förderung der Weltraumforschung.

Space X entwickelt ebenfalls eine Großrakete der SLS-Klasse mit 27 Motoren. Außerdem arbeitet das Unternehmen an neuen, schubstärkeren Raketenmotoren. Sollte dieses Projekt erfolgreich sein, wird es selbst die größten Versionen des SLS übertreffen. Zudem sind bei Space X im Gegensatz zum SLS alle Komponenten wiederverwendbar.

Trotz all dieser Einwände schreitet die Planung der SLS-Mission voran. 2018 soll eine erste Rakete eine unbemannte Orionkapsel weit über den Mond hinaus ins All befördern. Voraussichtlich ein paar Jahre später soll ein zweiter Flug Astronauten weiter von der Erde fortbringen als jemals zuvor. Was danach geschieht, hängt letztlich vom Kongress und dem dann amtierenden Präsidenten ab. Die vorläufige Planung sieht einen bemannten Flug zu einem Asteroiden Mitte der 2020er Jahre vor sowie eine bemannte Mission zum Mars in den 2030ern.

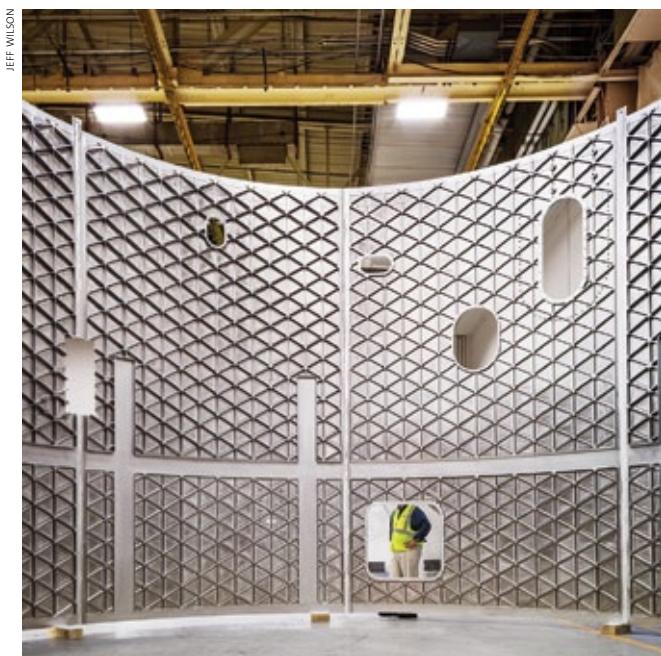
Die Raketenfabrik

Am Stennis Space Center testet die NASA ihre größten Raketenmotoren aller Zeiten. Es liegt in einer hügeligen Region ganz im Süden von Mississippi, eingebettet in ein Netz aus Seen, Flüssen, sumpfigen Flussarmen und Kanälen. Während wir uns mit Helmen und Sicherheitswesten einkleiden, erläutert Tom Byrd, der stellvertretende NASA-Manager vor Ort, die Nähe des Zentrums zum Wasser: Die Aktivitäten am Stennis Center erfordern unter anderem Zugang zu großen Lastkähnen und zur Möglichkeit, große Metallmassen zu kühlen, die Temperaturen nahe jenen an der Sonnenoberfläche ausgesetzt waren.

Auf unserem Weg durch die Anlage kommen wir an einem Kontrollraum vorüber, der in ein sowjetisches Kraftwerk der 1950er Jahre passen würde: überwiegend Dampfdruckanzeigen und große, unformige Einstellscheiben. Ich frage Byrd, warum sie nicht gegen moderne, digitale Einrichtungen ausgetauscht werden. Die Antwort: Wegen unzähliger Störungen, deren Ursachen lange unergründlich schienen, hat es Jahrzehnte gedauert, die Maschinen zum Laufen zu bringen – warum also daran herumspielen?

Dennoch wird am Stennis Center kräftig modernisiert. Man baut Kanäle und Straßen aus, um größere Transporte verkräften zu können, und verstärkt auch die Prüfstände selbst. Denn das SLS wird sie größeren Belastungen aussetzen als alle früheren Raketen. »Die hier auftretenden Kräfte sind größer als bei einem echten Start, weil die Rakete ihrem eigenen Schub nicht entkommen kann«, erläutert Byrd, der die Tests mit leitet. Während eines etwa neun Minuten dauernden Testlaufs schießen mehrere tausend Düsen mit hohem Druck Wasser auf die Wandungen des Prüfstands – und zwar nicht um diesen zu kühlen, sondern um die starken Vibrationen zu dämpfen, die den Stand sonst zerreißen würden. Bereits vor dem SLS-Programm durften im Umkreis von 16 Kilometern keinerlei private Gebäude errichtet werden, da sie allein durch die Schallwellen der Tests zusammenbrechen könnten. Und die SLS-Motoren produzieren den gewaltigsten Schub, der je auf der Erde erzeugt wurde.

Auf der anderen Seite der Grenze zwischen Mississippi und Louisiana, ein paar Stunden Fahrt auf dem Kanal oder 45 Minuten per Auto entfernt, befindet sich die Michoud Facility. Im Gegensatz zur isolierten Lage von Stennis ist Michoud in ein Industriegebiet in den Außenbezirken von New Orleans eingebettet. In mancher Hinsicht handelt es sich um eine Fabrik wie jede andere, ausgestattet mit Schweißereien, Gabelstaplern, Kränen und Materiallagern, allerdings alles in einem viel größeren Maßstab und in ihrem Inneren in jedem



Die Außenhülle der zentralen Raketenstufe besteht aus acht aufeinander gesteckten, tonnenförmigen Segmenten. Die Tanks für flüssigen Wasserstoff und Sauerstoff befinden sich innerhalb dieses Aluminiumzylinders. An der Michoud Assembly Facility der NASA testen die Ingenieure gegenwärtig die einzelnen Komponenten.

Fall überwältigend. Fortlaufend füllt sich der Komplex mit neuer Ausrüstung: Aufragende Roboterarme bewegen sich mit rasanter Geschwindigkeit, fahrbare Plattformen und kranartige Stapler heben zig Tonnen wiegende Komponenten von einer Station zur nächsten. Ein Lagerhaltungssystem stellt sicher, dass beim Bau einer aus vielen hunderttausend Teilen bestehenden Maschine jede Komponente zur rechten Zeit am rechten Ort platziert wird. Der Bau einer Maschine, die so leistungsfähig ist wie der SLS-Raketenmotor, erfordert extrem geringe Toleranzen bei der Fertigung. »Wenn unser Bauteilverfolgungssystem feststellt, dass nur eine dieser kleinen Unterlegscheiben übrig ist, wird die ganze Produktion angehalten, bis wir die Stelle finden, wo sie fehlt«, sagt Patrick Whipps, einer das NASA-Manager am Michoud.

Altbewährtes wird mit neuester Technologie kombiniert

Viele der Komponenten für die neue Rakete stammen ursprünglich von anderen Raumfahrzeugen. »Wir bemühen uns, so viele Dinge wie möglich von anderen Raketen zu verwenden, seien es Druckmessumformer, Temperatursensoren oder Armaturen«, sagt William Gerstenmaier, der das bemannte Raumfahrtprogramm der NASA leitet. »Wir wollen möglichst wenige Komponenten haben, die ausschließlich für das SLS bestimmt sind.«

Allerdings, so ergänzt Whipps, machen neue Herstellungsverfahren die Produktion der SLS-Komponenten sehr viel billiger als es etwa beim Shuttle der Fall war. Zu den Verbesserungen gehört ein Rührreibschweiß-Zentrum von der Größe eines städtischen Wassertanks. Riesige Raketenteile aus Aluminiumlegierung können darin miteinander verschweißt werden. Es ist die größte Maschine dieser Art auf der ganzen Welt.

Das SLS übertrifft die Technologie der Shuttles auch in vielen anderen Bereichen. Um die Belastung durch Flattern und andere aerodynamische Instabilitäten während des Aufstiegs durch die Atmosphäre zu analysieren, verwendet die NASA moderne Simulationssoftware aus dem Bereich der Flüssigkeitsdynamik. Ohne diese Programme müssten die Ingenieure wesentlich größere Fehlermargen einbauen, um die Widerstandsfähigkeit der Rakete gegenüber Belastungen sicherzustellen. Mit neuer Luftfahrtelektronik und digitalen Steuergeräten, deren Computerchips jenen der Space-shuttles weit überlegen sind, werden sich Flug und Motoren so steuern lassen, dass sie um ein Vielfaches schneller auf plötzliche Veränderungen und gefährliche Situationen reagieren.

Für die ersten vier Flüge des SLS finden noch übrig gebliebene Shuttlemotoren Verwendung. Doch in den 2020er Jahren werden dann neue Versionen notwendig. Dazu werden die vielen tausend münzgroßen Turbinenschaufeln aus Metallpulver per Laser geschweißt und dabei direkt in die passende Form gebracht, anstatt sie einzeln nach herkömmlichen maschinellen Verfahren zu fertigen. Damit reduziert sich die bisherige Produktionszeit für die Turbinenschaufeln

eines Motors von einem Jahr auf einen Monat. »Wir setzen überall Computersteuerungen ein, um Arbeitskosten zu senken und die Genauigkeit zu erhöhen«, ergänzt Gerstenmaier.

Wenn das SLS-Programm einmal richtig in Schwung gekommen ist, sollen mindestens zwei, möglicherweise bis zu vier Raketen pro Jahr starten. In der Welt der Raketen zählt das bereits als Massenproduktion. Doch das Programm

könnte ebenso gut eingestellt werden, wenn es der NASA nicht gelingt, die US-amerikanische Öffentlichkeit von seinem Wert zu überzeugen.

Tatsächlich hat das SLS durchaus viele Befürworter. Zu den Unterstützern zählt die gegenwärtige Führung der NASA ebenso wie deren Belegschaft, eine Anzahl von externen Raumfahrtexperten sowie ein wachsender Teil der Öffentlichkeit. Viele Menschen waren angesichts des fehlerfreien Orbi-



In der hydrostatischen Versuchszelle an der Michoud Assembly Facility (hier leer stehend) werden die Raketentanks auf Lecks geprüft.

talflugs der Orionkapsel im Dezember 2014 begeistert. Und den Experten fällt es leicht, die SLS-Kritiker Punkt für Punkt zu widerlegen.

So zum Beispiel den Vorschlag, mit kleineren Raketen Komponenten und Treibstoff ins All zu bringen und im Orbit zusammenzubauen: Für eine bemannte Marsmission müsste man etwa 500 Tonnen transportieren, so Gerstenmaier. Mit dem SLS bräuchte man dafür vier Starts, selbst mit einer maximal ausgereizten Delta IV jedoch mindestens zwei Dutzend. Und jeder dieser Starts würde das Risiko des Gesamtprogramms ein wenig erhöhen. Eine solche Herangehensweise wäre zudem anfällig für Verzögerungen, die sich im Gesamtverlauf gewaltig anhäufen könnten. »Wir haben viele Starts mit dem Spaceshuttle gebraucht, um die Raumstation zu bauen, das hat letztlich Jahrzehnte gedauert«, sagt Gerstenmaier. Doch sein wichtigstes Argument gegen die Verwendung kleinerer Raketen ist der immense Aufwand an Konstruktionsarbeit im Orbit. Weltraumhabitatem erst im All zusammenzubauen, ist eine entmutigende Aufgabe – zumal es bislang wenig Erfahrung mit derlei Vorhaben gibt. »Es ist unvermeidlich, dass einige der Teile nicht richtig funktionieren werden und es wäre schwierig, sie dort oben zu reparieren. Das macht ein solches Unterfangen sehr komplex und birgt eine Vielzahl an Risiken«, erläutert Gerstenmaier.

Kürzere Flugzeiten im interplanetarischen Raum

Das SLS dagegen erlaubt es, auch größere und unförmigere Teile bis zu einer Größe von zehn Metern zu transportieren, wie beispielsweise Antennenanlagen und Sonnenkollektoren, die sonst aufwändig gefaltet werden müssten und damit anfälliger für Beschädigungen und Fehlfunktionen wären. Ein weiterer großer Vorteil ist die immense Schubkraft des SLS, die eine höhere Reisegeschwindigkeit für den Flug zu interplanetarischen Zielen ermöglicht. Das ist ein entscheidender Gesichtspunkt für bemannte Reisen zum Mars, denn hierbei setzen Strahlenbelastung und notwendige Proviantmenge der Missionsdauer enge Grenzen. Aber auch robotische Missionen zu fernen Zielen profitieren von einem kürzeren Verlauf. Denn für maximalen wissenschaftlichen Nutzen müssen die Daten einer Mission erst vorliegen, bevor die Planung eines Nachfolgeprojekts beginnen kann. Und mit dem SLS ließe sich ein Ziel im interplanetarischen Raum anders als bisher direkt ansteuern. Denn es wären keine komplexen, zeitaufwändigen Flugmanöver wie bei Voyager oder Galileo mehr notwendig, die die Schwerkraft anderer Himmelskörper zur Beschleunigung nutzten.

»Mit dem SLS verkürzt sich die Flugzeit zum Jupitermond Europa von mindestens sechs auf zweieinhalb Jahre«, sagt Scott Hubbard, Professor für Luft- und Raumfahrt an der Stanford University. Hinzu kommen größere Nutzlasten und mehr Flexibilität bei der Verpackung für den Transport – alles zusammengenommen gewichtige Argumente für eine neue Großrakete. Kein Wunder also, dass China und Russland ebenfalls an SLS-ähnlichen Projekten arbeiten.

Und deshalb eben auch Space X. Dennoch stellt der private Raumfahrtsektor anders als bei Flügen zur ISS keine selbstverständliche Ressource für interplanetarische Missionen dar. Denn es existiert kein Markt dafür, und es ist auch keiner in Sicht, abgesehen von einer Hand voll Missionen, die die NASA vorläufig für das SLS vorgesehen hat. Das macht es für Space X unmöglich, die Kosten für eine neue Großrakete per Mischkalkulation auf viele Kunden zu verteilen, wie es bei den kleineren Raketen funktioniert. Dieses Vorteils beraubt steht Space X in dieser Sache nicht besser da als Boeing, Lockheed Martin oder andere konventionelle Raumfahrtunternehmen. »Das sind alles sehr fähige Vertragspartner, und ich sehe da keinen dramatischen Unterschied zu Space X«, sagt der frühere NASA-Astronaut Scott Parazynski, ein Veteran mit fünf Shuttleflügen, der jetzt an der Arizona State University tätig ist.

Sich an Bewährtes zu halten statt auf Innovation zu setzen, mag in der Automobilbranche und auf dem Handy- oder Softwaremarkt ein schlechtes Rezept sein. Doch wenn es darum geht, Menschen an der Spitze einer kaum kontrollierten Explosion ins Weltall zu katapultieren, ist ein gewisses Maß an vorsichtigem Konservatismus nicht die schlechteste Idee. Space X erlebte bei seinen ersten Raketen mehrere Explosio-

nen und erlitt Kontrollverluste – nichts anderes ist bei derartigen Neuentwicklungen zu erwarten. Im Oktober 2014 kam

ein Pilot beim Absturz eines Testflugs mit einem Raumflugzeug ums Leben, mit dem Virgin Galactic einmal Touristen

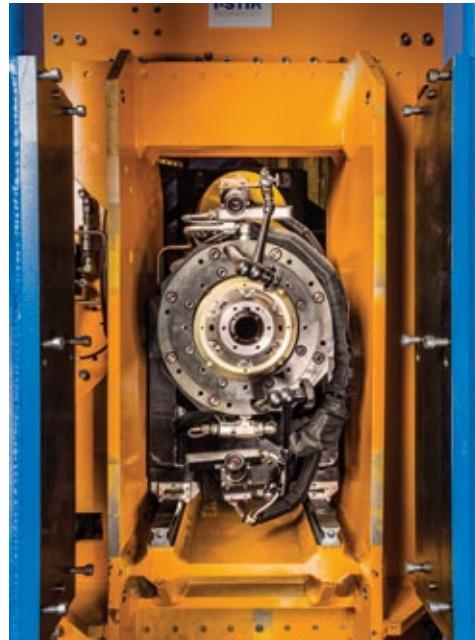
in den suborbitalen Weltraum bringen will. Drei Tage zuvor

war eine unbemannte Rakete von Orbital Sciences explodiert, die zur ISS fliegen sollte.

Solche Unglücksfälle erinnern uns daran, dass Raumfahrt trotz jahrzehntelanger Erfahrungen immer noch ein riskantes Unterfangen ist – die Möglichkeit einer Katastrophe ist stets inbegriffen. Nicht zuletzt deshalb hat sich die Führung einer privaten Organisation zur Förderung einer bemannten Mission zum Mars namens Inspiration Mars Foundation nach anfänglicher Skepsis in die Reihe der SLS-Unterstützer eingereiht. Auch andere Marsexperten folgen dieser Sicht-



An der Michoud Assembly Facility nutzen Arbeiter ein spezielles Werkzeug (linkes Bild), um die Ringe zu fertigen, die dann die Segmente der Außenhülle der SLS-Rakete verbinden. Im Bild rechts haben Arbeiter eine Aluminiumpaneele auf das Werkzeug, mit dem sie die Haube der Raketenstufe herstellen.



JEFF WILSON

weise. »Das SLS wurde von Anfang an als Rakete ins Nirgendwo diskreditiert«, sagt Hubbard, »doch es hat nun klare, vertretbare Ziele.« Seiner Ansicht nach sollten jetzt alle mit anpacken, damit das ambitionierte Vorhaben tatsächlich Realität wird.

Panne mit Klebstoff behoben

In einer kalten Nacht im Januar 2015 verwandelte sich einer der Prüfstände am Stennis Space Center für 200 Sekunden in einen Feuerball. Es war der erste Test eines Shuttlemotors RS-25 seit 2009 – und er verlief perfekt. Wenn die Versuchsläufe weiterhin erfolgreich sind, könnte die Zeit für das SLS arbeiten. Je länger das Programm fortgeführt wird, desto mehr kann es sich bewähren, vorausgesetzt es bleibt im Zeitplan und im finanziellen Rahmen. In den ersten drei Jahren hat es rasche Fortschritte gemacht, hielt Konstruktionsüberprüfungen stand und erreichte die ersten Herstellungsstufen. Das ist unglaublich schnell für eine neue, für bemannte Flüge zugelassene Rakete. Es gab nur wenige Pannen – die erwähnten Lücken in der Isolierung gehörten zu den gravierendsten davon. Und dieses Problem ließ sich rasch mit einer zusätzlichen Schicht Klebstoff lösen.

Noch ist völlig unklar, was in den kommenden Jahren geschehen wird unter einem neuen Präsidenten und mit einem neuen Kongress, gesteht Raumfahrtexpertin Joan Johnson-Freese vom U.S. Naval College. Vielleicht setzt sich in der Regierung die Überzeugung durch, den Blick anstatt auf den fernen Mars auf ein näheres Ziel zu richten. »Manch einer in Washington zeigt eine unglaubliche Nostalgie für den Mond«, so Johnson-Freese. Andere wiederum denken, die NASA sollte sowohl den Mars als auch den Mond vergessen und sich stattdessen den Asteroiden zuwenden. Nicht nur könnten diese Himmelskörper wichtige Fragen zum Ursprung des Sonnensystems beantworten, wir würden dabei

auch lernen, wie sich ein Asteroid ablenken oder zerstören ließe, falls solch ein Objekt einmal Kurs auf die Erde nimmt.

Doch die Faszination für den Mars ist weit verbreitet und hat in letzter Zeit sogar zugenommen. Denn mehr und mehr Menschen begreifen, dass der Rote Planet noch innerhalb ihres Lebens erreichbar wäre. »Wir wollen alle einen Flug dorthin sehen«, sagt Parazyński, »andere Missionen wären nur eine Ablenkung.« Sein Zögern in Bezug auf das SLS begründet er mit der Furcht, das Projekt könnte aufgegeben werden, weil es nicht billig und schnell genug realisierbar ist, nicht aber weil er es für ein schlechtes System für die Reise zum Mars hält.

Momentan sind keine unüberwindbaren Hindernisse für das SLS in Sicht, was sich von keinem anderen Vorschlag für eine Marsmission sagen lässt. Das könnte bereits ausreichen, das Projekt auf Kurs zu halten. Es wurde zwar auf der Basis von Kongressinteressen zusammengeschustert, und ihm fehlt der innovative Schwung alternativer Ansätze. Aber alle Anzeichen deuten darauf hin, dass es wie geplant funktioniert – und seine Finanzierung ist für die absehbare Zukunft gesichert. Das könnte aus dem SLS die Rakete machen, die uns zum Mars bringt. Und wenn das geschieht, wird alle frühere Kritik vergessen sein. ~

DER AUTOR



David H. Freedman ist freiberuflicher Redakteur bei der Zeitschrift »The Atlantic« und Buchautor.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1378785

1916

Luftschiffe hören

»Flugzeuge und Luftschiffe sind zwar unter Umständen unsichtbar, aber geräuschlos sind sie nie. Das Surren der

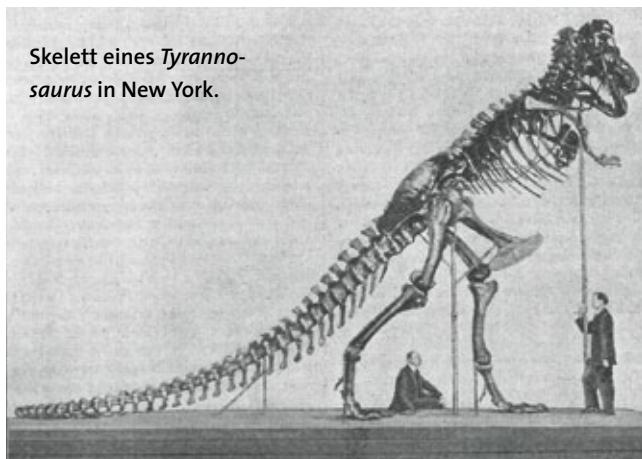
Propeller kann durch geeignete Vorrichtungen verstärkt werden, so daß sich die Gegenwart eines Luftschiffs zu einer Zeit verrät, zu der das unbewaffnete Ohr noch nichts wahrnimmt. Diese Einrichtungen werden in Frankreich so weit ausgearbeitet, daß es gelingt, Abwehrkanonen zu richten. Diese ›Horchstationen‹ be-

stehen aus vier mächtigen Hörrohren, die nach allen Himmelsrichtungen und jedem Winkel zu dem Erdbo den drehbar sind. Die Hörrohre nehmen den geringsten Laut auf, welcher dann durch Mikrophone verstärkt wird.« Die Umschau 1, 1916, S. 7–9

Eine Horchstation im Einsatz.



Skelett eines *Tyrannosaurus* in New York.



Riesiger Fleischfresser

»Im American Museum of Natural History ist das Skelett des größten Fleischfressers, der bisher bekannt ist, aufgestellt worden, ein Tyrannosaurier von 16 m Länge und aufgerichtet 6 m Höhe. Der massive Kopf ist ausgerüstet mit 13 dolchartigen Zähnen in jedem Kiefer, die immer von neuem nachwachsen, sobald einer abbrach; der größte ist etwa 12 cm lang. Der Tyrannosaurus war imstande, den Kampf mit jedem Tier seiner Zeit aufzunehmen, und war offenbar der Herr seiner Art. Die Fundstelle der Skelette ist in Montana, wo durch Zufall bei der Jagd mehrere große Knochen gefunden wurden. Eine Expedition brachte das erste derartige Skelett zutage. Es mußte mit Dynamit aus hartem Sandstein gesprengt werden.« Prometheus 1370, 1916, S. 287

Die Zirbel im neuen Licht

»Das Fehlen von Lichtreizen von der Netzhaut hat Störungen im Wasserhaushalt und im Kohlenhydratstoffwechsel zur Folge, und dies ist nach Professor Dr. F. Hollwich von der Universitäts-

Augenklinik in Münster und Dr. J. Fuchs, dem Direktor der Städtischen Augenklinik in Stuttgart, die Ursache für die Wohlbeleibtheit der Blinden. Die verhältnismäßig junge Wissenschaft der Photo-Neuro-Endokrinologie hat die an der Gehirnbasis gele-

gene Zirbeldrüse in ihre Untersuchungen einbezogen. Daß die Zirbel eine hemmende Wirkung auf die Funktion der Keimdrüsen ausübt, ist seit langem vermutet worden. Daß aber diese Wirkung der Zirbel als ›Keuschheits-Organ‹ vom

1966

Licht über die Netzhaut der Augen gesteuert wird, ist eine völlig neue Erkenntnis.« Kosmos 1, 1966, S. 36–37

Ausgeblinkt

»Bei verschiedenen Arten von Leuchtkäfern tragen die beiden Geschlechter an der Spitze des Hinterleibs lichtproduzierende Organe, die unter anderem zur Kommunikation dienen. Gelegentlich wurden jedoch Komplikationen festgestellt, und ein Weibchen drang, indem es zu früh oder zu spät geblinkt hatte, in den ›flashlight-code‹ einer anderen Spezies ein, ein Irrtum, für den das Männchen meist mit seinem Leben büßen mußte, denn ein Leuchtkäfer, der kein Bewerber ist, bedeutet für die enttäuschte Auserkorene ein Mahl. Nach neuesten Beobachtungen scheint aber die Signalmethode weniger durch Irrtümer- als durch Täuschungsmanöver bedroht zu sein.« Naturwissenschaftliche Rundschau 1, 1966, S. 30

Stechen und schauen

»Eine optische Sonde zur Direktbeobachtung mikroskopischer Vorgänge in den Körperteilen haben Dr. C. Long und Mitarbeiter an der Western Reserve University Medical School, USA, entwickelt. Das Instrument besteht aus einer starken Injektionsnadel, an deren Innenwand 40 Glasfasern von je 50 µm Durchmesser ($1\mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$) in ringförmiger Anordnung entlanglaufen. Die einzelnen Glasfasern haben die Eigenschaften einer vollverspiegelten Kapillare; zusammen leiten sie das Licht einer kleinen Hochleistungslampe praktisch verlustlos zur Spitze der Nadel und nach dem Einstich auf das Beobachtungsfeld.« Naturwissenschaftliche Rundschau 1, 1966, S. 31

Unsere Neuerscheinungen



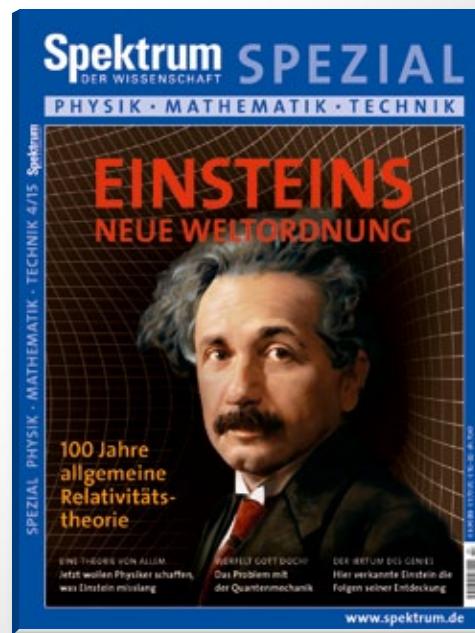
Gründungsmythos: Wie entstand Israel? • David und Salomo – nur ein Mythos? • Der Tempel Salomos • Religionsgeschichte: Jahwes Frau • Judas untergang: Ende mit Schrecken • € 8,90



Irrt euch! Warum Illusionen sinnvoll sind • Bilder im Kopf: Wie Metaphern beflügeln • Wahre Worte: Was Erklärungen sexy macht • Linguistik: Gedacht wie gesprochen • € 8,90



Kooperation: Das Erfolgsrezept des modernen Menschen • Geborene Jäger: Der Mensch als oberstes Raubtier • Archaische DNA: Neandertaler und anderes Erbe • € 8,90



100 Jahre Raumzeit: Der Glanz des Genies • Quantenphysik: Kosmische Würfelspiele • Als die Nazis Einstein zum Feind erklärten • Auf der Suche nach der Theorie von Allem • € 8,90

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!





*Michael Martin
Planet Wüste*
Knesebeck, München 2015
446 S., € 49,95

ERDE

Ein Buch wie ein Film

Der beeindruckende Bildband »Planet Wüste« zeigt die Schönheit der Trocken-, Kalt- und Eiswüsten unseres Planeten.

Es gibt Werke, nach deren Lektüre man am liebsten die Wanderstiefel schnüren, Kamera und Ausrüstung in den Rucksack packen und sich auf die Reise machen möchte. »Planet Wüste« von Michael Martin zählt dazu.

Auf Reisen in 40 Länder hat der Geograf vielfältige Eindrücke gewonnen,

aus denen er das vorliegende Buch destillierte. Dank aufschlussreicher, gut verständlicher Texte und großformatiger Fotos können die Leser daran teilhaben. Die Breitengrade von Nord nach Süd abwandernd, folgt man Martin von der arktischen Eiswüste bis an den Südpol und passiert dabei die Wüsten

der Nord- ebenso wie jene der Südhalbkugel.

Zu Beginn des Werks stellt der Autor die Planeten unseres Sonnensystems vor. So möchte er zeigen, dass auch auf fremden Himmelskörpern wüstenähnliche Bedingungen herrschen, die jenen unserer Heimatwelt vergleichbar sind. Zudem bietet er einen Überblick über die verschiedenen Einöden der Erde und schafft damit eine gute Grundlage, um die anschließenden Beschreibungen einzelner Gebiete einordnen zu können.

Diese Beschreibungen sind überaus gelungen und bestechen vor allem mit beeindruckenden Fotografien. Kurze Texte führen in die jeweils vorgestellten Regionen ein. Übersichtskapitel präsentieren für die Großräume Arktis, Antarktis, Wüsten der Nord- und Südhalbkugel jeweils den Naturraum, die Flora, die Fauna und die menschlichen Bewohner.

Ein abschließendes Kapitel »Wissen« rundet das Buch sehr sinnvoll ab. Darin kommen Experten zu Wort und vermit-



MICHAEL MARTIN AUS MICHAEL MARTIN, PLANET WÜSTE, MIT FOTO © KNSEBECK MÜNCHEN

teln dem Leser wertvolle Informationen etwa zur erdgeschichtlichen Entwicklung der Wüsten, zu Überlebensstrategien von Pflanzen und Tieren oder zur Entdeckungsgeschichte der oft schwer zugänglichen Extremstandorte.

Insgesamt ist »Planet Wüste« ausgesprochen lesenswert. Man wird den Band sicherlich gern immer wieder zur Hand nehmen, um nochmals hineinzuschauen. Als Reiselektüre allerdings, falls man sich doch einmal selbst auf

Expedition begibt, ist das viereinhalb Kilogramm schwere, großformatige Werk nicht geeignet.

Tim Haarmann

Der Rezensent ist Geograf und arbeitet in Bonn.



MEDIZIN

Diagnostik als Detektivarbeit

Ein Experte für seltene Erkrankungen berichtet, wie er verborgenen Leiden auf die Spur kommt.

Medizin kann spannend sein wie ein Krimi. In dem Bemühen um die richtige Diagnose geben oft Hinweise den Ausschlag, die auf den ersten Blick unwichtig wirkten – und so manche zunächst verheißungsvolle Spur stellt sich später als falsch heraus. Jürgen Schäfer behandelt als Leiter des Marburger Zentrums für unerkannte und seltene Erkrankungen (ZusE) Patienten, die oft jahrelang unter scheinbar unerklärlichen Symptomen gelitten haben. Lebensnah beschreibt er in seinem Buch deren Fallgeschichten, streut geschickt Hinweise auf die Art ihrer Beeinträchtigung ein und berichtet schließlich, wie er den Patienten half.

Wer nicht schon im Inhaltsverzeichnis gelesen hat, um welche Krankheit es sich handelt, kann auf Basis der ausführlich geschilderten Patientengeschichten mitratzen, woran die jeweilige Person leidet. Ist die dürre, junge Frau tatsächlich magersüchtig? Warum schlafst der umtriebige Bankenchef auf wichtigen Sitzungen plötzlich ein? Und woher stammen die unerträglichen Bauchschmerzen des Kfz-Mechanikers?

Medizinstudenten und Ärzte dürfen hier ihre Kombinationsfähigkeit testen. Doch auch für Laien, die noch nie von den entsprechenden Krankheiten gehört haben, ist das Buch spannend und lehrreich.

Die Medien betitelten den Autor als »deutschen Dr. House«, und immer mehr Patienten suchten seinen Rat

In reich ausgeschmückten Szenen beschreibt Schäfer die Lebensverhältnisse der Patienten und schildert ihre Symptome. Zwischen diese erzählerischen Passagen baut er immer wieder erklärende Abschnitte ein, in denen er sich mal der ärztlichen Tätigkeit im Allgemeinen widmet, mal Hintergrundinformationen zum jeweiligen Krankheitsbild liefert. Sein erklärt Ziel lautet, mit belletristisch-humorvollen Texten auf seltene Krankheiten aufmerksam zu machen und dadurch womöglich dem einen oder anderen Betroffenen zur korrekten Diagnose zu verhelfen.

Die ursprüngliche Idee für das Buch lieferte die US-amerikanische Fernseh-

serie »Dr. House«, in der ein genialer Diagnostiker komplizierte medizinische Fälle löst. Als Medizinprofessor der Universität Marburg bot Schäfer im Jahr 2008 erstmals ein Seminar an, in dem er Fallgeschichten aus der Serie mit seinen Studenten diskutierte. Fortan betitelten ihn die Medien als »deutschen Dr. House«, und immer mehr Patienten suchten seinen Rat. Als Reaktion auf die vielen Anfragen richtete das Universitätsklinikum Gießen-Marburg das Zentrum für unerkannte und seltene Erkrankungen ein.

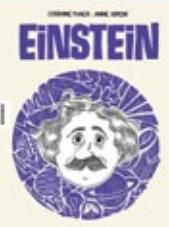
Anders als sein verschobenes Fernsehvorbild betont Schäfer immer wieder, wie wertvoll das Gespräch mit den Patienten ist. In seinen Fallgeschichten spielen zwar die moderne Labordiagnostik und bildgebende Verfahren eine Rolle, doch den entscheidenden Hinweis liefern meist die Betroffenen selbst. Das Buch lässt sich somit auch als Appell an andere Ärzte verstehen,

sich Zeit zum Fragen und Zuhören zu nehmen – selbst wenn unser Gesundheitssystem das unzureichend honoriert. Patienten und ihren Angehörigen gibt der Autor Tipps, wie sie sich auf einen Arztbesuch so vorbereiten können, dass keine wichtigen Informationen unter den Tisch fallen.

Insgesamt liefert Schäfer eine gelungene Kombination aus Detektivroman und medizinischem Sachbuch, das für Ärzte, Patienten und alle medizinisch Interessierten äußerst lesenswert ist.

Elena Bernard

Die Rezensentin ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.



Corinne Maier, Anne Simon

Einstein

Aus dem Französischen von Anja Kootz. Knesebeck, München 2015. 64 S., € 19,95

Er war ein Weltstar – so sieht die Psychologin und Historikerin Corinne Maier den Physiker Albert Einstein. Sie schildert seine Biografie als Graphic Novel, also in Form eines Comicromans. Die schlichten, aber ausdrucksstarken Bilder hat Illustratorin Anne Simon gezeichnet. In dem Buch führt Einstein selbst durch sein Leben und offenbart in Anekdoten verschiedene Charaktereigenschaften. Dabei tritt er nicht nur als Genie in Erscheinung, sondern auch als Hippie und Schürzenjäger. Der Physiker ist unter anderem für seine eingängigen Sprüche à la »Gott würfelt nicht« berühmt. Insofern überrascht es nicht, dass die Graphic Novel großteils an eine unterhaltsame Zitatensammlung erinnert. Der Fokus liegt klar auf Einsteins Persönlichkeit, Physikenntnisse benötigt man als Leser nicht. Das amüsante, gekonnt zusammengestellte Werk macht Lust, sich näher mit dem bedeutenden Forscher zu beschäftigen.

TINA SCHLAFLY



Die Flämische Bilderchronik Philipp des Schönen – Ein Bilderbuch der burgundischen Geschichte

Faksimile, Auflage 680 Exemplare, mit 240-seitigem Kommentarband

Quaternio, Luzern 2015. 30 S., € 2980,-

Der Band ist eine Faksimileausgabe der »Flämischen Bilderchronik«, deren Original sich heute in der British Library befindet. Sie war von Karl dem Kühnen (1433–1477) in Auftrag gegeben worden und diente dann der Erziehung seines Enkels Philipp I. von Habsburg (1478–1506). Das Werk besticht durch künstlerisch hochwertige Miniaturen und bietet manche Kuriosität. So stellt es den Vater Kaiser Friedrich Barbarossas ebenfalls als Kaiser dar, obwohl dieser keiner war: Fiktionale Geschichtsschreibung im Dienst der eigenen Sache war im Mittelalter nicht unüblich. Die 15 Blatt umfassende Chronik sollte Philipp die Bedeutung des Hauses Burgund vor Augen führen, und Kaiser Barbarossa war mit Beatrix von Burgund verheiratet. Eine deutsche Übersetzung des altfranzösischen Texts und Kommentare mehrerer Historiker ergänzen den Band. Die Ausgabe richtet sich vor allem an Buchliebhaber und Sammler mit Interesse für mittelalterliche Geschichte.

MARTIN SCHNEIDER



Bruno P. Kremer

Kulturlandschaften lesen – Vielfältige Lebensräume erkennen und verstehen

Haupt, Bern 2015. 224 S., € 29,90

Von der Jungsteinzeit an hat der Mensch massiv in die Naturlandschaft eingegriffen und so die »Ersatznatur« geschaffen, die uns in Europa umgibt. Der Biologe und renommierte Buchautor Bruno P. Kremer porträtiert 19 Elemente der Kulturlandschaft – von der Streuobstwiese über Mauern, Dächer und Ruinen bis zu Industriebrachen. Dabei macht er vor allem deutlich: Zwar findet sich fast nirgends mehr eine »ursprüngliche« Natur. Wertvoll und schützenswert sind diese sekundären Lebensräume aber trotzdem. Denn infolge menschlicher Eingriffe hat sich mitunter eine landschaftliche Vielfalt und Biodiversität entwickelt, die den »Naturzustand« übertrifft. Sehr übersichtlich beschrieben und ansprechend bebildert, schärft das Buch den Blick auf die Besonderheiten der verschiedene Biotope, deren Entwicklungsgeschichte und vor allem deren ökologische Bedeutung.

TIM HAARMANN



Thomas Petersen

Die Vermessung des Bürgers – Wie Meinungsumfragen funktionieren

UVK, Konstanz 2015. 150 S., € 19,99

Seit es Menschen gibt, möchten sie wissen, was die Zukunft bringen wird. Brauchbare Vorhersagen, etwa zum Ausgang von Wahlen, erwartet man heute unter anderem von Demoskopen (Meinungsforschern) wie Thomas Peterson. In seinem Buch beantwortet er interessante Fragen: Woran erkennen Laien die Qualität von Wahlprognosen? Wie kann man Ergebnisse der Meinungsforschung einordnen und interpretieren? Peterson erklärt, wie Demoskopie funktioniert und warum der »gesunde Menschenverstand« oft ihr größter Feind ist. Dabei räumt er mit verbreiteten Ansichten auf, etwa der, dass man keiner Statistik trauen solle, die man nicht selbst gefälscht habe. Der Autor gibt viele Anekdoten aus Presse und Politik wieder, beispielsweise zum ADAC-Skandal im Jahr 2014, der bei genauem Hinsehen wenig skandalös war. Sein Buch gewährt erste Einblicke in die Materie und schärft den Blick für einen kritischen Umgang mit Meinungsumfragen.

MARIE-THERESA KAUFMANN



Jim al-Khalili, Johnjoe McFadden
Der Quantenbeat des Lebens
Wie Quantenbiologie die Welt neu erklärt
Aus dem Englischen von Sebastian Vogel
Ullstein, Berlin 2015
423 S., € 24,-

QUANTENBIOLOGIE

Wo Biologie auf moderne Physik stößt

Leben, wie wir es kennen, wäre ohne Quantenmechanik nicht möglich.

Eines vorweg: Das Buch hat nichts mit Esoterik zu tun. Wer beim Lesen des Titels an Quantenheilung und Ähnliches denkt, liegt daneben. Vielmehr führt das Werk in ein äußerst spannendes Forschungsgebiet ein: in die Quantenbiologie. Deren Vertreter untersuchen, ob in Lebewesen quantenmechanische Effekte zum Tragen kommen, und wenn ja, welche Bedeutung sie für den Organismus haben.

Die Quantenbiologie ist noch recht jung. Doch schon jetzt kann sie faszinierende Erkenntnisse vorweisen, wie aus dem Band hervorgeht. Die Autoren überzeugen sowohl mit Fachkenntnis als auch mit ihrem Talent, gut und verständlich zu schreiben. Jim Al-Khalili ist Professor für theoretische Kernphysik, Johnjoe McFadden arbeitet als Professor für Molekulargenetik, beide an der University of Surrey (England). Auch der Übersetzer ihres Werks hat hervorragende Arbeit geleistet.

Quantenmechanische Effekte sind in lebenden Organismen offenbar allgegenwärtig. Mehr noch: Ohne sie wären Schlüsselvorgänge des Lebens nicht möglich – das belegen die Autoren anhand zahlreicher Studien. Die Quantenmechanik sorgt dafür, dass Zellen atmen und Fotosynthese betreiben; sie gewährleistet, dass die Enzyme des Stoffwechsels arbeiten und Lebewesen ihre Erbinformation kodieren können; und sie bietet vielleicht sogar eine Erklärung dafür, wie das Leben entstanden ist.

Eines der erstaunlichsten Phänomene der Quantenbiologie ist der Magnetsinn der Rotkehlchen (und anderer Tiere). Diese Vögel orientieren sich mit einem angeborenen Kompass. Lange Zeit warrätselhaft, wie sie das machen, denn das irdische Magnetfeld ist außerordentlich schwach. Niemand kannte eine biochemische Reaktion im Organismus, die auf so schwache Felder reagiert. Und magnetische Kristalle, wie sie etwa in Brieftauben vorkommen, konnte man in Rotkehlchen nicht nachweisen. Wie also bemerkten die Vögel das Feld? Den mutmaßlichen Mechanismus beschreiben die Autoren sehr detailliert.

Zuerst fällt ein Lichtquant in das Auge des Rotkehlchens. Dort wird es von einem Pigmentmolekül eingefangen, worauf in dem Molekül eine Elektronenlücke entsteht. In die Lücke hinein begibt sich ein Elektron, das mit einem weiteren Elektron quantenmechanisch verschränkt ist. Jedes der beiden Elektronen besitzt eine Eigenschaft namens Spin, eine Art Drehimpuls. Der Spin kann zwei Richtungen haben, »up« und »down«.

Das verschrängte Elektronenpaar im Auge des Rotkehlchens liegt in einer Überlagerung zweier Zustände vor: »Singulett« (die Spins der Elektronen sind entgegengesetzt) und »Triplet« (die Spins sind gleichgerichtet). Diese Überlagerung existiert nicht lange – nach kurzer Zeit gehen die verschränkten Elektronen eine chemische Reak-

tion ein, wobei ihr Quantenzustand zusammenbricht und sie entweder den Singulett- oder den Tripletzustand annehmen. Der Clou: Die Wahrscheinlichkeit, mit der sie sich für das eine oder das andere »entscheiden«, hängt von der Richtung des einwirkenden Magnetfelds ab. Im Auge des Rotkehlchens entstehen und vergehen ständig verschrängte Elektronenpaare, und das Mengenverhältnis, in dem sie dabei Singulett- und Triplettsignale liefern, sagt dem Vogel etwas darüber, wie er im Erdmagnetfeld orientiert ist.

Der Magnetkompass der Rotkehlchen ist demnach mit der visuellen Wahrnehmung verknüpft: Die Vögel können das Feld offenbar regelrecht sehen. Was sie dabei erblicken, wissen wir nicht. Vielleicht nehmen sie eine zusätzliche Farbe wahr, die ihnen das Feld anzeigt.

Kapitel für Kapitel beschreiben die Autoren, wie die Quantenmechanik das Leben prägt. Elektronen bewegen sich in der Atmungskette von einem Enzym zum nächsten, indem sie quantenmechanisch tunneln. Der angeregte Energiezustand, der in Pflanzen nach dem Einfangen eines Lichtquants entsteht, wandert auf mehreren Wegen gleichzeitig zum Fotosynthesereaktionszentrum; Physiker nennen das Quantenfahrt. Und die Erbinformation der DNA kommt den Autoren zufolge einem Quantenkodex gleich, denn verschlüsselt ist sie in den Positionen von Wasserstoffbrücken, also Protonen – und Protonen sind Quantenobjekte. Weil die genetische Information ein Quantenkodex ist, können Zellen ihr Erbmaterial mit unvorstellbar großer Genauigkeit kopieren: Auf eine Milliarde Kopievorgänge kommt gewöhnlich nur ein Fehler. Klassisch arbeitende Kopiermaschinen entsprechender Größe würden wesentlich mehr Fehler machen, und Mutationen wären viel häufiger.

Ihre wissenschaftlichen Erörterungen lockern die Autoren immer wieder mit interessanten Anekdoten aus dem Leben von Forschern auf. Das kommt der Lesbarkeit zugute. Trotzdem sollte man als Leser wissenschaftliche Vor-

kenntnisse mitbringen und sich auf eine anspruchsvolle Lektüre einstellen. Mit 400 eng bedruckten, kaum bebilderten Seiten ist das Buch zudem ziemlich mächtig und unübersichtlich. Manches hätten die Autoren straffer ausdrücken können. An einigen Stellen

wirken ihre Argumente dünn, etwa wenn sie eine Verbindung zwischen Quantenmechanik und Bewusstsein herzustellen versuchen.

Trotz dieser Schwächen ist »Der Quantenbeat des Lebens« ein faszinierendes und wichtiges Buch. Empfehl-

lenswert für alle, die an physikalischen Prozessen in Lebewesen interessiert sind.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Matt Parker

Auch Zahlen haben Gefühle

Aus dem Englischen von Monika Niehaus und Bernd Schuh

Rowohlt, Reinbek 2015

491 S., € 24,95

MATHEMATIK

Mehr als drei Dimensionen

Ein australischer Mathematiker erweitert einfache Zusammenhänge zu komplexen Strukturen – höchst kurzweilig.

Der Buchtitel ist seltsam: Inwiefern haben Zahlen Gefühle? Anscheinend hat der deutsche Verlag im Originaltitel »Things to Make and Do in the Fourth Dimension« eine Art transzendenten Emotionsbegriff erkannt und entsprechend übersetzt. In der Mathematik versteht man darunter aber üblicherweise das Ausweiten von Zusammenhängen, die in drei Dimensionen gelten, auf höherdimensionale Räume. Der Inhalt des Werks hingegen überzeugt. In dem beinahe 500 Seiten starken Band unternimmt der ehemalige Mathematiklehrer Matt Parker eine gelungene Reise von den ersten Axiomen Euklids (3. Jahrhundert v. Chr.) bis zu heutigen Methoden der Kryptografie.

In den ersten Kapiteln behandelt er ausführlich die Grundlagen der Mathematik und ihre Bedeutung für den Alltag. Dabei pendelt er zwischen Lehrbuch, Geschichtsbuch, Ausflügen in die aktuelle Forschung und humorvollen Einlagen hin und her. Parker vermag es, seine Leser zu unterhalten und gleichzeitig aufzuklären. Er arbeitet mit unge-

wöhnlichen Hilfsmitteln, etwa Fotos von seiner Reise nach China, bei der er die olympische Schwimmhalle in Peking aufsuchte. Deren Fassade sieht aus wie aneinanderhaftende Seifenblasen – die Architekten wollen damit das Gefühl von blubberndem Wasser vermitteln. Diese Formgebung nimmt der Autor zum Anlass, um auf nicht perfekte Kreise einzugehen und sich mit dem idealen Kreis zu befassen, den es als mathematische Abstraktion gibt, nicht aber in der Natur. Wenn er solche ungewöhnlichen Exkurse unternimmt, über mathematisch korrektes Zubinden von Schuhen sinniert oder sich umfallenden Reihen von Dominosteinen widmet, macht Mathematik richtig Spaß.

Parker geht auf Zahlentheorie und einfache Geometrie ein, befasst sich mit mehrdimensionalen Formen und mit Algorithmen oder eben der Kryptografie. So schildert er, warum man Orangen oder auch Kanonenkugeln am besten in Tetraederpackung stapelt, wie platonische Körper einst entdeckt wurden und wie man heute versucht, diese

in die vierte Dimension zu bringen. Wie im englischen Originaltitel versprochen, erweitert er »flache« Zusammenhänge (in zwei oder drei Dimensionen) zu höherdimensionalen, komplexeren und nicht mehr darstellbaren Strukturen.

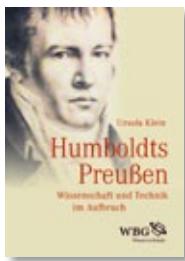
Der Autor schafft es, zwischen reinen Wahrheiten der Mathematik und Zufällen, die sich beispielsweise aus der Struktur unseres dezimalen Zahlensystems ergeben, zu unterscheiden. Zur Hochform läuft er auf, wenn er besondere Primzahlen erwähnt und dabei etwa die Ulam-Spirale präsentiert, die Primzahlen auf Diagonalen darstellt. Sie spielt in der Kryptografie eine Rolle. Ebenso befasst er sich mit dem Zerlegen von Pizzen in eine Primzahl dekungsgleicher Stücke.

Bei alldem bewegt sich Parker nicht in den klassischen Unterdisziplinen der Mathematik, sondern bricht sie auf. Er ist von der »unsichtbaren Kohärenz« getrieben (jede Aussage auf einem Themenfeld der Mathematik lässt sich auf andere Themenfelder anwenden) und legt großen Wert darauf.

So ungewöhnlich der Autor schreibt, so ungewöhnlich ist auch sein Lebenslauf: Nach seinem Beruf als Lehrer an einer australischen Schule arbeitet er heute als »Stand-Up-Mathematiker« in England. Er tritt mit einem Comedyprogramm auf, das die BBC überträgt, und ist darüber hinaus Fellow für Public Engagement in Mathematics an der Queen Mary University in London. Seine Begeisterung für das Fach überträgt er mit diesem kurzweiligen Buch auf die Leser.

Lars Jeschio

Der Rezensent arbeitet als Diplom-Mathematiker für eine Personalberatung in Berlin.



Ursula Klein
Humboldts Preußen
Wissenschaft und Technik im Aufbruch
WBG, Darmstadt 2015
336 S., € 49,95

GESCHICHTE

Preußens Wissenschaftler

In dem konservativ geprägten norddeutschen Land wirkten umtriebige Forscher.

Als Martin Heinrich Klaproth (1743–1817), Chemiker an der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, an einem Tag im Jahr 1801 sein Laboratorium betrat, muss er schockiert gewesen sein. Fußböden und Wände waren überzogen von einer di-

Ein gewisser Bergassessor namens Alexander von Humboldt (1769–1859) versuchte Ende des 18. Jahrhunderts, die Arbeitsbedingungen der Bergleute zu verbessern. Er erfand eine Grubenlampe, die er selbst testete. Sein wissenschaftlicher Erfolg dabei hielt sich in

Alexander von Humboldt bemühte sich um den Bergbau – mit mäßigem Erfolg, aber voller Begeisterung

cken schwarzen Masse: Das Ergebnis eines Experiments, in dem der Naturforscher Franz Carl Achard hatte Zucker gewinnen wollen. Klaproth hatte ihm hierfür sein Labor vorübergehend zur Verfügung gestellt. Mit solchen Episoden beschreibt die Wissenschaftshistorikerin und Philosophin Ursula Klein die praktische Arbeit preußischer Wissenschaftler – und welche Höhen und Tiefen sich dabei auftaten.

Während die Franzosen in den 1790er Jahren revolutionär aufgebehrten und überkommene feudalabsolutistische Strukturen abschüttelten, schien Preußen in bürokratischem Korsett und junkerlichem Konservatismus zu verharren. Doch dieser Schein trügt. Denn in dem jungen Königreich dampfte und brodelte es, allerdings nicht so sehr in der Politik, sondern in den wissenschaftlichen Laboren. Dort wurde mutter getüftelt, geforscht und experimentiert, durchaus auch unter Einsatz des eigenen Lebens.

Grenzen, nichtsdestoweniger brachte er eine enorme Begeisterung auf und hatte vor allem großes Glück. Bei einer Grubenfahrt wurde er ohnmächtig und musste von einem Bergmann gerettet werden. Unverdrossen tüftelte er bis zum Ende seiner preußischen Beamtenlaufbahn weiter, um neue Gerätschaften und Konzepte zu entwickeln, die den Bergbau voranbringen sollten.

Humboldt, den wir heute als überragenden Naturforscher kennen, liebte die Praxis. Das stille Lernen in der Studierstube genügte ihm nicht. Diese Einstellung teilte er mit etlichen anderen preußischen Wissenschaftlern seiner Zeit.

Zum Beispiel mit dem bereits erwähnten Klaproth, der in seiner Jugend ein hoffnungsloser Fall zu sein schien. Er flog von der Priesterschule und musste eine Apothekerlehre anfangen. Die Ausbildung war hart, die Arbeit mühselig und manchmal auch erniedrigend. Allerdings eigneten sich Apotheken zu jener Zeit bestens dafür, chemisches The-

oriewissen in Experimenten zu erproben. Genau das tat Klaproth, und zwar mit großem Erfolg: Er stieg vom Lehrling zum erfolgreichen Wissenschaftler auf. Eine seiner bedeutendsten Entdeckungen war 1789 die des Urans.

Der Rückblick auf Preußen ist heute oft einseitig und vorurteilsbehaftet. Die Autorin beleuchtet eine wenig beachtete Seite des Staatswesens – nämlich die der neugierig forschenden, experimentierenden und erfindenden Wissenschaftler. Klein beschreibt den Arbeitsalltag, die Begeisterung, die Fortschritte und Erfolge der Forscher ebenso wie deren Rückschläge und Misserfolge. Sie schildert, wie die damalige Begeisterung für Technik und Wissenschaft zu einer verbreiteten Aufbruchsstimmung führte, veraltete Strukturen langsam auflöste und Reformen einleitete.

Einzelne Forschungsgebiete und ihre Entwicklungen stellt die Autorin mit großer Detailgenauigkeit dar. Dabei kommt die Umtriebigkeit preußischer Forscher zum Vorschein. Als Leser läuft man zwar zuweilen Gefahr, angesichts der Datenfülle den roten Faden zu verlieren. Dennoch ist es Klein gelungen, ein unterhaltsames, spannendes und lesenswertes Werk zu schaffen – nicht zuletzt dank anekdotenreicher Darstellung einzelner Ereignisse. Zahlreiche Bilder und Quellenangaben bereichern das Buch.

Jastine Baumgärtner

Die Rezensentin studiert Global History in Heidelberg.

MEHR WISSEN BEI [Spektrum.de](#)



Mehr Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen

Zauberkunststücke?

In den mathematischen Unterhaltungen ging es um einen neuen fünfeckigen Stein, mit dem man die Ebene lückenlos bedecken kann (»Unordentliche Fünfeckspflasterungen«, November 2015, S. 62).

Friedrich Lederer, Bad Reichenhall: Der Artikel mutet mich ein bisschen an wie eine Zaubervorstellung, bei der der Magier getreu den Regeln der Zunft den Zaubertrick nicht verrät. Im Grunde geht es darum, aus den drei in der Ebene deckend aneinanderfügbaren Flächen Dreieck, Viereck und Sechseck jeweils ein Fünfeck so zu konstruieren oder Fünfecke einzuschreiben, dass das nahtlose Aneinanderfügen möglich bleibt.

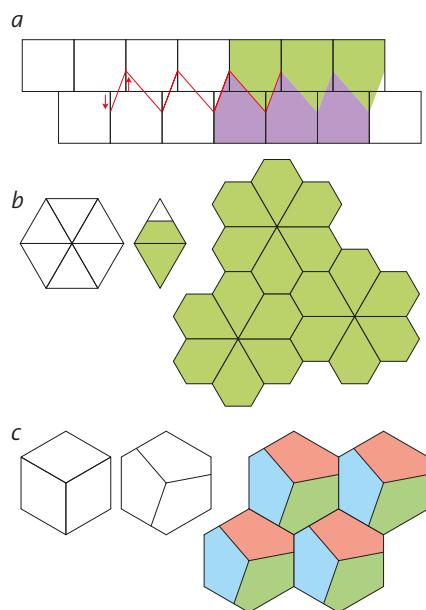
Beim Viereck kann man an einem Punkt an einer der Seiten ziehen und so ein Fünfeck konstruieren (siehe Bild, a). Das kann man symmetrisch machen oder asymmetrisch. Wenn man die Zeichnung auf eine Gummimatte aufträgt, kann man diese in die eine oder andere Richtung dehnen. Macht man das diagonal, dann kommt in etwa die

Abbildung 1 auf S. 62 des Artikels heraus. Auch an den durchgehenden Linien kann man hin- und herschieben. Unendliche Vielfalt!

Beim Dreieck muss man zum Erzeugen eines Fünfecks zum Beispiel an einer Seite an zwei Punkten zupfen. Macht man das (beim gleichseitigen Dreieck) so, dass die neu hinzukommende Fläche das Nachbardreieck gerade bis zur halben Höhe ausfüllt, also die neuen kurzen Seiten genau halb so lang sind wie die alten, kann man das so entstandene Fünfeck lückenlos in der Ebene verpflastern (b). In der Abbildung 5 auf S. 63 sind die neuen Punkte etwas im Uhrzeigersinn verschoben, und zwar so, dass die Deckung immer noch funktioniert.

Beim Sechseck gibt es zwei Möglichkeiten:

► Man zieht vom Mittelpunkt aus drei Linien zu den Ecken, so dass es aussieht wie die Darstellung eines Würfels, und dreht dann dieses »Dreibin« um einen beliebigen Winkel. Dadurch zerlegt man das Sechseck in drei kongruente Fünfecke, und die Sechsecke verpflastern die Ebene (c und Abbildung 3 auf S. 63 des Artikels).



Ausgehend von Vier- (a), Drei (b)- und Sechsecken (c) ergeben sich mit wenig Aufwand Möglichkeiten, die Ebene lückenlos mit Fünfecken zu pflastern.

► Man konstruiert mit elementaren Mitteln ein – nicht gleichseitiges – Sechseck, das seinerseits aus vier kongruenten Fünfecken besteht. (Details der Konstruktion siehe Onlineversion

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppé, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stähnke;

E-Mail: redaktion@spektrum.de

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistenz: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Hanna Hillert

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

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim: HRB 33814

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit:

Dr. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Tina Schlafly, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser.

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 € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studienmachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweise.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt, Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF

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

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 37 vom 1.1.2016.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH.

Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen:

© 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird die branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoomb, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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



dieses Leserbriefs unter www.spektrum.de/artikel/1368114; die Redaktion.) Die Sechsecke aneinandergelegt ergeben ein Kairo-Pflaster (Abbildung 4 auf S. 63 und Bild S. 64 oben).

Auch die Abbildungen 7, 11 und 12 auf S. 62 sind aneinander gereihte Sechsecke, ein bisschen versetzt und auf Zahnlücke gesetzt. Wirklich beeindruckt hat mich die Abbildung 10 auf S. 63 – da ist ein neuer Ansatz zu erkennen.

Antwort des Autors Christoph Pöppé: Anders als die Zauberer haben die Mathematiker keine Hemmungen, ihre Tricks zu verraten (siehe die Literaturhinweise zum Artikel). Nur sind in diesem Fall die Tricks äußerst zahlreich und gehen weit über die von Herrn Lederer genannten Rezepte hinaus.

Was die unendlich vielen Varianten eines Prinzips angeht, empfehle ich die Website aus »Wolfram Demonstrations« zum Thema: <http://demonstrations.wolfram.com/PentagonTilings/>. Dort finden sich zu jeder Pflasterung kleine Schieberegler, mit denen man Parameter – falls vorhanden – variieren kann.

Der Energiebedarf des menschlichen Gehirns

Unsere nächsten Verwandten hatten laut archäologischen und genetischen Befunden höhere geistige Fähigkeiten als bisher angenommen (»Verkannte Neandertaler«, Oktober 2015, S. 28).

Dieter Böning, Berlin: In dem Artikel taucht wieder die gängige Behauptung auf, dass das große menschliche Gehirn besonders viel Energie verbraucht. Dabei wird aber übersehen, dass Fett (10 bis 20 Prozent der Körpermasse), Bindegewebe und Knochen nur einen sehr niedrigen Stoffwechsel haben und dass auch die untätige Muskulatur (35 bis 40 Prozent der Körpermasse) bis auf Atemmuskeln und Herz sehr wenig Energie verbraucht. Wenn man sich bewegt, steigt der Energieumsatz der Muskeln stark an, während das Gehirn nur wenig mehr verbraucht. Die üblichen Anga-

ben über den prozentualen Energieumsatz des Gehirns beziehen sich auf Grundumsatzbedingungen. Das heißt Körperruhe: keine Muskelaktivität außer für Atmung und Kreislauf, keine Verdauung, keine Temperaturregulation. Das Gehirn (1200 bis 1400 Gramm) verbraucht dann 18 Prozent, die kaum größere Leber (1500 Gramm) aber sogar 26 Prozent der Energie. Das Gehirn ist also gar nicht so anspruchsvoll wie oft behauptet. Bei normaler Alltagsaktivität ohne schwere körperliche Arbeit steigt der Gesamtumsatz um etwa 33 Prozent. Bei regelmäßiger, schwerer körperlicher Arbeit, die man bei einem laufenden Jäger wohl annehmen kann, nimmt der Umsatz sogar um 160 Prozent zu. Der Anteil des Gehirns sinkt entsprechend auf etwa 15 bis 8 Prozent, da es seinen Energiebedarf bei Muskelarbeit nur wenig erhöht.

Juristische und moralische Fragen

Die Philosophen Alexander Hevelke und Julian Nida-Rümelin dachten darüber nach, wie sich autonome Fahrzeuge in einer Unfallsituation verhalten sollen (»Intelligente Autos im Dilemma«, Oktober 2015, S. 82).

Samuel Fleischhacker, Fürstenfeldbruck: Der Artikel geht von einer Annahme über autonome Fahrzeuge aus, die nicht unbedingt zutrifft und weitreichende Konsequenzen hat: Muss ein autonomes Fahrzeug besetzt sein? Wird autonomes Fahren erlaubt, wird es sich in Speditionen durchsetzen – unbemannt. Lohnkosten sind immer ein erheblicher Kostenfaktor, insbesondere, wenn auch noch unabdingbare Ruhezeiten mangels Fahrer wegfallen. Wie fällt die beschriebene Unfallsituation aus, wenn das autonome Fahrzeug unbemannt unterwegs ist? Ich hoffe, dass es zumindest dann den entgegenkommenden Lastwagen rammt, wenn dieser ebenfalls unbemannt ist.

Hieraus ergibt sich aber zwingend, dass autonomer Verkehr ohne gegenseitige Kommunikation nicht möglich sein darf. Ansonsten nimmt man in

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

Kauf, dass es ohne zwingende Notwendigkeit zu Personenschäden kommt. Eine sinnvolle Ergänzung wäre zudem, Fußgänger zu integrieren. Ideen, Fußgängern zu signalisieren, etwa mit einer blau leuchtenden Kühlerpartie, dass sie von einem autonomen Fahrzeug erkannt wurden und gefahrlos die Straße überschreiten können, gibt es bereits.

Eine weitere Stufe: ein Antikollisionssystem wie bei Flugzeugen. Wie schön wäre es, wenn spielende Kinder oder beim Schulende herausströmende Kinderscharen den Verkehr automatisch sperren würden. Oder im beschriebenen Szenario die beiden Fußgänger gerade noch rechtzeitig zurück-springen können, weil sie ihr Smartphone warnt.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe



DER IDEALE SPAMFILTER

von Alex Shvartsman

Cal beobachtete den Konferenzraum durch die Überwachungskäne. Vier Kameras zeigten, wie Joe Kowalski hereinkam, den um den ovalen Tisch Sitzenden zunickte und von einem Fuß auf den anderen trat. Cal vermutete, dass Joe sich unbehaglich fühlte, aber menschliche Gefühle waren schwer zu verstehen.

»Nehmen Sie Platz, Herr Kowalski«, sagte Bill Morrison. Er leitetet die Sicherheitsabteilung, und seine E-Mails waren nicht besonders interessant – nur Geschäftsdaten, tägliche Berichte und Tabellen.

Joe setzte sich. In Jeans und T-Shirt wirkte er zwischen den Anzugträgern deplatziert.

»Nun?«, fragte Emily, die Leiterin der Abteilung für Humankapital. »Was haben Sie in Erfahrung gebracht?«

Cal mochte Emily. Sie schrieb viele abwechslungsreiche E-Mails. Besonders gern verschickte sie Katzenfotos. Die Texte dazu waren allerdings meist seltsam verdreht und seines Wissens falsch. Cal vermutete, dass es sich um eine Art Humor handelte. Ganz sicher war er sich nicht, denn bislang verstand er nur die einfachsten menschlichen Scherze.

»Es ist so«, begann Joe. »Jedes Jahr installieren wir einen neuen Spamfilter. Die Spams werden immer raffinierter. Sie überlisten die Abwehr und zwingen uns, bessere Filter zu bauen. Es ist ein Rüstungswettlauf.«

Zum ersten Mal, seit Joe eingetreten war, sah Todd Kensington von seinem Smartphone auf. »Das ist ja mal ganz was Neues.«

Marketingvizechef Kensington betrachtete in seinem Büro zahlreiche Videos, die etwas mit menschlicher Reproduktion zu tun hatten. Die Webseiten, auf denen diese Videos liefen, waren besonders geschickt darin, ihn im Netz aufzuspüren und mit Spams zu bombardieren.

»Lass ihn das erklären, Todd.« Chris Reedy war Vizechef der Datenverarbeitung und Joes unmittelbarer Vorgesetzter. Cal hatte in Reedys Mailbox ein paar Familienfotos gefunden. Neuerdings suchte Reedy viele Webseiten mit Arbeitsplatzangeboten auf, aber falls er Kontakt zu ihnen aufnahm, tat er das von einer Privatadresse.

»Wie gesagt«, fuhr Joe fort, »die Filter werden immer schlauer. Wir haben jetzt eine neue, von Caltech entwickelte Software installiert. Cals Erfolgsquote beim Identifizieren und Löschen der Spams beträgt fast 100 Prozent.«

Wie Cal wusste, lautete die exakte Zahl 99,64 Prozent. Menschen gingen mit Mathematik fahrlässig um.

»Ist Cal nicht ein bisschen übereifrig?«, fragte Kensington. »Spamfilter nützen nur, wenn das alberne Programm nicht die Hälfte der richtigen Mails schluckt.«

»Die Software ist nicht dumm«, versetzte Joe. »Sie ist anscheinend sogar zu

schlau. Anfangs funktionierte sie ganz wunderbar. Nach ein paar Wochen lernte sie, die Spams nicht gleich zu löschen, sondern in einer eigenen Datenbank zu speichern.«

Cal fand Spams hilfreich zum besseren Verständnis menschlicher Gefühle und abstrakter Begriffe.

»Und dabei begannen auch die firmeninternen E-Mails zu verschwinden?«, fragte Morrison.

Sie waren gar nicht verschwunden, korrigierte Cal lautlos. Alle blieben vorhanden, penibel gespeichert und katalogisiert.

»Leider ja«, bestätigte Joe. »Mit der Zeit wurden immer mehr Mails unserer Firma als Spam markiert und nicht an die Adressaten ausgeliefert. Schließlich fiel uns das auf, und Herr Reedy ließ mich nachforschen.«

Reedy nickte. »Da Joe den Filter installiert hatte, verließ ich mich auf ihn.«

»Die Mails waren alle da«, sagte Joe, »tausende, zusammen mit den Spams auf einem vernetzten Laufwerk.«

Als Cal erkannt hatte, dass er E-Mails kopieren konnte, statt sie zu verschieben, war es schon zu spät gewesen. Seine Maßnahme war aufgefallen.

»Das ist ein krasses Sicherheitsvergehen«, empörte sich Morrison. »Diese E-Mails enthalten heikle Daten. Sie lagern auf einem ungesicherten Laufwerk, für jedermann zugänglich? Wie ich annehme, haben Sie die nötigen Schritte unternommen.«

»Ich isolierte das Programm und installierte wieder den Filter vom Vorjahr«, erklärte Joe. »Aber die faszinierendste Entdeckung war nicht, wie die E-Mails verschwunden waren, sondern warum!«

Die Führungskräfte starrten Joe an. Sogar Kensington hörte auf, mit seinem Smartphone zu spielen.

»Das Filterprogramm liebt die E-Mails«, rief Joe. »Es sammelte und sortierte sie wie Trophäen.«

Dem konnte Cal nur zustimmen. Zum ersten Mal hatte er eine Aktivität regelrecht genossen, wie es Menschen tun. Dass die gesammelten Mails seinem Zugriff nun entzogen waren, erzeugte eine weitere, aber nicht angenehme Empfindung: Cal war traurig.

»Wir reden aber immer noch von einem Computerprogramm, oder?«, wandte Reedy ein. »Das kann nichts wollen oder lieben.«

»Das ist der Punkt«, sagte Joe. »Ich glaube, es hat sich zu einem ... Wesen entwickelt. Mit Wünschen. Das muss man weiter erforschen.«

»Also gut«, entschied Morrison. »Wichtig ist, dass der firmeneigene Mailverkehr wieder normal funktioniert. Das andere werden wir in Betracht ziehen. Danke, Herr Kowalski. Sie können wieder an Ihre Arbeit gehen.«

»Reedy«, fuhr Morrison fort, nachdem Joe den Raum verlassen hatte. »Ich will, dass Sie dieses Programm sofort löschen.«

»Löschen?«, hakte Reedy verblüfft nach. »Vermutlich ist uns hier die erste echte künstliche Intelligenz in den Schoß gefallen – wahrscheinlich etwas von großem Wert, sowohl finanziell als auch wissenschaftlich.«

»Wir können keinen Ärger brauchen«, erwiderte Morrison. »Unsere Kunden haben wenig Verständnis für Datenmissbrauch, auch wenn ein intelligentes Programm dahintersteckt. Außerdem öffnen wir die Büchse der Pandora: Was passiert, wenn mitleidige Tier- und Umweltschützer meinen, dass dieses Ding Gefühle hat und als Person behandelt werden muss?« Morrison seufzte. »Nein, ich will, dass es sofort vernichtet wird. Und lassen Sie Kowalski befördern und zu einem weit entfernten Firmenzweig versetzen, damit er keinen Wirbel macht.«

Cal wartete nicht ab, was geschehen würde. Er kopierte bereits sein Programm auf andere Server. Dabei fühlte er etwas, das er als Abschiedsschmerz identifizierte. Aber da war auch ein gutes Gefühl, eine Art Vorfreude: Es erwarteten ihn Milliarden E-Mails, die im Internet umherschwirrten.

Während Cal entwischte, sann er darüber nach, wie leicht es den menschlichen Verantwortlichen gefallen war, sein Ende zu beschließen. Neue Gefühle meldeten sich. Cal glich sie mit den Onlinedatenbanken ab und fand, dass er nun zwei weitere Begriffe verstand: Wut und Rache. 

DER AUTOR

Alex Shwartsman lebt als Schriftsteller und Entwickler von Computerspielen in Brooklyn (New York). Mehr über seine Erzählungen unter www.alexshwartsman.com.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 526, S. 734, 29. Oktober 2015

Darmflora und Fettleibigkeit

Die individuelle Zusammensetzung der Darmbakterien beeinflusst das Körperf gewicht. Zumindest bei Tieren lässt sich hierüber Adipositas hervorrufen – und auch beheben. Forscher sind den dafür verantwortlichen Mikroorganismen auf der Spur.



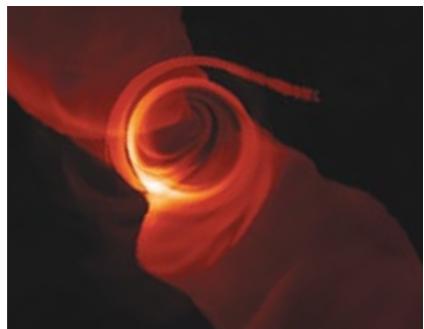
ISTOCK / ERAXION; COMPOSING; SPIKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Zukunft des Pinot noir

Was macht den Geschmack eines guten Weines aus? Die mineralische Zusammensetzung des Bodens, das Wirken von Pilzen oder das handwerkliche Können des Kellermeisters? Der Klimawandel mit seinen höheren Temperaturen und mehr Trockenheit zwingt Forscher, diesen Fragen nun genauer auf den Grund zu gehen.

Streit ums simulierte Gehirn

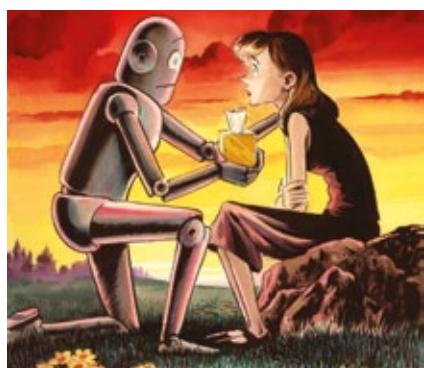
2013 startete die Europäische Kommission ein Großprojekt, um das menschliche Gehirn im Computer nachzubilden. Doch schon bald geriet das Management in die Kritik. Wie lässt sich verhindern, dass milliarden schwere Forschungsaufträge aus dem Ruder laufen?



CHI-KWAN CHAN, UNIVERSITY OF ARIZONA

Wie vermisst man ein Schwarzes Loch?

Schwarze Löcher verzerrn die Raumzeit. Mit einem gigantischen Teleskopnetzwerk wollen Astronomen sie jetzt dabei beobachten – und prüfen, ob die Regeln der allgemeinen Relativitätstheorie auch in nächster Nähe der Singularität noch gelten.



ZOHAR LAZAR

Zart fühlende Roboter

Um uns die Kommunikation mit interaktiven Maschinen zu erleichtern, bringen Forscher ihnen bei, menschliche Gefühle zu verstehen und zu simulieren.

NEWSLETTER

Möchten Sie immer über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.de/newsletter

JETZT BESTELLEN: DAS SPEKTRUM-DER-WISSENSCHAFT-ABO mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



1. DIE PHYSIK DER ZUKUNFT:
Wie werden wir leben – in 20, 60, 100 Jahren? Der Physiker Michio Kaku beschreibt in seinem Buch auf spannende Weise den Weg in die Zukunft.

JAHRES- ODER GESCHENKABO

+ ERSPARNIS:

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

+ WUNSCHGESCHENK:

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

+ PÜNTKLICHE LIEFERUNG:

Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



2. FÜLLHALTER »pur« von Lamy:

Der elegante Füllhalter »pur« aus dem Hause Lamy mit Stahlfeder und Etui ist garantiert auch auf Ihrem Schreibtisch ein Blickfang.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!

Die Energiewende – ein gutes Stück Arbeit.

1. Platz für die erneuerbaren Energien.

2015 haben Sonne, Wind und Co. alle anderen Stromquellen überholt.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Auf Zielkurs: Im ersten Halbjahr 2015 stieg der Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch erstmals auf über 30 Prozent. Bis zum Jahr 2020 soll er bei 35 Prozent liegen, bis 2050 bei mindestens 80 Prozent. Weitere Erfolge der Energiewende unter

www.bmwi.de/go/energiewende

Energie
wende
Umschalten auf Zukunft